

# 地下工程建设安全面临的挑战与对策

钱七虎

(中国人民解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 详细介绍我国地下工程建设的安全管理现状和我国地下工程建设安全的严峻形势。从事故发生的类型和原因等对工程建设事故进行分析, 指出责任事故及主观原因是构成地下工程建设安全管理巨大挑战的主因。结合海恩安全金字塔、海因里希安全法则、约翰逊的工程变化-失误理论模型等工程事故管理理论, 提出工程事故预防的可行性和工程建设安全管理实施的对策。对重大地下工程建设中最突出的突水突泥地质灾害和岩爆地质灾害进行详细阐述, 主要介绍突水突泥灾害的严重挑战、发生发展的科学规律、事故前兆信息分析以及地质超前预报等事故对策; 介绍岩爆地质灾害的定义和分类、岩爆的预测机制、岩爆监测预报的理论基础和工程实践以及岩爆灾害的施工对策等。最后, 针对地下工程建设的事前预防提出技术方法和管理手段的一些意见和建议。

**关键词:** 地下工程; 安全事故; 风险管理; 突水突泥; 岩爆; 地质灾害

**中图分类号:** TU 91

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2012)10-1945-12

## CHALLENGES FACED BY UNDERGROUND PROJECTS CONSTRUCTION SAFETY AND COUNTERMEASURES

QIAN Qihu

(Engineering Institute of Engineers Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** The status quo of safety management in China's underground projects construction was introduced. Based on the accidents statistics, the serious security situation of underground projects construction was certificated. The analysis of types and causes for accidents indicated that the responsibility and subjective reasons are the great challenges for security management. Combining with Hain's safety pyramid theory, Heinrich's safety rules and Johnson's changes-errors model, the concept that accidents can be prevented by risk management measures was established, and some suggestions for accidents prevention were put forward. Besides, the mechanism and control measures for two typical geological hazards, i. e. water and mud outbursts and rockburst, were represented. For the study of water and mud outbursts, the laws of occurrence and development, the precursory information theory, the geological prediction methods and other incident countermeasures were introduced. For the control measures of rockburst, the definition and classification of rockbursts, the prevention mechanism, theoretical basis and engineering practice for monitoring and prediction, as well as the construction measures, were introduced. Some opinions and suggestions on technical methods and management tools were put forward for the accident prevention for underground projects construction.

**Key words:** underground engineering; safety accident; risk management; water and mud outbursts; rockburst; geological disaster

### 1 引言

在我国经济建设迅速发展的背景下, 我国现今

工程建设速度居于世界前列, 尤其是我国的地下工程建设, 其工程类型众多、规模之巨大为世界所瞩目。与此同时, 由于地质条件的复杂性, 地下工程与地下空间建设过程中岩爆、大变形与大面积塌方、

收稿日期: 2012-05-23; 修回日期: 2012-08-06

作者简介: 钱七虎(1937-), 男, 1965年毕业于前苏联莫斯科古比雪夫军事工程学院, 现任中国工程院院士, 主要从事地下工程与隧道工程方面的教学与研究工作。E-mail: gcyqh@163.com

突水、地表沉陷等地质与工程灾害事故频发,造成人员伤亡、设备损失、工期延误和工程失效等。地下工程与地下空间的安全建设与风险管理已成为国内外专家关注的重要问题。

## 2 地下工程建设安全的现状和分析

### 2.1 地下工程建设安全现状

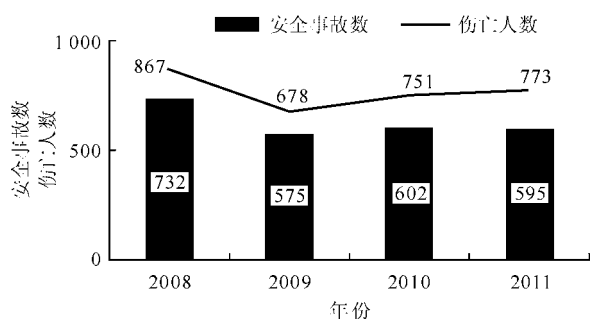
我国近年来工程事故不断出现,其中不乏一些重特重大事故。表 1 为 2008~2011 年我国重特重大事故统计<sup>[1]</sup>。

表 1 2008~2011 年我国重特重大事故统计<sup>[1]</sup>

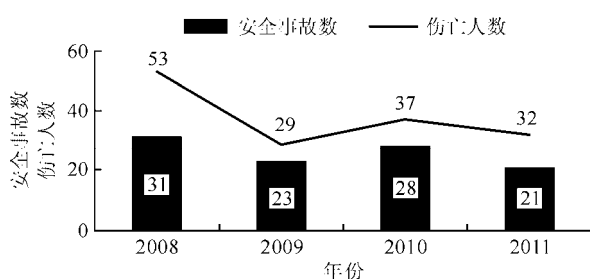
Table 1 Statistics of serious accidents happened in China (during 2008–2011)<sup>[1]</sup>

年份	事故性质	发生次数	死亡人数
2008	重大事故	86	1 304
	特重大事故	11	667
2009	重特重大事故	67	1 128
2010	重特重大事故	74	1 438
2011	重特重大事故	59	897

图 1 给出了 2008~2011 年不同领域安全事故数及伤亡人数统计结果。



(a) 土木工程领域



(b) 地下工程领域

图 1 2008~2011 年不同领域安全事故数及伤亡人数

Fig.1 Number of incidents and casualties in different areas (during 2008–2011)

由表 1 可见,近年来,安全形势虽有所好转,

但事故发生率仍居高不下。历年来,在各行业中我国土木工程领域事故伤亡人数仅低于道路交通事故和煤矿事故,居第三位,在全国重特重大事故中,土木工程领域约占 10%。

由图 1 可见,地下工程安全事故数及伤亡人数约占土木工程领域事故数及伤亡人数的 10%。在土木工程领域中,由于房建工程数量巨大,地下工程事故数及伤亡数位居第二,图 1 表明,近 4 年来地下工程事故数及伤亡数没有明显的下降,总体上安全形势没有明显改善。

### 2.2 地下工程建设安全事故分析

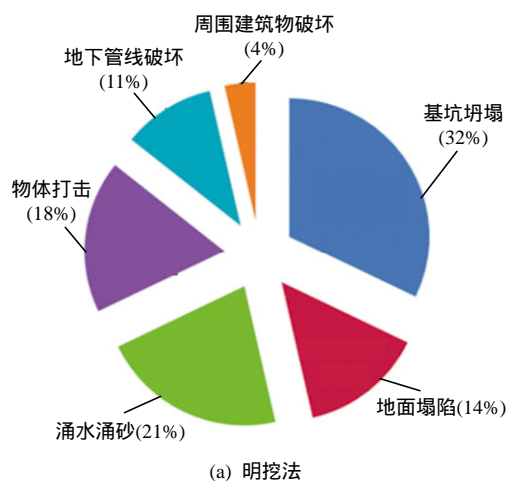
在地下工程事故案例分析中,共收集 50 多起矿山法工程事故案例,20 多起浅埋暗挖法工程事故案例,40 多起盾构与 TBM 施工事故案例和 100 多起明挖法基坑及地铁工程事故案例。

