**交通运输行业标准**

**公路工程施工安全风险评估指南**

**第3部分：隧道工程**

**（征求意见稿）**

**编制说明**

**标准编制组**

**二〇二〇年二月**

目 录

[一、工作简况 3](#_Toc32321801)

[二、标准编制原则及主要内容 7](#_Toc32321802)

[三、预期经济、社会效益 88](#_Toc32321803)

[四、采用国际、国内标准的程度 88](#_Toc32321804)

[五、与现行法律法规和标准的关系 88](#_Toc32321805)

[六、重大分歧意见的处理经过和依据 89](#_Toc32321806)

[七、其它应予说明的事项 89](#_Toc32321807)

# 一、工作简况

**（一）任务来源。**

近年来，我国公路隧道建设发展迅速，隧道工程向深埋、长大等方向发展，隧道工程地质条件、施工条件更加复杂，作业安全风险更加突出。为加强隧道工程施工安全风险预控管理，有效防范施工安全事故发生，有必要在施工阶段推行隧道工程施工安全风险评估工作，增强风险管理意识，优化施工方案，提高施工安全风险辨识和防控能力。

2011年交通运输部出台了《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》，提高了工程项目的风险防控意识，加强了施工安全风险管控工作，风险管控效果明显。但执行过程中，仍存在管理程序不规范、风险评估准确性不高、后期结果应用效果不佳等问题。为此，交通运输部安全与质量监督管理司组织开展《公路工程施工安全风险评估指南》编制工作，共分为《公路工程施工安全风险评估指南 第1部分：总体要求》、《公路工程施工安全风险评估指南 第2部分：桥梁工程》、《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》与《公路工程施工安全风险评估指南 第4部分：高边坡工程》。其中，交通运输部公路科学研究院、北京科技大学、交通运输部科学研究院等单位开展了《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》的研究工作。根据交通运输部《关于下达2018年交通运输标准化计划的通知》（交科技函〔2018〕235号）的要求，本部分由交通运输部公路科学研究院、北京科技大学、交通运输部科学研究院、昆明理工大学等单位共同制定，计划号为JT 2018-16。

**（二）主要工作过程。**

**1. 前期研究阶段**

2018年1月，前期调研工作正式启动，起草组开始全面搜集整理国内外风险评估领域的文献、规范和标准，对现行指南进行分析和对比研究，撰写《隧道施工风险评估方法调研与分析》。

2018年2月，交通运输部安全与质量监督管理司公路处在京主持召开了“隧道施工安全风险评估方法调研与分析”研讨会，会议听取了起草组关于隧道施工安全风险评估方法现状的调研分析报告。

2018年5月，交通运输部公路科学研究院在京主持召开了“公路工程施工风险评估指南编制”研讨会，会议听取了起草组对本次修编工作总体思路与框架、主要修编内容等问题的意见及建议；参会人员结合现行指南实施现状及工程经验，经过讨论，就风险评估思路、评估方法等有关内容达成一致看法。

**2. 起草阶段**

2018年6月，起草组召开了《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》专项评估指标体系研讨会，会议针对初定的专项风险评估6大风险事件评估指标进行研讨，考量指标的科学性问题。

2018年8月，起草组召开了《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》专项评估指标体系研讨会，对专项风险评估指标进行复核和修正，并布置了研究总体风险评估方法的任务。

2018年9月，起草组召开了《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》总体和专项评估方法研讨会，会议确定了总体风险评估和专项风险评估的方法和流程，并着手确定主因素控制指标体系法风险等级分级标准。

2018年10月，起草组召开了《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》专项评估方法视频研讨会，会议修正了施工前专项风险评估指标体系取值及计算方法，并指导了风险评估指南正文编写工作。

2018年12月，起草组召开《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》编写研讨会，会议逐条审核了新编指南条文，对相关内容和结构进行了增减和调整，并布置了下一阶段的指南编写任务。

2019年4月，交通运输部公路科学研究院召开“公路工程施工风险评估指南编制”研讨会，对起草组提交的初版提出修改意见。

2019年4月，起草组召开了《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》正文修订视频研讨会，研讨了交通运输部公路科学研究院会议反馈的修改意见，指出了风险评估指南正文的下一步修改方向。

2019年7月，交通运输部公路科学研究院在京主持召开了《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》专家评审会。起草组汇报了当前版本《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》的主要内容，各评审专家提出了修改意见及建议。

2019年8月，起草组召开了《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》正文修订研讨会，逐条研讨了评审会上各专家反馈的正文修改意见，对总体和专项风险评估指标体系进行了修正和调整，明确了正文中逻辑关系不清楚的内容。

2019年9月，起草组召开了《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》正文修订研讨会，根据专家评审会上各专家反馈的建议，对后果当量法等风险估测方法和专项风险评估指标体系等内容进行了研讨和修改，指出了风险评估指南正文的下一步修改方向，并布置下一阶段任务。

2019年11月，交通运输部公路科学研究院在京组织参编单位进行了内部研讨会，根据专家评审会收集的意见和建议，编制组对指南修改内容进行了详细的介绍，确定了该阶段指南主要结构的合理性，并对部分内容进行了调整和优化。

2020年1月2日，起草组召开了《公路工程施工安全风险评估指南 第3部分：隧道工程》条文说明及正文修订研讨会，会议结合该阶段下的条文说明和正文，审核了风险评估网站的结构和内容，并对网站、正文和条文说明部分的结构和逻辑进行了研讨和修改，使指南的整个体系和工具更加完善和丰富。

**（三）标准起草单位和主要起草人。**

本标准起草单位：交通运输部公路科学研究院、北京科技大学、交通运输部科学研究院、昆明理工大学。

本标准主要起草人：李伟、吴顺川、吴忠广、陈磊、严琼、张宇、刘伟、张成良、杨弘卿、谢洪涛、吕祥锋。上述同志承担的主要工作如下：

表1‑1 主要起草人及承担主要工作表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 起草人 | 起草单位 | 主要工作 |
| 李伟 | 交通运输部公路科学研究院 | 负责标准编写工作的组织协调，制定总体技术路线，总体负责第5章总体风险评估。 |
| 吴顺川 | 北京科技大学 | 负责标准统稿与组织编写，制定标准研究大纲，总体负责第6章专项风险评估。 |
| 吴忠广 | 交通运输部科学研究院 | 负责第4章基本原则、6.6重大风险源风险估测、第8章风险评估报告编制。 |
| 陈 磊 | 交通运输部公路科学研究院 | 负责6.1一般要求、6.2风险辨识、6.3风险分析。 |
| 严 琼 | 北京科技大学 | 负责6.4风险估测、6.5一般风险源风险估测。 |
| 张 宇 | 交通运输部科学研究院 | 负责第1章范围、第2章规范性引用文件、第3章术语和定义。 |
| 刘 伟 | 交通运输部公路科学研究院 | 负责第7章风险控制。 |
| 张成良 | 昆明理工大学 | 协助施工前和施工过程洞口失稳、涌水突泥风险事件指标体系建立。 |
| 杨弘卿 | 交通运输部公路科学研究院 | 协助施工前和施工过程坍塌、大变形风险事件指标体系建立。 |
| 谢洪涛 | 昆明理工大学 | 协助施工前和施工过程瓦斯爆炸、岩爆风险事件指标体系建立。 |
| 吕祥锋 | 北京科技大学 | 协助标准统稿与修改。 |

# 二、标准编制原则及主要内容

**（一）编制原则。**

1. 充分利用现有的科研成果。在《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南（试行）》（以下简称“《现行指南》”）的基础上，2018年1月，起草组成员开展了隧道施工风险评估方法调研与分析研究，包括国内外标准、规范、文献，通过对比分析初步确定了现行指南的修编方向。在修编过程中，起草组成员多次参与“公路工程施工风险评估指南”专家研讨会，广泛听取专家意见，确保主要技术内容更加科学、合理。

2. 根据《现行指南》的试行情况完善技术内容。《现行指南》公布实施已有八年时间，根据《现行指南》的实际应用反馈情况，对技术内容修改完善，突出其实用性与科学性。

3. 简化风险评估管理相关内容。本标准是技术指南，重点是风险评估的内容和方法，因此将《现行指南》中一些不必要的风险评估管理内容进行精简。

4. 优化标准格式。本标准按照《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》（GB/T 1.1-2009）起草编写，考虑到本标准有大量的表格，为了方便标准的阅读和使用，将专项风险评估中的风险事件评估指标体系等表格作为附录。

**（二）主要内容。**

本标准由前言、正文和附录三部分组成。

标准正文包括范围、规范性引用文件、术语和定义、基本原则、总体风险评估、专项风险评估、风险控制、风险评估报告编制8个章节。

附录包括附录A（资料性附录）专项风险评估指标体系、附录B（资料性附录）公路隧道工程施工的典型风险事件类型、附录C（资料性附录）可选用的评估方法、附录D（资料性附录）公路隧道典型重大风险源风险控制建议、附录E（资料性附录）施工安全风险评估报告格式。

其中，附录表A.1~表A.6分别为公路隧道工程施工前洞口失稳、坍塌、涌水突泥、大变形、瓦斯爆炸、岩爆等6类风险事件可能性评估指标体系；附录表A.7~表A.12分别为公路隧道工程施工过程中洞口失稳、坍塌、涌水突泥、大变形、瓦斯爆炸、岩爆等6类风险事件可能性评估指标体系。

附录表B.1为公路隧道工程施工的典型风险事件类型表。

附录C包括风险评估常用的技术方法、层次分析法开展基本步骤、点估计法开展基本步骤、未确知测度法开展基本步骤。

附录表D.1~表D.6分别为隧道洞口失稳、坍塌、涌水突泥、大变形、瓦斯爆炸、岩爆风险事件控制措施建议。

附录E为施工安全风险评估报告格式（资料性附录）。

### **. 范围**

隧道施工属于高危行业，由于其环境复杂、施工条件差、不安全因素动态变化快、安全事故诱因复杂及主体从业人员流动性大等因素，多年来隧道安全事故呈现“易发、频发、多发”等特点[1]。我国各区域地形地质条件复杂多变，长大、深埋、坍塌、大变形等问题日益凸显，隧道施工安全面临严峻挑战，开展隧道工程施工安全风险评估工作，是保障隧道施工安全和工程质量必不可少的条件；低风险的隧道工程，不需或只需采取简单的风险控制措施；高风险的隧道工程，则需采取复杂、有效的风险管控措施将风险降低至可接受的范围内。

本标准规定了隧道工程施工安全风险评估的基本原则，包括评估阶段的划分、评估方法的选择以及评估实施步骤。

评估阶段主要包括总体风险评估和专项风险评估。总体风险评估是项目开工前对隧道工程施工风险的整体性评估，评估结论可为配置工程项目的人员和装备等资源、决定是否开展专项风险评估、初步辨识重大风险源等方面提供决策支持；专项风险评估则是对隧道工程各施工区段洞口失稳、坍塌、涌水突泥、大变形、瓦斯爆炸、岩爆等风险事件的量化评估。对于总体风险评估，应提出操作简便、切实科学的指标体系和评估方法，突出实用性；对于专项风险评估，则应突出科学性与动态性。

公路隧道施工方法主要有钻爆法、TBM法、沉管法等，虽然TBM法、沉管法可应用于复杂岩土条件的隧道施工，但钻爆法仍是公路隧道上应用范围最广的施工方法。因此，本标准主要以钻爆法施工为主编写，适用于以钻爆法为主要开挖手段的新建公路隧道工程，改建和扩建公路隧道工程的施工安全风险评估可参照使用，其他类型隧道后续成熟。此外，本标准总体风险评估中总体风险分级标准、专项风险评估各风险事件类别及可能性分级标准主要通过统计分析相关工程案例确定，超出其范围的隧道工程风险应展开进一步研究。

### **. 规范性引用文件**

规范性引用文件是指本标准中引用的某文件或条款，它们与本标准中的规范性技术要素具有同等效力。在使用本标准时，除了应遵守本标准的规定外，还应满足“规范性引用文件”中引用的文件或其条款要求。通过引用其它有关标准，将相关技术内容纳入本标准中，以保持各个标准技术内容的协调性。

本标准6.2.4中，对于隧道工程施工过程的评估单元划分，引用了交通运输部2017年12月发布的《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1-2017）[2]；在本标准的6.3.1中，分析风险源中物的不安全状态和人的不安全行为时，引用了国家标准局1986年5月发布的《企业职工伤亡事故分类》（GB/T 6441-1986）[3]，在本标准的6.4.6中，确定风险事件严重程度时，参考了国务院2007年6月1日起施行的《生产安全事故报告和调查处理条例》[4]。

### **. 术语和定义**

（1）风险一般指预见或者未预见的潜在事件或后果。风险可分为健康风险和生产风险，健康风险是存在的若干风险中作用于人的身体、影响人的健康的一种风险，一般仅考虑可能性；而生产风险则需要考虑系统中事件发生的概率和后果。隧道工程施工安全风险属于生产风险，专项风险评估是围绕风险事件发生概率和后果严重程度开展的。

（2）风险事件指导致人员伤亡、直接经济损失、社会影响、环境影响或工期延误等不利后果的可能事件，由于未发生，应与事故有所区分。

（3）风险源也称致险因素、致险因子，指可能导致风险事件发生的直接因素，如施工方案、作业活动、施工设备、危险物质、作业环境等。其来源可分为人因和物因，人因包括行为和规制，物因包括自然和技术。施工方案和作业活动可归为人因，而施工设备、危险物质、作业环境则可视为物因。

（4）风险辨识是通过系统分解隧道工程施工过程，找出可能存在的风险源，调查各施工工序风险事件的过程。如将隧道工程按照单位工程—分部工程—分项工程—工序(单位)作业的层次进行分解。

（5）风险分析是在风险辨识基础上，采用安全系统工程方法对风险源可能导致的风险事件进行分析，找出可能受伤害人员、致害物、事故原因等，确定物的不安全状态和人的不安全行为。安全系统工程方法包括风险传递路径法、鱼刺图法、故障树分析法等。

（6）风险估测是采用定性或定量的方法，对风险事件发生的可能性及严重程度进行估算，基于风险矩阵法或其它方法得出风险大小，再根据风险分级标准和接受准则，对工程风险进行等级分析、危害性评定和风险排序过程。

（7）一般风险源是指相对简单，影响因素间关联性较低，运用一般知识与经验即可防范的风险源。

（8）重大风险源是指相对比较复杂，存在较大的不可预见性，引发的风险事件严重性较大，应从工程地质水文地质条件、作业环境、技术方案、施工设备等多角度进行控制和防范的风险源。

（9）施工安全风险评估是针对工程施工过程中各项作业活动、作业环境、施工设备、危险物品等风险进行风险辨识、风险分析、风险估测的系列工作。

（10）总体风险评估是以整个隧道工程为评估对象，根据施工前的风险主控因素、建设规模、地质条件、洞口特征、气候条件和资料完整性等，评估隧道工程施工的整体风险，确定其安全风险等级并提出控制措施建议。评估结论可为配置工程项目的人员和装备等资源、决定是否开展专项风险评估等方面提供决策支持。

（11）总体风险评估结果为较大风险(Ⅱ级)及以上时，需进行专项风险评估。专项风险评估是以施工区段为评估对象，根据隧道工程地质水文地质条件、作业风险特点以及类似工程事故情况，进行风险辨识、分析、估测，针对其中的重大风险源量化评估，划分风险等级，并提出风险控制措施，开展控制效果评估。专项风险评估包括施工前专项风险评估和施工过程专项风险评估。

（12）主因素控制指标体系法是根据影响公路隧道工程施工安全风险的主控因素，建立体现风险特征的主控因素判识表与指标体系评估表，对各主控因素与评估指标进行量化分级，对施工安全总体风险作出评估的一种方法，包括主控因素判识、指标体系评估两个步骤。

（13）对人员伤亡、直接经济损失、环境影响、社会影响及工期延误等五种后果的严重程度进行量化统一的一种方法。该法是以死亡一人作为单位当量，按照相关法规、标准等量化人员伤亡、直接经济损失、环境影响、社会影响及工期延误等五种后果，使其与单位当量的严重程度相当，实现各类型后果量化统一的方法。

（14）风险控制预期效果评估是针对专项风险等级为较大风险(Ⅱ级)及以上的施工区段，检查、确认其风险控制措施的制定情况，并对风险控制措施实施后的预期风险进行评价。

### **. 基本原则**

（1）总体风险评估于项目开工前完成，为完善施工组织设计提供依据。专项风险评估分为施工前专项风险评估和施工过程专项风险评估，施工前专项风险评估在分部分项工程开工前完成，为专项施工方案编制提供依据。在施工过程中，风险源发生重大变化或出现新的重大风险时需进行施工过程专项风险评估。评估类型、时间节点、承担单位见表4‑1。

表4‑1 公路隧道施工安全风险评估时间节点与承担单位

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 评估类型 | | 时间节点 | 承担单位 |
| 总体风险评估 | | 施工图设计完成、项目开工前 | 建设单位组织，可委托第三方完成 |
| 专项风险评估 | 施工前专项风险评估 | 施工组织设计完成后、专项施工方案编制前 | 施工单位或委托第三方完成 |
| 施工过程专项风险评估 | 现场地质、水文条件等发生重大变化，影响施工安全；发生重大设计变更，影响施工安全；施工过程出现灾害预兆或出现事故险情；出现其它新的重大风险源 | 宜委托第三方完成 |

（2）隧道风险评估方法应根据各阶段风险特点选用定性或定量方法。

①总体风险评估宜采用主因素控制指标体系法。

②专项风险评估中一般风险源的风险估测宜采用检查表法或LEC法；专项风险评估中重大风险源的风险估测宜采用定量方法，施工前风险事件可能性宜采用指标体系法，亦可采用点估计法确定；施工过程风险事件可能性推荐采用指标体系法结合重要性排序法、层次分析法、未确知测度法等综合判定，风险事件严重程度宜采用后果当量法，最后基于风险矩阵法确定风险大小。

③必要时宜采用两种以上方法比对验证风险评估结果，当不同评估方法的评估结果出现较大差异时，应分析导致较大差异的原因，确定合理的评估结果。

（3）公路隧道工程施工安全风险评估工作包括以下主要步骤：

①前期准备；

②总体风险评估；

③专项风险评估(施工前专项风险评估、施工过程专项风险评估和风险控制预期效果评估)；

④风险评估报告编制；

⑤风险评估报告评审。

### **. 总体风险评估**

（1）一般要求

①公路隧道工程应开展总体风险评估。主要考虑隧道工程的地质条件、建设规模、洞口特征、年均降水量、资料完整性等因素，静态评估隧道工程的总体风险。评估结论可为配置工程项目的人员和装备等资源、确定是否开展专项风险评估、初步辨识重大风险源等提供依据。

②总体风险评估应尽可能收集原有的地质勘察、施工图设计、水文气象等资料。此外，现场调查也是重要的工作内容，评估小组应对隧道沿线的地形环境条件、洞口特征、周边建筑物进行详细调查。

③隧道工程施工安全总体风险评估的结论应明确总体风险等级、主控因素清单(若无可不列出)、重要性指标清单(采用指标体系法时)、风险控制措施建议等内容。

④总体风险评估主要是将隧道工程施工安全总体风险进行分级管理。较大风险（Ⅱ级）及以上的隧道工程，应针对具体施工区段进一步详细评估，找出主要风险节点，开展专项风险评估，预先制定风险防控措施。对风险较低的隧道工程，若交通运输主管部门、建设单位、监理单位、施工单位等认为有必要，也可根据本标准确定的原则进行专项风险评估。

（2）主因素控制指标体系法

①根据隧道工程施工安全风险的主要影响因素，建立体现风险特征的主控因素判识表，先由主控因素直接确定风险等级，若不满足主控因素或由主控因素确定总体风险等级为较大风险(Ⅱ级)时，再进一步对各总体风险评估指标进行赋值分级，从而对隧道总体风险作出评估和预测。

总体风险评估宜采用主因素控制指标体系法，该法包括主控因素判识、指标体系评估两个步骤。前者选取关键的、控制性指标因素，并给定阈值，可直接确定隧道总体风险为重大风险（Ⅰ级）或较大风险（Ⅱ级）；后者基于指标体系法，考虑各类因素对总体风险的综合影响。具体评估流程见图5‑1。



