

中国岩石工程技术的新进展

钱七虎^{1,2}

(1. 解放军总参科技委,北京 100857; 2. 解放军理工大学,南京 210007)

[摘要] 在水电建设的岩石工程技术方面,介绍了三峡船闸高边坡稳定性及监控施工技术;深切河谷水电工程高边坡稳定性和支护技术;大跨度高边墙地下洞室群围岩稳定技术。在公路、铁路建设中的岩石工程技术方面,介绍了青藏铁路——穿越长年冻土层的施工技术;公路、铁路隧道中乌鞘岭隧道挤压大变形支护技术,高寒高海拔的风火山隧道、二郎山隧道施工技术;岩溶地区隧道超前地质预报技术。在矿业工程的岩石工程技术方面,介绍了煤矿巷道支护成套技术创新体系;低透气性煤层群无煤柱煤与瓦斯共采技术;深凹露天矿安全高效开采技术。另外,还介绍了岩石工程锚固新技术和精细爆破技术。

[关键词] 岩石工程;水电工程;支护技术;地质预报;锚固技术;爆破技术

[中图分类号] TU45 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)08-0037-12

1 前言

“岩石力学与岩石工程”是一门与国民经济建设、国防建设有着极其密切关系的应用学科。人类为了开发能源、防灾减灾、发展农业,要兴修大量的水利工程;为了修公路、筑铁路,要劈山越岭、开凿隧道(包括水下隧道);为了国民经济建设的需要,要从地下索取大量的矿产资源;为了修筑大型桥梁,要解决最关键的桥墩岩基问题;为了缓解地面居住及城市交通的紧张状况,势将更大规模地开发和利用地下空间;为了国防建设的需要,要修筑地下洞(井)库工程等。人类这些重要的工程活动,实际上都要依据“岩石力学与岩石工程”学科的理论原理作为指导,才能保证正确进行。没有“岩石力学与岩石工程”学科知识的武装,这些重要工程的设计、施工和成功修建是不可能的。我国的岩石工程,无论是地面的,还是地下的,近些年来其规模之大、难度之高、数量之多,已居世界之前列。例如,世人瞩目的三峡工程以及金沙江、雅砻江、大渡河上已建和在建的大型水电工程;南水北调水利工程;成昆(成都—昆明)、南昆(南宁—昆明)、京九(北京—九

龙)、青藏(青海—西藏)、滇藏(云南—西藏)等铁路工程;“7918”(7条射线、9条纵线、18条横线)高速公路工程;大冶、攀枝花、鞍本、金川等矿山工程;抚顺、大同、两淮、兖州等煤炭工程;大庆、胜利、克拉玛依等石油工程;秦山、大亚湾、岭澳等核电工程;北京、上海、广州、深圳等城市地铁工程;一些在建或蓄势待建的石油战略储存、核废料储存工程、国防工程等。这些工程相当一部分在我国西部地区,不仅地势险峻、地质环境复杂,而且还处于地质灾害高风险条件下,带来的技术难题也是空前的。几年来中国岩石力学与岩石工程科技人员为解决这些技术难题,奋力拼搏,开拓进取,取得了一大批开创性成果。

2 水电建设中的岩石工程技术

2.1 三峡船闸高边坡稳定性及其监控施工技术

水电工程最具代表性的是三峡工程。三峡岩石工程建设重大成果之一是三峡船闸高边坡稳定性及其监控施工技术。永久船闸位于三峡大坝左岸山体中,是在山林中深切开挖修建的双线连续5级船闸。船闸线路总长6 442 m,其中船闸主体段(闸室段)

[收稿日期] 2010-02-01

[作者简介] 钱七虎(1937-),男,江苏昆山市人,中国工程院院士,解放军理工大学教授,研究方向为防护工程及地下工程;

E-mail: gcyqqh@163.com

长 1 621 m。船闸沿线形成 W 形(见图 1)。

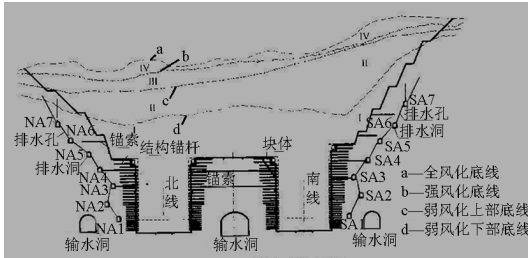


图 1 船闸高边坡典型锚固断面
Fig. 1 Typical anchoring section of high - rock slope of shiplock

人工开挖岩质高边坡,最大开挖高度 173 m,最大坡高 160 m,边坡高度连续超过 120 m 范围长约 460 m,土石方明挖 $4\ 196 \times 10^4\ \text{m}^3$,土石方洞挖 $9.8 \times 10^5\ \text{m}^3$,两线船闸中间保留有 50 ~ 60 m 中隔墩。船闸最大总水头 113 m,地下输水系统反弧门单级最大工作水头 45.2 m,是目前世界上规模最大、级数最多、总设计水头最高的船闸。

和一般高边坡相比,船闸高边坡具有以下特点:
a. 它是在山体中深切出来的陡高边坡,高度大、形态复杂、范围广、应力释放充分,呈现出明显的卸荷和非均质特征;b. 为确保黄金水道畅通和满足船闸人字门的正常运行,对边坡稳定和变形特性有严格的特殊要求;c. 施工难度大、干扰多、工期紧,不仅地面施工强度高,窄、深且陡的闸室直立边墙开挖更为困难,而且与地下隧洞与竖井开挖同步进行,如何解决开挖与爆破的相互影响,最大限度地减少岩体损伤和确保施工安全都是施工中极具挑战性的难题。

三峡船闸 20 世纪 50 年代末开始设计研究,1994 年开工建设,2003 年 6 月建成投产,它是多门类、多学科先进技术与方法综合运用和研究成果的荟萃。几十年来,数百名高校、科研、设计、施工等部门科技人员进行联合攻关,经过长期研究,所有技术难题都得到妥善解决。它涉及高边坡工程地质、岩体力学特性、地下渗流及排水措施、施工方法优化与开挖爆破技术、高边坡锚固技术、高边坡稳定性分析等方面。研究获得了有关三峡船闸高陡边坡工程稳定大量定性和定量的信息,各种二维、三维数值分析方法得出大量计算成果,为设计、施工和科学评价稳定性提供了可靠依据。

三峡船闸高边坡稳定性及其监控施工技术成果

是多方面的,文章主要介绍它的综合锚固技术。三峡船闸高边坡共安装普通钢筋锚杆近 3.6 万根、高强结构锚杆 10 万根、1 000 kN 级锚索 229 束、3 000 kN 级锚索 3 975 束,块体支护 1 054 块,其边坡锚固量和块体支护量均居世界之最,并研究成功了多形式的锚索结构。三峡船闸高边坡锚固工程浩大,锚索结构形式及施工工艺直接关系到工程进度和造价。为充分利用各种锚索的性能,根据船闸边坡的结构特点,在船闸不同部位采用不同结构形式的锚索。