#### 2.2.1 事故类型分析

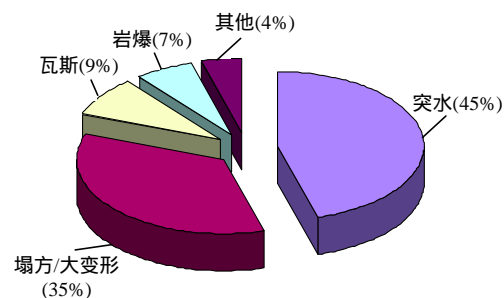
在上述地下工程事故案例中,按各类施工方法区分,其事故类型所占比例如图 2 所示。

#### 2.2.2 事故原因分析

在地下工程事故直接原因分析中,约 1/4 为客观原因(22%),1/3 多(37%)是主观原因,另外 1/3 多既有客观原因,又有主观原因(40%)。所有主观原因均可归为责任事故和人为因素,而且所有责任事故都高度近似:政府监管部门监管责任缺失,以罚代



(a) 明挖法



(b) 矿山法

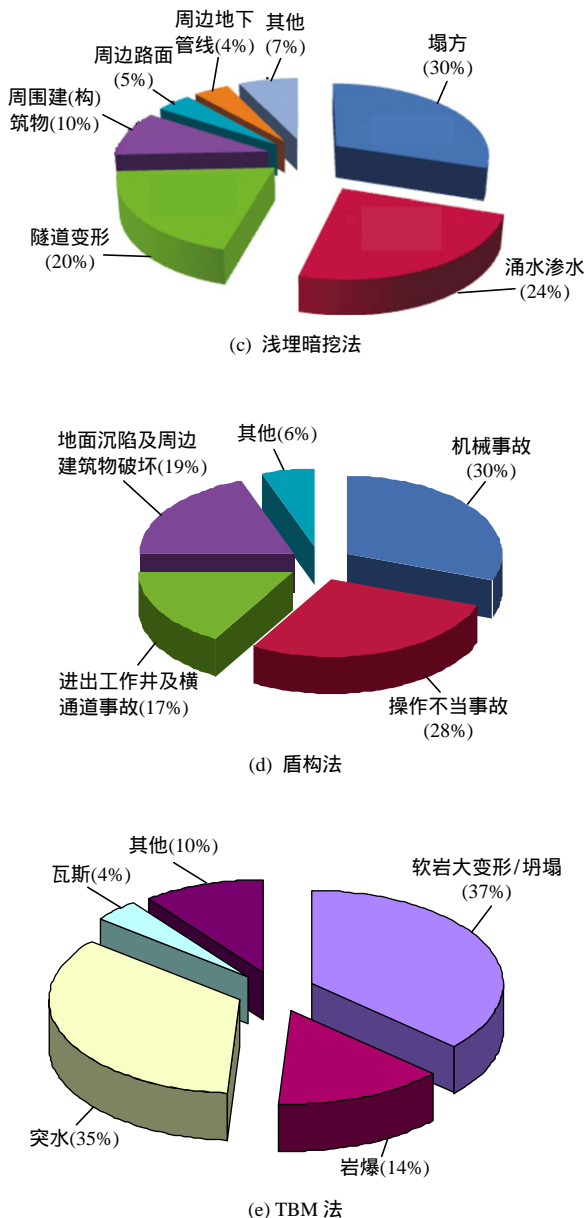


图 2 不同方法地下工程安全事故类型及所占比例

Fig.2 Safety accident type and proportion in underground construction by different methods

管、以包代管；施工方安全管理人员未能履行好安全管理职责，施工指挥人员违规指挥，施工人员违规操作，施工方案不完善；监理不严，责任心不强；业主方招标时违规发包、转包、抢工期；设计方案存在缺陷，勘察资料不全等。通过工程事故的直接主观原因，分析其深层次的原因，主要问题为：

(1) 赶工期。这个问题在地下工程建设中相当突出，政府、业主为了献礼或追求政绩，不尊重科学施工规律和相关法规，任意规定工期，造成施工单位忽视安全；任意删减施工中的安全步骤和措施，造成设计方勘察资料不全；边设计边施工，设计方案不完善，酿成重大责任事故。

(2) 工程造价低，致使合同价格低，造成安全措施投入的缺少，工程设计和施工方案缺乏严格审查。

(3) 用工制度造成的人员技术水平低，安全意识差，无证上岗人员多。这是由于我国基础建设的用工制度中，除管理人员外，现场施工人员很多为农民工为主的流动工人，缺乏培训导致安全意识低，甚至野蛮施工。虽然《安全生产法》要求重要岗位工人有证上岗，但多达 36% 的案例中存在施工人员无证上岗的现象，12.5% 的案例中存在监理人员无证上岗现象。

(4) 业主方在工程招投标过程中存在违规现象，违规发包，层层转包，以包代管，以罚代管。招标条件把关不严，将工程发包给不符合相应资质条件的单位，这其中不难发现腐败情节。

上述责任事故及主观原因构成对地下工程建设安全管理的巨大挑战。造成绝大多数事故(坍塌、涌水涌砂、岩爆等)的客观原因是环境和气象，而工程地质环境、水文地质环境复杂是其第一主因，因而查明复杂地质环境并及时防治是地下工程建设面临的又一巨大挑战。特别是突水突泥及岩爆的防治难度最大，挑战最强。

### 3 地下工程安全管理所面临的挑战 and 对策

#### 3.1 中国地下工程安全管理所面临的挑战

地下工程建设安全的严峻形势首先是由中国地下工程建设规模大、发展快的客观形势所决定的。中国是目前世界上地下空间开发利用的大国、隧道建设的大国。我国耕地资源已临近 18 亿亩红线、城市建设用地资源的紧缺、城市交通拥堵的日益突出，促使我国城市地下空间开发利用规模日益广泛拓展，城市轨道交通建设突飞猛进，城市轨道交通建设的速度居世界首位，城市地下快速路建设方兴未艾。以上是造成地下工程建设安全形势严峻的客观原因。由于规模大、发展快，地下工程技术和力量难以充分保证。体现在地下工程前期工作(地质勘察和工程可行性研究)不充分；工期偏紧，3~4 a 建成一条长 20~30 km 的地铁，3~4 a 建成一条长达数公里的世界级高水压、大直径水下隧道；设计人员、施工管理人员青黄不接，许多年轻工程师甚至助工担任主力。而对于长施工周期、多施工项目、复杂施工技术和不良地质环境的地下工程中诸多

不可预见因素的高风险特点认识不足,由上述建设体制、管理体制的深层次原因导致管理体制比较混乱、转包分包现象比较突出;工程招投标制度不规范,项目管理水平参差不齐,官僚主义疏于管理、以包代管、以罚代管经常发生;工程造价偏低造成安全措施投入不足,风险管理的投入不到位等等是地下工程建设安全形势严峻的主要原因,这一切是地下工程建设安全管理面临的严重挑战。

### 3.2 工程事故预防是可行的

工程安全科学告诉我们:

(1) 事故发生发展是有过程的,发生前有预兆,预兆可以反映到监测数据中来。图 3 给出了工程事故发展示意图。事故萌芽至险情发生在地下工程中一般历时 2~3 d。

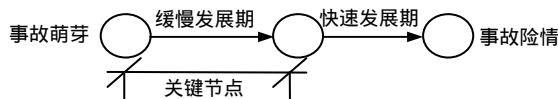


图 3 工程事故发展示意图

Fig.3 Sketch of development of engineering accidents

#### (2) 海恩安全金字塔法则

图 4 给出了海恩安全金字塔理论模型。海恩安全金字塔法则<sup>[2]</sup>是德国飞机涡轮机的发明者德国人帕布斯·海恩提出的一个在航空界关于飞行安全的法则。海恩法则指出,每 1 起严重事故的背后,必然有 29 起轻微事故和 300 起未遂先兆以及 1 000 起事故隐患。

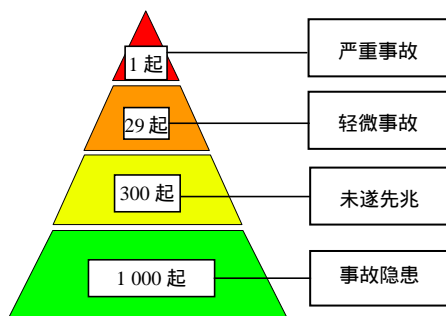


图 4 海恩安全金字塔理论模型

Fig.4 Model of Hain's safety pyramid theory

(3) 海因里希安全法则(通过 55 万次事故的统计分析)指出,存在 88:10:2 的规律,即 100 起事故中,有 88 起纯属人为不安全状态引起的(即主观原因),有 10 起是物(环境)的不安全状态造成的,只有 2 起是所谓的“天灾”,是难以预防的。

(4) 图 5 给出了约翰逊的变化-失误模型示意图。该模型表明,事故酿成是领导者、计划者、监

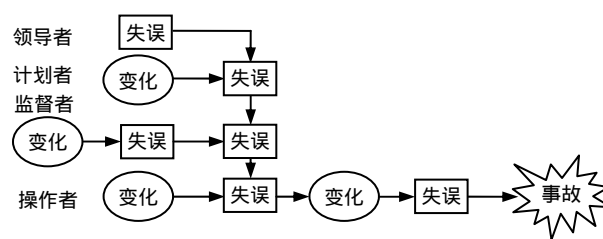


图 5 变化-失误模型示意图

Fig.5 Sketch of changes-errors model

督者和操作者一系列的变化-失误链引起的,这些变化和失误往往具有关联性,工程事故的发生大多是由于在错误的时间、地点,采用了错误的技术或管理方法而导致的,并不是一个单独的错误事件,只有切断这个变化-失误链条,事故才可以避免。

上述法则、理论和模型揭示了一个十分重要的事故预防原理:事故的发生过程是一个由反应链过程导致的小概率事件,这个反应链上任一环节得到控制,就可以很好地遏制事故的发生。因此,事故是可以预防的,预防的重点就在于对工程中大量的人的不安全行为和物的不安全状态的有效控制。因此,必须不厌其烦地关注施工中的日常安全管理,特别要注重细节管理,才能很好地控制事故隐患,实现重大事故的预防。

### 3.3 地下工程建设安全管理应实施的对策

面对地下工程建设安全的挑战,根据工程建设安全科学及重特大工程事故原因的分析,其应实施的对策为:

#### (1) 加强针对地下工程安全风险管理的法规建设

针对地下工程高风险工程的特性以及地下工程事故高发态势,需要政府有关部门(城市建设部、交通部、铁道部和水利部等)以及行业协会制订强有力的法规作指导和规范,通过法规明确政府监管部门、业主、监理、设计和施工等各有关单位的安全风险管理责任,建立全面科学的安全风险管理体系;通过法规强制实行重大工程立项前的安全风险分析、评估研究,凡安全风险评估为“严重”等级的工程方案应实行一票否决制,必须进行修改;强制实行重大地下工程的设计和施工方案审核制;通过法规规定在工程预算及定额中安全风险的相关费用,及其在整个地下工程建设费用中所占的合理比例,且为“专项提取”,不列入商务造价标,并加强其审计和监督,确保这些费用切实落在安全风险管理工作上。

#### (2) 实施地下工程安全风险管理的重在预防

提高地下工程风险意识,全面推广在一切地下

工程领域实行地下工程安全风险管理制度，将其作为地下工程项目管理的必要组成部分。

安全风险管理制度主要包括风险因素辨识和分析、风险工程评估、风险监测和控制，内容涉及探明风险源、分析确定风险因素导致事故发生的概率和事故后果影响的大小、评估风险工程的等级以及建立监测系统，采取预防措施及预警应急方案以规避、转移和减缓风险等。

安全风险管理制度应贯穿地下工程建设的全过程，包括勘察阶段、方案设计阶段、初步设计阶段、施工设计阶段、施工阶段及工后阶段。

(3) 建立地下工程安全监控中心(分中心)和第三方监测、监理制度

安全监控中心是地下工程安全风险管理的信息枢纽，负责组织工程各部分、各阶段的安全风险监控、综合预警发布、信息管理和相关咨询工作，并进行监督管理。为保证风险管理工作的权威性和专业性，一方面明确安全监控中心是业主的职能部门，同时以合同方式委托专业咨询单位(或第三方监测单位)负责，安全监控中心的所有指令都以业主名义发出。

对于安全风险专业咨询单位和第三方监测、监理单位的资质和监测、监理人员的考核、审查，政府有关部门应建立相应的严格管理制度。

(4) 建立基于现代化、信息化技术的地下工程建设安全风险管理制度

这种系统能克服目前工程管理中参建各方职责不清、信息不畅的弊端，利用信息技术将工程安全管理的有关信息及时地传递到有关各方，使有关各方在工程中的“操作”相对“透明”，有利于提高效率 and 落实责任。

这种系统包含地理、地质信息系统，为风险管

理提供地理、地质、工程和环境等信息支持；包含风险基础信息数据库，为风险管理提供风险工程信息，风险阈值，风险监测数据库(空域和时域)，风险处置方案等；包含风险预警管理模块，为风险管理提供风险分析，预警发布，风险处置消息及历史预警查询等。

(5) 加强地下工程安全风险管理制度以及重大事故预测预报和防治技术的研究

工程事故的预防主要从创新技术方法和改善管理方法两方面来进行。在管理上，要加强工程建设的安全风险管理，推广安全风险管理制度。在技术方法上，要综合利用现代数值模拟手段和地球物探方法，不断研究新的技术方法，对重大事故进行预测预报。

突水突泥地质灾害和岩爆地质灾害居地下工程事故客观原因中的第一主因，并有时成为不可预防的“天灾”。下面主要对这两类工程地质灾害的机制和防治理论进行阐述。

4 突水突泥地质灾害的挑战和对策

4.1 突水突泥地质灾害对地下工程建设安全的挑战

我国 70% 的国土面积为山区，且岩溶地区分布广泛，可溶岩分布面积约占国土总面积的 1/3，其中以西南部云、贵、桂和川、鄂、湘部分地区的岩溶最为发育。因此在我国地形、地貌及地质条件复杂的地区，特别是西部地区修建地下工程，尤其是长大隧道的建设将会遇到很多的岩溶和不良地质问题。随着我国地下工程建设的大、长、深发展趋势，突水突泥地质灾害逐渐成为制约我国隧道建设发展的瓶颈问题。表 2 给出了我国的部分长大隧道突水突泥灾害详情<sup>[3]</sup>。