图5‑1 主控因素判识流程

②主控因素判识

本标准选取的主控因素包括：隧道区域环境、隧道长度、围岩情况、预测瓦斯涌出量、预测涌水量、断层破碎带宽度、地应力和岩溶发育程度。

隧道区域环境主要考虑其特殊工况，即是否为海底隧道、下穿河流湖泊及重要建筑物的隧道，通常情况下，其施工条件更为困难，施工安全风险较大。重要构筑物主要指水利设施、高压电线塔、需重要保护的建筑物、古文物等。

隧道长度是在《现行指南》的基础上进一步扩大了隧道长度区间。根据交通运输部发布的《交通运输行业发展统计公报》统计显示[5]，截止2018年全国公路隧道共计17738处，其中特长隧道1058处、长隧道4315处，特长及长隧道占比达30.3%，随着我国隧道施工技术的不断完善、发展，目前已能够在一定程度上规避长隧道和部分特长公路隧道的施工风险。据不完全统计，截止2019年8月，我国已建、在建和规划的10km以上公路隧道超过34条[6]，为满足当前及未来公路隧道工程的发展趋势，本标准扩展了隧道长度区间值。

隧道长度主要考虑最长单洞的长度，若有竖井、斜井时应包括竖井、斜井长度。因为隧道事故的危险性主要受地质条件影响，如果隧道掘进长度大，遇到断层、破碎带以及涌水的可能性也增加，因此隧道越长，风险越大。

围岩情况在长度占比的基础上还考虑了V级围岩连续长度。当待评估隧道长度很大，往往V级围岩长度占比小于40%，但V级围岩连续长度已达到《公路工程技术标准》（JTG B01-2014）[7]的中、长隧道标准(500m~1000m、＞1000m)，该隧道施工风险仍然很大。另外，考虑到公路隧道施工技术的日趋成熟，IV级围岩不纳入考虑范围。

预测瓦斯涌出量是指单位时间内涌出的瓦斯量[8]，其大小值是发生瓦斯爆炸事故的先决条件。一般情况下，瓦斯涌出量直接影响爆炸发生的可能性，瓦斯涌出量越大，发生爆炸的风险越大。

预测涌水量[9]是评估隧道涌水突泥事故的关键性指标，根据《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，其大小直接关乎有无涌水突泥事故的风险，故将该指标作为评估总体风险的主控因素。

断层破碎带宽度，参考《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]，一般而言，断层及其影响带内，岩体应力较低，近影响带岩体局部可能存在应力集中现象，易引起塌方、岩爆等事故。此外，断层破碎带往往岩石较为破碎，围岩等级较低，是地表水、地下水流动的天然通道，是引发塌方、大变形、甚至涌水突泥等灾害的主要因素。本标准根据断层破碎带的宽度分类，宽度分级沿袭现行指南，宽度越大，则在断层破碎带及其影响带中的施工周期越长，施工安全风险越高。

地应力，是在天然状态下，存在于岩体内部的应力，是公路隧道工程的基本外荷载之一[11]。隧道开挖后，围岩发生应力重分布，切向应力显著增大，径向应力减少，容易造成围岩失稳，一般来说，地应力越大，风险越高。参考《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50287-2016)[12]进行指标分级。另外，没有地应力的实测成果时，可参照《工程岩体分级标准》(GB/T 50218 - 2014)[11]确定。即：

a）较平缓的孤山体，一般情况下，初始应力的铅直向应力为自重应力，水平向应力不大于。

b）通过对历次构造形迹的调查和对近期构造运动的分析，以第一序次为准，根据复合关系，确定最新构造体系，据此确定初始应力的最大主应力方向。

当铅直向应力为自重应力，且是主应力之一时，水平向主应力较大的一个，可取或更大。

c）埋深大于1000m，随着深度的增加，初始应力场逐渐趋向于静水压力分布；大于1500m以后，可按静水压力分布确定。

d）在峡谷地段，从谷坡至山体以内，可划分为应力松弛区、应力过渡区、应力稳定区和河底应力集中区。峡谷的影响范围，在水平方向一般为谷宽的1倍 ~3倍。在谷底较深部位，最大主应力趋于水平且多垂直于河谷。

e）地表岩体剥蚀显著地区，水平向应力应按原覆盖层厚度计算，其覆盖层厚度应包括已经剥蚀的部分。

岩溶发育程度[13]，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，岩溶发育程度与可溶性岩石密切相关，当隧道穿越岩溶发育区时，往往存在安全隐患，故应查明岩溶及地质灾害的形态与分布、岩溶发育规律等。岩溶越发育，储存的岩溶水越多，引发事故的可能性越大。

若隧道工况满足主控因素判识表中的某项指标，则可直接确定总体风险等级为Ⅰ级或Ⅱ级，不同主控因素的判识结果不一致时，采用就高原则确定风险等级；如不满足主控因素判识表或判识结果为Ⅱ级，则进一步采用指标体系评估确定总体风险等级。当指标体系评估结果与主控因素判识结果不一致时，采用就高原则确定总体风险最终风险等级。

③指标体系评估

影响隧道工程施工安全风险的因素众多，考虑到隧道施工前相关单位已有的勘察信息，选取建设规模、地质条件、洞口特征、年均降水量、资料完整性5个项别建立评估指标体系。本标准给出了指标体系评估表，指标取值应针对单洞。

总体风险评估指标包括：建设规模、地质条件、洞口特征、年均降水量、资料完整性等，各指标和风险大小的关系说明如下：

a）建设规模*B*，主要考虑隧道长度和开挖跨度。

隧道长度*B*1见主控因素判识部分对该指标的说明。隧道开挖跨度*B*2指隧道开挖横断面的水平最大宽度，《公路隧道施工技术细则》（JTG/T F60-2009）[14]、《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]中隧道跨度分类规定，见表5‑1。

表5‑1 参考规范的隧道分类

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 隧道分类 | 特大跨度隧道 | 大跨度隧道 | 中等跨度隧道 | 小跨度隧道 | 参考规范 |
| 隧道跨度(宽度)*B*(m) | *B*≥14 | 14>*B*≥12 | 12>*B*≥8.5 | 8.5>*B*≥5 | 《铁路隧道设计规范》  (TB 10003-2016) |
| *B*≥18 | 18>*B*≥14 | 14>*B*≥9 | *B*<9 | 《公路隧道施工技术细则》(JTG/T F60-2009) |

开挖跨度*B*2越大，隧道断面开挖持续时间越长，支护结构难以快速封闭成环，安全稳定性问题越突出，风险也越大。考虑到公路隧道实际工程，本标准参考《公路隧道施工技术细则》(JTG/T F60-2009)[14]中隧道开挖跨度分类规定。

b）地质条件*G*，主要考虑围岩情况、预测瓦斯涌出量、预测涌水量、断层破碎带宽度、硬岩强度应力比、岩溶发育程度，这些因素是隧道发生塌方、涌水突泥、瓦斯爆炸、岩爆等风险事件的主要客观条件。

围岩情况*G*1，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，隧道的围岩等级是工程地质勘察的重要内容，是影响隧道围岩稳定性的关键性指标。一般来说，围岩等级越低，围岩稳定性越差，对应的施工风险越高。大量工程经验表明，整条隧道中V级围岩施工难度大，容易诱发坍塌事故，本标准将Ⅴ级围岩连续长度占隧道长度的比例作为评估指标，并将该指标比例大小分别定为70%以下、40%~70%、20%~40%和20%以上四档评分，它是能够反映隧道工程总体施工风险的一个主要因素。

预测瓦斯涌出量*G*2，指单位时间内涌出的瓦斯量。本标准参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]，将瓦斯涌出量划分为大于1m3/min、0.5 m3/min ~1m3/min、0.5m3/min以下和不存在瓦斯四个等级。

预测涌水量*G*3[9]，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，隧道涌水量是影响隧道涌水突泥风险的关键因素，可以根据前期地勘资料和超前地质预报资料对涌水量进行定量估计，隧道预测涌水量越大，隧道发生涌水突泥的风险越大。

断层破碎带宽度*G*4，参考《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]，一般而言，断层及其影响带内，岩体应力较低，近影响带岩体局部可能存在应力集中现象，易引起塌方、岩爆等事故。此外，断层破碎带往往岩石较为破碎，围岩等级较高，是地表水、地下水流动的天然通道，是引发坍塌、大变形等灾害的主要因素。本标准根据断层破碎带的宽度分类，宽度分级沿袭现行指南，宽度越大，则在断层破碎带及其影响带中的施工周期越长，施工风险越高。

硬岩强度应力比*G*5，为岩石饱和单轴抗压强度与垂直洞轴线方向的最大初始应力之比，是判断岩爆倾向性的常用指标。参照《水力发电工程地质勘察规范》（GB 50287-2016）[12]中岩体初始地应力的分级(见表5‑2)，将强度应力比分为四个等级，强度应力比值越小，发生岩爆的风险越高。

表5‑2 岩体初始地应力的分级

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 应力分级 | 最大主应力量级（MPa） |  |
| 极高地应力 | ≥40 | <2 |
| 高地应力 | 20≤<40 | 2~4 |
| 中等地应力 | 10≤<20 | 4~7 |
| 低地应力 | <10 | >7 |

注：表中*Rb*表示岩石饱和单轴抗压强度（MPa），表示最大主应力（MPa）。

当岩石抗压强度和地应力实测数据不足时，可以参照《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]（见表5‑3）评估隧道工程岩体所对应的强度应力比范围值。

表5‑3 隧道工程岩体强度应力比评估

|  |  |
| --- | --- |
| 高地应力条件下的主要工程现象 |  |
| 1.硬质岩：岩芯常有饼化现象；开挖过程中时有岩爆发生，有岩块弹出，洞壁岩体发生剥离，新生裂缝多，围岩易失稳。  2 软质岩：开挖过程中洞壁岩体有剥离，位移极为显著，甚至发生大位移，持续时间长，不易成洞。 | <4 |
| 1.硬质岩：岩芯时有饼化现象；开挖过程中偶有岩爆发生，洞壁岩体有剥离和掉块现象，新生裂缝较多。  2.软质岩：开挖过程中洞壁岩体位移显著，持续时间较长，围岩易失稳。 | 4~7 |

岩溶发育程度*G*6[13]，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，岩溶发育程度与可溶性岩石密切相关，当隧道穿越岩溶发育区时，往往存在安全隐患，故应查明岩溶及地质灾害的形态与分布、岩溶发育规律等。岩溶越发育，储存的岩溶水越多，引发事故的可能性越大。

c）洞口特征*C*，主要考虑地质特征、洞口偏压角度、进洞施工难易程度。

地质特征*C*1主要考虑隧道洞口岩土体的抗滑能力，古滑坡体或堆积体、破碎的边仰坡、比较稳定的边仰坡三者抗滑能力依次增加，施工风险依次减弱，考虑比较稳定的边仰坡有足够的抗滑能力，赋分值为0。

洞口偏压角度*C*2，指垂直于隧道洞口的横剖面与地面的交线，该交线与水平面的夹角。参考《铁路隧道设计规范》（JB 10003-2016）[15]，大多数偏压隧道处于洞口段与浅埋段，地形因素造成的偏压对隧道洞口浅埋段的稳定性影响很大，本标准以岩层倾角表示偏压情况，倾角越大，则发生洞口失稳、塌方等事故的可能性就越大。参考已有研究成果[16]，本标准将洞口偏压角度分为大于45°、30°~45°、15°~30°、15°以下四个等级进行评价。

进洞施工难易程度*C*3，参考《公路隧道施工技术规范》（JTG F60-2009）[17]，洞口的不良地质条件、临近的建（构）筑物、公路、桥涵以及雨期、融雪期、严寒季节等均会加大进洞施工难度。以进洞施工难易程度为考量指标，进洞施工越困难，则施工风险越大。

d）年均降水量*W*，降水量过大，特别是持续的强降水，影响洞口工程施工；如果地表的排水、截水设施不完善，大量的地表水将会渗入地层，此外在隧道浅埋段降水易渗入隧道围岩，软化岩体并降低围岩强度，影响隧道围岩稳定性。故降水量越大，则总体施工安全风险越大。

e）资料完整性*D*，主要考虑地质、水文、气象资料完整性对地质条件的影响，资料越完整，可获取的隧道地质信息越多，对应地质条件*G*的二级指标值也越准确，对应的修正系数越小。

同时，本标准给出了隧道施工安全总体风险分值计算公式。总体原则为同一项别下的二级指标评估分值相加，资料完整性对地质条件的影响、降水量对洞口特征的影响分别作为系数处理。

④给出了隧道工程总体风险分级标准，对照此分级标准即可得出总体风险等级。

总体风险分级标准的区间界限是由统计分析并估算求得。通过查阅文献，汇总近100个隧道工程资料，按照指标体系评估，分别对其进行风险评估分值试算，计算其正态分布，采用2*σ*原理确定Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅰ级风险区间，结果如下：

由试算结果得到Ⅲ级风险区间为(18.46，34.25)，平均值为26.48，标准方差为16.08；Ⅱ级风险区间为(25.38，39.47)，平均值为32.43，标准方差为12.42；Ⅰ级风险区间为(35.21，52.17)，平均值为45.56，标准方差为14.69。

为减少离散数据对试算结果的影响，删除试算结果较大值和较小值后得到的Ⅲ级风险区间为(18.19，31.7)，平均值为24.95，标准方差为11.41；Ⅱ级风险区间为(25.35，37.53)，平均值为31.44，标准方差为9.266；Ⅰ级风险区间为(35.72，51.89)，平均值为44.23，标准方差为10.02。

为直观对比分析，将上述数据做成表格，见表5‑4，并进一步求出各等级试算分值的第一四分位数、第二四分位数、第三四分位数。

最后以试算结果第一四分位数作为各分级区间的界限。

表5‑4 试算结果分析对比表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目  类别 | 1 根据原始数据 | | | 2 删减试算结果较大较小值 | | |
| 风险等级 | Ⅲ级 | Ⅱ级 | Ⅰ级 | Ⅲ级 | Ⅱ级 | Ⅰ级 |
| 风险区间 | (18.46，34.25) | (25.38，39.47) | (35.21，52.17) | (18.19，31.7) | (25.35，37.53) | (35.72，51.89) |
| 平均值 | 26.48 | 32.43 | 43.69 | 24.95 | 31.44 | 43.81 |
| 标准方差 | 16.08 | 12.42 | 14.69 | 11.41 | 9.266 | 10.02 |
| *Q*1 | 19.53 | 27.13 | 39.45 | 19.6 | 27.125 | 39.76 |
| *Q*2 | 25.58 | 32.70 | 43.69 | 25 | 31.6 | 43.81 |
| *Q*3 | 32 | 36.35 | 47.93 | 29.5 | 35.475 | 47.85 |

注：*Q*1指第一四分位数；*Q*2指第二四分位数；*Q*3指第三四分位数。

此外，通过对每个指标分值进行随机抽样106次，代入总体风险分值计算公式，得到分值的分布情况如下表所示：

表5‑5 总体风险分值分布

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 中心值 | 概率 | 中心值 | 概率 | 中心值 | 概率 | 中心值 | 概率 |
| 4.5 | 0.0005 | 27.5 | 4.7371 | 50.5 | 65.8132 | 73.5 | 99.3047 |
| 5.5 | 0.001 | 28.5 | 5.7758 | 51.5 | 68.9444 | 74.5 | 99.4728 |
| 6.5 | 0.0024 | 29.5 | 6.962 | 52.5 | 71.9516 | 75.5 | 99.6043 |
| 7.5 | 0.0043 | 30.5 | 8.3168 | 53.5 | 74.8241 | 76.5 | 99.7005 |
| 8.5 | 0.0075 | 31.5 | 9.8661 | 54.5 | 77.5273 | 77.5 | 99.7772 |
| 9.5 | 0.013 | 32.5 | 11.5784 | 55.5 | 80.067 | 78.5 | 99.8347 |
| 10.5 | 0.0194 | 33.5 | 13.4898 | 56.5 | 82.4153 | 79.5 | 99.8801 |
| 11.5 | 0.0325 | 34.5 | 15.582 | 57.5 | 84.6077 | 80.5 | 99.9157 |
| 12.5 | 0.0528 | 35.5 | 17.8574 | 58.5 | 86.5858 | 81.5 | 99.9408 |
| 13.5 | 0.0794 | 36.5 | 20.3369 | 59.5 | 88.3852 | 82.5 | 99.9598 |
| 14.5 | 0.1186 | 37.5 | 22.9857 | 60.5 | 90.0412 | 83.5 | 99.973 |
| 15.5 | 0.173 | 38.5 | 25.7926 | 61.5 | 91.5091 | 84.5 | 99.9805 |
| 16.5 | 0.2505 | 39.5 | 28.7712 | 62.5 | 92.8173 | 85.5 | 99.9867 |
| 17.5 | 0.3469 | 40.5 | 31.8883 | 63.5 | 93.9434 | 86.5 | 99.9917 |
| 18.5 | 0.4755 | 41.5 | 35.1135 | 64.5 | 94.9331 | 87.5 | 99.9956 |
| 19.5 | 0.6543 | 42.5 | 38.4366 | 65.5 | 95.8093 | 88.5 | 99.9973 |
| 20.5 | 0.8761 | 43.5 | 41.8875 | 66.5 | 96.5547 | 89.5 | 99.9985 |
| 21.5 | 1.1583 | 44.5 | 45.3523 | 67.5 | 97.1923 | 90.5 | 99.9989 |
| 22.5 | 1.5122 | 45.5 | 48.8534 | 68.5 | 97.7211 | 91.5 | 99.9992 |
| 23.5 | 1.936 | 46.5 | 52.3254 | 69.5 | 98.1754 | 92.5 | 99.9996 |
| 24.5 | 2.4659 | 47.5 | 55.7878 | 70.5 | 98.5439 | 93.5 | 99.9997 |
| 25.5 | 3.0979 | 48.5 | 59.2228 | 71.5 | 98.8522 | 94.5 | 99.9999 |
| 26.5 | 3.8525 | 49.5 | 62.5679 | 72.5 | 99.0978 | 95.5 | 100 |

由上表数据结合试算结果可知，总体风险分值的分布情况与6.4.4中等级划分标准符合较好。根据案例试算与工程修正，考虑到总体风险等级为4级，以累积概率分布曲线上对应的>30%、3%~30%、0.3%~3%、<0.3%的区间作为重大、较大、一般、较小风险的分级标准，结果见表5‑6。

表5‑6 总体风险等级计算分值

|  |  |
| --- | --- |
| 风险等级 | 计算分值*R* |
| 重大风险（Ⅰ级） | *R*≥40 |
| 较大风险（Ⅱ级） | 26≤*R*<40 |
| 一般风险（Ⅲ级） | 17≤*R*<26 |
| 较小风险（Ⅳ级） | *R*<17 |

### **. 专项风险评估**

（1）一般要求

①专项风险评估属于可能灾害的针对性评估，评估对象是隧道工程的施工区段，包括施工前专项风险评估、施工过程专项风险评估和风险控制预期效果评估。专项风险评估通过风险辨识、风险分析、风险估测等过程，找出影响事故发生的各个因素，进而提出风险控制措施。为检验风险控制措施实施后的残留风险情况，需开展风险控制预期效果评估。

②专项风险评估的基本程序包括：风险辨识、风险分析、风险估测、风险控制和风险控制预期效果评估。

③施工前专项风险评估

总体风险评估等级为较大风险（Ⅱ级）及以上的隧道工程应开展施工前专项风险评估，一般风险（Ⅲ级）、较小风险（Ⅳ级）视情况确定是否开展。

施工前专项风险评估在隧道开工前进行，不考虑人为及管理因素，应参照隧道工程本身属性、勘察设计文件等静态条件展开评估。

本标准给出了开展施工前专项风险评估的意义，即：施工前专项风险评估结果作为编制专项施工方案的主要依据。

④施工过程专项风险评估

施工过程专项风险评估并非针对每一条公路隧道，满足其开展条件（总体风险评估等级为较大风险及以上的隧道工程）时才得以启动，参照前期专项风险评估文件、隧道施工现状、施工过程监控量测及补充的地质资料等展开评估。因此，专项风险评估属于动态评估。