1) 船闸高边坡使用的支护锚索有:1 000 kN, 3 000 kN 级端头锚和 3 000 kN 级对穿锚,除 113 束监测锚索和 121 束闸首混凝土结构加固锚索为无黏结结构外,其他均为全长黏结锚索。

2) 设计吨位 1 000 kN 锚索,超张拉吨位 1 150 kN,采用 7 根 $\phi 15.24\ \text{mm}$ 的 1 860 MPa 级钢绞线,设计强度利用系数为 0.55,超张拉强度系数为 0.63,孔深 30 ~ 40 m,孔径 115 mm,内锚段长 5 m,内锚段采用枣核状结构。

3) 3 000 kN 级端头锚索,锚索孔深 30 ~ 60 m,内锚段长 8 m,孔径 165 mm。锚索设计吨位 3 000 kN,超张拉吨位为 3 450 kN,采用 19 根 $\phi 15.24\ \text{mm}$ 的 1 860 MPa 级钢绞线,设计强度利用系数为 0.606,超张拉强度系数为 0.697,其他与 1 000 kN 级端头锚索相同。

4) 3 000 kN 级对穿锚索,主要用于中隔墩及南北坡的系统支护,南北坡与岩体深部的排水洞对穿,中隔墩两侧对穿。对穿锚索两端均设锚墩,只有张拉段无内锚段。锚索孔深 40 ~ 60 m,孔径 165 mm,其他与 3 000 kN 级端头锚索相同。闸首支持体加固采用专门设计的能适应混凝土与岩体间可能产生变形的无黏结锚索,并考虑闸首闸门交变荷载的作用,外锚头还剥皮 8 m 形成黏结段,使外锚端有锚具和黏结段的双重保险。

5) 另外,根据水电工程的特点,对锚索的耐久性也作了系统研究,并采取了相应的增强和耐久性措施,确保耐久、实用。

工程完工后,截止 2007 年 7 月 20 日,测得南北坡岩体向闸室中心线方向的最大累计位移分别为 72.07 mm 和 52.96 mm,位移月变化在 1.64 mm 和 1.96 mm 之间;南北坡直立墙最大位移分别为 36.93 mm 和 30.08 mm;中隔墩南、北侧最大累计位移分别为 23.16 mm 和 31.50 mm,闸首顶部向闸室

方向最大位移 4.73 mm, 闸首顶部向上游方向最大位移 2.75 mm, 闸首顶部向下游方向最大位移 2.84 mm, 变形基本结束。船闸投入运用后, 闸室充水过程中船闸首的位移不大于 0.5 mm, 完全满足船闸人字门正常运用的要求, 均控制在设计预测范围之内。

2.2 深切河谷水电工程高边坡稳定性和支护技术

除三峡工程外, 中国还有大批大型和超大型水电站正在和即将建设中。西电东送的规模将超过 1.5×10^8 kW。如长江支流金沙江干流上, 规划建设 20 个梯级电站, 其中 100×10^4 kW 以上的有 17 座, 如溪洛渡、白鹤滩、乌东德和向家坝的规模是在 500×10^4 kW 以上; 雅砻江干流规划建设 21 个梯级电站, 100×10^4 kW 以上的有 10 座, 其中锦屏一级、二级总装机容量为 840×10^4 kW; 大渡河干流规划建设 22 个梯级电站, 其中 100×10^4 kW 以上电站有 7 个, 例如, 瀑布沟电站为 360×10^4 kW。另外, 还有澜沧江上的小湾、糯扎度, 乌江上的构皮滩, 红水河上的龙滩, 黄河上游的拉瓦西等。

这些电站大多处在我国青藏高原向四川盆地过渡地带, 由于晚近期以来地质构造的作用, 青藏高原快速隆升, 形成了一系列的大江大河以及高差达 2 000 ~ 3 000 m 的深切河谷, 同时也发育了我国著名的西部深大断裂带和地震带。因此, 地质条件十分复杂, 在开发水力资源的过程中, 存在着复杂的大型工程高边坡问题。这类高边坡具有如下一些显著特征: a. 自然谷坡陡峻, 坡角一般在 45° 以上, 大多在 $70^\circ \sim 90^\circ$, 谷深多在千米以上; b. 工程边坡高, 大多在 300 m 以上, 最高可达到 600 m 以上; c. 边坡的地质条件复杂, 断层发育, 岩体地应力高, 岩体卸荷强烈, 卸荷深度大。锦屏一级水电站就是一个典型的例子。

锦屏一级水电站枢纽区为典型的深切“V”型峡谷, 相对高差 1 500 ~ 1 700 m。左岸为反向坡, 1 820 ~ 1 900 m 高程以下为大理岩, 坡度 $55^\circ \sim 70^\circ$; 以上为砂板岩, 坡度 $40^\circ \sim 50^\circ$, 呈山梁与浅沟相间的微地貌特征。该工程将建世界最高拱坝, 左岸肩拱肩槽边坡开挖高度达到 530 ~ 540 m, 国内外少有, 而且地质条件十分复杂, 设计和实施难度很大, 引起国内外工程界高度关注。

成都勘测设计研究院联合国内多家科研单位和大专院校对坝址区开展了深入细致的研究, 基本查

清了该区的工程地质条件和主要的工程地质和岩石力学问题。针对结构面不利组合情况, 分别采用三维极限平衡法、有限元强度折减法和三维非线性有限元法等方法, 考虑边坡不同工况, 分析了边坡整体滑移破坏模式和局部滑移破坏模式下的稳定状况, 并采取相应确保稳定的措施。

1) 边坡截、排水系统: 在开挖边坡周边设置截水沟、排水沟等地表排水系统和地下排水孔、排水水平洞系统, 避免地表水、地下水入渗开挖边坡, 引起边坡失稳。

2) 锚杆、锚筋加固系统: 采用系统锚杆、锚筋束对开挖边坡浅表松动岩体进行系统处理, 确保岩体稳定, 施工安全。

3) 锚索布置: 左岸开挖边坡 1 820 m 高程以上的砂板岩卸荷岩体及 1 800 m 高程附近 f42-9 断层剪出口部位岩体, 采用 2 000 kN (必要时 3 000 kN) 级预应力锚索加固, 锚索间排距 4 m × 4 m, 锚索长度 40 ~ 80 m。大理岩卸荷岩体采用 2 000 ~ 1 000 kN 级锚索加固, 随机布置。开口线附近浅表危岩体采用 2 000 kN 级预应力锚索加固, 锚索间排距 5 m × 5 m。

4) 抗剪置换洞: f42-9 断层为边坡潜在整体滑动的滑移面, 采用抗剪置换洞方式予以加固。分别在 1 834 m, 1 860 m 和 1 885 m 高程设置 3 层抗剪置换洞, 采用 9 m × 10 m 断面, 挖除断层及破碎带, 周围岩体固结灌浆, 回填混凝土。

5) 灌浆处理: 利用现有锚固洞对卸荷裂隙和卸荷岩体进行灌浆处理, 采用马道锚筋束孔及马道间的预灌浆孔对边坡进行预灌浆处理。

通过采取以上措施处理的边坡工程, 经过几年的监测, 边坡变形逐步收敛, 证明边坡加固实施效果较好。该边坡成功实施, 表明我国边坡工程实践取得新的跨越, 在边坡工程地质调查、稳定性分析、加固技术、施工开挖技术等方面提高到一个新水平。