表 2 我国的部分长大隧道突水突泥灾害详情<sup>[3]</sup>  
Table 2 Details of water and mud outburst incidents in China<sup>[3]</sup>

隧道名称	地质灾害描述
大瑶山铁路隧道	施工期涌水量：4 000 ~ 15 000 m <sup>3</sup> /d，平洞 1994+213 涌水造成竖井被淹、洞内机具被淹没达数月；正洞 DK1994+600 涌水淹没隧道 200 余米，水深 1.4 m，隧底淤积泥沙厚 1 m，中断施工长达 1 a 之久；DK1994+636 ~ 637 处发生涌泥涌沙 80 m <sup>3</sup> ，淹没轨道，造成短时中断行车；地表斑古坳地区生产生活用水枯竭；地表坍塌约 413 次
圆梁山铁路隧道	施工期涌水量：110 000 m <sup>3</sup> /d(出口 DK361+764)；DK354+450 ~ 510 溶洞发生涌水为 9.6×10 <sup>4</sup> ~ 1.656×10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> /d，伴随涌沙涌泥，淤积长度 130 m，高度 2.5 m，涌沙量约 1 300 m <sup>3</sup> ；DK354+879 溶洞发生涌水，伴有涌泥涌沙(总量约 6 000 m <sup>3</sup> )，最大涌水量达 7.2×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d，造成人员伤亡事故，被迫采用迂回导坑通过；DK360+873 涌沙，淹没导洞近 200 m；DK361+764 处发生涌水伴随涌沙涌泥，涌水量为 240 000 m <sup>3</sup> ，涌泥沙覆盖整个掌子面，淤积量约 15 000 m <sup>3</sup>
歌乐山铁路隧道	DK2+619.6 发生涌水，涌水量 14 400 m <sup>3</sup> /d，涌水泥沙含量达 20% ~ 30%
宜万马鹿箐隧道	2006 年 1 月位于湖北省恩施市屯堡乡的宜万铁路马鹿箐隧道发生涌水，死亡 11 人
宜万野三关隧道	2007 年 8 月 5 日发生突水突泥事故，在 30 min 内，突出 15 104 m <sup>3</sup> 水、泥、石等物，导致大量机械被冲出，并造成人员伤亡，治理时间至少半年，淹没正洞 500 余米，掌子面附近 200 m 全被大块孤石充满



特别需要指出的,渝怀线铁路圆梁山隧道在毛家坝向斜处最大突水量为  $14.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 其中 3<sup>#</sup> 溶洞曾发生爆喷型涌泥,瞬间涌泥量高达  $4\,200 \text{ m}^3$ , 充满下导坑 244 m 空间;广渝线华蓥山公路隧道施工中发生多次突水灾害,同时局部伴随大量涌泥,左洞左侧底板突水量高达  $14\,400 \text{ m}^3/\text{d}$ ,涌泥砂  $463 \text{ m}^3$ ;渝怀线铁路武陵隧道施工揭露 4 条特大暗河,最大突水量  $718 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。宜万线铁路野三关隧道穿越强岩溶地区,由于连续降雨,地表水与地下溶腔及断层水相通,其 I 线 DK124+602 掌子面在爆破后不久发生大型突水涌泥地质灾害(见图 6),突水量约为  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,并伴有大量泥沙涌出,突水部位的水量最终稳定在  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  左右,造成 10 人死亡;沪蓉线龙潭隧道左线曾发生大型突泥地质灾害,淹没隧道约 58 m,突泥量高达  $1\,800 \text{ m}^3$ ,并伴有  $30 \text{ m}^3/\text{d}$  稳定流量的水流,造成施工中断数月之久;宜万线铁路马鹿箐隧道平导施工时上覆溶腔水体压裂拱部围岩,发生特大突水灾害,最大突水量高达  $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ,造成 11 人死亡;衡广线铁路大瑶山隧道忽略了槽谷地区岩溶现象及岩溶水与断层的连通性,当隧道掘进至 334 m 时,发生突水淹井事故,最大突水量达到  $4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水中含沙量高达 20%,致使水下 6 台高扬程水泵(200D~65×8)因叶轮淤堵磨损而全部失效。后经开挖迂回平行导洞排水清淤才重新开工,由此造成工程停工达 1 a 之久。



(a) 突水部位



(b) 突水冲出的巨石

图 6 宜万线野三关隧道突水<sup>[4]</sup>Fig.6 Water and mud outburst incidents in Yesanguan tunnel on Yichang—Wanzhou railway line<sup>[4]</sup>

由表 2 可见,由于突水突泥等地质灾害造成极大的设备损失、严重的人员伤亡和工期延误。据不完全统计,在水利水电、铁路、公路、矿山的隧(巷)道施工过程中遇到的突水突泥等地质灾害所造成的停工时间约占总工期的 30%。

据相关资料统计,仅 20 世纪 80 年代,我国长岩溶隧道共计 26 座,约占隧道总数的 40%,其中西南、中南地区 17 座,占岩溶隧道数量的 65%左右,且在施工过程中均遭受不同程度岩溶水的侵害,其中 10 座发生了较大岩溶突水灾害。

进入 21 世纪以来,随着长大隧道等地下工程埋深的增大,施工条件的日趋复杂和生产机械化程度的提高,突水突泥带来的经济损失及人员伤亡呈增长趋势,因此,施工突水突泥灾害对重大地下工程建设安全的挑战相当严峻。

#### 4.2 突水突泥地质灾害的发生是有科学规律可循的

地下工程施工中,不可避免地会破坏隐伏的含水构造,导致导水通道与开挖临空面相连通或处于准连通状态,进一步的扰动会诱发地下水或与导水通道有水力联系的其他水体(地表水、地下暗河以及溶腔水等)突然涌入开挖区,发生突水突泥灾害。因此突水突泥的发生是有条件的:含水构造的能量储存,含水的动水性能和能量释放以及围岩的稳定性。

含水构造的能量储存是指含水构造中的岩溶水体由于高水头压力作用相对于开挖中的地下工程具有势能和围岩具有应变能;岩溶水动力性能与能量释放是指岩溶水压与隔水层厚度的比值,它是突水能量释放与否的关键指标。当开挖过程中,一旦隔水层的防突厚度小于其临界值,能量瞬间释放,形成突水;含水构造围岩的稳定性是阻止突水发生的最后一道屏障,如果地下工程施工中,隔水层被直接挖除或开挖临空面的隔水层围岩,由于工程因素引起变形破坏导致防突厚度减小从而诱发突水。而对于充填型岩溶管道来说,总突水势能达到一定阈值时,充填介质将滑脱,发生渗透失稳突水。