以下对施工过程专项风险评估的启动条件作进一步阐述：

a）主要考虑到由于围岩等级急剧变化、突遇溶洞暗河、暴雨等自然因素的重大改变，影响施工安全；

b）主要依据《公路工程设计变更管理办法》（交通部令2005年第5号），有下列情形之一的属于满足重大设计变更的条件：

——连续长度10公里以上的路线方案调整的；

——特长隧道的数量或通风方案发生变化的；

——超过初步设计批准概算的。

c）主要考虑隧道施工中监控量测指标值频繁超出正常值范围或现场出现小范围的事故险情；

d）主要考虑到前期勘察不充分、资料不完整导致重大风险源存在遗漏，以及评估小组对某些评估指标过高或过低的预测等情况，致使现场实际条件与施工前专项风险评估结果不符，出现重大新的风险源。

本标准给出了施工过程专项风险评估报告的内容、形式要求。施工过程专项风险评估报告应包含评估指标前后变化对比、现阶段风险评估等级、风险控制措施等。

⑤对于风险等级为较大风险(Ⅱ级)及以上的隧道施工区段，应开展风险控制预期效果评估。

（2）风险辨识

①风险辨识包括工程资料的收集整理、施工现场地质条件和环境条件的调查（或补充勘察）、施工作业程序分解、施工作业可能发生的风险事件类型分析等4个步骤。风险辨识前应成立评估小组，评估小组负责人应具有类似工程施工经历和五年以上的工程管理经验，评估小组成员的专业范围应覆盖隧道工程的主要施工及管理环节，由评估负责人进行分工，分头开展工作。

②收集的资料中，有些是勘察设计单位能提供的，有些是施工单位编写的，还有一部分是需要协调相关单位提供的（如工程区域内的环境条件）。按照《中华人民共和国建筑法》的相关要求，应由建设单位向施工单位提供相关资料。同类工程事故资料等其它相关资料应由评估小组自行收集整理。此外，应注意施工过程专项风险评估和风险预期效果评估还应收集其它指定资料。

③现场调查是专项风险评估中的重要工作，施工现场地质条件和环境条件调查应包括地质条件、气候水文条件、周边环境条件、围岩变形破坏迹象和特征、补充地质勘察结果(如有)、现场开挖揭露地质情况的差异、周边环境的变化情况等。

④施工作业程序分解重点是把握分解的层次。评估小组可以根据安全管理需要、工程实际情况，将隧道工程施工按单位工程、分部工程、分项工程逐级分解，并应符合下列规定：

a）在合同段中，具有独立施工条件和结构功能的工程为单位工程。

b） 在单位工程中，按路段长度、结构部位及施工特点等划分的工程为分部工程。

c） 在分部工程中，根据施工工序、工艺或者材料等划分的工程称为分项工程。

⑤根据工程项目实际情况，评估单元可以是分部工程、分项工程、工序（单位）作业，评估单元大小视风险评估具体需求而定。施工作业程序分解框见图6‑1。



图6‑1 施工作业程序分解框图

施工作业程序分解时，应重点将以往事故或险情的施工工序，或有潜在风险的施工工序筛选出来，重点分析以下内容：

a）致害物：作业场所内设施、设备及物料等；作业场所对施工人员安全的影响；

b）可能受到事故伤害的人员，包括：作业人员本身，同一作业场所的其它作业人员，周围其它人员；

c）事故发生的原因，包括：机械故障、自然灾害等。

⑥本标准中隧道作业程序分解的示例是到单位作业，实际操作时也可到分项工程，重点是根据隧道施工难易程度，提出隧道施工容易发生人员伤亡的施工作业。同时也应根据隧道施工的掘进区段，进行施工作业分解，以便于找出不同施工区段的重大风险事件类型。

⑦每个施工作业可能对应多种可能的风险事件类型，逐一分析可预见的各风险事件类型，从而辨识出风险源。从某种意义上来说，风险评估的最基本元素应该是风险事件，针对分部分项工程的评估实际是针对综合风险的评估，施工安全风险评估应针对每个施工作业活动的每种风险事件类型展开评估工作，考虑到执行层面实际情况，应针对典型施工作业活动中发生的重大风险事件类型开展定量评估。

风险事件类型分析和风险源辨识是经验性很强的一项工作，应广泛听取专家意见，结合前期事故资料收集整理结果，采用头脑风暴法，按照梳理的施工流程确定本工作主要作业活动可能发生的风险事件类型，特别是重大风险事件类型及其对应的风险源。普查成果务必全面、准确。

⑧附录B给出了公路隧道工程施工的典型风险事件类型。

（3）风险分析

①风险分析应在深入分析已有资料的基础上进行，特别是针对确定的施工组织设计、工程施工环境条件、可能的现场情况，应从人、机、料、法、环等方面，找出受伤害对象(人或物)、伤害主体(机械、临时结构、外界条件等)、损失程度(人员伤亡、经济损失、环境和社会影响、工期延误等)、事故原因等。

②对于物的不安全状态可能引起的风险事件，主要从地质条件、施工方案、施工环境、施工机械、自然灾害等方面分析。表6‑1为企业职工伤亡事故分类（GB/T 6441-1986）[3]中的不安全状态分类。

a）地质条件变化。主要是分析设计文件中所依据的地质资料和现场开挖揭露的实际地质情况的差异。当地质条件变化较大时，原施工方法可能不当，从而产生较大的施工安全风险。

b）施工方案。主要分析隧道施工所有的分项工程，分析其施工方法和工艺是否得当、相互间的施工工序与衔接是否合理。

c）施工环境方面存在的风险源。主要调查和分析施工场地周边的建筑物、构筑物、埋藏物、管道（油、气、水）、缆线、国防设施、铁路、公路、外电架空线路、地下水体、地表水体等可能造成安全事故的外部环境。

d）施工设备。主要分析爆破开挖、混凝土喷射、仰拱施工、高压供风、高压注浆等使用的可能造成安全事故的施工机械设备。

e）施工材料。主要分析材料过期、失效等质量问题，施工中可能遇到的有毒有害、易燃易爆等物质。

f）自然灾害。主要分析生产、生活区域可能受到暴雨、洪水、泥石流、地震、大风、雨雪等突发自然灾害造成的风险。

表6‑1 不安全状态分类

| 分类号 | 不安全状态 |
| --- | --- |
| 6.01  6.01.1  6.01.1.01  6.01.1.02  6.01.1.03  6.01.1.04  6.01.1.05  6.01.1.06  6.01.1.07  6.01.1.08  6.01.1.09  6.01.1.10  6.01.1.11  6.01.2  6.01.2.1  6.01.2.2  6.01.2.3  6.01.2.4  6.01.2.5  6.01.2.6  6.01.2.7  6.01.2.8  6.02  6.02.1  6.02.1.1  6.02.1.2  6.02.1.3  6.02.1.4  6.02.1.5  6.02.1.6  6.02.1.7  6.02.2  6.02.2.1  6.02.2.2  6.02.2.3  6.01.2.4  6.02.3  6.02.3.1  6.02.3.2  6.02.3.3  6.02.4  6.02.4.1  6.02.4.2  6.02.4.3  6.02.4.4  6.03  6.03.1  6.03.2  6.04  6.04.1  6.04.1.1  6.04.1.2  6.04.1.3  6.04.2  6.04.2.1  6.04.2.2  6.04.2.3  6.04.2.4  6.04.2.5  6.04.2.6  6.04.2.7  6.04.3  6.04.4  6.04.4.1  6.04.4.2  6.04.4.3  6.04.4.4  6.04.5  6.04.6  6.04.7  6.04.7.1  6.04.7.2  6.04.7.3  6.04.8  6.04.9 | 防护、保险、信号等装置缺乏或有缺陷  无防护  无防护罩  无安全保险装置  无报警装置  无安全标志  无护栏、或护栏损坏  (电气)未接地  绝缘不良  局扇无消音系统、噪声大  危房内作业  未安装防止“跑车”的挡车器或挡车栏  其它  防护不当  防护罩未在适应位置  防护装置调整不当  坑道掘进，隧道开凿支撑不当  防爆装置不当  采伐、集材作业安全距离不够  放炮作业隐蔽所有缺陷  电气装置带电部分裸露  其它  设备、设施、工具、附件有缺陷  设计不当，结构不合安全要求  通道门遮挡视线  制动装置有缺欠  安全间距不够  拦车网有缺欠  工件有锋利毛刺、毛边  设施上有锋利倒棱  其它  强度不够  机械强度不够  绝缘强度不够  起吊重物的绳索不合安全要求  其它  设备在非正常状态下运行  设备带“病”运转  超负荷运转  其它  维修、调整不良  设备失修  地面不平  保养不当、设备失灵  其它  个人防护用品用具——防护服、手套、护目镜及面罩、呼吸器官护具、听力护具、安全带、安全帽、安全鞋等缺少或有缺陷  无个人防护用品、用具  所用防护用品、用具不符合安全要求  生产(施工)场地环境不良  照明光线不良  照度不足  作业场地烟雾尘弥漫视物不清  光线过强  通风不良  无通风  通风系统效率低  风流短路  停电停风时放炮作业  瓦斯排放未达到安全浓度放炮作业  瓦斯超限  其它  作业场所狭窄  作业场地杂乱  工具、制品、材料堆放不安全  采伐时，未开“安全道”  迎门树、坐殿树、搭挂树未作处理  其它  交通线路的配置不安全  操作工序设计或配置不安全  地面滑  地面有油或其它液体  冰雪覆盖  地面有其它易滑物  贮存方法不安全  环境温度、湿度不当 |

③对于人的不安全行为可能引起的风险事件，主要从操作错误、违反安全规程和管理缺陷等方面分析。表6‑2为企业职工伤亡事故分类（GB/T 6441-1986）[3]中不安全行为分类。

a）操作错误。不按设计文件和施工组织要求的顺序施工、偷工减料、偷工减序、设备操作错误、易燃易爆品操作不当、多人配合作业不协调、空中抛掷物件、材料工具存放不当等。

b）违反安全规程。高处作业没有个人安全防护用品（安全带、安全帽、安全网）、设备带病运转不维修、设备外露旋转部分不加防护罩、隧道安全监测不到位、酒后作业等。

c）管理缺陷。主要从制度管理和现场管理两方面分析：1) 制度管理：从安全管理机构、安全管理人员配备、安全管理责任制、安全培训、安全投入、事故处理、事故应急预案等方面分析；2) 现场管理：现场安全巡查、安全隐患查处和事故应急处理等方面分析。

表6‑2 不安全行为分类

|  |  |
| --- | --- |
| 分类号 | 不安全行为 |
| 7.01  7.01.1  7.01.2  7.01.3  7.01.4  7.01.5  7.01.6  7.01.7  7.01.8  7.01.9  7.01.10  7.01.11  7.01.12  7.01.13  7.01.14  7.01.15  7.01.16  7.02  7.02.1  7.02.2  7.02.3  7.02.4  7.03  7.03.1  7.03.2  7.03.3  7.04  7.04.1  7.04.2  7.04.3  7.05  7.06  7.06.1  7.06.2  7.06.3  7.06.4  7.06.5  7.06.6  7.06.7  7.06.8  7.06.9  7.06.10  7.06.11  7.07  7.08  7.09  7.10  7.11  7.11.1  7.11.2  7.11.3  7.11.4  7.11.5  7.11.6  7.11.7  7.11.8  7.12  7.12.1  7.12.2  7.12.3  7.13 | 操作错误、忽视安全、忽视警告  未经许可开动、关停、移动机器  开动、关停机器时未给信号  开关未锁紧，造成意外转动、通电、或泄漏等  忘记关闭设备  忽视警告标志、警告信号  操作错误(指按钮、阀门、搬手、把柄等的操作)  奔跑作业  供料或送料速度过快  机器超速运转  违章驾驶机动车  酒后作业  客货混载  冲压机作业时，手伸进冲压模  工件紧固不牢  压缩空气吹铁屑  其它  造成安全装置失效  拆除了安全装置  安全装置堵塞，失掉了作用  调整的错误造成安全装置失效  其它  使用不安全设备  临时使用不牢固的设施  使用无安全装置的设备  其它  手代替工具操作  用手代替手动工具  用手清除切屑  不用夹具固定，用手拿工件进行机加工  物体(指成品、半成品、材料、工具、切屑和生产用品等)存放不当  冒险进入危险场所  冒险进入涵洞  接近漏料处(无安全设施)  采伐、集材、运材、装车时，未离危险区  未经安全监察人员允许进入油罐或井中  未“敲帮问顶”开始作业  冒进信号  调车场超速上下车  易燃易爆场合明火  私自搭乘矿车  在绞车道行走  未及时嘹望  攀、坐不安全位置(如平台护栏、汽车挡板、吊车吊钩)  在起吊物下作业、停留  机器运转时加油、修理、检查、调整、焊接、清扫等工作  有分散注意力行为  在必须使用个人防护用品用具的作业或场合中，忽视其使用  未戴护目镜或面罩  未戴防护手套  未穿安全鞋  未戴安全帽  未佩戴呼吸护具  未佩戴安全带  未戴工作帽  其它  不安全装束  在有旋转零部件的设备旁作业穿过肥大服装  操纵带有旋转零部件的设备时戴手套  其它  对易燃、易爆等危险物品处理错误 |

④在隧道工程施工中，可能受到风险事件伤害的人员类型包括：作业人员自身、同一作业场所的其他作业人员、作业场所周围其他人员。

⑤风险分析应通过评估小组讨论会的形式实施，宜采用风险传递路径法、鱼刺图法、故障树分析法等安全系统工程理论进行分析。风险分析的结果应填入表6‑3。

表6‑3 施工安全风险分析表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 风险源 | 潜在的风险事件类型 | 原因1 | 原因2 | ∙∙∙ ∙∙∙ | 风险事件后果 |
| 风险源1 |  |  |  |  |  |
| 风险源2 |  |  |  |  |  |
| … |  |  |  |  |  |
| 风险源N |  |  |  |  |  |

a）风险传递路径法

隧道施工安全管理失误的风险传递路径，见图6‑2。



图6‑2 隧道施工安全管理失误风险传递路径

针对隧道施工的特点，对隧道施工安全管理失误风险传递路径细化，可知：风险从原因事件向结果事件传递，其表现形式由最初单一的、确定的管理失误（*D*）分化到若干不同的危险形态（*H*1*、H*2*、……、Hn*）并导致事故发生，最终发展到多样的、程度不一的伤害（*I*111*、I*112*、……、Innn*）。

隧道施工安全风险传递路径细化见图6‑3。



图6‑3 隧道施工安全风险传递路径细化图

b）鱼刺图法

鱼刺图法是把系统中产生事故的原因及造成的结果所构成的因果关系，采用简单的文字和线条加以全面表示的方法。由于分析图的形状像鱼刺，故称“鱼刺图”(见图6‑4)。



图6‑4 隧道施工安全风险鱼刺图法

制作鱼刺图分两个步骤：

第一步：分析问题原因及结构

——针对问题点，选择层别方法（如人、机、料、法、环等）；

——按头脑风暴分别对各层别找出所有可能原因（因素）；

——将找出的各因素进行归类、整理，明确其从属关系；

——分析选取重要因素；

——检查各要素的描述方法，确保语言简明、意思明确。

第二步：绘制鱼刺图

——填写鱼头（要解决的问题）；

——画出主骨（影响结果主要概况因素）；

——画出大骨，填写大要因；

——画出中骨、小骨，填写中小要因。

在绘制鱼刺图时应召集建设、施工、监理、第三方评估单位（如有）等相关人员共同分析，将所要解决问题遵从面-线-点依次细化。

c）故障树分析法

故障树是将系统的失效事件（称为顶上事件）分解为许多子事件的串、并联组合。在系统中各个基本事件的失效概率已知时，沿故障树图的逻辑关系逆向求解系统的失效概率。故障树是一种特殊的树状逻辑因果关系图，它用规定的逻辑门和事件符号描述系统中各种事物之间的关系。故障树的编制要求分析人员十分熟悉工程系统情况，包括工作程序、各种参数、作业条件、环境影响因素及过去常发事故情况等。

故障树解决问题的步骤见图6‑5。



图6‑5 故障树分析流程图

故障树的绘制见图6‑6，要分析的对象即为顶上事件（施工安全事故），按逻辑关系可向下罗列顶上事件发生的一级条件及原因，一级条件及原因转换为一级事件，再向下罗列二级事件及原因（*A1、A2……Ann*），依次类推直至事故的基本事件（*A11、A12……Ann*）。目前该方法主要应用于定性评估。



图6‑6 隧道工程施工故障树

（4）风险估测

①风险估测是为了将风险源进行区分，确定风险等级便于安全管理。对于风险的大小，综合考虑风险事件可能性和风险事件严重程度，利用风险矩阵综合确定风险源的风险等级。

②风险估测方法应结合施工组织设计、风险事件的特点等因素确定。

③明确了一般风险源和重大风险源的关系。在进行风险估测时，所有风险源均先视为一般风险源进行一般风险源风险估测，对于一般风险源风险估测中风险等级较高的风险源，将其列为重大风险源，再进行重大风险源风险估测。由此可见，虽然风险源分为一般风险源和重大风险源，但是由于重大风险源无法直接识别出，只能从一般风险源风险估测产生，这是本标准不能取消一般风险源估测最根本的原因，所以一般风险源风险估测包括对重大风险源的初步定性或者半定量估测。从通俗意义上说，一般风险源估测即为风险源估测。

此外，定义一般风险源风险估测的“较高”等级，可依据选取的评估方法。例如常用的LEC法（见6.5.3），对于风险分值高于70分及以上的的一般风险源定义为“较高”等级，其它评估方法根据具体情况确定。

④将风险事件可能性等级分为5级，主要参照了《Guidelines for tunnelling risk management》[18]、《港口工程施工安全风险评估指南》[19]、《铁路隧道风险评估暂行规定》[20]、《公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南(试行)》[21]、《地铁及地下工程建设风险管理指南》[22]等国内外标准规范通行做法。

⑤将风险事件严重程度的等级分成5级，并提供两种确定风险事件严重程度的方法：第一种方法一般主要考虑人员伤亡和直接经济损失；当多种后果同时产生时，应考虑人员伤亡、直接经济损失、社会影响、环境影响、工期延误，宜采用第二种方法——后果当量法确定风险事件严重程度等级。

a）人员伤亡和直接经济损失的程度等级划分主要参考《Q/CR 9006-2014铁路建设工程风险管理技术规范》，一般情况下，从人员伤亡和直接经济损失两个方面并采用就高原则确定风险事件严重程度。

b）当多种后果同时产生时，在人员伤亡、直接经济损失的基础上，参照《Guidelines for tunnelling risk management》[18]、《铁路隧道风险评估暂行规定》[20]、《公路水路行业安全生产风险辨识评估管控基本规范(试行)》[23]等国内外标准规范，进一步考虑社会影响、环境影响、工期延长等方面影响，采用后果当量法确定风险事件严重程度等级。

针对公路隧道施工风险事件后果的多样性以及各种风险事件后果计量方式的不统一，根据文献《山岭铁路隧道工程施工风险评估及其应用研究》[24]、《铁路隧道施工安全风险管理研究》[25]等文献，引入当量的概念，当多种后果同时产生时，采用后果当量法确定风险事故严重程度等级。

后果当量法的意义主要有两个，一是它能够综合考虑多种后果的影响，而不是单纯利用就高原则来确定严重程度等级，这可以避免对风险事件严重程度的误判；另一方面，后果当量法考虑并量化了社会、环境影响等，尤其是当量值的引入，可以更直观地认识到各后果严重程度的大小，统一的衡量标准对于施工人员对风险的理解具有重要意义。

如何确定各后果之前的换算标准是后果当量法是否合理有效的关键，以下给出本标准确定各后果当量值参考的相关规范和说明：

Ⅰ）人员伤亡：

表6‑4 《Q/CR 9006-2014铁路建设工程风险管理技术规范》[26]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 后果等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 人员伤亡数量（人） | *F*≥30或*SI*≥100 | 10≤*F*<30或50≤*SI*<100 | 3≤*F*<10或10≤*SI*<50 | *F*<3或*SI*<10或*MI*≥5 | *MI*<5 |

注：*F*为死亡人数；*SI*为重伤；*MI*为轻伤

表6‑5 国际隧协：《Guidelines for tunnelling risk management》[18]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Disastrous | Severe | Serious | Comsiderable | Insignificant |
| No.of fatalities/injuries | *F*>10 | 1<*F*≤10，*SI*>10 | 1*F*，1<*SI*≤10 | 1*SI*,1<*MI*≤10 | 1 *MI* |

注：F-fatality; SI-serious injury; MI-minor injury.