2.3 大跨度高边墙地下洞室群围岩稳定技术

随着我国国民经济的不断发展和对地下空间建设的需求, 大跨度高边墙地下洞室(群) 在我国的能源、交通、采掘、国防等行业得到快速发展。以水电行业为例, 近 10 年来, 在我国西南地区兴建或将要建设一大批地下式水力发电站, 其洞室的跨度、高度和规模位居世界前列。表 1 是西南地区部分水电工程规模统计表。

表 1 西南地区部分水电工程规模统计表

Table 1 The statistics of scales about hydropower engineering in southwest China

名称	流域	装机容量 /MW	坝型/坝 高/m	地下厂房 (宽/m × 高/ m × 长/m)	调压室 (宽/m × 高/ m × 长/m)	引水(泄洪) 隧洞(宽/m × 高/m × 长/m)	工程边 坡高/m	开挖工 程量(石/ 10 ⁴ m ³ 土)	建设状况	特性说明
二滩	雅砻江	3 300	拱坝/240	25.5 × 65.4 × 280.3	19.5 × 69.8 × 217	16.5 × 16.5 × 876.6	240	1 151.5	已建, 2000 年竣工	国内已建最高 双曲拱坝
溪洛渡	金沙江	12 600	拱坝/278	28.4 × 75.1 × 381	23 × 94 × 300	φ10 × 183	> 300	3 543.5	在建, 2005 年开工	尾水洞长 1 802 m
锦屏 一级	雅砻江	3 600	拱坝/305	29.6 × 68.8 × 277	φ32 × 92	15 × 16 × -	> 350	1 853.8	在建, 2005 年开工	在建最高拱坝
大岗山	大渡河	2 400	拱坝/210	31.2 × 72.4 × 277.9	20.5 × 72.3 × 130	14.5 × 16 × -	> 260	912.3	筹建	
官地	雅砻江	2 400	重力坝/168	31.9 × 77.5 × 243	21.5 × 18 × 96	18.8 × 27 × -	> 120	1 231	筹建	
双江口	雅砻江	2 000	堆石坝/314	29.3 × 64 × -	18 × 52 × 120	9 × 10 × 73	> 200	1 052	拟建	在建最高堆石 坝
两河口	大渡河	3 000	堆石坝/295	28.5 × 63 × 273	20.5 × 83.7 × 215	12 × 15 × 215	> 200	2 120	拟建	295 m 堆石坝
瀑布沟	大渡河	3 300	堆石坝/186	26.8 × 70.1 × 294.1		φ9.5 × 533.7	> 150	1 529.5	在建, 2003 年开工	75.4 m 深厚覆 盖层
构皮滩	乌江	3 000	拱坝/232.5	27 × 73.2 × 230.5	24 × 46 × 110.2	φ9.5 × -	> 280	1 609.3	在建, 2003 年开工	
小湾	澜沧江	4 200	拱坝/292	30.6 × 79.2 × 298	φ32 × 87	φ18 × 932	> 400	2 468	在建, 2002 年开工	大圆筒型调压 室

近 10 年来,我国水电站地下厂房特别是大型地下洞室群的设计、施工和管理的理论、方法、技术和措施已取得长足的发展,地下工程的设计理念不断创新和突破,新技术和新方法不断应用和完善,积累了丰富的设计、施工经验,也产生了显著的经济效益和社会效益。然而,大型水电工程地下厂房往往地处高山峡谷,洞室规模巨大,其主体洞室(发电厂房、主变室、尾水调压室或尾水闸门室等)跨度接近或超出 30 m,高度可达到 80 ~ 90 m,长度可达 400 ~ 500 m,主体洞室与压力管洞、母线洞、尾水管洞以及通向地面的出线洞(井)、通风洞(井)、交通洞、尾水隧洞、排水洞等附属洞室一起,形成规模宏大、纵横交错的地下洞室群(见图 2)。对于各种类型地下厂房,不仅需要解决好洞室群在开挖过程中的洞室围岩稳定问题,更要确保地下厂房能长期安全稳定运行。

大跨度高边墙地下洞室(群)围岩稳定面临以下主要关键技术问题,包括地下洞室群合理布置、地



图 2 某大型地下厂房洞室群布置示意图

Fig. 2 The sketch of caverns group in a big - scale underground workshop

下洞室围岩稳定性与评判标准、地下洞室群支护设计与优化、高地应力地下洞室群岩爆的预防和处置、地下洞室群施工期快速监测与反馈分析和地下洞室开挖程序等。文章仅就开挖顺序和监测与反馈分析作简要介绍。

地下洞室群的施工采取不同的开挖顺序将产生不同的应力变化途径,研究不同的施工顺序以寻求岩体的最佳稳定效果是大型地下洞室群围岩稳定与支护方式研究的重要方面。目前,在地下洞室群施工开挖顺序研究方面,国内外已从平面分析发展到

反应大型地下洞室群的三维非线性特征的定量化分析,并与施工组织优化相配合,使施工力学分析与施工系统工程紧密结合,并进行定量化评估。

总结已建和在建的地下洞室群施工情况,我国

科技工作者提出的开挖顺序是:“先拱后墙、自上而下,逐层开挖、逐层支护,平面多工序、竖向多层次,多工作面交叉作业”的施工方案。图3是某工程主厂房及主变室分层开挖示意图。