岩溶隧道突水突泥实质上是地下水运移网络或储存条件受外界干扰发生的动力失稳现象,影响因素多且复杂,总体上可概括为工程因素和地质因素。工程因素比较复杂,诸如开挖、爆破、注浆以及其他人为活动,而地质因素则主要包括地下水、岩组、地质结构面、岩层产状、沉积期古剥蚀面、地貌和降雨等。

#### 4.3 突水突泥发生一般有预兆,是可预测预报的

突水突泥地质灾害的前兆包括地质调查前兆、含水构造在地球物理勘探中的前兆以及临突水前的

前兆。

#### 4.3.1 突水突泥地质灾害的地质调查前兆特征

通过对岩溶隧道突涌水实例资料的系统收集和归类整理,分析了突涌水地质灾害的前兆信息及临灾特征,总结如下:

(1) 在地下工程施工过程中,可通过观测钻孔出水情况或分析开挖揭露围岩的变化情况,获取一定的突水前兆信息,从而避免突水灾害。如:

当采用超前钻孔探测时,钻进速率突然增大,钻孔开始出现喷水现象,喷距比较大,且呈浑浊状态或时喷时停者。

在开挖过程中:掌子面附近围岩出现锈状,且开始出现环状滴水或渗水现象者;揭露岩体的岩性发生突变者,如弱可溶岩进入强可溶岩的边界部位;开挖过程中,发现黏土量增多,而涌水量有减小的趋势;或出现大量的剥落碎块,掌子面无涌水现象者;突然遇到断层破碎带、褶曲向斜、裂隙密集带或岩溶管道不良地质,且揭露围岩明显湿化者。

(2) 在地下施工中,当接近不良地质或岩溶水时,可以发现一定的突水突泥灾害特征。

##### 断层破碎带前兆

岩层中伴有牵引褶曲、牵引褶皱、弧形节理组成的小型帚状构造或反倾节理裂隙的出现,节理组数急剧增加,可达6~12组;开始有压碎岩、碎裂岩的出现,岩石强度明显降低;邻近富水断层下盘泥岩、页岩等隔水层明显湿化、软化,或伴有淋水现象和其他水流痕迹。

##### 临近大型溶洞水体或暗河前兆

钻孔中涌水量剧增,且夹有泥沙或小砾石,或有凉风冒出,洞中有较大的流水声;施工过程中小溶洞出现的频率增加且多有水流、河沙或水流痕迹,裂隙、溶隙间含有较多的铁染锈或夹黏土,岩层明显湿化、软化,或伴有淋水现象。

##### 岩溶管道前兆

非断层破碎带出现岩层内倾牵引现象或内倾小断层,附近岩层易发生疏松、变暗等氧化现象,且可使岩层潮湿或泥化。

##### 淤泥带的前兆

频繁出现铁染锈裂隙或有水、无水小溶洞;若淤泥带中含水较多,钻孔中的用水量剧增且浑浊,并夹有大量泥沙和棱角尖锐的小碎石。

##### 邻近人为坑洞积水的前兆

掌子面空气变冷或出现雾气,岩层明显湿化、软化,或伴有淋水现象以及嘶嘶的水声,岩层裂隙有涌水现象;若为煤层老窑积水,则岩层中有暗红

色水锈的出现。

#### 4.3.2 突水突泥地质灾害在地球物理勘探中的前兆特征

岩溶水体和不良地质体的存在是突水突泥地质灾害发生的前提,当地下工程开挖邻近它们时,其在电场、磁场和地震波等地球物理信息场上有一定的响应特征,即表现为特殊的前兆信号,通过其辨识,可发现这些前兆信息<sup>[5]</sup>:地质雷达波通过地下水、含水溶洞及富水介质等含水水体后,高频成分被吸收,含水层的反射波的优势频率会降低;电磁波通过含水裂隙或富水破碎带时,其电导率远大于无水岩石,因此雷达波的反射强烈;雷达波遇含水层的反射波相位,相对于入射波,相位差180°。

#### 4.3.3 突水突泥地质灾害在临突水前的前兆信息

模型试验和现场监测表明:

(1) 当开挖面接近岩溶含水构造时,隔水层及围岩体经历了内部裂隙萌生、扩展、贯通的细观破裂过程和围岩渗水、局部涌水、整体失稳突水的宏观灾变过程。

(2) 临突水前,位移表现为持续增长后的突升,应力表现为持续增长后的突降,渗压表现为持续降低后的突降,隔水层的声发射事件及其能量也在突水前均体现出一定的突升和激增现象。

#### 4.4 应对突水突泥地质灾害的对策

(1) 突水突泥地质灾害事故的绝大部分在实行综合超前地质预报与预警机制后是可以避免的

基于突水突泥地质灾害的发生是有科学规律可循的,是有前兆可预测预报的,为了预防和避免突水突泥灾害事故,可以或必须实施超前地质预测预报。由于地质条件的复杂性和物探结果的多解性,单一的预报方法难以保证结果的准确性,而且不同的预报方法所得的结果也有所差异,因此,为了提高预报的准确性和精确度,必须实施综合超前地质预报,从而扬长避短、相互补充、相互印证,多角度、多参数地对施工前方的地质情况进行预报:宏观超前地质预报(工程地质法)、长距离(50~200 m)超前地质预报(工程地质法、TSP 探测等)、短距离(50 m以内)超前地质预报(地质雷达、红外探水、瞬变电磁、超前钻探、超前导洞及经验法等)。

根据综合地质超前预报报告制定相应的预警方案和处理措施。

(2) 必须在岩溶地区实施地下工程安全风险管理制度

虽然突水突泥地质灾害是有发生前兆的,是可以预测预报的,绝大部分是可以避免的,但关键是

要落实到工程管理中去，因此必须实施地下工程安全风险管理制度。

首先，在重大地下工程可研阶段实行工程安全风险管理制度，通过工程风险分析和风险评价决定工程是否批准立项，对于风险等级严重的工程实行一票否决，必须修改方案，特别是修改工程埋深和走向；其次，在立项后工程实施过程中，要通过地质分析确定所要预报工程各段的围岩情况进行风险等级评价和划分，对不同地质灾害风险等级的工程段实行不同的综合预报方案。

实践表明：重大工程区地质分析和不良地质宏观预报是综合超前地质预报的基础和前提，是工程高水平的施工地质灾害综合超前预报的不可或缺的第一道工序。只有在地质分析和宏观预报的指导下，才能准确、有效地实施下一步的地质超前预报、超前钻探、判断及临近警报等后续预报工作。

地下工程地质灾害监测、判断和临近警报技术是在地下工程所在地区不良地质宏观预报和岩溶水体和不良地质体长期和短期超前预报的基础上进行的，包括地质灾害的环境监测、地质灾害发生可能性和位置的判断，以实施地质灾害的临近警报。根据综合超前地质预报基础上风险评价的结果和信息化施工过程中揭示的信息，判断突水的危害程度、发展趋势和可能造成的危害程度。灾害预测预警级别可分为 4 级：红色(特别严重，I 级)、橙色(严重，II 级)、黄色(较重，III 级)和蓝色(一般，IV 级)。预警信息一经发布，必须严格按照预警级别及应急预