表6‑6 《生产安全事故报告和调查处理条例》[4]人员伤亡等级判断标准

|  |  |
| --- | --- |
| 事故等级 | 判断标准 |
| 特别重大 | 30人以上死亡，或者100人以上重伤（包括急性工业中毒，下同） |
| 重大 | 10人以上30人以下死亡，或者50人以上100人以下重伤 |
| 较大 | 3人以上10人以下死亡，或者10人以上50人以下重伤 |
| 一般 | 3人以下死亡，或者10人以下重伤 |

表6‑7 《GB50652-2011城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》[27]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 建设人员 | 死亡（含失踪）10人以上 | 死亡（含失踪）3人~9人，或重伤10人以上 | 死亡（含失踪）1人~2人，或重伤2人~9人 | 重伤1人，或轻伤2人~10人 | 轻伤1人 |
| 第三方 | 死亡（含失踪）1人以上 | 重伤2人~9人 | 重伤1人 | 轻伤2人~10人 | 轻伤1人 |

参考以上标准，可发现同一级别中死亡人数和重伤人数比例约为3~5：1，即1人死亡的后果约等于3到5人重伤。

《企业职工伤亡事故分类》[3]规定：

——轻伤指损失工作日低于105日的失能伤害；

——重伤指相当于附录B（下文未列出）表中损失工作日等于和超过105日的失能伤害；

——死亡或永久性全失能伤害规定为6000日。

经计算，《企业职工伤亡事故分类》中附录B列出的所有重伤平均损失工作日为2286天，按照损失工作日计算，死亡、重伤和轻伤严重后果比例约为1：3：60。

综上，1人死亡=3人重伤=60人轻伤。

Ⅱ）直接经济损失

表6‑8 《Q/CR 9006-2014铁路建设工程风险管理技术规范》[26]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 后果等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 绝对经济损失（万元） | *EL*≥10000 | 5000≤*EL*<10000 | 1000≤*EL*<5000 | 100≤*EL*<1000 | *EL*<100 |
| 相对经济损失（%） | *EL*≥100 | 50≤*EL*<100 | 20≤*EL*<50 | 5≤*EL*<20 | *EL*<5 |

注：1.“*EL*”指经济损失；

2.相对经济损失的基数为原工程的造价；

3.后果等级取绝对经济损失或相对经济损失中对应的最高等级。

表6‑9 《GB50652-2011城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》[27]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 工程本身 | 1000万元以上 | 500万元~1000万元 | 100万元~500万元 | 50万元~100万元 | 50万元以下 |
| 第三方 | 200万元以上 | 100万元~200万元 | 50万元~100万元 | 10万元~50万元 | 10万元以下 |

表6‑10 国际隧协：《Guidelines for tunnelling risk management》[18]

Economic loss to owner

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Disastrous | Severe | Serious | Considerable | Insignificant |
| Loss in Million Euro | >30 | 3-30 | 0.3-3 | 0.03-0.3 | <0.03 |

Damage or economic loss to third party

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Disastrous | Severe | Serious | Considerable | Insignificant |
| Loss in Million Euro | >3 | 0.3-3 | 0.03-0.3 | 0.003-0.03 | <0.003 |

《生产安全事故报告和调查处理条例》[4]中规定：

根据生产安全事故（以下简称事故）造成的人员伤亡或者直接经济损失，事故一般分为以下等级：

——特别重大事故，是指造成30人以上死亡，或者100人以上重伤（包括急性工业中毒，下同），或者1亿元以上直接经济损失的事故；

——重大事故，是指造成10人以上30人以下死亡，或者50人以上100人以下重伤，或者5000万元以上1亿元以下直接经济损失的事故；

——较大事故，是指造成3人以上10人以下死亡，或者10人以上50人以下重伤，或者1000万元以上5000万元以下直接经济损失的事故；

——一般事故，是指造成3人以下死亡，或者10人以下重伤，或者1000万元以下直接经济损失的事故。

简单计算，1人死亡的严重后果，约和300-500万的直接经济损失相当。

此外，《工伤保险条例》[28]第三十九条规定，职工因工死亡，其近亲属按照下列规定从工伤保险基金领取丧葬补助金、供养亲属抚恤金和一次性工亡补助金：

——丧葬补助金按统筹地区上年度职工月平均工资6个月支付；

——供养亲属抚恤金按照职工本人工资的一定比例发给由因工死亡职工生前提供主要生活来源、无劳动能力的亲属。标准为：配偶每月40%，其他亲属每人每月30%，孤寡老人或者孤儿每人每月在上述标准的基础上增加10%，核定的各供养亲属的抚恤金之和不应高于因工死亡职工生前的工资；

——一次性工亡补助金标准按上一年度全国城镇居民人均可支配收入的20倍支付。

表6‑11为举例计算结果，根据国家统计局资料，2018年全国城镇居民人均可支配收入39251元，人均年工资约8万元。假设供养亲属抚恤金赔偿比例为70%，赔偿10年。经计算，1人死亡的赔偿总额约为138万。

表6‑11 赔偿金额计算结果

|  |  |
| --- | --- |
| 赔偿项目 | 赔偿标准（近似值） |
| 丧葬补助金 | 8万元/年×0.5年=4万元 |
| 供养亲属抚恤金 | 5.6万/年×10年=56万元 |
| 死亡赔偿金 | 39251元/年×20年=78.5万元 |
| 合计 | 约138.5万元 |

综上，为了与1亿元直接经济损失和30人以上死亡严重后果相当，也不考虑相对的经济损失占比，1人死亡相当于约400万元直接经济损失。

Ⅲ）环境影响

表6‑12 《Q/CR 9006-2014铁路建设工程风险管理技术规范》[26]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 后果等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 自然环境影响 | 涉及范围非常大，周边生态环境发生严重污染或破坏 | 涉及范围很大，周边生态环境发生较重污染或破坏 | 涉及范围较大，邻近区域内生态环境发生污染或破坏 | 涉及范围较小，邻近区域生态环境发生轻度污染或破坏 | 涉及范围很小，施工区域生态环境发生少污染或破坏 |
| 社会环境影响 | 恶劣的，或需转移安置1000人以上 | 严重的，或需转移安置500人~1000人 | 较严重的，或需转移安置100人~500人 | 需考虑的，或需转移安置50人~100人 | 轻微的，或需转移安置小于50人 |

表6‑13 《GB50652-2011城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》[27]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 影响范围及程度 | 涉及范围非常大，周边生态环境发生严重污染或破坏 | 涉及范围很大，周边生态环境发生较重污染或破坏 | 涉及范围较大，区域内生态环境发生污染或破坏 | 涉及范围较小，邻近区域生态环境发生轻度污染或破坏 | 涉及范围很小，施工区域生态环境发生少污染或破坏 |

结合以上两个标准，环境影响分为自然环境和社会环境两个方面，并考虑到公路隧道施工相比化工等工业活动对环境的影响较轻，所以淡化了各等级的定性描述措辞，从整体上看降低了一级。同时，为了与人员伤亡等级保持一致，取死亡人数的等级上限人数作为当量值，当量值分别为：10、3、1、1/2、0。

Ⅳ）社会影响

表6‑14 《Q/CR 9006-2014铁路建设工程风险管理技术规范》[26]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 后果等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 社会影响 | 绝大部分群众有意见、反应极其强烈，可能引发大规模群体性事件 | 大部分群众有意见、反应特别强烈，可能引发较大规模群体性事件 | 部分群众有意见、反应强烈，可能引发矛盾冲突 | 多数群众理解支持但少部分人有意见、通过有效工作可防范与化解矛盾 | 绝大多数群众理解支持，极少数人有意见，矛盾易化解 |

本标准社会影响分级描述参考该标准，并淡化措辞，整体上减低一级。当量值取法方法和环境影响取值相同，即为10、3、1、1/2、0。

Ⅴ）工期延误

表6‑15 《Q/CR 9006-2014铁路建设工程风险管理技术规范》[26]

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 后果等级 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 控制工期工程 | 绝对延误时间（月/单一事故） | >12 | 6~12 | 3~6 | 0.5~3 | ≤0.5 |
| 相对延误时间（%） | >50 | 20~50 | 10~20 | 5~10 | ≤5 |
| 非控制工期工程 | 绝对延误时间（月/单一事故） | >24 | 12~24 | 6~12 | 1~6 | ≤1 |
| 相对延误时间（%） | >100 | 50~100 | 25~50 | 10~25 | ≤10 |

表6‑16 《GB50652-2011城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》[27]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 长期工程 | 延误大于9个月 | 延误6个月~9个月 | 延误3个月~6个月 | 延误1个月~3个月 | 延误少于1个月 |
| 短期工程 | 延误大于90d | 延误大于60d~90d | 延误30d~60d | 延误10d~30d | 延误少于10d |

表6‑17 国际隧协：Guidelines for tunnelling risk management[18]

Delay(two alternative examples are shown)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Disastrous | Severe | Serious | Considerable | Insignificant |
| Delay(1)(months per hazard) | >10 | 1-10 | 0.1-1 | 0.01-0.1 | <0.01 |
| Delay(2)(months per hazard) | >24 | 6-24 | 2-6 | 1/2-2 | <1/2 |

综上，本指南将工期延误分为两类：控制工期工程和非控制工期工程，并征求专家意见，令1个当量=3个月非控制工期工程=1个月控制工期工程。

结合以上规范和说明，1个当量=1人死亡=400万经济损失=三级的社会或环境影响=3个月非控制工期工程=1个月控制工期工程。

在之前的指南中，是利用就高原则考虑多种后果，而后果当量法的引入，是通过综合考虑每种后果影响的当量值，完善就高原则中不尽合理之处。因此，划分等级区间也是按照符合就高原则，并进一步优化就高原则的方法进行。

为计算后果当量法各区间端点值，取后果各区间下限值。值得注意的是，本标准淡化措辞后，由当量值可知环境、社会影响后果为五级时相当于人员死亡的四级，依次类推。确定等级时，将环境和社会影响当量值提高一个等级，保持和人员死亡后果当量一致，避免因同等级下环境和社会影响当量过小导致的等级下限值过低。环境和社会影响提高后的各等级从高到低的当量值为：30、10、3、1、1/2（本标准实际为10、3、1、1/2、0）。

表6‑18 后果各区间下限值

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 人员死亡 | 30 | 10 | 3 | 1 | 0 |
| 直接经济损失 | 10000 | 5000 | 1000 | 100 | 0 |
| 环境影响 | 30 | 10 | 3 | 1 | 1/2 |
| 社会影响 | 30 | 10 | 3 | 1 | 1/2 |
| 工期延误 | 24 | 12 | 6 | 1 | 0 |

对于五种后果等级出现5、5、5、5、*X*（组合一）的情况，后果等级按照就高原则取*X*级，后果当量法也与之保持一致。取5、5、5、5、*X*等级的下限值代入本标准公式计算，结果如下：

表6‑19 组合一试算结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 死亡人数 | 直接经济损失 | 工期延长 | 环境影响 | 社会影响 | 计算结果 | 等级下限值 |
| 4级 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2.00 | 1 |
| 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 1.25 |
| 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 1.33 |
| 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 1.50 |
| 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1.50 |
| 3级 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4.00 | 3 |
| 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 3.50 |
| 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 3.00 |
| 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 3.50 |
| 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3.50 |
| 2级 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 11.00 | 10 |
| 5 | 2 | 5 | 5 | 5 | 13.50 |
| 5 | 5 | 2 | 5 | 5 | 5.00 |
| 5 | 5 | 5 | 2 | 5 | 10.50 |
| 5 | 5 | 5 | 5 | 2 | 10.50 |
| 1级 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 31.00 | 30 |
| 5 | 1 | 5 | 5 | 5 | 26.00 |
| 5 | 5 | 1 | 5 | 5 | 9.00 |
| 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 30.50 |
| 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 30.50 |

综上后果当量法划分区间为：

表6‑20 后果当量法等级区间划分

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 后果等级 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 当量值*DC* | *DC*<1 | 1≤*DC*<3 | 3≤*DC*<10 | 10≤*DC*<30 | *DC*≥30 |

对于五种后果等级出现*X*、*X*、*X*、*X*、*X*+1（组合二）情况，与5、5、5、5、*X*相同，就高原则均定为*X*级，显然不太合理，利用后果当量法则可以区分，以下是试算结果：

表6‑21 组合二试算结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 就高原则等级 | 死亡人数 | 经济损失 | 工期延长 | 环境影响 | 社会影响 | 计算结果 | 后果当量等级 |
| 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2.58 | 4 |
| 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3.33 | 3 |
| 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3.25 | 3 |
| 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 2.75 | 4 |
| 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 2.75 | 4 |
| 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 11.50 | 2 |
| 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 11.25 |
| 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 11.83 |
| 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 11.50 |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 11.50 |
| 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 39.50 | 1 |
| 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 36.50 |
| 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 44.50 |
| 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 39.50 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 39.50 |

由上表知，对于4级组合的情况，部分上升为3级，而对于3和2级的组合情况，后果当量法计算后均上升一个等级，从逻辑上看也是合理的。

综上所述，后果当量法相对于就高原则有其优越性，且该等级区间划分也较为合理，从只考虑人员死亡后果的角度看，该等级也符合《生产安全事故报告和调查处理条例》[4]，可见，该后果当量法是基于人员伤亡进行当量换算的。

此外，这里给出了直接经济损失的统计范围。根据《企业职工伤亡事故经济损失统计标准》（GB 6721-86)[29]，伤亡事故经济损失指企业职工在劳动生产过程中发生伤亡事故所引起的一切经济损失，包括直接经济损失和间接经济损失。

直接经济损失指因事故造成人身伤亡及善后处理支出的费用和毁坏财产的价值，其统计范围为：

人身伤亡后所支出的费用：医疗费用(含护理费用)、丧葬及抚恤费用、补助及救济费用、歇工工资；

善后处理费用：处理事故的事务性费用、现场抢救费用、清理现场费用、事故罚款和赔偿费用；

财产损失价值：固定资产损失价值、流动资产损失价值。

间接经济损失指因事故导致产值减少、资源破坏和受事故影响而造成其它损失的价值，其统计范围为：

停产、减产损失价值；

工作损失价值；

资源损失价值；

处理环境污染的费用；

补充新职工的培训费用；

其它损失费用。

本标准中“直接经济损失”统计范围和该标准保持一致，此外还考虑了人员伤亡、社会影响、环境影响和工期延误等后果。需注意，在“直接经济损失”中考虑了人员伤亡的赔偿等费用，更多侧重于企业的支出费用，而“人员伤亡”则是从社会管理和评价事故对社会和人类的影响的角度考虑的，应注意区分。

⑥专项风险等级标准规定了较小风险(Ⅳ级)、一般风险(Ⅲ级)、较大风险(Ⅱ级)、重大风险(Ⅰ级)四个风险等级，风险等级利用风险矩阵，由风险事件可能性和严重程度组成的矩阵表来综合判定。

⑦风险源估测结果应分别按照一般和重大风险源进行汇总，以便查阅。

（5）一般风险源风险估测

①一般风险源风险估测，可采用定性方法（如检查表法），或半定量方法（如LEC法）等确定风险等级。

②检查表法把检查对象加以分解，将大系统分割成若干子系统，以提问或打分的形式，将检查项目列表逐项检查，即做一份安全检查和危险诊断的项目明细表、备忘录。安全检查表法可以直观地反映出问题，可以作为评估者评估时提出对策建议的重要依据，并且可以使对策建议更有针对性和可操作性，通风安全检查表示例如表6-22所示。

表6‑22 隧道通风安全检查表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 检查内容 | 检查依据 | 检查结果 | 备注 |
| 1.空气中有害物质容许浓度  2.通风设备  3.自动报警装置  4. …… | 1.空气中有害物质容许浓度是否满足施工规范要求。  2.通风设备数量是否足够，通风设备是否开启。  3.自动报警装置指示灯是否完好，监测系统是否正常工作。  4. …… |  |  |

③LEC法（作业条件危险性评价法）

LEC法是根据作业人员在具有潜在危险性环境中作业，以影响作业条件危险性的因素进行评价的方法。作业条件危险性评价法的评价步骤如下：

a）组成专家组。

b）对于一个具有潜在危险性的作业条件，确定事故类型，找出影响危险性的主要因素：*L*—事故发生的可能性；*E*—人员暴露于危险环境的频繁程度；*C*—发生事故可能造成的后果。

c）由专家组成员按规定标准对 *L*、*E*、*C* 分别评分，取分值集的平均值作为 *L*、*E*、*C* 的计算分值。用计算的危险性分值（*D*）评价作业条件的危险性等级。其计算公式为：

** (1)

式中：*L*—事故发生的可能性大小，取值见表6‑23；

*E*—人员暴露于危险环境的频繁程度，取值见表6‑24；

*C*—发生事故可能造成的后果，取值见表6‑25；

*D*—危险性分值，确定危险等级的划分标准见表6‑26。

表6‑23 事故发生的可能性分值*L*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分数值 | 10 | 6 | 3 | 1 | 0.5 | 0.2 | 0.1 |
| 事故发生的可能性 | 完全会被预料到 | 相当可能 | 可能，但不经常 | 完全意外，可能小 | 可以设想，不太可能 | 极不可能 | 实际上不可能 |

表6‑24 暴露于危险环境的频繁程度分值*E*

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分数值 | 10 | 6 | 3 | 2 | 1 | 0.5 |
| 暴露于危险环境的频繁程度 | 连续暴露 | 每天工作时间内暴露 | 每周一次或偶然暴露 | 每月暴露一次 | 每年暴露几次 | 非常罕见暴露 |

表6‑25 事故造成的后果分值 *C*

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分数值 | 100 | 40 | 15 | 7 | 3 | 1 |
| 事故造成的后果 | 10人以上死亡 | 3人以上9人以下死亡 | 1人死亡 | 严重伤残 | 有伤残 | 轻伤，需救护 |

表6‑26 危险性等级划分标准

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 危险性分值*D* | ≥320 | ≥160～320 | ≥70～160 | ≥20～70 | <20 |
| 危险程度 | 极度危险，  不能继续作业 | 高度危险，  需要整改 | 显著危险，需要整改 | 比较危险，  需要注意 | 稍有危险，  可以接受 |
| 危险等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

一般情况下，事故发生的可能性越大，风险越大；暴露于危险环境的频繁程度越大，风险越大；事故产生的后果越大，风险越大。运用作业条件危险评价分析法进行分析时，对于风险分值高于70分及以上的，列为重大风险源并进行风险估测。

④以列表方式汇总一般风险源风险等级。

（6）重大风险源风险估测

①一般要求

a）重大风险源风险估测应分为施工前重大风险源估测和施工过程重大风险源估测，两者分别与施工前、施工过程专项风险评估对应，主要考虑到施工前、施工过程获取评估信息手段、评估指标体系、评估方法的变化等因素。通常来讲，施工过程可获取的指标信息、评估方法更为多样，评估指标体系更为复杂，指标更加准确、可靠。

b）重大风险源往往在一个工程中常多处存在，为了找出风险控制的重点，应进行定量风险估测，即先确定风险事件可能性和严重程度，再基于风险矩阵法确定该风险事件的风险等级。

②施工前重大风险源估测

a）本标准中风险事件可能性是根据施工前风险事件可能性评估指标体系，结合工程实际情况对评估指标赋值，再将分值进行加乘运算求得综合评分，参照各施工前风险事件可能性等级标准得出风险等级。

根据国内外969条隧道的各类灾害或潜在灾害统计结果，塌方、岩爆、瓦斯爆炸、大变形以及涌水突泥是隧道施工中频繁发生的。如图6‑7和图6‑8所示，统计数据中共有隧道大变形灾害事件265起，占总数的27.4%；塌方事件483起，占总数的49.9%；瓦斯爆炸事件47起，占总数的4.9%；岩爆事件92起，占总数的9.5%；涌水突泥事件81起，占总数的8.4%。此外隧道洞口段施工往往作为隧道工程的主要控制工程段，其结构及地层通常具有稳定性差、受力复杂、施工技术难度高和支护工程量大等特点，因此隧道洞口段易发生失稳坍塌、滑坡等灾害，处置不当将严重影响工程作业人员的生命财产安全和施工进度。故本标准主要考虑洞口失稳、坍塌、涌水突泥、大变形、瓦斯爆炸和岩爆等6种风险事件类型，并建立相应的风险事件可能性评估指标体系。