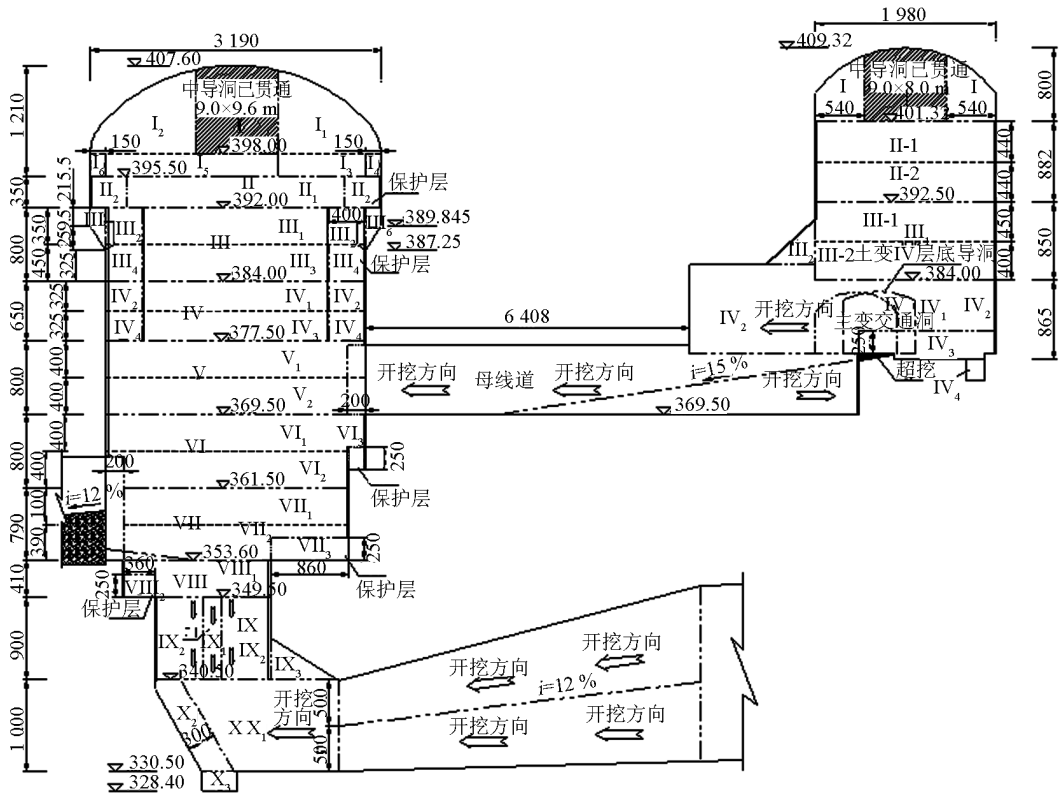


图3 某工程主厂房及主变室开挖分层示意图(单位:cm)

Fig.3 Sketch of stratified excavation on main workshop and the primary chamber (unit: cm)

由于岩体是一个包含各种复杂因素和本构关系的模糊系统,为弥补预可行研究和设计中结论和实际工程之间差距,在施工方案确定以后,还要在施工过程中建立快速监测和反馈分析系统,分析研究在一定工程措施下(开挖顺序、爆破参数、支护措施)的输出信息(应力变形等),以不断修正施工方案中结构和支护参数,这个过程要不断循环反复,也就是说整个施工要不断调整和优化,确保地下洞室群施工的经济与安全。图4是溪洛渡水电站地下厂房典型监测剖面多点位移计布置及监测反馈分析成果。从图4可清楚看出,洞室各关键部位变形量的大小,图4中虚线为实测数据,实线为反馈分析计算数据,两者总的趋势吻合较好。

通过溪洛渡地下厂房施工期监测反馈分析,逐层进行围岩稳定性评价和后续开挖对围岩影响的预测,为整个开挖过程中的设计支护参数的调整、施工开挖方案的优化提供了重要的依据。

3 公路、铁路建设中的岩石工程技术

根据规划,2020年以前中国将建成布局为“7918”的高速公路网络,即7条射线、9条纵线、18条横线,总里程约 8.5×10^4 km。其中北京至各省会城市的7条射线总里程为 1.8×10^4 km。该高速公路网将连接所有现在人口在20万人以上的319个城市。除高速公路外,其他各种等级的公路也在大规模建设,到2010年全国公路总里程将达到 230×10^4 km,到2020年将达到 300×10^4 km。

中国铁路营运里程到2007年底为 7.8×10^4 km,居亚洲第一位。根据规划,2020年前铁路营运里程将达到 10×10^4 km。中国铁路工程除已建成的4纵4横线路外,还有一大批重大的待建和在建项目,其中举世瞩目的是目前正在施工的京沪高速铁路,总投资为2209亿元,是一次性投资最多的铁路建设项目,我国铁路建设的速度在东部,铁

路建设的难点在西南。例如,滇藏铁路是规划线路之一,自云南大理站西,经澜沧江、怒江、雅鲁藏布江到拉萨,路经滇西北横断山脉、藏东南高山峡谷地区及藏南谷地,全长 1 594 km。沿线依次通过唐古拉—三江折褶带、拉萨—波密折褶带和雅鲁藏布江缝合带等三大构造带。铁路沿线地区新构造运动十分强烈,据我国 30 多年精密复测水准点资料,年平均上升速度达 12 mm,珠穆朗玛峰地区达 12 ~

50 mm。据国家地震局 1990 年《中国地震烈度区划图》(1:400 万),滇藏铁路沿线工程设防烈度 $\geq IX$ 度区线路累计长 127 km,占 8%。全线设特大、大、重型桥梁 392 座,总长 108.9 km;隧道 419 座,最长者达 12.59 km,总长 491.8 km。全线桥隧总长 600.7 km,占线路总长的 7.7%。可以说,其技术难度是世界罕见的。

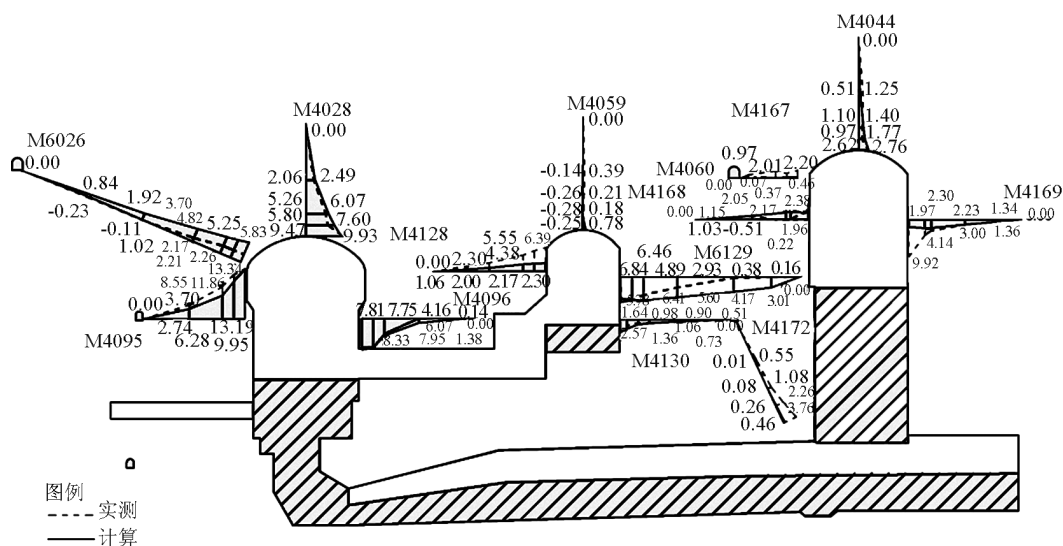


图 4 溪洛渡地下厂房典型剖面多点位移计布置及监测反馈分析成果

Fig. 4 Typical location of multiple point displacement meter of the underground powerhouse in Xiluodu and its monitoring feedback

3.1 青藏铁路——穿越长年冻土层的施工新技术

最近几年铁路建设最突出的成就是建成青藏铁路。青藏铁路,从格尔木至拉萨,全长 1 142 km,海拔高于 4 000 m 地段长达 960 km,最高海拔 5 072 m,创造了世界高原铁路的建设奇迹。

工程建设成功克服了冻土、高寒缺氧、生态脆弱三大世界性工程难题,实现了多项技术创新。在关键的多年冻土工程技术方面,中铁第一勘察设计院系统研究了气候变化的影响,制订了高原多年冻土地区铁路勘察、设计和施工的国家技术标准;确立了主动降温、冷却地基、保护冻土的设计思想并确定了关键参数;创造性地综合采用片石气冷、热棒路基、以桥梁跨越特殊不良冻土地段,并研究成功防冻胀隧道衬砌结构等成套冻土路基结构施工工艺和施工技术。