案制定相应的工程预防措施并按措施进行施工。

## 5 岩爆地质灾害的挑战和对策

### 5.1 岩爆地质灾害对地下工程建设安全的挑战

图 7 给出了我国煤矿历年来出现岩爆矿井数量<sup>[6]</sup>，该图表明，发生岩爆灾害的煤矿井数量呈指数规律增长。

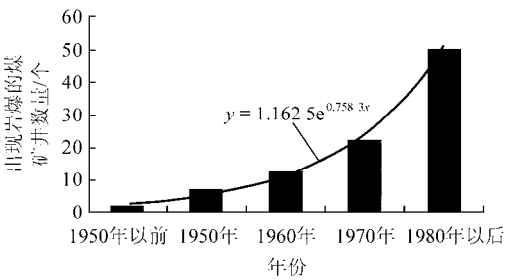


图 7 出现岩爆的煤矿井数量<sup>[6]</sup>

Fig.7 Numbers of coal mine wells where rockburst happened<sup>[6]</sup>

我国金属矿的开采深度普遍大于煤矿采深，金属矿山的岩爆灾害更为严重突出。如我国年产量超过 1.5 万吨的冬瓜山铜矿采深超过 1 000 m，自 1996 年 12 月 5 日第一次发生岩爆以来，已记录到岩爆现象超过 10 余次，多次影响施工进度。表 3 总结了我国的深部交通及水电地下工程领域岩爆灾害情况<sup>[6]</sup>。

由表 3 可见，随着该领域地下工程埋深增加，特别是西部大开发以来，岩爆灾害发生的频次和等

表 3 我国发生岩爆矿区及隧洞工程汇总(不完全统计)<sup>[6]</sup>

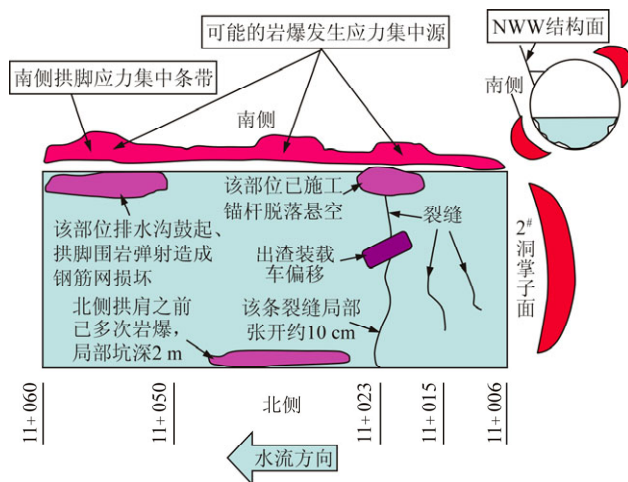
Table 3 Summary of mine and tunnel projects where rockburst has occurred(incomplete statistics)<sup>[6]</sup>

工程名称	竣工年份	最大埋深/m	岩爆等级及比例/%			岩爆次数/次	岩爆段长度/m	备注
			轻微	中等	强烈及极强			
成昆铁路关村坝隧道	1966	1 650	为主	少量	无			零星岩爆
二滩水电站左岸导流洞	1993	200	为主	少量	无		315	工程区位于深切河谷卸荷集中区域，最大主应力为 26 MPa，方位角 N34 E，倾角 23°，因而以水平应力为主
岷江太平驿水电站引水隧洞	1993	600	为主	少量	少量	> 400		
天生桥二级水电站引水隧洞	1996	800	70.0	29.5	0.5	30		比例依据岩爆次数统计
秦岭铁路隧道	1998	1 615	59.3	34.3	6.4		1 894	比例依据岩爆段长度统计
川藏公路二郎山隧道	2001	760	为主	少量	无	> 200	1 252	
重庆通渝隧道	2002	1 050	91.0	7.8	1.2		655	比例依据岩爆段长度统计
重庆陆家岭隧道	2004	600	55.8	39.7	4.5	93		比例依据岩爆次数统计
瀑布沟水电站进厂交通洞	2005	420				183		工程区位于深切河谷卸荷高应力集中区内，地应力方向沿着河谷边坡向与隧洞呈大角度相交
秦岭终南山特长公路隧道	2007	1 600	61.7	25.6	12.7		2 664	比例依据岩爆段长度统计
锦屏二级水电站引水隧洞	2011	2 525	44.9	46.3	8.8	> 750		比例依据岩爆次数统计 出现数次极强岩爆
江边电站引水隧洞	2012	1 678	46.4	50.4	3.2	> 300		比例依据岩爆次数统计



级均明显增高。2000 年以前,岩爆工程埋深大都为 1 600 m,岩爆等级以轻微岩爆为主,少量为中等岩爆,强烈岩爆极少。2000 年以后,岩爆工程最大埋深超 2 000 m,甚达 2 525 m,呈现岩爆等级向中级和强烈等级明显增加的趋势,而像锦屏二级水电站引水隧洞工程更多次发生历史上罕见的极强岩爆(见图 8):2009 年 11 月 28 日施工排水洞发生极强岩爆,该隧洞洞径为 7.2 m,埋深接近 2 500 m,TBM 法开挖,28 日 0:54 极强岩爆位于距掌子面 7~20 m 范围内,爆坑深度达 8~9 m,爆方总量达近

千立方米,岩爆发生的大量粉尘在洞内弥漫达 10 min,正作业的 TBM 设备被埋,主梁断裂,沿轴线约 28 m 长原支护系统全部毁损,7 名工人遇难,1 人受伤,严重影响工程进度,采掘设备至今仍未挖出;2010 年 2 月 4 日下午钻爆法施工的 2<sup>#</sup>引水隧洞发生极强岩爆,岩爆区段达 37 m。岩爆时,停放在该部位的出渣装载车受强烈冲击弹起移位,装载铲车被弹起 3 次,岩爆除造成边坡、拱脚围岩弹出垮塌外,还造成台阶底板出现 3 条裂缝,其中一条横向贯穿隧洞,深约 1 m,宽约 10 cm。



(a) 岩爆概况示意图



(b) 岩爆导致锚杆脱落



(c) 岩爆导致的爆坑



(d) 岩爆推翻的出渣装载车



(e) 技术人员察看事故现场



(f) 台阶底板的巨大裂缝

图 8 锦屏二级水电站岩爆现场

Fig.8 Accident sites of rockburst in Jinping II hydropower station

由上所述可知,对于深部地下工程,岩爆已成为造成人员伤亡、设备毁损、影响工程施工的突出地质灾害。

## 5.2 岩爆是可以预测的

岩爆地质灾害发生的主要机制已大致清晰,在一定程度上可以对岩爆进行安全风险分析意义上的预测<sup>[7]</sup>。

世界上众多岩石力学研究工作者,包括一些知名权威,都认为岩爆的力学机制是一个十分复杂的挑战性的难题。面对其复杂性和难度,我国有的研究专家认为岩爆不能预测预报,只能预警。笔者认为:从目前岩爆研究进展的成果看,其发生的主要(虽非全部)机制已逐渐清晰,因而可以对其进行大致的(虽非准确的)预测;我国已经进行的对岩爆监测预报的大量工程实践<sup>[8]</sup>表明,对岩爆的发生部位与强度进行大致的预报是可行的;缺乏对岩爆进行预测预报的预警将是盲目的,因而也是事倍功半的。