在评估过程中，可根据工程实际情况对现有评估指标进行适当增减，其它风险事件可借鉴参考建立相应的风险事件可能性评估指标体系。对于施工前专项风险评估指标体系中指标分值范围的确定，宜采用固定指标、重点考虑各指标的相互影响进行分值范围的确定。

Graph2

图6‑7 隧道各类事故发生比例

Graph1

图6‑8 隧道发生各类灾害的数量

b）连拱隧道指两洞拱部衬砌结构通过中柱相连接的隧道结构，是一种常用于复杂特殊地形的结构型式。与分离式隧道相比，连拱隧道施工更为复杂，且不同开挖顺序对隧道结构及围岩的影响难以把握，施工风险较大。

小净距隧道指上下行双洞洞壁净距较小，不能按独立双洞考虑的隧道结构。当前，我国在小净距隧道设计、施工以及其关键技术等方面的研究尚未成熟，理论研究尚未形成体系，施工风险较大。故需考虑这两种隧道类型对各风险事件可能性造成的影响，在本标准中作为修正值体现。

资料完整性是指地质、水文、气象、勘察设计等相关资料的完整性。从评估角度来看，资料完整性可理解为隧道现有资料对于本标准评估指标的满足程度，即评估小组根据隧道现有资料能否得出较为准确的分值，若不能，则评估小组需凭主观经验估算赋值，这对评估结果的影响较大，故引入资料完整性作为修正指标。

c）降水通常会增加洞口施工难度，增大失稳风险，故将年均降水量作为地形地质条件的修正系数；将隧道开挖跨度与被洞口偏压角度修正过的洞口浅埋段长度分值相加，再与降水量、地质条件对应的系数、隧道类型和资料完整性修正系数相乘得到被评价施工区段发生洞口失稳事故的可能性等级。

施工前各风险事件等级区间划分方法如下：通过对每个指标分值进行随机抽样106次，代入各风险事件可能性计算公式，并画出分值的累计频率曲线，结合坍塌和涌水风险事件的工程案例试算（坍塌、涌水风险事件案例较多，且现行指南有相对应的评估指标体系，因此以坍塌和涌水风险事件试算结果为主要参考依据，通过对比现行指南和本标准的评估分值情况，结合累计频率曲线确定合适的累计频率占比，来划分其余风险事件的分级区间，试算结果和分级区间确定说明见6.6.2.4和6.6.2.5）。

图6‑9为隧道施工前洞口失稳风险事件可能性评估分值累计频率曲线，分级区间取累计频率曲线占比分别为<3%、3~20%、20~50%、50~80%、>80%作为洞口失稳的五个等级区间。



图6‑9 隧道施工前洞口失稳风险事件可能性评估分值累计频率曲线

d）将断层破碎带宽度、优势结构面倾角、预测涌水量作为隧道围岩级别的系数来处理，主要考虑到三者往往表现为对围岩强度的削减作用；围岩级别、浅埋隧道偏压角度、隧道开挖跨度是引发坍塌事故的重要因素，将三者进行加和，与修正系数相乘得到被评价施工区段发生坍塌事故的可能性等级。

坍塌风险事件案例试算结果见表6‑27和图6‑10，现行指南最高等级为Ⅳ级。由表6‑27和图6‑10易知，现行指南Ⅰ级和Ⅱ级的分界点约为25分，对应本标准坍塌风险事件可能性评估分值累计频率约为20%，现行指南Ⅱ级和Ⅲ级的分界点约在30~35分之间，对应本标准累计频率约为50%；现行指南Ⅲ级和Ⅳ级的分界点在45分以上，对应本标准累计频率约为80%。此外，考虑到各分级区间长度相差不宜太大，取累计频率曲线占比分别为<3%、3~20%、20~50%、50~80%、>80%作为坍塌的五个等级区间。

表6‑27 坍塌风险事件试算结果汇总

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 风险事件 | 依据本标准试算分数 | 依据现行指南评估等级 |
| 坍塌 | 38 | Ⅲ |
| 28 | Ⅱ |
| 31 | Ⅲ |
| 28 | Ⅱ |
| 33 | Ⅲ |
| 28 | Ⅱ |
| 31 | Ⅲ |
| 40 | Ⅲ |
| 23 | Ⅱ |
| 40 | Ⅲ |
| 36 | Ⅲ |
| 30 | Ⅱ |
| 36 | Ⅲ |
| 40 | Ⅲ |
| 10 | Ⅱ |
| 26 | Ⅱ |
| 36 | Ⅲ |
| 38 | Ⅲ |
| 28 | Ⅱ |
| 34 | Ⅲ |
| 43 | Ⅲ |
| 32 | Ⅱ |
| 41 | Ⅲ |
| 31 | Ⅱ |
| 41 | Ⅲ |
| 44 | Ⅲ |
| 32 | Ⅱ |



图6‑10 隧道施工前坍塌风险事件可能性评估分值累计频率曲线

e）水体情况往往作为补充水体增加涌水突泥风险，故将其作为“扩大修正”系数；不良地质和岩溶发育程度往往与涌水量有直接关系故将其加和作为预测涌水量的“修正”系数，再与周围水体情况确定的系数、修正系数相乘得到被评价施工区段的涌水突泥风险事件可能性等级。

涌水突泥风险事件案例试算结果见表6‑28和图6‑11，搜集的工程评估报告资料中等评估级按照五级划分，和本标准相同。由表6‑28和图6‑11易知，Ⅴ级和Ⅳ级的分界点约为5分，对应本标准涌水突泥风险事件可能性评估分值累计频率约为20%，Ⅱ级和Ⅰ级的分界点约为40分，对应本标准累计频率约为95%。此外，结合坍塌的划分标准，取累计频率占比分别为<20%、20~50%、50~80%、80~95%、>95%作为涌水突泥的五个等级分值区间。

表6‑28 涌水突泥风险事件试算结果汇总

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 风险事件 | 依据本标准试算分数 | 评估等级 |
| 涌水突泥 | 3 | Ⅴ |
| 40 | Ⅱ |
| 42 | Ⅰ |
| 8 | Ⅳ |
| 21 | Ⅱ |



图6‑11 隧道施工前涌水突泥风险事件可能性评估分值累计频率曲线

f）将断层破碎带宽度、预测涌水量作为围岩级别的修正系数，主要考虑到两者会在一定程度上弱化围岩强度。隧道开挖跨度、浅埋隧道偏压角度、围岩级别、地应力是引发大变形事故的重要因素，将四者进行加和，与修正系数相乘得到被评价施工区段的大变形风险事件可能性等级。

图6‑12为隧道施工前大变形风险事件可能性评估分值累计频率曲线，参考坍塌的划分标准，取累计频率曲线占比分别为<3%、3~20%、20~50%、50~80%、>80%作为大变形的五个等级区间。



图6‑12 隧道施工前大变形风险事件可能性评估分值累计频率曲线

g）将瓦斯压力作为瓦斯涌出量的“修正”系数，是因为压力越大则单位时间内隧道瓦斯涌出量越多；将隧道距煤层距离作为煤层厚度的“修正”系数，是因为隧道距煤层距离越小，煤层厚度才会对隧道施工安全的威胁越大，发生瓦斯爆炸的风险越大。两指标分别与对应的“修正”系数相乘后再相加，得到被评价施工区段的瓦斯爆炸风险事件可能性等级。

图6‑13为隧道施工前瓦斯爆炸风险事件可能性评估分值累计频率曲线，参考坍塌的划分标准，取累计频率曲线占比分别为<3%、3~20%、20~50%、50~80%、>80%作为瓦斯爆炸的五个等级区间。



图6‑13 隧道施工前瓦斯爆炸风险事件可能性评估分值累计频率曲线

h）三个指标从不同角度揭示岩爆影响因素，其中地应力是诱发岩爆关键指标，将岩体质量指标RQD、岩石单轴饱和抗压强度作为地应力的系数来处理，三者之积再与修正系数相乘，就可得到被评估区段的岩爆风险事件可能性等级。

图6‑14为隧道施工前岩爆风险事件可能性评估分值累计频率曲线，参考涌水突泥的划分标准，取累计频率曲线占比分别为<20%、20~50%、50~80%、80~95%、>95%作为岩爆的五个等级区间。



图6‑14 隧道施工前岩爆风险事件可能性评估分值累计频率曲线

③施工过程重大风险源估测

a）本标准建立了隧道洞口失稳、坍塌、涌水突泥、大变形、瓦斯爆炸、岩爆6个施工过程风险事件可能性评估指标体系。与施工前的不同之处在于，施工过程引入了地质超前预报、监控量测等动态指标。参照相关标准规范和隧道实际工程经验，对施工过程隧道洞口失稳、坍塌、涌水突泥、大变形、瓦斯爆炸、岩爆等6个风险事件可能性评价指标体系作出说明，见附录A.7-A.12。对于施工过程专项风险评估指标体系中指标分值范围的确定，宜结合动态评估的原则，采用灵活指标，重点考虑各指标对风险事件影响的重要程度。

b）施工过程重大风险源估测采用定性和定量相结合的方法。风险事件严重程度的估测宜采用后果当量法，风险事件可能性的估测方法宜采用指标体系法，指标权重的确定推荐采用重要性排序法。

重要性排序法确定指标权重的步骤如下：

重要性排序法是根据评估指标与风险事件发生可能性以及后果严重程度(优先考虑人员伤亡)的相关性，进行综合评判后，将各评估指标按重要性从高到低依次进行排序，权重系数按公式(2)计算。根据指标个数和重要性程度可按照附录A.13直接选取各评估指标的权重系数。

 (2)

式中：—权重系数；*n*—评估指标项数；*m*—重要性排序号，*m*≤*n*。

d）施工过程重大风险源估测与施工前相比，评估指标的揭露程度更高，对各指标的准确把握要求也更高，因此与施工前指标各等级固定分值不同，施工过程采用百分制打分和权重来综合定量估测。通过动态权重来满足施工过程复杂的现场实际情况，充分发挥评估小组的主观经验，达到准确评估的目的。风险事件可能性为该风险事件各评估指标的评估分值*Rij*与对应的指标权重*γij*的乘积之和。

由于施工过程风险事件评估指标体系采用百分制打分并结合指标权重，各风险事件可能性分值累计频数曲线基本相同，见图6‑15，因此统一划分等级。参考施工前坍塌风险事件的划分标准，以累计频率占比分别为<3%、3~20%、20~50%、50~80%、>80%作为五个等级区间，对应的分值约是以10分为步距，从小于30分到大于60分。



图6‑15 隧道施工过程风险事件可能性评估分值累计频率曲线

④当施工区段情况特别复杂，需要结合现场监控量测等手段，必要时还应借助数值模拟等手段进行重大风险源估测。采用层次分析法、未确知测度法等综合判定方法，具体说明如下：

a）层次分析法

第一步：建立重大风险安全风险指标多层次结构模型，见图6‑9。



图6‑16 层次结构模型

第二步：通过两两比较确定两指标间相对重要程度，可采用1~9标度法进行取值确定两指标间相对重要程度，见表6‑29，建立判断矩阵表，判断矩阵中*aij*表示指标*ai*相对于指标*aj*的重要程度，见表6‑30。

表6‑29 因素两两比较的标度

|  |  |
| --- | --- |
| 标度值*a*ij | 含义 |
| 1 | 表示两个因素相比，前者比后者同等重要 |
| 3 | 表示两个因素相比，前者比后者稍重要 |
| 5 | 表示两个因素相比，前者比后者明显重要 |
| 7 | 表示两个因素相比，前者比后者强烈重要 |
| 9 | 表示两个因素相比，前者比后者极端重要 |
| 2，4，6，8 | 表示上述相邻判断的中间值 |
| 倒数 | 因素一与因素二比较结果是因素二与因素一重要性比较结果的倒数 |

表6‑30 指标间两两判断矩阵表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 判断项指标 | *A*1 | *A*2 |  | *Aj* |  | *An* |
| *A*1 | *a*11 | *a*12 |  | *a*1*j* |  | *a*1*n* |
|  |  |  |  |  |  |  |
| *Ai* | *ai*1 | *ai*2 |  | *aij* |  | *ain* |
|  |  |  |  |  |  |  |
| *An* | *an*1 | *an*2 |  | *anj* |  | *ann* |

第三步：按照式(3)计算判断矩阵中每行元素的几何平均值，再按照式(4)进行归一化处理得到相对权重值*wi*。

 (3)

 (4)

第四步：通过式(5)计算判断矩阵的最大特征值*λ*max，计算*CI*进行一致性检验，随机一致性指标*RI*见表6‑31，若*CI*/*RI*<0.1，则判断矩阵符合要求，否则应写出新的矩阵，重新进行计算。所有判断矩阵符合要求时，计算各层次指标的组合权重。

 (5)

 (6)

式中，*CI* —判断矩阵的一般一致性指标，*n*—判断矩阵的阶数。

表6‑31 随机一致性指标*RI*取值表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *n* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| *RI* | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 |

b）未确知测度法

第一步：建立隧道专项风险评估的风险事件评估指标体系。删除具有较大相关性的风险指标，选择具有代表性的风险指标，形成具有相互独立性的隧道风险指标体系，指标体系包含几个大类，各大类中包括多项指标，即评价因子。

首先将定性指标通过相关文献及专家建议定量化，再运用分级标准化法将每个指标分为4级，建立评判集为*U*={*C*1,*C*2,*C*3,*C*4}，即Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级，分别代表风险性极高、风险性高度、风险性中度和风险性低度，每级都根据专家建议设置一个取值标准，形成分级标准评定表：

表6‑32 分级标准评定表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 评价因子 | 分级标准 | | | |
| Ⅰ级(*C*1) | Ⅱ级(*C*2) | Ⅲ级(*C*3) | Ⅳ级(*C*4) |
| 评价因子1 | ＞*c1* | *b1*~*c1* | *a1*~*b1* | ＜*a1* |
| 评价因子2 | ＞*c2* | *b2*~*c2* | *a2*~*b2* | ＜*a2* |
| … | … | … | … | … |
| 评价因子*m* | ＞*cm* | *bm*~*cm* | *am*~*bm* | ＜*am* |

结合工程实际、相关规范和专家建议，对施工中隧道的各评价指标进行赋值，见表6‑33。

表6‑33 风险评估指标调查统计表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 评价指标 | 评价因子 | 评价赋值 |
| 评价指标1 | 评价因子1 | *α* |
| 评价因子2 | *β* |
| … | … | *…* |
| 评价指标*n* | 评价因子*m* | *γ* |

第二步：建立隧道施工安全状态各影响因素的未确知测度函数。单指标测度函数的定义为：

 (7)

 (8)

 (9)

式中，*i*=1，2，…，*n*；*j*=1，2…，*m*；*k*=1，2，3，4；*Xi*表示第*i*个指标的测量值；*μ*为未确知测度。

根据上述单指标测度的定义及表6‑32和表6‑33，构建单指标测度函数(函数图形见图6‑17、图6‑18、图6‑19)以便求得隧道施工各评价指标的测度。



图6‑17 评价因子1的未确知函数



图6‑18 X评价因子2的未确知函数



图6‑19 X评价因子*m*的未确知函数

将表6‑33中评价因子代入上述的单指标测度的函数中，可计算得到单指标评价矩阵。

 (10)

第三步：利用信息熵理论计算各评估指标的指标权重。指标区分权重是指评价因子*Xi*与其它因子相比具有的相对重要程度，记作。令：

 (11)

式中：为指标*j*提供的信息量；*k*为评价等级的数量；为单指标测度。

各指标的权重为：

(12)

第四步：依照置信度识别准则判定等级。

根据指标权重可得到综合测度，表示*Xi*隶属于第*k*个等级的程度，即：

(*i*=1，2…，*n*；*k*=1，2，3，4) (13)

得综合测度评价矩阵：

(14)

为了得到最优评价结果，引入置信度评价准则，设*λ*为置信度(*λ*≥0.5)。若评价空间{*C*1,*C*2,…,*Cp*}是有序的，且*C1*＞*C*2＞…＞*Cp*，令：

(15)

则认为优化对象*Ri*属于第*k*0个评价类*Ck0*。

第五步：根据风险事件发生的可能性、严重程度等级，采用风险矩阵法确定重大风险源的施工安全风险等级。并将专项风险评估的风险等级用不同颜色在施工、形象进度图中标识出来，形成施工安全风险分布图，并附于评估报告中，同时以列表方式将不同施工区段的重大风险源列表说明。

### **. 风险控制**

（1）一般要求

风险控制措施是风险评估的最终目的，应根据风险源辨识、风险分析、风险估测的结果，特别是风险分析的结果，从管理手段、技术手段、安全教育、应急救援等方面提出风险控制措施建议。

我国要求隧道施工必须遵守国家和行业的质量验收标准，建立完善的质量保证体系，制定切实可行的质量管理制度和措施，确保工程质量；必须遵守国家的劳动保护法规，积极改善隧道施工条件，制定切实可行的防止噪声、粉尘、废水污染环境的措施，保护原有植被地貌，对施工废弃物应妥善处理，做到文明施工；必须遵守国家关于生态保护、环境保护的法律法规，保护原有植被地貌，施工废弃物应妥善处理，做到文明施工。

因评估对象和作用不同，本标准将总体和专项风险评估的控制对策区别开来。

①对于总体风险评估结果，其作用主要是配置人员、装备等资源，以及作为是否开展专项风险评估的依据，因此，总体风险评估的控制对策是围绕这些方面展开。值得注意的是，由于隧道选线等设计均具有较为充分的依据，所以总体风险评估的控制对策未涉及隧道选线、大的设计变更等方面的内容。

②因专项风险评估对隧道施工具有直接指导意义，所以专项风险评估的控制对策是围绕施工和更为具体的控制措施展开。根据不同的风险等级提出分级控制措施，确定层级责任和责任人，实施现场管理和监控预警，根据风险等级的不同分别采取不同的针对措施。

日常管理是施工单位按照国家、行业或地方的有关安全生产的法律法规、标准规范等制定风险控制措施，对工程实行日常管理。

监控预警是施工单位或业主委托第三方监控单位，对风险源采取监控和预警预报体系，明确预警预报标准，通过对施工监控数据的动态管理，及时掌握其发展状态，发现异常或超过警戒值，应及时采取规避措施。

专项整治是指在分析风险原因的基础上对重大风险源采取专项整治措施，包括对完善设计方案、调整施工方法和组织、加强安全措施、改善施工环境、加强现场管和提高人员素质等多方面的综合考虑，必要时须暂停施工，全面整治。

应急准备是除采取以上控制措施外，还应提出典型重大风险事件的应急预案，做好事故应急处置准备工作。应根据风险事件类型和发展态势，对采用专项整治不能及时控制风险的，制定应急措施，做好应急准备，确保事故不造成严重后果。

（2）风险控制措施

①总体风险评估应重点提出风险控制的方向与总体思路，以及安全管理力量投入、资源（财、物）配置、对施工单位的要求。

②专项风险评估应针对风险源提出系统全面、重点突出的控制措施建议，作为现场安全管理、专项施工方案编制和完善、安全交底和应急处置的依据。专项风险评估中风险等级为较大风险 (Ⅱ级)及以上时，应分析主控因素指标，提出有针对性的措施降低风险。

③应按照隧道工程专项风险评估的结论，充分考虑工程实际情况，按照不同风险等级，制定适宜的重大风险源风险控制措施。当风险产生的后果可能为突发性事故（坍塌、瓦斯爆炸、涌水突泥等）时，风险处理必须明确设计措施和预案、施工工序、注意事项、监控要求和施工应急措施等，并进行有效的风险管理。

④风险控制措施包括调整施工方案、加强安全措施等。

⑤调整施工方案主要包括：

a）合理调整施工顺序。对施工工序从时间顺序和空间次序上进行合理调整或优化，降低施工风险。

b）改进施工工艺。从专用设备、施工方法、工艺参数上改进，预防和减少发生事故。

⑥加强安全措施，除应执行现行的有关标准、规范外，还应根据实际工程特点，采取有效、可操作性强的安全措施，降低施工安全风险。主要包括：

a）安全管理措施。包括监测预警、对不安全场所进行安全隔离或加固防护、设立警告标志、人工警戒或专人指挥等。

b）安全替代措施。对人工直接操作有较大风险的，宜用机械或其它方式替代人工操作。

c）应急救援措施。制定应急预案和做好应急准备，明确关键岗位应急职责、危险作业应急处置措施。

（3）风险控制预期效果评估

①专项风险等级评估为较大风险(Ⅱ级)、重大风险(Ⅰ级)的风险事件一旦发生，会造成较大的人身伤亡和财产损失等。因此，有必要开展风险控制预期效果评估，包括对风险控制措施制定情况的确认评价以及风险控制措施实施后的预期效果评估。