青藏铁路沿线自然条件恶劣,属生命禁区。建设中,针对大群体、高海拔、作业时间长的特点,创建

三级医疗保障救治体系,应用高原病综合救治等技术和创鼠疫预防监控体系,实现高原病零死亡和人间鼠疫零感染。青藏高原生态环境脆弱,线路穿越三江源等自然保护区,环境保护任务艰巨。建设者开展野生动物、高寒植被、多年冻土、江河源水质保护等方面的综合研究和创新实践,在大规模建设中保护了生态环境,实现了工程建设与自然环境相和谐。

技术创新、管理创新为青藏铁路建设提供了可靠支撑,青藏铁路建设形成行业标准、部级和国家级工法多项,获专利数十项,发表论文千余篇,极大地推动了多年冻土工程、高原医学和环境保护等领域的科技进步,总体技术达到国际领先水平,是中国铁路建设史上标志性的重大成就。

3.2 “隧道”施工技术新进展

在公路、铁路建设中,隧道工程施工技术近几年也取得了巨大成就。中国公路、铁路等行业已投入

使用的各类隧道 1.2 万座以上,延长总计超过 7 000 km。其中铁路隧道 7 000 多座,总长超过 4 000 km,公路隧道 4 000 多座,总长超过 2 000 km。中国建成的水下隧道主要集中在上海地区,已建 8 座跨黄浦江隧道,另外待建和在建的还有 5 座。其他在建的有南水北调的跨黄河跨长江隧道和城市有关隧道;在建的跨海隧道有胶州湾湾口海底隧道、广州生物岛——大学城隧道及狮子洋海底铁路隧道等;拟建的有琼州海峡跨海工程、渤海湾(大连—蓬莱)跨海工程、杭州湾外海工程(上海—宁波)以及大连湾水下隧道等。

在特长隧道建设方面,10 km 以上特长铁路隧道有 21 座,其中最长的铁路隧道为 20.06 km 的乌鞘岭隧道,另外,还有大瑶山隧道(14.3 km)、秦岭一线隧道(18.46 km)、二线隧道(18.46 km)、东秦岭隧道(12.27 km)、圆梁山隧道(11.07 km)。公路隧道方面有秦岭终南山隧道(18 km),规划在建中的 10 km 以上公路隧道有甘肃大坪里隧道、陕西包家山隧道、山西宝塔山隧道等。中国目前规模最大的特长公路隧道群——沪蓉西高速公路全线有隧道 44 座共 155.712 km,隧线比 48.66%,其中特长隧道 10 座共 92.134 km。水工隧洞中,锦屏二级水电站共 4 条引水隧洞处于高地应力和岩爆、岩溶、高地温、有害气体等不良地质地带,开挖洞径 12 m,平均长度 16.625 km,最大埋深达 2 525 m。另外,引大入秦工程是跨流域调度的大型水利工程,全长 884.3 km,有隧洞 77 座,总长 110 km。其中总干渠全长 87 km,有隧洞 33 座,总长 75.14 km,堪称“地下运河”。2009 年 4 月 15 日,大伙房水库输水工程输水隧道全线贯通,贯通误差仅为 3 cm,隧道长 85.3 km,超过目前世界公认最长的 57.67 km 的瑞士戈特哈尔德隧道,成为世界上最长的水工隧道。

3.2.1 乌鞘岭隧道挤压大变形的支护技术

兰新铁路线上的乌鞘岭隧道是中国目前最长的铁路隧道(全长 20.06 km),岭脊地段埋深 500 ~ 1 100 m,隧道穿越多条区域性大断层组成的“挤压构造带”,高地应力软弱围岩挤压大变形显著,变形控制十分困难,对设计、施工技术都是一次空前的挑战。中铁第一勘察设计院集团有限公司等单位科技人员采取了“短开挖、快封闭、强支护、速成环、二衬适时紧跟”的原则,成功解决了通过挤压大变形的难关,具体措施有:

1) 采取辅助工法,对软弱断层围岩进行超前预

支护,施工中采用严格控制施工爆破参数,尽量减少对围岩的扰动。

2) 优化施工参数,采取超短台阶法施工,使围岩和初期支护系统及早闭合成环。

3) 采用“多重支护”的原则,开挖初期及时喷混凝土(厚 20 cm)并施作长系统锚杆,使围岩和支护系统达到变形协调,并释放部分位移。随即施作钢支撑,并复喷混凝土(厚 15 cm)以部分限制围岩挤压变形发展。

4) 根据实例变形曲线采取合适的预留变形量和适当的二次衬砌施作时机。

5) 加强现场监控量测,动态控制围岩挤压大变形,并重视地质超前预报。

3.2.2 高寒高海拔隧道施工技术

中国隧道工程在机械化程度、修建速度、长大隧道修建能力等方面和国际水平相当,但在穿过高寒、高海拔复杂地质条件地区施工技术已处于世界领先水平。如以青藏铁路风火山隧道为依托而形成的高原多年冻土隧道防排水及保温施工技术、低温早强混凝土施工技术、高原多年冻土隧道光面爆破技术、高原多年冻土隧道施工卫生保障技术和环境保护技术等,填补了国内在该领域的空白。以川藏公路二郎山隧道和鹧鸪山隧道为依托,解决了高海拔大型公路隧道地形地质条件复杂、气候条件恶劣、营运条件特殊带来的三大类关键技术难题,形成了一批创造性综合技术成果。

1) 在国内外开创了单洞双向行驶条件下,平导压入半横向式和纵向式通风的特长公路隧道建设模式并解决了相应的关键理论和技术问题。

2) 在国内外首次建立了季节性冻胀冻融地区特长公路隧道结构抗防冻设计的技术体系。

3) 运用岩体浅表生改造理论、卸荷变形破裂理论和软岩力学理论,在国内外首次建立了高地应力场的相应地质力学模式、岩爆和大变形的力学机制及其预测预报综合集成技术。

4) 在国内首次测试了 400 ~ 5 000 m 海拔范围考虑烟雾和 CO 的海拔高度系数,填补了我国现行《公路隧道通风照明设计规范》的空白。

5) 建立了基于 GIS 的隧道机电设备营运智能监控及维护管理一体化技术系统,实现了高寒区大型公路隧道机电系统监控管理的智能化、网络化、组态化和综合化。

6) 根据公路隧道横断面特征,针对高烈度地震

区公路隧道,提出了加设减震层、采用聚合物钢筋或钢纤维混凝土衬砌等抗减震措施。

二郎山隧道经历了汶川地震的考验,基本完好无损,证明施工技术措施是正确的。以上核心技术均属于世界领先水平。

3.2.3 岩溶地区隧道超前地质预报技术

在隧道施工中,对不良地质条件的超前预报方面近几年也取得了重大进展。山东大学科技人员针对沪蓉西高速公路上 20 余条岩溶隧道进行的综合超前预报研究,预报准确率达到 70%。主要的技术进展有:

1) 在大量分析已有地质勘察资料基础上,分析了隧道岩溶发育的主控因素、岩溶垂直分带和水平展布特点,建立了岩溶隧道灾害风险定量评价方法,提出了相应的隧道施工灾害风险分级标准,并对高风险岩溶隧道各工程段进行了科学的风险评估。