### 5.2.1 岩爆的定义和分类

从岩爆的防治角度出发,将岩爆定义为高地应力地区由于地下工程开挖卸荷引起的围岩弹射性破裂的现象,而将无动力弹射现象的围岩脆性破坏归之于围岩静力稳定性丧失现象。从其发生机制出发,基于围岩中无结构面,可将岩爆类型分为应变型岩爆、地质构造型岩爆以及应变与构造杂交型岩爆。

这样的定义和分类将有利于对岩爆进行预测预报和采取预警措施和工程应急方案。

### 5.2.2 均质岩体应变型岩爆的预测原理

对于围岩中只存在微缺陷,不存在断层、裂隙、节理等宏观裂纹的围岩称之为均质岩体,在这类岩体中发生的岩爆,一般为应变型岩爆。应变型岩爆的理论机制概括为:工程所在地区的初始高地应力在开挖卸荷引起的应力集中后,使得围岩中的局部地应力水平超过岩体极限强度而造成围岩的局部破坏,而当破坏岩体相应其围岩高应力水平的围岩弹性应变能超过围岩破坏所耗散的破坏能时,其剩余应变能因围岩的应力梯度转化成破坏岩体的动能,从而破坏岩体向临空面弹射形成岩爆。

现从发生岩爆的冬瓜山铜矿的粉砂岩峰值前加、卸载曲线和荷载-变形(见图9<sup>[9]</sup>)全面来说明其预测原理。

由图9可见,当岩石加载至峰值强度后,外载做功 $A_1$ 所产生的能量可分为弹性变形能 $\Phi_{SP}$ 和塑性

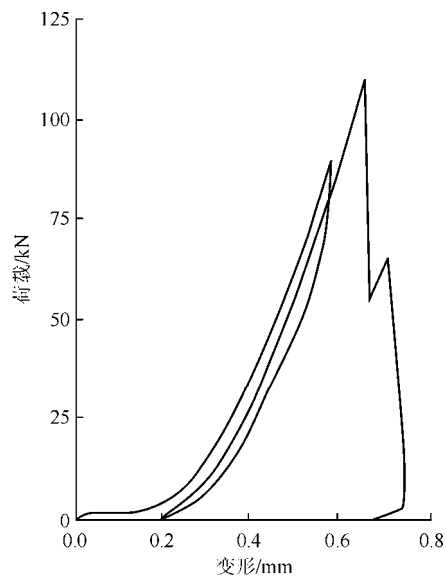


图9 粉砂岩的峰值前加载曲线和荷载-变形全图<sup>[9]</sup>

Fig.9 Complete curve of cyclic loading and deformation before peak strength of siltstone<sup>[9]</sup>

变形能 $\Phi_{ST}$ 两部分,前者为岩石储存的变形能 $\Phi_{SP}$ ,后者则在加载过程中以热能等形式耗散掉;而峰值强度后下降段曲线所围的面积则为岩石破坏所耗散的能量 $A_2$ 。

对于发生岩爆的岩石来说,其动能即为剩余能量 $\Delta = \Phi_{SP} - A_2$ ,这只有在 $A_2$ 较小,即 $\Delta$ 为正时才可能发生岩爆,即峰值后下降段曲线较陡时才有可能发生岩爆,也即发生脆性破坏时才有可能发生岩爆,所以发生岩爆的岩石一般为弹脆性或弹塑脆性岩石就是这个原因。

因 $\Phi_{SP} = A_1 - \Phi_{ST}$ ,所以有

$$\Delta = A_1 - \Phi_{ST} - A_2 \quad (1)$$

式(1)表明,岩爆预测只有在具备下述4个条件下才是可能实现的:

- (1) 获得相应围岩岩石的加卸载过程的全应力-应变曲线;
- (2) 计算出高地应力地区洞室开挖卸荷应力重分布后,非连续非协调变形岩体中的应力(应变)场;
- (3) 计算出相应峰值强度前塑性变形能的微缺陷(裂纹)扩展以及次生裂纹稳定扩展所消耗的能量;

(4) 计算出相应于峰值强度下降段曲线岩石破坏能的次生裂纹失稳扩展合并成宏观裂纹的耗散能。

上述4个条件在建立了基于断裂力学和非连续非协调变形介质解析计算模型,或能计算裂纹发生发展的扩散有限元数值计算模型的计算方法体系下

是可能的,根据该模型可预测围岩中可能发生岩爆的危险区的部位、面积以及破坏岩块的弹射速度(即岩爆等级)。

### 5.2.3 围岩中邻近洞室存在单独结构面时应变型岩爆的预测

基于工程实践,当邻近洞室的围岩节理裂隙发育到一定程度,地应力得到松弛,一般不易发生岩爆。但当邻近洞室仅存在单独结构面(裂隙)时,则另当别论,此时构造地应力松弛不充分,而裂隙位于开挖引起的应力重分布的应力集中区,导致原生裂隙滑动、启动出现次生裂隙。当裂隙扩展到一定长度后,就会与洞壁发生相互作用,产生失稳扩展,形成破裂区,对于存在原生裂隙区的脆性岩石,其裂隙扩展、破裂消耗的能量更小,所以与无宏观裂隙的围岩相比,含单条裂隙的围岩洞室更易发生岩爆,岩爆的面积更大,岩爆的强度(弹性速度)更高,这已为预测计算所证实。

### 5.3 岩爆监测预报在理论上和工程实践上是可行的

由上述可知,岩爆是高地应力地区因开挖卸荷引起的围岩动力破裂现象,由此可以推断(工程实践也表明),岩爆发生前一定是有前兆的,这给岩爆的监测预报提供了可能。如同一切岩体的宏观破坏一样,岩爆的宏观破裂是由大量的微破裂产生、合并、集群导致的失稳破裂发展而成,这就是岩爆的前兆;这些微破裂发生在工程开挖引起的卸荷范围内,因此可以被微震监测器在其有效作用范围内所接收,微破裂产生、合并、集群导致的失稳破裂发展的规律,即是岩爆宏观破坏的规律,也是岩爆监测预报可行性的理论基础。

微震监测系统通过地震检波器或加速度传感器将微破裂产生的P波和S波接收转化成电信号并转换成数据信号,借助数据处理软件,确定岩体中微震事件的时间、位置、强度,最终依据微破裂稳定或失稳破裂发展的趋势,分别对岩体是否发生岩爆以及岩爆的定位和量级做出定性和定量的评价,也即做出预报。微震监测系统监测范围广,具有监测自动化、信息化、智能化和远程化的特点。微震监测系统的监测范围可以覆盖地下工程开挖卸荷引起的岩爆发生范围。

岩爆监测预报的工程实践(锦屏二级水电站强烈岩爆区域)表明,岩爆监测预报的准确率是相当高的:中国科学院武汉岩土力学研究所的准确率为88.36%,大连理工大学的准确率为85.5%。