风险控制措施制定情况的确认评价过程中采用的安全检查表，应包含方案中采取的风险控制措施，以确定风险控制措施是否有完整、可行、有效，同时对风险控制措施的问题和不足进行记录，以便后期进一步完善风险控制措施。

安全检查表法是依据相关的标准、规范，对工程、系统中已知的危险类别、设计缺陷以及与一般工艺设备、操作、管理有关的潜在危险性和有害性进行判别检查。适用于工程、系统的各个阶段，是系统安全工程的一种最基础、最简便、广泛应用的系统危险性评价方法。

②本条介绍了采取风险控制措施后预期风险的评审方式。评审依据是典型施工情况与风险控制措施制定的情况。

以评审结论为基础，通过风险矩阵法，确定采取措施后预期风险等级。预期风险等级共有四级：较小风险(Ⅳ级)、一般风险(Ⅲ级)、较大风险(Ⅱ级)、重大风险(Ⅰ级)。

③风险控制预期效果评估报告宜以报表形式反映，报表中应包含风险控制措施的制定情况、采取措施后预期风险的等级、完善风险控制措施的建议等。

### **. 风险评估报告编制**

（1）一般要求

①本标准给出了风险评估报告编制内容的整体要求。工作记录就是指专项评估流程图中所列的各个表格，评估结果主要是重大风险源的情况总结，控制措施建议就是应采取、宜采取的主要措施。另外，专家调查过程中的各类问卷结果也应附到报告中。

（2）风险评估报告编制内容

②本标准给出了总体风险评估报告、专项风险评估报告内容要求，部分工程某些内容可能没有。另外，在内容序编排上也可以前后调整，但应包含规定的主要内容。

（3）风险评估报告评审

①本标准给出了风险评估报告评审的要求。

### **9. 附录A.1（资料性附录）隧道施工前洞口失稳****风险事件可能性评估指标体系**

根据前期现行指南的研究成果和专家意见，从隧道建设规模、地形特征、地质条件、水文地质条件等四个方面建立施工前洞口失稳风险事件可能性评估指标体系。其中建设规模包含了隧道开挖跨度一项指标，地形特征包含了洞口浅埋段长度、洞口偏压角度等指标，地质条件包含了围岩级别([BQ]值)、坡体结构等指标，水文地质条件包含了年平均降水量指标。

（1）隧道开挖跨度*X*11，参考《公路隧道施工技术细则》（JTG/T F60-2009）[14]，按开挖宽度*B*可将隧道划分为小跨度隧道、中跨度隧道、大跨度隧道、超大跨度隧道，开挖宽度*B*越大，隧道断面开挖持续时间较长，支护结构难以快速封闭成环，安全性问题越突出。

（2）洞口浅埋段长度*X*21，参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]，浅埋段是决定洞口处稳定性的重要因素，该段岩体质量往往相对较差，易受降水影响。洞口浅埋段长度越长，则该段施工时间越长，发生失稳的风险就会越大。

（3）洞口偏压角度*X*22，指的是垂直于隧道洞口的横剖面与地面的交线同水平面的夹角。参考《铁路隧道设计规范》（JB 10003-2016）[15]，大多数偏压隧道处于洞口段与浅埋段，地形因素造成的偏压对隧道洞口浅埋段的稳定性影响特别大，本标准以岩层倾角表示偏压情况[30, 31]，倾角越大，则发生洞口失稳、塌方等事故的可能性就越大。

（4）围岩级别([BQ]值)*X*31，参考《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]，按地下工程岩体质量指标[BQ]值确定岩体级别，围岩级别越低，则围岩质量越差，对应的洞口失稳风险也越大[32]。

（5）坡体结构*X*32，参考《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》（JTG 3370.1-2018）[33]，洞口应设于山坡稳定、地质条件较好的位置。与坡面正交的横交坡结构较为理想，而斜交坡、缓顺向坡、古滑坡体结构的失稳风险相对依次增加。

（6）年均降水量*X*41[13]，降水量过大，特别是持续的强降水，严重影响洞口工程施工。如果地表的排水、截水设施不完善，大量的地表水将会渗入地层。此外，降水容易在隧道浅埋段渗入隧道围岩，软化岩体并降低围岩强度，影响隧道围岩稳定性。故降水量越大，则洞口失稳风险越大。

根据降水量随地域分布的特征而言，我国大陆地区各年降水量主要分布在200mm~3000mm之间，且东南部降雨普遍比西北部多。隧道运营期间降水量对隧道风险的分为四级，其分级标准[34]为：

表A-1 隧道运营期降雨量对隧道的风险分级标准

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 等级 | Ⅰ级  （轻微） | Ⅱ级  （较轻微） | Ⅲ级  （中度） | Ⅳ级  （较严重） | Ⅴ级  （严重） |
| 降雨量/mm | <200 | 200~400 | 400~800 | 800~1600 | >1600 |

### **10. 附录A.2（资料性附录）隧道施工前坍塌风险事件可能性评估指标体系**

根据前期对现行指南的研究成果和专家意见，从隧道建设规模、地形特征、地质条件、水文地质条件等四个方面建立施工前坍塌风险事件可能性评估指标体系。其中建设规模包含了隧道开挖跨度指标，地形特征包含了浅埋隧道偏压角度等指标，地质条件包含了围岩级别([BQ]值)、断层破碎带宽度、优势结构面倾角等指标，水文地质条件包含了隧道预测涌水量指标。

（1）隧道开挖跨度*X*11，参考《公路隧道施工技术细则》（JTG/T F60-2009）[14]，按开挖宽度可将隧道划分为小跨度隧道、中跨度隧道、大跨度隧道、超大跨度隧道，开挖宽度越大，隧道断面开挖持续时间较长，支护结构难以快速封闭成环，安全性问题越突出。

（2）浅埋隧道偏压角度*X*21，是指垂直于隧道洞口的横剖面与地面的交线同水平面的夹角。参考《铁路隧道设计规范》（JB 10003-2016）[15]，大多数偏压隧道处于洞口段与浅埋段，地形因素造成的偏压对隧道洞口浅埋段的稳定性影响特别大，本标准以岩层倾角表示偏压情况，倾角越大，则发生洞口失稳、塌方等事故的可能性就越大[16, 35]。

（3）围岩级别([BQ]值)*X*31，参考《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]，围岩级别越低，则围岩质量越差，围岩自稳能力越差，对应的坍塌风险越大，对施工作业条件的要求也越高。评估过程中，同一施工区段内围岩级别不一的情况下，应取低值。

（4）断层破碎带宽度*X*32，参考《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]，一般而言，断层及其影响带内岩体往往较为破碎，且围岩等级较低，是地表水、地下水流动的天然通道，是引发坍塌的主要因素之一。本标准根据断层破碎带的宽度分类，宽度越大，则在断层破碎带及其影响带的施工周期越长，隧道坍塌的风险越高。

（5）优势结构面倾角*X*33，其概念来源于岩体结构控制理论。该理论认为岩石并非完整的，它被各种各样的结构面切割，这些结构面包括节理面、断层面、劈理面、软弱层等。优势结构面就是在上述各种结构面中按一定的优势指标找出对相应区域稳定性有控制作用的的结构面，优势指标可以是时间、性质、数量、规模和分形等[36-38]。参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]，优势结构面的产状对隧道围岩稳定性影响较大，本标准以优势结构面倾角描述结构面对围岩稳定性的影响程度，优势结构面倾角越小，则潜在的风险越大。

（6）预测涌水量*X*41[9]，地下水是诱发塌方的所有因素中最具活力和最具影响力的因素。岩体在水的溶解、软化、侵蚀等作用下凝聚力减小，力学强度降低，围岩自稳能力大大下降，导致隧道发生坍塌事故的概率增大。

### **11. 附录A.3（资料性附录）隧道施工前涌水突泥风险事件可能性评估指标体系**

根据前期对现行指南的研究成果和专家意见，从隧道地质条件、水文地质特征、水文地质特征、环境条件等四个方面建立施工前涌水突泥风险事件可能性评估指标体系。其中地质条件包含了不良地质、岩溶发育程度等指标，水文地质特征包含了隧道预测涌水量指标，环境条件包含了周围水体情况指标。

（1）不良地质*X*11，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，不良地质的发育程度影响工程的安全性和处治难度，不良地质主要考虑含导水构造或承压含导水构造。不良地质的富水性、导水性及其与隧道的空间位置关系对涌水突泥风险影响较大，甚至起到了决定性作用[39]。

（2）岩溶发育程度*X*12，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，岩溶发育程度与可溶性岩石密切相关，当隧道穿越岩溶发育区时，往往存在安全隐患，故应查明岩溶及地质灾害的形态与分布、岩溶发育规律等。岩溶越发育，则储存的岩溶水越多，引发事故的可能性越大。

（3）预测涌水量*X*21[40]，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，该指标是影响隧道涌水突泥风险的关键因素，可以根据前期地勘资料和超前地质预报资料对涌水量进行定量估计，隧道预测涌水量越大，隧道发生涌水突泥的风险越大。

（4）周围水体情况*X*31，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，地表水发育地段易产生涌水、突泥及塌方冒顶等事故。隧道上方若存在湖泊、河流、水库等水体等补给性水体，则引发隧道涌水突泥的可能性较大。

### **12. 附录A.4（资料性附录）隧道施工前大变形风险事件可能性评估指标体系**

根据前期指南编制小组对国内外隧道大变形事故案例的研究成果和专家意见，从建设规模、地形特征、地质条件、水文地质条件等四个方面建立施工前大变形事故可能性评估指标体系。其中建设规模包含了隧道开挖跨度指标，地形特征包含了浅埋隧道偏压角度指标，地质条件包含了围岩级别、断层破碎带宽度、地应力等指标，水文地质条件包含了预测涌水量指标。

（1）隧道开挖跨度*X*11，参考《公路隧道施工技术细则》（JTG/T F60-2009）[14]，按开挖宽度可将隧道划分为小跨度隧道、中跨度隧道、大跨度隧道、超大跨度隧道。开挖宽度越大，其支护与开挖方式要求越高，发生围岩大变形的风险越高[41]。

（2）浅埋隧道偏压角度*X*21，是指垂直于隧道洞口的横剖面与地面的交线同水平面的夹角。参考《铁路隧道设计规范》（JB 10003-2016）[15]，大多数偏压隧道处于洞口段与浅埋段，地形因素造成的偏压对隧道洞口浅埋段的稳定性影响特别大，洞身一侧压力过大，极易导致挤压大变形的发生。偏压角度越大，对应的风险等级越高[42]。

（3）围岩级别([BQ]值)*X*31，参考《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]，结合隧道设计文件，围岩级别越低，变形模量往往越小，相同的应力条件下发生大变形的风险越大，施工作业条件要求也越高。评估过程中，对于同一施工区段内围岩级别不一致的情况，应取低值。

（4）断层破碎带宽度*X*32，隧道经过断层破碎带的地段地质条件复杂，围岩岩性陡然变差，支护难以及时跟进变化，导致围岩发生较大范围内的变形。隧道穿越的断层破碎带的宽度越大，发生大变形的风险越高。

（5）地应力*X*34，主要考虑到高地应力下软岩大变形。一般来说，隧道埋深越大，围岩初始地应力越大。高地应力状态下，受开挖扰动影响，围岩在集中应力作用下发生显著变形，且变形时间较长，甚至在初次及二次支护后仍未稳定，影响隧道施工安全[43, 44]。这种情况下，地应力越大则更容易发生大变形。

（6）预测涌水量*X*41[9]，参照已有的研究结果，岩体在水的溶解、软化、侵蚀等作用下凝聚力减小，力学强度降低，围岩自稳能力下降，增加围岩变形。

### **13. 附录A.5（资料性附录）隧道施工前瓦斯爆炸风险事件可能性评估指标体系**

根据前期指南编制小组对国内外隧道瓦斯爆炸风险事件案例的研究成果和专家意见，从地质条件、瓦斯因素等两个方面建立施工前瓦斯爆炸风险事件评估指标体系。其中地质条件包含了煤层厚度、隧道距煤层距离等指标，瓦斯因素包含了预测瓦斯压力、预测瓦斯涌出量等指标。

（1）煤层厚度*X*11，煤层厚度影响其内部瓦斯的蕴藏量，煤层越厚，对应的风险等级越高。评估时应综合考量含煤地层的分布，煤层数及顶底板特征和位置，煤层厚度、倾角[45]。

（2）隧道距煤层距离*X*12[45]，指隧道中心线距周边瓦斯煤层的最小直线距离[46]。距离越近，越易受瓦斯侵扰，施工时发生瓦斯爆炸的风险越高。

（3）预测瓦斯压力*X*21[47]，指受开挖扰动前的地层中瓦斯的压力。瓦斯压力越大，发生瓦斯爆炸的风险越高，《铁路瓦斯隧道技术规范》（TB 10120-2019）[48]中按照瓦斯压力和煤层瓦斯含量将瓦斯隧道工区分为非瓦斯、微瓦斯、低瓦斯、高瓦斯和瓦斯突出5个等级，而瓦斯压力有三个区间，分别为<0.1MPa、0.1~0.74MPa和≥0.74MPa。当瓦斯压力≥0.74MPa时，有瓦斯突出的危险。

（4）预测瓦斯涌出量*X*22，指施工前预测的单位时间内从煤层和采落的煤(岩)中所涌出的瓦斯量。瓦斯涌出量直接影响发生瓦斯爆炸风险事件的可能性，瓦斯涌出越多，发生瓦斯爆炸的风险越大。本标准参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]，将瓦斯涌出量划分为大于1m3/min、0.5m3/min~1m3/min、0.5m3/min以下、不存在瓦斯四个等级。

### **14. 附录A.6（资料性附录）隧道施工前岩爆风险事件可能性评估指标体系**

近些年来，随着我国公路隧道工程建设的不断发展，埋深或地应力水平不断增高，岩爆问题日益凸显。影响岩爆发生的因素众多，主要有地层岩性、埋深、地质构造、结构面、开挖施工因素等。目前，关于岩爆定义、分类、烈度分级学术界尚未形成统一看法，但公认的是岩爆常发生于高应力状态下的硬脆性围岩中。当前岩爆判据所需测量的岩石物理力学性质指标较多，实施操作较为繁琐。而对于隧道施工前岩爆事故可能性指标体系的建立，在满足科学性的前提下，应考虑项目开工前能够获取的信息，即指标的易获取性。

根据前期指南编制小组对国内外岩爆事故案例的研究成果和专家意见，从地质条件、岩性因素等两个方面建立评估指标体系。其中地质条件包含了地应力指标，岩性因素包含了岩体质量指标RQD、岩石单轴饱和抗压强度等指标。

（1）地应力*X*11，参考《水利水电工程地质勘察规范》（GB 50487-2008）[49]、《公路隧道施工技术规范》（JTG F60—2009）[17]知，高地应力是发生岩爆的必要条件。通常来说，初始地应力水平越高，发生岩爆的风险越高。结合隧道实际工程经验并参照《水力发电工程地质勘察规范》(GB50287-2016)[12]，本标准将地应力分级定为10MPa以下、10MPa、20MPa、40MPa以上四个档进行评分。

（2）岩石质量指标RQD *X*21，指长度在10cm(含10cm)以上的岩芯累计长度占钻孔长度的百分比[50]，是能够反映岩体完整性程度。已有的研究成果表明岩爆更易发生在完整性较好的岩体。相关文献[51]将岩石质量以25%、50%、70%为界划分为四级，考虑到指标划分区间个数应尽量保持一致性，本标准采用RQD指标。

（3）岩石单轴饱和抗压强度*X*22，参考《工程岩体分级标准》（GB/T50218-2014）[11]，该值反映了岩石在外荷载作用下，抵抗变形直至破坏的能力，也能体现岩石储能能力，且容易获得。岩石单轴饱和抗压强度*RC*一般采用实测值，若无实测值，可采用实测的岩石点荷载强度指数*I*s(50)的换算值，即按国家标准规定的换算式计算：

 (A-1)

（4）岩石单轴饱和抗压强度*RC*的划分方法是在总结并参考国内已有的划分方法和工程实践经验的基础上提出的。从表A-2中可知，各规范均以30MPa作为硬质岩与软质岩的划分值，以60MPa作为较硬岩和坚硬岩的划分值。但大量文献表明岩爆往往发生在高应力状态下围岩条件较好处，相比较而言，现有岩石单轴饱和抗压强度分级区间值偏小，故作为岩爆的评估指标，在此处上调了划分值。

表A-2 国内岩石坚硬程度的强度划分

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 名称 | 硬质岩(MPA) | | | 软质岩(MPA) | | |
| 极硬岩 | 坚硬岩 | 较硬岩 | 较软岩 | 软岩 | 极软岩 |
| 《岩土工程勘察规范》  （GB 50021-2001）[52] | >60 | | 60~30 | 30~15 | 15~5 | ≤5 |
| 《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》（JTG 3370.1-2018）[33] | >60 | | 60~30 | 30~15 | 15~5 | <5 |
| 《水工隧洞设计规范》  （SL 279-2016）[53] | >60 | | 60~30 | 30~15 | 15~5 | - |
| 《铁路隧道设计规范》  （TB 10003-2016）[15] | >60 | | 60~30 | 30~15 | 15~5 | ≤5 |
| 《水利水电工程地质勘察规范》（GB 50487-2008）[49] | >60 | | 60~30 | 30~15 | 15~5 | ≤5 |
| 《水力发电工程地质勘察规范》（GB 50287-2016）[12] | >60 | | 60~30 | 30~15 | 15~5 | - |
| 《工程岩体分级标准》（GB/T50218-2014）[11] | >60 | | 60~30 | 30~15 | 15~5 | ≤5 |
| 《公路工程地质勘察规范》  （JTG C20-2011）[10] | >60 | | 60~30 | 30~15 | 15~5 | ≤5 |
| 本标准 | >60 | | 60~30 | <0 | | |

### **15. 附录A.7（资料性附录）隧道施工过程****洞口失稳风险事件可能性评估指标体系**

根据前期对现行指南研究的成果和专家意见，从隧道建设规模、地形特征、地质条件、气象条件、超前预报与监测等五个方面建立施工过程洞口失稳风险事件可能性评估指标体系。其中建设规模包含了隧道开挖跨度指标，地形特征包含了洞口浅埋段长度、洞口偏压角度等指标，地质条件包含了围岩级别([BQ]值)、坡体结构等指标，气象条件包含了年平均降水量指标，超前预报与监测包含了相对变形值、监控量测方案等指标。

（1）隧道开挖跨度*X*11，参考《公路隧道施工技术细则》（JTG/T F60-2009）[14]，按开挖宽度*B*将隧道划分为小跨度隧道、中跨度隧道、大跨度隧道、超大跨度隧道，开挖宽度*B*越大，隧道断面开挖持续时间较长，支护结构难以快速封闭成环，安全稳定性问题越突出。

（2）洞口浅埋段长度*X*21，参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]，浅埋段是决定洞口处稳定性的重要因素，该段岩体质量往往相对较差，易受降水影响。洞口浅埋段长度越长，该段施工时间越长，发生失稳的风险就会越大。

（3）洞口偏压角度*X*22，是指垂直于隧道洞口的横剖面与地面的交线同水平面的夹角。参考《铁路隧道设计规范》（JB 10003-2016）[15]，大多数偏压隧道处于洞口段与浅埋段，地形因素造成的偏压对隧道洞口浅埋段的稳定性影响特别大，本标准以岩层倾角表示偏压情况[30, 31]，倾角越大，则发生洞口失稳、塌方等事故的可能性就越大。

（4）围岩级别([BQ]值)*X*31，参考《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]，按地下工程岩体质量指标[BQ]值确定岩体级别，围岩级别越低，则围岩质量越差，对应的洞口失稳风险也越大。

（5）坡体结构*X*32，参考《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》（JTG 3370.1-2018）[33]，洞口应设于山坡稳定、地质条件较好的位置，隧道轴线与坡面正交的横交坡结构最为理想。而斜交坡、缓顺向坡、古滑坡体的失稳风险相对依次增加。