2) 针对物探多解性和地质情况的复杂性,研究了不同超前地质预报方法的特点和适用范围;研发了突水预报的瞬变电磁仪和地质雷达专用后处理软件;研究了雷达、瞬变电磁的正反演理论和提高预报精度的方法;提出了综合超前地质预报的原则和技术体系。按照综合预报“合理搭配、科学管理、贯穿全程、因地制宜”的思想,将研究成果成功应用于 20 余条岩溶隧道的超前地质预报工程实践中,指导了施工,避免了突水和突泥等灾害事故的发生,保证了施工安全。

3) 研究了岩溶裂隙水突出的影响因素与其基本力学机理;研究了动力扰动诱发突水的灾变机制、岩溶裂隙水作用下岩石裂纹扩展机制、岩溶水突出耦合突变机制与非线性特点;给出了相应的灾变演化路径和突水判据;分析研究了岩溶裂隙水作用下单裂纹扩展机理、爆破启裂扩展机制和相邻裂纹的贯通机制,并进行了数值模拟,为灾变控制方法的研究奠定了理论基础。

4) 提出了岩溶隧道灾害四色预警机制和相应的应急预案;研究了预警信息的发布依据和发布流程,制订了主要高风险岩溶隧道应急救援方案和逃生路线,并在乌池坝隧道进行了突水灾害应急救援演练。

5) 研究了高风险岩溶隧道突水灾害的处理原则和标准;在分析不同涌水类型和特点的基础上,建立了“先探后堵、综合治理”的岩溶水处理原则;研究了不同注浆材料的适用性,进行了注浆材料的性

能试验;探讨了常见突水灾害的处理方案,应用不同的注浆方案和注浆材料,成功地在现场进行了不同岩溶突水类型的注浆封堵试验,为岩溶突水灾害治理积累了宝贵的经验。

4 矿业工程的岩石工程技术

中国煤矿资源丰富,目前在能源结构中占主导地位,2008 年煤炭产量已达 27.16×10^8 t,与之配套的每年巷道掘进量大约在 12 000 km 以上。中国黑色和有色金属矿开采规模巨大,2008 年铁矿石原矿产量已达 8.4×10^8 t,10 种有色金属 2008 年总产量为 2520.28×10^4 t,相应的每年黑色和有色金属地下矿山巷道掘进量也十分巨大。这是国民经济各行业中最大的岩石工程。

4.1 煤矿巷道支护成套技术创新体系

地下开掘规模巨大的巷道工程,巷道支护是直接影响矿井安全、产量与效益的关键技术。煤炭科学研究总院康红普研究团队针对我国煤矿巷道特点,开发集理论、方法、材料、机具、工艺、仪器和技术规范于一体的巷道支护成套技术创新体系,形成了有中国特色和自主知识产权的巷道支护技术,解决复杂困难巷道支护难题,加快我国高产高效矿井建设,大幅度提高煤炭产量与效益,明显改善了巷道安全状况。

主要研究内容有:煤矿巷道锚杆支护理论、锚杆支护动态信息设计法与软件、高强度树脂锚杆与锚索支护材料、锚杆钻机与快速施工技术、矿压监测仪器及技术、锚杆与注浆联合加固技术及综采放顶煤、深部开采等复杂困难条件巷道支护技术。通过 16 年连续进行巷道支护技术科技攻关,取得主要创新性研究成果有:

1) 提出锚杆支护扩容—稳定理论。认为锚杆支护主要作用在于控制锚固区围岩的离层、滑动、张开裂隙等扩容变形与破坏,在锚固区内形成次生承载层,最大限度地保持锚固区围岩的完整性,避免有害变形的出现,减小锚固区围岩强度的降低。为此,应采用高强度、高刚度锚杆组合支护系统。高强度要求锚杆具有较大的破断力,高刚度要求具有较大的预紧力并实施加长或全长锚固,组合支护要求采用钢带、金属网等护表构件,应尽量一次支护有效控制围岩变形。

2) 提出锚杆支护动态信息设计法,具有两大特点:a. 设计不是一次完成,而是一个动态过程;

b. 设计充分利用每个过程中提供的信息,实时进行信息收集、分析与反馈。

3) 开发出注浆锚杆、注浆锚索及钻锚注一体化等锚固与注浆联合加固技术。注浆锚索是在小孔径树脂锚固锚索的基础上,开发的小孔径树脂与注浆联合锚固锚索,兼有树脂锚固和注浆锚固锚索的优点。先对锚索进行树脂端部锚固,施加预紧力,使锚索及时承载,然后水泥注浆全长锚固。通过控制注浆参数,使浆液渗透到钻孔周围的煤岩体内,达到注浆加固的目的。引进与改进了钻锚注锚杆,兼有钻进、锚固、注浆加固的功能。这些技术将锚固与注浆加固有机结合,为松软破碎围岩巷道提供了有效加固手段。

4) 开发出巷道矿压和安全监测成套仪器,包括测力锚杆,锚索测力计,顶板离层指示仪,多点位移计等。这些仪器已大面积推广应用于煤矿井下,对巷道支护设计优化、评价巷道支护效果、保证巷道安全起到重要作用。

5) 开发出系列锚杆钻机,并经过不断完善和提高,产品已经根据我国煤矿巷道条件形成系列,性能指标达到国际先进水平,满足了煤矿锚杆支护技术的要求,结束了锚杆钻机主要靠进口的历史。

该项成果已推广应用于 20 个省(自治区)的 58 个大中型矿区,使我国煤矿巷道支护技术水平实现了跨越式提升。它深刻地改变了矿井的开拓部署与巷道布置方式,对我国高产高效矿井建设、煤炭产量与效益的大幅度提高及安全状况改善起到重要作用。

4.2 低透气性煤层群无煤柱煤与瓦斯共采技术

中国煤炭资源 70% 以上为低透气性、高瓦斯、高吸附性、煤岩松软的地质条件,瓦斯事故频发,已成为煤矿安全生产中一个突出问题。淮南矿业集团袁亮研究团队研究成功的“低透气性煤层群无煤柱煤与瓦斯共采技术”,为低透气性、高瓦斯煤层安全高效开采开辟新的方向,其主要成果:

1) 采取卸压开采,增加煤层透气性,在采动区预先布置巷道和钻孔抽采瓦斯,实现卸压开采抽采瓦斯、煤与瓦斯共采构想。

2) 针对煤岩松软、极易离层,卸压开采采动区巷道围岩控制难题,提出锚索网注围岩的整体控制技术,并在工程实践中成功应用,保证了生产安全。

3) 变传统的 U 型通风方式为沿空留巷(替代预先布置的专用瓦斯抽采岩巷)Y 型通风方式,工作面瓦斯抽采率达 70%,确保被卸压高瓦斯煤层安全高效开采。

世界采矿大会国际组委会主席,波兰科学院院士杜宾斯基对此成果的评价是:“采用无煤柱沿空留巷 Y 型通风卸压开采,解决深井低透气性,高瓦斯、高地应力等构造复杂地质条件矿区煤与瓦斯共采技术难题,是无煤柱煤与瓦斯共采关键技术重大突破,成果达到国际领先水平”。