### 5.4 对于岩爆地质灾害的对策

综合以上岩爆预测预报的理论研究和工程实践成果,应对岩爆地质灾害的对策归纳如下:

(1) 在高地应力地区建设重大地下工程时,必须在原位实测与反演分析的基础上,掌握工程埋深区域的实际初始地应力的分布资料;在室内试验的基础上,获得工程开挖区域岩石的加卸载全过程的应力-应变曲线。

(2) 进行工程开挖前结构面(断层、裂隙等)的超前地质预报。

(3) 进行工程各开挖段的岩爆预测数值研究分析。

(4) 选择有经验的科技队伍,进行连续有效的微震监测;为了保证监测的连续有效,必须对现场监测设备及线缆进行有效的保护。

(5) 在综合对比分析超前地质预报的结构面信息、微震监测信息、岩爆预测数据的基础上,提出岩爆监测风险预测报告。

(6) 建立施工各方领导参加的对岩爆风险预测报告会的会商制度(每天、每3d、每周)提出相应岩爆风险等级的防治策略及措施;降低开挖进尺的施工调整方案;增设超前钻孔爆破的应力释放孔;加强抗爆支护措施(增加喷层厚度、系统锚杆密度及长度、加大锚杆垫片的厚度及尺寸,安装等阻大变形抗爆锚杆等)。

## 6 讨论与展望

重大地下工程的安全建设与风险管理是当前国际岩土力学与工程界最为关注的前沿问题,也是我国未来需要重点研究的关键问题。在我国地下工程建设安全形势没有得到明显改善的情形下,工程建设中安全管理的水平和工程科技水平还有很大的改进空间,针对于地下工程建设的技术方法研究和管理手段研究任重道远。

在管理手段上,城市轨道交通工程建设中已进行了安全风险管理制度探索,安全风险管理的法规体系建设和制度建设得到了完善,建立了相应的组织管理体系、技术管理体系、管理流程体系、第三方监控体系、预测预警制度及监控预警模型,制订了安全风险现场施工指南,开发了信息化的远程监控平台。通过强有效的安全风险管控,重特大事故的发生得到了有效遏制,因此,建议全面推广和加强地下工程安全风险管理制度,加强地下工程全生命周期工作的协调和统筹,加强地质勘查、地应力测试和岩体的非确定性和非均质性研究,加

强重大事故预测预报和防治的基础理论、新技术和新材料的研究,建立基于现代化、信息化技术的地下工程安全风险管理信息系统。

在技术方法的创新与发展上,我国经过近些年的努力,取得了一些突出成果,主要包括:发展了有限元极限分析方法技术并在隧道稳定性分析中得到成功应用;开发了光纤光栅传感技术、安全状态实时感知技术、施工便携式智能预警终端;研究了岩爆孕育过程的现场和室内试验方法、特征、规律、机制、分析、预警方法和基于微震信息动态演化规律的动态调控方法;研发了有效控制岩爆的大变形锚杆;建立了陆地声纳、水空间识别、瞬变电磁和复合式激发激化技术为一体的含水构造超前预报技术和系统;探索了水注浆新材料、集地质预报和科学服务为一体的信息化综合治理的决策系统。

为了更好地解决当前和今后重大地下工程建设中的安全问题,建议还应加强以下 3 个方面的研究:

#### (1) 地下工程安全设计理论研究

加强深埋长大隧道动态设计方法和掘进支护技术研究;加强岩石力学建模和岩石工程设计的研

#### (2) 风险评估理论研究

要研究和推动涵盖地下工程的各个阶段的全生命周期的风险管理理论的研究,研究基于可靠性的风险管理方法和风险量化方法,研究风险评估和决策的新方法和新技术。

#### (3) 岩爆、突水突泥的机制、预防和控制

实施基于实时微震监测的动态控制理论研究;改进前兆规律不明岩爆的预警和动态控制方法;加强微震监测的精确定位研究;加强先进的物理探测,数值分析和微震监测预警和地下工程灾害预测的综合方法的研究与利用;加强快速、准确地应力测量和地球物理勘探新方法和新技术的研究;加强新的数值模拟方法研究,尤其是基于非连续介质力学的数值模拟方法研究;尽快推动建立地下工程灾害数据库。

### 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2011 年房屋市政工程生产安全事故情况通报[OL]. 2012-02-27[2012-05-23]. [http://www.mohurd.gov.cn/zxydt/201203/t20120314\\_209111.html](http://www.mohurd.gov.cn/zxydt/201203/t20120314_209111.html). (Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. 2011 housing municipal engineering production safety accident report[OL]. 2012-02-27[2012-05-23]. [http://www.mohurd.gov.cn/zxydt/201203/t20120314\\_209111.html](http://www.mohurd.gov.cn/zxydt/201203/t20120314_209111.html). (in Chinese))
- [2] 管理科学著名定律连载. NO.39 海恩法则[J]. 施工企业管理, 2010, (3): 70. (Well-known Law of Management Science. 39-Hain's safety pyramid theory[J]. Construction Enterprise Management, 2010, (3): 70. (in Chinese))
- [3] 湖北沪蓉西高速公路建设指挥部. 高风险岩溶隧道地质灾害控制关键技术研究[R]. 武汉: 湖北沪蓉西高速公路建设指挥部, 2009. (Hubei Hu-Rong-Xi Expressway Construction Headquarters. The research of geological disaster control in high risk karst tunnel[R]. Wuhan: Hubei Hu-Rong-Xi Expressway Construction Headquarters, 2009. (in Chinese))
- [4] 湖北省三峡翻坝高速公路建设指挥部, 山东大学. 高风险岩溶隧道不良地质预报与灾害控制研究[R]. 济南: 山东大学, 2011. (Hubei Three Gorges Fanba Expressway Construction Headquarters, Shandong University. Adverse geological prediction and disaster control in high risk karst tunnel[R]. Jinan: Shandong University, 2011. (in Chinese))
- [5] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 复信号分析技术在地质雷达预报岩溶裂隙水中的应用研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2191-2196. (LIU Bin, LI Shucai, LI Shuchen, et al. Study of application of complex signal analysis to predicting karst-fractured ground water with GPR[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2191-2196. (in Chinese))
- [6] 张晓春. 煤矿岩爆发生机制研究[博士学位论文][D]. 武汉: 华中理工大学, 1999. (ZHANG Xiaochun. A study on mechanism of rockburst in coal mines[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1999. (in Chinese))
- [7] 王元汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的“模糊数学”综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493-501. (WANG Yuanhan, LI Wodong, LI Qiguang, et al. Comprehensive method for estimating rockburst with fuzzy mathematics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 493-501. (in Chinese))
- [8] 蔡美峰, 王金安, 王双红, 等. 玲珑金矿深部开采岩体能量分析与岩爆综合预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 38-42. (CAI Meifeng, WANG Jin'an, WANG Shuanghong, et al. Analysis of energy distribution and prediction of rockburst during deep mining excavation in Linglong gold mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 38-42. (in Chinese))
- [9] 唐礼忠, 王文星. 一种新的岩爆倾向性指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 874-878. (TANG Lizhong, WANG Wenxing. A new rock burst proneness index[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 874-878. (in Chinese))