（6）年均降水量*X*41，降水量过大，特别是持续的强降水，严重影响洞口工程施工；如果地表的排水、截水设施不完善，大量的地表水将会渗入地层，此外降水容易在隧道浅埋段渗入隧道围岩，软化岩体并降低围岩强度，影响隧道围岩稳定性。故降水量越大，则洞口失稳风险越大。

（7）相对变形值*(u/B*)*X*51[54, 55]，参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]，隧道开挖后，围岩表面因开挖扰动作用会产生部分变形，相对变形值即为变形量*u*与隧道等效半径*B*之比，评估时按照就高原则，选取评估区段内变形量最大的断面，相对变形值越大，则洞口失稳风险越大。

（8）监控量测方案*X*52[56]，参考《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90-2015）[57]，监控量测包括量测频率、监测项目、信息反馈等内容。合理的监控量测频率、全面的必测项目与及时的信息反馈可以有效降低风险事件发生的可能性。

### **16. 附录A.8（资料性附录）隧道施工过程坍塌风险事件可能性评估指标体系**

根据前期对现行指南的研究成果和专家意见，从隧道建设规模、地形特征、地质条件、水文地质条件、施工因素、超前预报与监测等六个方面建立施工过程坍塌风险事件可能性评估指标体系。其中建设规模包含了隧道开挖跨度指标，地形特征包含了隧道埋深、浅埋隧道偏压角度等指标，地质条件包含了围岩级别([BQ]值)、断层破碎带宽度、断层破碎带胶结程度、优势结构面倾角等指标，水文地质条件包含了地下涌水情况指标，施工因素包含了衬砌安全距离、仰拱安全距离等指标，超前预报与监测包含了超前地质预报、相对变形值、监控量测方案等指标。

（1）隧道开挖跨度*X*11，参考《公路隧道施工技术细则》（JTG/T F60-2009）[14]，按开挖宽度可将隧道划分为小跨度隧道、中跨度隧道、大跨度隧道、超大跨度隧道，开挖宽度越大，隧道断面开挖持续时间较长，支护结构难以快速封闭成环，安全性问题越突出。

（2）隧道埋深*X*21[58]，参考《铁路隧道设计规范》（JB 10003—2016）[15]，这里主要考虑高地应力下的坍塌风险。一般来说，隧道埋深越大，围岩初始地应力越大。高地应力状态下，受开挖扰动及岩体内部结构面影响，在围岩内部一定范围内易形成松动圈，再加之爆破扰动，易造成围岩坍塌[59, 60]。

（3）浅埋隧道偏压角度*X*22[16]，是指垂直于隧道洞口的横剖面与地面的交线同水平面的夹角。参考《铁路隧道设计规范》（JB 10003-2016）[15]，大多数偏压隧道处于洞口段与浅埋段，地形因素造成的偏压对隧道洞口浅埋段的稳定性影响特别大，本标准以岩层倾角表示偏压情况，倾角越大，则发生坍塌事故的可能性就越大。

（4）围岩级别([BQ]值)*X*31，参考《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]，围岩级别越低，则围岩质量越差，则围岩自稳能力越差，对应的坍塌风险越大[35]，施工作业条件要求也越高。评估过程中，对于同一施工区段内围岩级别不一的情况，应取低值。

（5）断层破碎带宽度*X*32[38]，参考《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]，一般而言，断层及其影响带内岩体往往较为破碎，围岩等级较低，是地表水、地下水流动的天然通道，是引发坍塌的主要因素之一。本标准根据断层破碎带的宽度分类，宽度越大，则在断层破碎带及其影响带中施工周期越长，坍塌风险越高。

（6）断层破碎带胶结情况*X*33，本标准将断层破碎带视为岩体碎裂结构，以该结构的胶结程度作为划分依据，胶结程度越差或越松弛的断层破碎带，其潜在的坍塌风险越大，表A-3给出了各分类的基本特征[61]，作为评估参考。

表A-3 断层破碎带胶结情况分类特征

|  |  |
| --- | --- |
| 结构类型 | 基本特征 |
| 严重松弛的胶结碎裂结构 | 裂隙间距小于0.1m，延伸短，一般小于0.5m，结构严重松弛，岩体内发育较多的表生结构面，并且有些结构面充填次生泥。 |
| 松弛的胶结碎裂结构 | 裂隙间距小于0.1m，延伸短，一般小于0.5m，结构松弛明显，岩体完整性变差，岩体透水性较强，变形模量较低。 |
| 有轻度松弛的胶结碎裂结构 | 裂隙间距小于0.1m，延伸短，一般小于0.5m，受河谷风化、应力场变化虽有轻度松弛，但胶结的碎裂结构仍保持较紧密的结构，大部分岩体完整性较好，少量较差，岩体透水性弱，抗变形能力较强。 |
| 紧密的胶结碎裂结构 | 裂隙间距小于0.1m，延伸短，一般小于0.5m，结构面被后期的钙质充填胶结良好，岩块之间的胶结呈紧密状，岩体完整性为完整~较完整，岩体透水性弱，抗变形能力强。 |

（7）优势结构面倾角*X*34，其概念来源于岩体结构控制理论。该理论认为岩石并非完整的，它被各种各样的结构面切割，这些结构面包括节理面、断层面、劈理面、软弱层等。优势结构面就是在上述各种结构面按一定的优势指标找出对区域稳定性起控制作用的结构面，优势指标可以是时间、性质、数量、规模和分形等。参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]，优势结构面的产状对隧道围岩稳定性影响较大，本标准以优势结构面倾角描述结构面对围岩稳定性的影响程度，优势结构面倾角越小，则潜在的风险越大。

（8）地下涌水情况*X*41，参考表A-4中的相关规范，采用10m洞长渗水量定量描述隧道围岩出水状况，可分为干燥或潮湿状态、点滴状出水、线状流水及涌水三种状态，隧道中每10m长段涌水量=隧道二衬至掌子面总出水量÷掌子面距二衬距离的长度×10。

表A-4 国内有关地下涌水情况规范汇总

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 资料来源 | 地下水出水状态 | 状态名称与定量描述 | | |
| 状态1 | 状态2 | 状态3 |
| 《水工隧洞设计规范》(DL/T 5195-2004)[53] | 10m洞长水量*Q*(L/min·10m)  或压力水头H(MPa) | 干燥到渗水滴，*Q*≤25或*H*≤0.1 | 线状流水，  25＜*Q*≤125  0.1＜*H*≤1.0 | 涌水，  *Q*＞125  *H*＞1.0 |
| 《水利水电工程地质勘察规程》(GB 50487-2008)[49] | 10m洞长水量*Q*(L/min·10m)  或压力水头H(MPa) | 渗水到滴水，*Q*≤25或*H*≤0.1 | 线状流水，  25＜*Q*≤125  0.1＜*H*≤1.0 | 涌水，  *Q*＞125  *H*＞1.0 |
| 原《铁路隧道设计规范》(TB 10003-2004)[62] | 10m洞长渗水量*Q*(L/min·10m) | 干燥或湿润，  ＜10 | 偶有渗水，10~25 | 经常渗水，25~125 |
| 《铁路隧道设计规范》(TB 10003-2016)[15] | 10m洞长渗水量*Q*(L/min·10m) | 潮湿或点滴装出水，*Q*≤25 | 淋雨状或线状出水，  25~125 | 涌流状出水，  ＞125 |
| 节理岩体地质力学分级(RMR法)[50] | 10m洞长水量*Q*(L/min·10m)或裂隙水压与最大主应力比值*ζ* | 干燥，湿润，滴水，*Q*≤25或*ζ*≤0.2 | 线状流水  25＜*Q*≤125  0.2＜*ζ*≤0.5 | 涌水，  *Q*＞125  *ζ*＞0.5 |
| 《工程岩体分级标准》(GB 50218-2014)[11] | 水压*p*(MPa)，或10m洞长水量*Q*(L/min·10m) | 潮湿或点状滴水，*p*≤0.1或*Q*≤25 | 淋雨状或线状出水，  0.1＜*p*≤0.5  25＜*Q*≤125 | 涌流状出水，  *p*＞0.5或*Q*＞125 |

（9）衬砌安全距离*X*51，参考《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90-2015）[57]，Ⅳ级围岩二次衬砌距掌子面的距离不得大于90m，Ⅴ级及以上围岩不得大于70m，软弱围岩及不良地质隧道的二衬衬砌应及时施作。

（10）仰拱安全距离*X*52，参考《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90-2015）[57]，仰拱开挖施工应符合相关规定：Ⅳ级及以上围岩仰拱每循环开挖长度不得大于3m，不得分幅施作，仰拱与掌子面的距离，Ⅲ级围岩不得超过90m，Ⅳ级围岩不得超过50m，Ⅴ级及以上围岩不得超过40m。

（11）超前地质预报*X*61，参考《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1-2017）[2]及《铁路超前地质预报技术指南》（铁建设 [2008] 105号）[63]，采用地质雷达、超前导坑、超前探孔等超前预报手段，提前探明隧道开挖工作面前方的工程地质和水文地质条件，为隧道开挖、支护等工作提供基础资料，可以有效降低风险发生的可能性。

（12）相对变形值(*u*/*B*)*X*62，参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]，隧道开挖后，围岩表面因开挖扰动作用会产生部分变形，相对变形值即为变形量*u*与隧道等效半径*B*之比，评估时按照就高原则，选取评估区段内变形量最大的断面，相对变形值越大，则风险越大。

（13）监控量测方案*X*63，参考《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90-2015）[57]，监控量测包括量测频率、监测项目、信息反馈等内容。合理的监控量测频率、全面的必测项目与及时的信息反馈可以有效降低风险事件发生的可能性[56]。

### **17. 附录A.9（资料性附录）隧道施工过程涌水突泥风险事件可能性评估指标体系**

根据前期对现行指南的研究成果和专家意见，从隧道地质条件、水文地质条件、环境条件、施工因素、超前预报与监测等五个方面建立施工前涌水突泥风险事件可能性评估指标体系。其中地质条件包含了不良地质、岩溶发育程度等指标，水文地质特征包含了地下涌水情况指标，环境条件包含了周围水体情况指标，施工因素包含了防排水措施指标、超前预报与监测包含了超前地质预报、监控量测方案等指标。

（1）不良地质*X*11，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，不良地质的发育程度直接影响工程的安全性和处治难度，不良地质构造通常是指隧道附近潜在的突水通道或突水水源，不良地质构造的富水性、导水性及其空间位置关系在很大程度上决定涌水突泥风险的大小[39]。

（2）岩溶发育程度*X*12，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，岩溶发育的程度与可溶岩的岩性密切相关，当隧道穿越岩溶发育区时，往往存在安全隐患，在工程地质勘察时不仅应查明岩溶及地质灾害的形态与分布，还应注意岩溶发育规律，岩溶越发育，储存的岩溶水越多，引发涌水突泥事故的风险越大。

（3）地下涌水情况*X*21，参考表A-3中规范，采用10m洞长渗水量定量描述隧道围岩出水状况，可分为干燥或潮湿状态、点滴状出水、线状流水及涌水状态，隧道中每10m长段涌水量=隧道二衬至掌子面总出水量÷掌子面距二衬距离的长度×10。

（4）周围水体情况*X*31，参考《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10]，地表水发育地段易产生涌水、突泥及塌方冒顶等事故。隧道上方若存在湖泊、河流、水库等水体等补给性水体，引发隧道涌水突泥的可能性越大。

（5）防排水措施*X*41，参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]及《地下工程防水技术规范》（GB 50108）[64]，隧道防排水设计根据隧道所处环境和地下水敏感性、地层岩性等条件采取不同的处理策略：浅埋、低水压段，当环境要求较高时，采取“完全堵水”的原则，必要时进行地表注浆加固、堵水和引排地表水；一般埋深、中等水压段，采用“以堵为主，限量排放”的原则，加强围岩注浆堵水；深埋、高水压段，在隧道开挖及衬砌前对周边围岩进行注浆加固，设置排水系统进行泄压，隧道结构设计承载一定的水压力（0.5MPa）。根据上述标准，将防排水措施分为很差、较差、一般、基本合理四挡，防排水措施越差，则涌水突泥风险越大[65]。

（6） 超前地质预报*X*51， 参考《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1-2017）[2]及《铁路超前地质预报技术指南》（铁建设 [2008] 105号）[63]，采用地质雷达、超前导坑、超前探孔等超前预报手段，提前探明隧道开挖工作面前方的工程地质和水文地质条件，为隧道开挖、支护等工作提供基础资料，可以有效降低风险发生的可能性。

（7）监控量测方案*X*52，参考《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90-2015）[57]，监控量测包括量测频率、监测项目、信息反馈等内容。全方位监控量测与及时的信息反馈可以有效降低发生风险事件的可能性，监控量测越合理，监测项目越完善，反馈信息越及时，发生风险的可能性越低[56]。

### **18. 附录A.10（资料性附录）隧道施工过程大变形风险事件可能性评估指标体系**

根据前期指南编制小组对国内外隧道大变形事故案例充分研究的成果和广泛征集的行业专家意见，从建设规模、地形特征、地质条件、水文地质条件、施工因素、超前预报与监测等等六个方面建立施工过程大变形事故可能性评估指标体系。建设规模包含了隧道开挖跨度指标，地形特征包含了浅埋隧道偏压角度指标，地质条件包含了围岩级别、断层破碎带宽度、断层破碎带胶结程度、地应力等指标，水文地质条件包含了地下涌水情况指标，施工因素包含了衬砌安全距离、仰拱安全距离等指标，超前预报与监测包含了超前地质预报、相对变形值、监控量测方案等指标。

（1）隧道开挖跨度*X*11，参考《公路隧道施工技术细则》（JTG/T F60-2009）[14]，按开挖宽度可将隧道划分为小跨度隧道、中跨度隧道、大跨度隧道、超大跨度隧道。开挖宽度越大，其支护与开挖方式要求越高，发生围岩大变形的风险越高[41]。

（2）浅埋隧道偏压角度*X*21，是指垂直于隧道洞口的横剖面与地面的交线同水平面的夹角。参考《铁路隧道设计规范》（JB 10003-2016）[15]，大多数偏压隧道处于洞口段与浅埋段，地形因素造成的偏压对隧道洞口浅埋段的稳定性影响特别大，洞身一侧压力过大，极易导致挤压大变形的发生。偏压角度越大，对应的风险等级越高[42]。

（3）围岩级别([BQ]值)*X*31，参考《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）[11]，结合隧道设计文件，围岩级别越低，变形模量往往越小，相同的应力条件下发生大变形的风险越大，施工作业条件要求也越高。评估过程中，对于同一施工区段内围岩级别不一致的情况，应取低值。

（4）断层破碎带宽度*X*32，隧道经过断层破碎带的地段地质条件复杂，围岩岩性陡然变差，支护难以及时跟进变化，导致围岩发生较大范围内的变形。隧道穿越的断层破碎带的宽度越大，发生大变形的风险越高。

（5）断层破碎带胶结程度*X*33，本标准将断层破碎带视为岩体碎裂结构，以该结构的胶结程度作为划分依据，胶结程度越差或越松弛的断层破碎带，其潜在的坍塌风险越大[61]，详细分级见表A-4。

（6）地应力*X*34，主要考虑到高地应力下软岩大变形。一般来说，隧道埋深越大，围岩初始地应力越大。高地应力状态下，受开挖扰动影响，围岩在集中应力作用下发生显著变形，且变形时间长，甚至在初次及二次支护后仍未稳定，影响隧道施工安全。这种情况下，地应力越大则更容易发生大变形。

（7）地下涌水情况*X*41，参考表A-5中规范，采用10m洞长渗水量定量描述隧道围岩出水状况，可分为干燥或潮湿状态、点滴状出水、线状流水及涌水状态，根据现场调查情况确定，隧道中每10m长段涌水量=隧道二衬至掌子面总出水量÷掌子面距二衬距离的长度×10。

（8）衬砌安全距离*X*51[66]，参考《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90-2015）[57]，Ⅳ级围岩二次衬砌距掌子面的距离不得大于90m，Ⅴ级及以上围岩不得大于70m，软弱围岩及不良地质隧道的二衬衬砌应及时施作。

（9）仰拱安全距离*X*52，参考《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90-2015）[57]，仰拱开挖施工应符合相关规定：Ⅳ级及以上围岩仰拱每循环开挖长度不得大于3m，不得分幅施作，仰拱与掌子面的距离，Ⅲ级围岩不得超过90m，Ⅳ级围岩不得超过50m，Ⅴ级及以上围岩不得超过40m。

（10）超前地质预报*X*61，参考《铁路超前地质预报技术指南》（铁建设 [2008] 105号）[63]超前地质预报应根据不同的地质复杂程度分级，针对不同的地质问题，选择不同的方法和手段进行，并贯穿于施工全过程。评估过程中，应根据超前测量反馈情况，合理进行打分。

（11）相对变形值(*u/B) X*62，参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]，隧道开挖后，围岩表面因开挖扰动作用会产生部分变形，相对变形值即为变形量*u*与隧道等效半径*B*之比[67]，评估时按照就高原则，选取评估区段内变形量最大的断面，相对变形值越大，则风险越大。

（12）监控量测方案*X*63，参考《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90-2015）[57]，监控量测包括量测频率、监测项目、信息反馈等内容。合理的监控量测频率、全面的必测项目与及时的信息反馈可以有效降低风险事件发生的可能性[56]。

### **19. 附录A.11（资料性附录）隧道施工过程瓦斯爆炸风险事件可能性评估指标体系**

根据前期指南编制小组对国内外隧道瓦斯爆炸事故案例的研究成果和专家意见，从地质条件、瓦斯因素、施工因素、超前预报与监测、机电设备因素等五个方面建立瓦斯爆炸风险事件可能性评估指标体系。地质条件包含了煤层厚度、隧道距煤层距离等指标，瓦斯因素包含了瓦斯涌出量、开挖工作面瓦斯浓度等指标，施工因素包含了隧道通风量指标，超前预报与监测包含了超前地质预报、监控量测方案等指标，机电设备因素包含了机电设备防爆情况指标。

（1）煤层厚度*X*11，煤层厚度影响其内部瓦斯的蕴藏量，煤层越厚，对应的风险等级越高。评估时应综合考量含煤地层的分布、煤层数、顶底板特征和位置、煤层厚度、倾角等因素[45]。

（2）隧道距煤层距离*X*12[45]，指隧道中心线距周边含瓦斯煤层的最小直线距离[46]。距离越近，越易受瓦斯侵扰，施工时发生瓦斯爆炸的风险越高。

（3）瓦斯涌出量*X*21，指施工前预测的单位时间内从煤(岩)层以及采落的煤(岩)所涌出的瓦斯量。瓦斯涌出量直接影响发生风险的可能性，瓦斯涌出越多，发生瓦斯爆炸的风险越大。本标准参考《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15]，将瓦斯涌出量划分为大于1m3/min、0.5 m3/min ~1m3/min、0.5m3/min以下、不存在瓦斯四个等级。

（4）开挖工作面瓦斯浓度*X*22，参考《铁路瓦斯隧道技术规范》（TB 10120-2019）[48]，开挖工作面瓦斯浓度是决定是否进行施工的重要指标，在瓦斯隧道施工时应随时检测作业范围内的瓦斯浓度，瓦斯浓度大于或等于1%，应立即停止电钻钻孔作业；瓦斯浓度大于或等于1.5%，必须停止工作，撤人、切断电源、查明原因、加强通风。

（5）隧道通风量*X*31，隧道通风可以稀释隧道内瓦斯及有害气体，降低洞内瓦斯的浓度，故隧道通风情况越好，对应的风险等级越低。评估时应参照《公路隧道施工技术规范》(JTG F60-2009)[17]，考虑隧道通风系统的合理性，从通风方式，通风量，通风设备三方面综合评价。

（6）超前地质预报*X*41，参考《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1-2017）[2]及《铁路超前地质预报技术指南》（铁建设 [2008] 105号）[63]，采用地质雷达、超前导坑、超前探孔等超前预报手段，提前探明隧道开挖工作面前方的工程地质和水文地质条件，为隧道开挖、支护等工作提供基础资料，可以有效降低瓦斯爆炸风险发生的可能性。评估时应根据超前测量反馈情况，合理进行打分。

（7）监控量测方案*X*42，参考《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90-2015）[57]，监控量测包括量测频率、监测项目、信息反馈等内容。全方位监控量测与及时的信息反馈可以有效降低发生风险事件的可能性，监控量测越合理，监测项目越完善，反馈信息越及时，发生风险的可能性越低。