4.3 深凹露天矿安全高效开采技术

我国 80% 以上的铁矿石来自于露天开采。目前,很多大中型露天矿山已由山坡露天开采进入深部凹陷开采。矿山转入深凹开采后,一方面,随着开采深度的增加,边坡不断加高加陡,形成名副其实的高陡边坡,如首钢水厂铁矿的最终边坡垂直高度达到 670 m,凹陷开采深度 430 m,边坡的加高加陡导致边坡的稳定性和开采的安全性越来越差。另一方面,提高边坡角又是露天矿减少剥岩量、降低生产成本的重要手段,如一座年产千万吨级的露天矿,边坡角提高 1° ,就可减少剥岩量 $1\,000 \times 10^4$ t 以上,经济效益可达亿元。所以,这是一把双刃剑。为此必须系统地进行边坡优化设计和稳定性综合监测与控制的研究,才能在保证开采安全的前提下,最大限度地提高边坡角,减少剥岩量,降低成本,增加效益。

中国大型露天矿的总体边坡角与国外同类矿山相比,普遍偏缓。这主要是由传统的经验类比和二维极限平衡分析的边坡设计方法所决定的。北京科技大学蔡美峰研究团队在大量系统的工程地质、水文地质勘查和试验研究、矿区地应力场测量和矿岩物理力学特性测试的基础上,首次采用大型三维非线性有限差分法、离散单元法和基于 GIS 的三维极限平衡分析相结合的方法进行边坡稳定性分析和设计优化(其中,基于 GIS 的三维极限平衡分析方法为国内外首创),将水厂铁矿各区的总体边坡角分别提高了 $1^\circ \sim 6^\circ$,平均提高了 $3^\circ \sim 4^\circ$,使水厂铁矿边坡设计和开采优化达到并超过世界先进水平。同时采用了 GPS,全站仪等多种手段,结合网络理论,在水厂铁矿建立了边坡位移监测网,对边坡稳定性进行动态分析和预测预报,为及时采取必要的防控措施,保证边坡稳定提供了依据。同时,制定并采取了一系列保障深部高陡边坡强化开采安全的技术措施,包括:根据边坡潜在破坏模式调查和预测,制定了相应的边坡稳定性控制技术;针对水厂铁矿位于地震危险区,基于边坡动力失稳机制研究,制定了高陡边坡开采的防震减灾技术;针对水厂铁矿边界紧邻滦河,制定了邻水开采高陡边坡采场渗透破

坏的监测与防治措施等,从而保证了深凹露天高陡边坡开采的安全。为了降低运输成本、提高生产效率,还在该矿建立了新型高效的汽车—胶带半连续运输系统和基于 GPS 的自动化实时生产调度系统。

通过 4 年的攻关研究,使水厂铁矿生产成本显著下降,生产效率大幅度提高。2001—2004 年,在开采深度和提升高度不断增加的情况下,矿石成本不但没有上升,反而逐年下降,下降幅度达 32%;4 年中全员劳动生产效率增长了 2.3 倍,当年该矿的全员劳动生产率是全国同行业重点矿山平均水平的 6 倍以上,位列全国第一。创造经济效益 1.39 亿元/年。

通过攻关研究,不但将水厂铁矿的生产和管理整体提升到同期国际先进水平,而且解决了中国大型露天矿深部开采带有共性的关键技术问题,有力地推动了中国露天矿的科技进步、生产发展。

5 岩石工程锚固新技术

近年来,为了适应我国土木、水利水电、矿山和建筑等工程建设高速发展的需要,加强了对岩石锚固综合技术的研究,中冶建筑研究总院程良奎研究团队在岩土锚杆的荷载传递机制、设计、结构形式、灌浆工艺以及长期性能与安全评价等方面取得了一系列创新成果,使我国岩土锚固的综合技术水平得到了提升和跨越,主要成果有:

5.1 开发了可重复高压灌浆型和旋喷灌浆扩体型锚杆

针对复杂地层锚杆承载力低、蠕变变形大无法满足工程使用要求的突出难题,以及工程经济性对高承载力锚杆的需要,相继开发了可重复高压灌浆型及旋喷灌浆扩体型锚杆。

可重复高压灌浆型锚杆的技术关键是采用独特的注浆套管和注浆枪对锚杆锚固段圆柱形注浆体实施一次或多次高压劈裂灌浆,从而有效地提高锚固体的粘结强度和锚杆承载力。旋喷灌浆扩体锚杆即采用高压喷射原理在锚杆锚固段范围内对岩土体进行水力切割扩孔并置换充填水泥浆,形成一个圆柱状的扩大头,从而充分发挥扩大头的端承作用,极大地提高锚杆承载能力,通常扩大头直径为 0.7 ~ 0.8 m,最大可达 1.2 m。

5.2 开发了能显著提高承载力和防腐特性的荷载分散型锚固(单孔复合锚固)体系

此锚固体系是在同一钻孔中布设若干一定间距

配置的单元锚杆,每个单元锚杆有其独立的自由段和锚固段,而且承受的荷载也是通过各自的张拉千斤顶施加的,并通过预先补偿张拉(补偿各单元锚杆在同等荷载下因自由段长度不等而引起的位移差),而使所有单元锚杆承受相同的荷载。荷载分散型锚杆锚固段长度粘结应力分布均匀,其承载力能随锚固段长度的增加而线性增加。

特别是由无粘结钢绞线绕承载体弯曲成“U”型的单元锚杆组合而成的压力分散型锚杆体系,除能形成双层防腐外,由于灌浆体受压,不易开裂,大大提高了锚杆的耐久性。若用于临时工程,在其使用功能完成后,可方便地拆除芯体,对周边地下工程的开发不构成障碍。

压力分散型锚固体系具有粘结应力分布均匀、较强的防腐能力、高承载力、蠕变变形小的显著特点。目前,以其为主的荷载分散型锚固方法已在我国城市深基坑支挡、复杂地层高边坡加固、地下室与低洼结构抗浮及运河船闸抗倾结构、水利水电重力坝中得到广泛应用,并展示了广阔的发展前景。

5.3 建立了锚杆长期性能与安全评价模式

目前,岩土锚杆、隧道、地下洞室、混凝土坝及抗浮抗倾结构等永久性工程的广泛应用,岩土锚固工程长期性能与安全评价逐步成为岩土工程科技工作者关注的热点。

中冶集团建筑研究总院提出了包括锚杆锁定荷载(初始预应力)变化量、锚杆现有承载力降低率、被锚固的岩土体与结构物变形速率以及锚杆的腐蚀损伤程度为主的安全控制指标;建立了包括风险源识别、长期性能检测、监测项目与方法、安全评价的临界技术指标以及安全度不足锚固工程的处治方法等项内容的安全评价模式。并对所收集到国内外 17 项被检验的岩土锚固工程长期性能状况进行了分析研究,研究结果表明:具有足够安全度的锚杆设计、锚杆全长完善的防腐措施,采用能改善力学与化学稳定性的锚固结构、规范的锚杆验收试验、完善系统的长期性能监测与维护管理体系是提高岩土锚固的长期性能、确保锚固工程的长期安全工作的主要途径和方法。