（8）电气设备防爆情况*X*51[69]，参考《铁路瓦斯隧道技术规范》（TB 10120-2019）[68]，机电设备应符合下列防爆安全规定：（1）瓦斯工区使用的电测距仪及其它有电源的设备，应采用防爆型，当不得不使用非防爆型时，在仪器设备20m范围内瓦斯浓度必须小于1%；（2）安装后的机电设备，必须经过外观、防爆性能、操作性能的检查，合格后方可投入使用；（3）机电设备应重点检查专用供电线路、专用变压器、专用开关、瓦斯浓度超限与供电的闭锁、局扇与供电的闭锁情况。供电线路应无明接头，无接头连接不紧密或散接头，有漏电保护装置，有接地装置，电缆悬挂整齐，防护装置齐全等；（4）电动装渣、开挖等作业机械在操作中，防爆开关表面温度过高时应立即停止作业；（5）蓄电池机车及矿灯的充电房应距洞口50m以外；（6）隧道内使用的机电设备，在使用期间，除日常检查外，应按规定周期进行检查。评估时应综合考虑各方面情况，合理进行打分。

### **20. 附录A.12（资料性附录）隧道施工过程岩爆风险事件可能性评估指标体系**

岩爆影响因素众多，很难做到准确预测和评估。早期主要是从强度、刚度、能量、突变等单一因素出发进行岩爆预测研究。随研究的深入，逐渐认识到岩爆是非常复杂的非线性动力学现象，并受多种因素共同作用，因此开始研究基于多因素的综合预测方法。与单因素方法相比，综合预测方法考虑因素更为全面，可以从多角度利用评估指标信息，结果较为准确。因此本标准选取多种评估指标对岩爆风险展开评估。

当前预测岩爆的指标多基于岩爆判据，如Russenes判据、Hoek判据、脆性系数、岩爆倾向性指数、强度应力比等，考虑到指标的科学性和易获取性，选取常用的脆性系数、强度应力比、岩爆倾向性指数。

施工过程岩爆风险事件可能性评估是根据前期指南编制小组对国内外隧道岩爆事故案例的研究成果和征集专家意见，从应力因素、能量因素、结构面因素等三个方面建立评估指标体系。应力因素包含了强度脆性系数、强度应力比等指标，能量因素包含了岩爆倾向性指数指标，结构面因素包含了结构面特征指标。

（1）强度脆性系数*X*11，为岩石单轴抗压强度与岩石单轴抗拉强度之比，是评价岩石脆性、判断岩爆倾向性以及岩爆烈度分级的常用指标，参照有关研究，本标准将可将脆性系数分为四个等级，脆性系数越小，发生岩爆的风险越高[70]。

（2）强度应力比*X*12，为岩石的岩石饱和单轴抗压强度与垂直洞轴线方向的最大初始应力之比，是判断岩爆倾向性、进行岩爆烈度分级的常用指标[71]。参照《水力发电工程地质勘察规范》（GB 50287-2016）[12](见表5‑2)中岩体初始地应力的分级，将强度应力比分为四个等级，强度应力比值越小，发生岩爆的风险越高。

（3）岩爆倾向性指数*X*21，单轴压缩加卸载条件下，岩石弹性应变能与耗损应变能之比。不同的岩爆倾向性指数对应的岩爆等级见表A-5。该值可通过开展室内岩石力学试验获取，由式(A-2)计算弹性变形能指数[72]。

 (A-2)

式中：——试样加载到单轴抗压强度的0.7~0.8倍应力水平后卸载到单轴抗压强度的 0.05 倍应力水平时恢复的弹性应变能（J/m3）；——加卸载循环中试样产生塑性变形和微裂隙而消耗的能量（J/m3）。

表A-5 岩爆倾向性指数与岩爆等级的关系[72]

|  |  |
| --- | --- |
| 岩爆倾向性指数 | 岩爆等级 |
|  | 轻微岩爆 |
|  | 中等岩爆 |
|  | 强烈或极强岩爆 |

（4）结构面发育、结合程度*X*31，已有的研究结果表明岩体结构面对岩爆的发生和岩爆烈度具有控制作用，因此本标准将结构面因素纳入评估指标。主要考虑结构面发育程度、主要结构面的结合程度[11]，表A-6列出了国内现有规范关于结构面的定性分级，可知三种规范分级标准基本一致，本标准亦沿用此分级方法。

表A-6 结构面的定性分级

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 完整程度  类别 | | | 完整 | 较完整 | | 较破碎 | | 破碎 | | 极破碎 |
| 《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》（JTG 3370.1-2018）[33]s | 结构面发育程度 | 组数 | 1~2 | 1~2 | 2~3 | 2~3 | ≥3 | ≥3 | | 无序 |
| 平均间距(m) | >1 | >1 | 1~0.4 | 1~0.4 | 0.2~0.4 | 0.2~0.4 | ≤0.2 |
| 主要结构面结合程度 | | 好或一般 | 差 | 好或一般 | 差 | 好或一般 | 差 | 一般或差 | 很差 |
| 《工程岩体分级》（GB/T 50218-2014）[11] | 结构面发育程度 | 组数 | 1~2 | 1~2 | 2~3 | 2~3 | ≥3 | ≥3 | | 无序 |
| 平均间距(m) | >1 | >1 | 1~0.4 | 1~0.4 | 0.4~0.2 | 0.4~0.2 | <0.2 |
| 主要结构面结合程度 | | 结合好或结合一般 | 结合差 | 结合好或结合一般 | 结合差 | 结合好或结合一般 | 结合差 | 结合好或结合一般 | 结合很差 |
| 《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）[15] | 结构面发育程度 | 组数 | 1~2 | 1~2 | 2~3 | 2~3 | ≥3 | ≥3 | | 无序 |
| 平均间距(m) | >1 | >1 | 1~0.4 | 1~0.4 | 0.4~0.2 | 0.4~0.2 | <0.2 |
| 主要结构面结合程度 | | 结合好或一般 | 结合差 | 结合好或一般 | 结合差 | 结合好或一般 | 结合差 | 结合一般或差 | 结合很差 |
| 《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）[10] | 结构面发育程度 | 组数 | 1~2 | 1~2 | 2~3 | 2~3 | >3 | >3 | | 无序 |
| 平均间距(m) | >1 | >1 | 1~0.4 | 1~0.4 | 0.4~0.2 | 0.4~0.2 | <0.2 |
| 主要结构面结合程度 | | 好或一般 | 差 | 好或一般 | 差 | 好或一般 | 差 | 一般或差 | 很差 |

参考表A-6中规范，结构面的结合程度按表A-7确定。

表A-7 结构面结合程度的划分

|  |  |
| --- | --- |
| 结合程度 | 结构面特征 |
| 结合好 | 张开度小于1mm，为硅质、铁质或钙质胶结，或结构面粗糙，无充填物；  张开度1mm~3mm，为硅质或铁质胶结；  张开度大于3mm，结构面粗糙，为硅质胶结 |
| 结合一般 | 张开度小于1mm，结构面平直，钙泥质胶结或无充填物；  张开度1mm~3mm，为钙质胶结；  张开度大于3mm，结构面粗糙，为铁质或钙质胶结 |
| 结合差 | 张开度1mm~3mm，结构面平直，为泥质胶结或钙泥质胶结；  张开度大于3mm，多为泥质或岩屑充填 |
| 结合很差 | 泥质充填或泥夹岩屑充填，充填物厚度大于起伏差 |

# 三、预期经济、社会效益

近年来，我国公路隧道建设发展迅速，随着高速公路进一步向西部地区延伸，长大深埋隧道将会越来越多，隧道工程施工条件更加复杂，作业安全风险更加突出。本标准的实施能够加强隧道工程施工安全风险预控管理，增强隧道工程参建单位的风险管理意识，指导隧道工程施工安全风险辨识、分析、评估工作，提高施工安全风险防控能力，有助于防范和减少隧道工程施工安全事故发生。

# 四、采用国际、国内标准的程度

本标准基于《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南（试行）》以及该指南的实践应用成果，并参考相关标准规范等进行制定，为“全面修改、局部采用”。

参考的其它风险评估标准还有：《港口工程施工安全风险评估指南》、《铁路隧道风险评估暂行规定》、《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南》、《公路水路行业安全生产风险辨识评估管控基本规范(试行)》、《地铁及地下工程建设风险管理指南》、《Guidelines for Tunneling Risk Management》、《铁路建设工程风险管理技术规范》、《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》等。

# 五、与现行法律法规和标准的关系

本标准在起草过程中注意了与《公路水运工程安全生产监督管理办法》（中华人民共和国交通运输部令2017年第25号）、《公路水路行业安全生产风险管理暂行办法》（交安监发[2017]60号）、《生产安全事故报告和调查处理条例》（中华人民共和国国务院令第493号）等现行法规、制度、标准的衔接和内容一致，没有互相矛盾的内容。

# 六、重大分歧意见的处理经过和依据

1. 专项风险评估中风险估测、一般风险源估测以及重大风险源估测的关系：

在现行指南中，风险估测部分只包含“风险估测”和“重大风险源风险估测”两个章节。“风险估测”章节中提及一般风险源和重大风险源的风险估测推荐方法，但未指出一般风险源和重大风险源的关系，致使风险估测部分逻辑关系不够清晰，如何建立风险估测的条款框架分歧较大。

在深入研究专项风险评估流程后，编制组开展多次研讨会，决定将“风险估测”、“一般风险源风险估测”、“重大风险源风险估测”并列为专项风险评估中的三个小节。“风险估测”中主要对风险估测的一般原则进行说明，并指出重大风险源由一般风险源估测产生；“一般风险源风险估测”和“重大风险源风险估测”分别具体说明一般风险源和重大风险源的估测办法。通过以上架构，既明确了一般风险源和重大风险源的关系，也使风险估测部分逻辑严密、流程清晰。

2. 专项风险评估中重大风险事件后果严重程度评估方法：

现行指南中风险事件后果严重程度主要考虑人员伤亡和直接经济损失，且采用就高原则确定，本标准引入后果当量法，综合考虑人员伤亡、直接经济损失、社会影响、环境影响、工期延误等后果。关于方法的合理性以及五种后果量化统一的换算标准分歧较大。

经参考引用多篇法律法规和相关规范，确定五种后果的换算标准，使其有据可依，并在此基础上试算验证。考虑一般情况下，保留就高原则（考虑人员伤亡、直接经济损失两种后果）确定后果的方法，当多种后果同时产生时，宜采用后果当量法确定风险事件严重程度等级。

# 七、其它应予说明的事项

无。

**参考文献**

[1] 林志，李洪建，李真真．公路隧道施工总体风险评估方法优化研究[J]．工程建设，2017，49(8)：16-20．

[2] 交通运输部公路科学研究院．JTG F80/1-2017 公路工程质量检验评定标准 第1册 土建工程 [S]．北京：人民交通出版社，2017．

[3] 国家标准局．GB/T 6441-1986 企业职工伤亡事故分类[S]．北京：中国标准出版社，1986．

[4] 国务院法制办公室．生产安全事故报告和调查处理条例[M]．北京：中国法制出版社，2007．

[5] 蒋树屏，林志，王少飞．2018年中国公路隧道发展[J]．隧道建设(中英文)，2019，39(07)：1217-1220．

[6] 罗刚．中国10 km以上超长公路隧道统计[J]．隧道建设(中英文)，2019，39(08)：1380-1383．

[7] 主编交通运输部公路局，中交第一公路勘察设计研究院有限公司．JTG B01-2014 公路工程技术标准[S]．人民交通出版社，2015．

[8] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院．DB51/T2243-2016 公路瓦斯隧道技术规程[S]．成都：西南交通大学出版社，2017．

[9] 侯东赛，张霄，王磊．基于综合赋权-TOPSIS法隧道突涌水风险评价及应用[J]．隧道建设，2017，37(06)：691-699．

[10] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司．JTG C20-2011 公路工程地质勘察规范[S]．北京：人民交通出版社，2011．

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部．GB/T 50218-2014 工程岩体分级标准 [S]．北京：中国计划出版社，2014．

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部．GB 50287-2016 水力发电工程地质勘察规范[S]．中国计划出版社，2016．

[13] 宁波市交通工程质量监督站．宁波市交通质监站组织开展公路工程施工安全风险管理知识培训[EB/OL]．(2018-11-06)[2020-01-01]．http://zjzj.zjt.gov.cn/art/2018/11/6/art\_5460\_1029387.html．

[14] 中交第一公路工程局有限公司．JTG/T F60-2009 公路隧道施工技术细则[S]．北京：人民交通出版社，2009．

[15] 中华人民共和国国家铁路局．TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S]．北京：中国铁道出版社，2017．

[16] 周宗青，李术才，李利平，等．浅埋隧道塌方地质灾害成因及风险控制[J]．岩土力学，2013，34(05)：1375-1382．

[17] 中交第一公路工程局有限公司．JTG F60-2009 公路隧道施工技术规范[S]．北京：人民交通出版社，2009．

[18] Degn Eskesen S, Tengborg P, Kampmann J, et al. Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004,19(3):217-237.

[19] 交通运输部．交通运输部关于发布港口工程施工安全风险评估指南(沿海码头、护岸及防波堤分册)的通知[EB/OL]．(2017-09-15)[2019-04-23]．http://zizhan.mot.gov.cn/zfxxgk/bnssj/aqjds/201710/t20171031\_2930263.html.．

[20] 中国中铁二院工程集团有限公司．铁路隧道风险评估与管理暂行规定[M]．北京：中国铁道出版社，2008．

[21] 交通运输部工程质量监督局．公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析[M]．北京：人民交通出版社，2011．

[22] 中华人民共和国建设部．地铁及地下工程建设风险管理指南[M]．北京：中国建筑工业出版社，2007．

[23] 交通运输部．交通运输部办公厅关于印发《公路水路行业安全生产风险辨识评估管控基本规范（试行）》的通知[EB/OL]．(2018-10-31)[2019-11-25]．http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/aqyzljlglj/201811/t20181115\_3129006.html．

[24] 贺志军．山岭铁路隧道工程施工风险评估及其应用研究[D]．中南大学，2009．

[25] 宋平．铁路隧道施工安全风险管理研究[D]．中南大学，2009．

[26] 中国铁路总公司．Q/CR9006-2014 铁路建设工程风险管理技术规范[EB/OL]．(2018-11-25)[2019-11-25]．https://max.book118.com/html/2018/0123/150146620.shtm．

[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部．GB 50652-2011 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范[S]．中国建筑工业出版社，2011．

[28] 工伤保险条例编写组．工伤保险条例[M]．北京：中国方正出版社，2003．

[29] 吴道成，阎继祥，叶保华．企业职工伤亡事故统计分析标准讲析[M]．北京：劳动人事出版社，1988．

[30] 潘勇刚，刘胜，雷赛男．基于模糊评判法的隧道洞口段施工安全风险评价分析[J]．中国水运（下半月），2016，16(9)：198-200．

[31] 陈蔚．山岭隧道洞口稳定性分析及失稳风险评估[J]．低温建筑技术，2012，34(05)：108-110．

[32] 郭彦伟，龚雪晴，杨利明．基于风险矩阵法的隧道洞口失稳风险评估[J]．公路交通科技·应用技术版，2016，12(8)：28-30．

[33] 中华人民共和国交通运输部．JTG 3370.1-2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S]．北京：人民交通出版社，2018．

[34] 潘海泽．隧道工程地下水水害防治与评价体系研究[D]．西南交通大学，2009．

[35] 袁永才，李术才，李利平，等．山岭隧道塌方风险评价理论与方法及工程应用[J]．中南大学学报(自然科学版)，2016，47(07)：2406-2414．

[36] 蒋建平，章杨松，罗国煜，等．优势结构面理论在岩土工程中的应用[J]．水利学报，2001(08)：90-96．

[37] 谢小鱼．浅埋偏压大跨度隧道风险评估与围岩稳定性研究[D]．湖南科技大学，2014．

[38] 岳诚东．隧道工程施工塌方风险评估研究[D]．兰州大学，2016．

[39] 周宗青，李术才，李利平，等．岩溶隧道突涌水危险性评价的属性识别模型及其工程应用[J]．岩土力学，2013(3)：818-826．

[40] 杨艳娜．西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系统研究[D]．成都理工大学，2009．

[41] 赵勇．隧道软弱围岩变形机制与控制技术研究[D]．北京交通大学，2012．

[42] 范建海，陈志超，夏述光．软岩隧道矿山法施工大变形风险评估[J]．铁道建筑，2013(07)：52-56．

[43] 魏来．高地应力软岩隧道变形特征及施工方案优化研究[D]．长安大学，2018．

[44] 刘永刚．天坪隧道高地应力大变形机理及控制技术研究[D]．西南交通大学，2017．

[45] 康小兵．隧道工程瓦斯灾害危险性评价体系研究[D]．成都理工大学，2009．

[46] 刘雄伟，刘科．铁路隧道揭煤防突设计与施工[J]．交通节能与环保，2018，14(1)：89-92．

[47] 袁和勇．五松瓦斯隧道施工危险性评估研究[D]．安徽理工大学，2014．

[48] 国家铁路局．TB 10120-2019 铁路瓦斯隧道技术规范[S]．北京：中国铁道出版社，2019．

[49] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局．GB 50487-2008 水利水电工程地质勘察规范[S]．北京：中国计划出版社，2008．

[50] 蔡美峰，何满潮，刘东燕．岩石力学与工程 第2版[M]．北京：科学出版社，2013．

[51] 刘学增，苏云帆．隧道施工岩爆安全评价量化指标体系研究[J]．公路交通科技，2010，27(11)：88-93．

[52] 中华人民共和国建设部．GB 50021-2001 岩土工程勘察规范[S]．北京：中国建筑工业出版社，2001．

[53] 中华人民共和国水利部．DL/T 5195-2004 水工隧洞设计规范[S]．北京：中国水利水电出版社，2016．

[54] 谷建岭．高地应力软岩隧道大变形预测及防治研究[J]．科协论坛(下半月)，2011(04)：13-14．

[55] 刘志春，朱永全，李文江，等．挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究[J]．岩土工程学报，2008(05)：690-697．

[56] 曹文贵，翟友成，王江营，等．山岭隧道塌方风险的集对分析方法[J]．中国公路学报，2012，25(2)：90-99．

[57] 中交第四公路工程局有限公司，中国交通建设股份有限公司．JTG F90-2015 公路工程施工安全技术规范[S]．北京：人民交通出版社，2015．

[58] 刘学增，包浩杉，米东阳．公路隧道穿越断层塌方预测多级模糊综合评判[J]．现代隧道技术，2011，48(06)：65-71．

[59] 俞文生，彭蓉蓉．九岭山高地应力板岩隧道坍塌处理技术[J]．公路隧道，2008(03)：21-24．

[60] 李祥云．玄真观隧道高地应力整治段坍塌原因分析及处理措施[J]．路基工程，2016(06)：207-211．

[61] 周洪福．深覆盖宽河床多种复杂岩体作为重力坝建基岩体研究[D]．成都理工大学，2008．

[62] 铁路部第二勘测设计院．TB 10003-2005 铁路隧道设计规范[S]．北京：中国铁道出版社，2005．

[63] 中国中铁隧道集团有限公司．铁路隧道超前地质预报技术指南[M]．北京：中国铁道出版社，2008．

[64] 中华人民共和国住房和城乡建设部．GB 50108-2008 地下工程防水技术规范[S]．北京：中国计划出版社，2008．

[65] 闫凯旋，刘辉，潘岳，等．岩溶与采空区隧道涌水突泥区间概率风险响应研究[J]．公路与汽运，2017(03)：198-200．

[66] 谷建岭．高地应力软岩隧道大变形预测及防治研究[J]．科协论坛(下半月)，2011(04)：13-14．

[67] 刘志春，朱永全，李文江，等．挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究[J]．岩土工程学报，2008(05)：690-697．

[68] 赵阶勇．铁路瓦斯隧道施工特点及问题探讨[J]．隧道建设，2011，31(1)：82-87, 109．

[69] 张传庆，卢景景，陈珺，等．岩爆倾向性指标及其相互关系探讨[J]．岩土力学，2017，38(05)：1397-1404．

[70] 陶振宇．高地应力区的岩爆及其判别[J]．人民长江，1987(05)：25-32．

[71] 国家能源局．NB/T 10143-2019 水电工程岩爆风险评估技术规范[S]．北京：北京：中国水利水电出版社，2019．