5.4 建立了我国岩土锚固技术标准体系

随着我国岩土锚固技术的广泛应用,岩土锚固的标准化建设也得到发展。至今,已建立了较完整的岩土锚固技术标准体系。国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB50086-2001)及中国建设

标准化协会标准《岩土锚杆(索)的技术规程》(CECS22:2005)等技术标准对岩土锚杆的设计、材料、防腐、施工、试验、监测与验收都作了明确的规定,为我国岩土锚杆的设计、施工沿着安全可靠、技术先进、经济合理和有利环保的轨道发展发挥了重要作用。

6 岩石工程的精细爆破技术

进入 21 世纪尤其是最近 5 年,随着爆炸力学、岩石动力学、工程力学和工程爆破技术等基础理论研究的不断进展,借助计算机技术、爆破实验和测量技术的进步,使得量化的爆破设计成为可能;优良的便携式和遥控式爆破有害效应监测系统的出现,使爆破实时监控成为可能;爆破器材的进步、施工机械化水平和自动化水平的提高,为现代矿山和水利水电工程精细化的爆破施工提供了技术支持。精细爆破的萌芽和发展促进了岩石工程爆破技术脱胎换骨的变化。

精细爆破,即通过量化的爆破设计和精心的爆破施工,实现炸药能量释放与爆破作用过程的精确控制,既达到爆破目的,又实现对爆破有害效应的精确控制,最终实现安全可靠、绿色环保及经济合理的爆破作业。精细爆破秉承了传统控制爆破的理念,但与传统控制爆破又有着明显的区别。精细爆破的目标与传统控制爆破一样,既要达到预期的爆破效果,又要实现对爆破效果和爆破危害的双重控制。精细爆破更注重利用爆炸力学、岩石动力学、结构力学、材料力学和工程爆破等相关学科的最新研究成果,并充分利用飞速发展的计算机技术、数值分析技术,采用量化爆破设计计算理论、方法和试验手段,对爆破方案和参数进行优化,实现对爆破效果及有害效应的精确控制。精细爆破更注重根据爆破对象的力学特性、爆破条件及工程要求,依赖性能优良的爆破器材及先进可靠的起爆技术,辅以精心施工和严格管理,实现爆破全过程的精密控制。与传统控制爆破相比,精细爆破在量化的爆破试验、爆破设计、炸药能量释放和爆破作用过程控制、爆破效果的定量评价等方面,均提出了更高的要求。精细爆破不仅仅局限于传统控制爆破,其概念适用于岩石、拆除及特种爆破等工程爆破的方方面面,它不是一种爆破方法,而是含义颇广的概念。

精细爆破的支撑条件包括:爆破岩与设计理论、

爆破数值模拟及计算机辅助设计、高可靠性和安全性的爆破器材、爆破测试与检测技术、现代信息及控制技术,其核心包括“定量设计,精心施工,实时监控,科学管理”。中国工程院冯叔瑜院士认为:精细爆破是我国工程爆破技术发展的第三个里程碑。

在溪洛渡水电站大坝拱肩槽开挖中,贯彻精细爆破理念,爆破形成的建基面光滑平整,平整度、半孔率整体达到优秀水平,爆破对建基面岩石的损伤得到有效控制。建基面法线方向的平均超欠挖、平整度、残孔率的整体合格率分别为 97.2%, 98.8%, 99.8%, 钻孔声波法检测平均爆破影响深度均在 1.0 m 以内,质量等级全部达到优良标准。

在溪洛渡、向家坝水电站超大规模地下厂房洞室群开挖中,为了克服不利地质缺陷的影响,在开挖中贯彻精细爆破理念,采用质点振动速度、岩石声波等多种手段对爆破效果进行定量评估的评价体系。采用整体集成样架高精度自动施工量角器等措施,实现了精确定位、精确钻进的施工程序。建立了一整套精细爆破管理体系,形成的保留面光滑平整,平整度、半孔率整体达到优秀水平。

我国已将建设“资源节约型”和“环境友好型”社会作为 21 世纪的重要战略,精细爆破符合时代需求,有望作为引领中国工程爆破行业科技创新的重要手段与发展方向之一,将在实现爆破行业的可持续发展的过程中发挥重要的作用,对我国工程爆破的发展产生深远的影响。

7 结语

以上几个方面说明我国是岩石工程世界第一大国,不仅工程量极大,而且地质条件复杂,技术难度也是空前的。近年来,岩石工程科学技术已取得了一系列创新性成果,在勘测设计、施工、监测等方面,也积累了丰富的经验,当然也有许多教训,这些都是岩石工程领域的宝贵财富。以上介绍的只是笔者认为比较突出的几个方面,不一定全面,文章只作为抛砖引玉,希望全体岩石力学与岩石工程科技工作者都来总结已取得的新成果,共同推进岩石力学与岩石工程科学技术的发展,开辟岩石工程的新纪元。

致谢:衷心感谢戴会超、宋胜武、李术才、何满潮、程良奎、邬爱清、何川、蔡美峰、康红普提供相关资料;感谢方祖烈教授对资料的整理、归纳。

New progress of Chinese rock engineering

Qian Qihu^{1,2}

- (1. Science & Technology Commission of the General Staff of the PLA, Beijing 100857, China;
2. PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

[**Abstract**] Some of ground-breaking achievements of Chinese rock engineering are described in the paper. In the field of hydropower construction, the stability and monitoring technology of ship lock slope of the Three Gorges, stability and supporting technologies for high slope in deep river valley and hydropower projects and stability technology of underground large-span high side-wall caverns group were introduced. In highway and railway construction, the construction technology for passing through perennial frozen areas of Qinghai-Tibet railway, supporting technology for squeezed large deformation in Wushaoling Tunnel, construction technology of high-cold high-altitude Fenghuo Mountain tunnel and Erlang Mountain tunnel are presented, as well as geological prediction techniques for karst area tunnels. As for mining technology, a new set of coal mine roadway supporting technology system, mining technology for mixture of gas and low permeability coal seams without pillar, and safe and efficient mining technology for deep open pit were introduced. In addition, the new technology of rock anchorage and fine blasting technology were also described.

[**Key words**] rock engineering; hydropower engineering; supporting technology; geological forecasting; anchoring technology; blasting

(上接 36 页)

Project management of hydropower resource development in western China: case study on the lower reaches of the Jinsha River

Fan Qixiang^{1,2}, Lu Youmei^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Water Science & River Sediment and Hydraulic & Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Three Gorges Corporation, Yichang, Hubei 443002, China)

[**Abstract**] Hydropower is a key resource in China. In the 60 years' development since the founding of the PRC, especially the past 30 years of reform, China has been in the crucial development of hydropower resources in its western regions. The calls for a number of issues to be properly solved, such as construction management systems in project development, relocation of local populace, hydropower complex construction, environmental protection and project construction procedures are rising at the same time. Taking the hydropower development practices in the lower reaches of the Jinsha River as an example, this paper probes the issue of project management in the development of hydropower resources in western China.

[**Key words**] project management; hydropower resources; development of western regions; Jinsha River