

地下工程 施工技术研究

杨玉银 著

DIXIA GONGCHENG
SHIGONG JISHU YANJIU



四川大学出版社



作者简介

杨玉银，男，汉族，1968年出生，河北遵化人，中共党员，教授级高级工程师，高级爆破工程师，中国爆破行业协会专家，四川省工程爆破协会专家委员会委员，四川省评标专家，中国水电集团质量管理专家，现任职于中国水利水电第五工程局有限公司，长期从事地下工程及土石方明挖施工技术、安全管理工作。获得荣誉、成果情况：2006年11月荣获中国水电集团公司优秀工程技术人员称号；2016年1月被评为中国电建集团安全生产先进个人；2007年10月被评为中国水电五局第三届专业技术带头人（地下工程）；2016年、2017年、2018年连续三年被评为中国水电五局优秀科技人员、优秀工程技术人员；2019年被评为中国水电五局有限公司爆破工程专业技术带头人；获得发明专利4项，实用新型专利2项，省部级工法8项，中国企业新纪录2项，集团公司科技进步一等奖2项，协会等省部级科技进步奖6项，中国水电五局科技进步一等奖6项；在国家级、省部级科技期刊上发表专业技术论文66篇。

DIXIA GONGCHENG
SHIGONG JISHU YANJIU

地下工程 施工技术研究

杨玉银 著



四川大学出版社

前 言

我于 1990 年 7 月毕业于东北水利水电专科学校水利水电工程建筑专业，同月在中国水利水电第五工程局有限公司（以下简称中国水电五局）第二分局地下工程公司参加工作。参加工作以来，我一直从事地下工程、土石方明挖、安全管理工作。在近 30 年的工程实践中，每个工程项目都会出现一些工程技术及施工管理难题，在项目领导和现场工程技术人员的共同努力下，我们逐一攻克了这些施工技术和管理难题。为了让同行在遇到同类问题时有所借鉴，少走弯路，我和我的同事们在事后对这些难题的处理情况进行了详细的分析、整理，并撰写了相关论文，这些论文均发表在国家级、省部级科技期刊上。在此特别感谢《工程爆破》《爆破》《水利水电技术》《四川水力发电》《山西水利科技》《水利水电施工》等编辑部的主编、编辑、审稿专家等同志为我们论文的发表所做的努力，以及对我本人长期以来的信任和支持。随着这些难题的解决、论文的发表、科技成果的取得，我本人也从技术员一路破格晋升为高级工程师（以下简称高工）、教授级高工。在此感谢培育我的中国水电五局和各级领导们，感谢一直以来关注我、帮助我的师傅们：中国水利水电科学研究院张永哲教授、武汉大学赖世骧教授、中国水电五局杜瑄教授级高工、中国水电五局戴隆源教授级高工。

在汾河水库泄洪隧洞项目工作期间（1990.7—1993.12）：分析整理了 F₃ 断层塌方冒顶的原因、预防、处理方法，形成了《汾河水库泄洪隧洞 F₃ 断层塌方分析及处理》，先后发表于《科技与管理》（内部期刊）、《四川水力发电》。

在三峡对外交通专用公路夜明珠至乐天溪标段工作期间（1993.12—1998.7）：通过解决仙女索道段路基开挖中爆破震动和飞石对方上方仙女索道和附近排架柱的影响，形成了《复杂环境下路基开挖深孔控制爆破》；通过解决仙人溪 2[#] 隧洞左线采用三臂钻开挖过程中的单循环进尺小、钻孔利用

率低的问题，形成了《掏槽面积对隧洞开挖钻孔利用率影响试验研究》。以上论文分别发表于《四川水力发电》《爆破》。

在温州赵山渡引水工程第八标段工作期间（1998.7—2001.7）：通过解决许岙隧洞土质围岩进洞问题，以及上安隧洞和许岙隧洞围岩坚硬、钻孔利用率低、光爆效果差等问题，形成了《土质围岩隧洞口掘进的特殊施工方法》《水平 V 形掌子面在赵山渡引水工程隧洞开挖中的应用》《光面爆破孔内间隔装药传爆方法的改进与应用》《隧洞开挖光面爆破新技术》《周边密空孔钻爆法在软质围岩隧洞开挖中的应用》《小断面隧洞开挖单循环进尺试验研究》等 10 篇论文，分别发表于《矿冶》《工程爆破》《爆破》《四川水力发电》。

在山西万家寨引黄北干线工程第二标段施工阶段（2003.12—2007.9）：通过解决纯黄土斜井进洞、开挖，地下水丰富段泥结碎石斜井开挖等问题，形成了《土洞斜井进洞施工技术研究》《富水泥结碎石斜井隧洞施工技术》《分部分块开挖施工工艺在特大涌水土洞斜井开挖中的应用》等 5 篇论文，分别发表于《四川水力发电》《水利水电技术》《山西水利科技》。

在中国水电五局公司本部工作期间（2008.4—2013.11）：在项目督察检查工作中，发现隧洞开挖超挖量大、钻孔利用率低，为了指导工程施工，撰写了《隧洞开挖爆破超挖控制技术研究》《提高隧洞开挖爆破钻孔利用率方法》等论文；在多次被安排到在建工程项目解决技术难题后，形成了《综合控制爆破技术在坪上集水廊道开挖中的应用》《中长管棚在隧洞特大塌方处理中的应用》《南水北调穿黄河隧洞爆破振动控制技术研究》《某隧洞特大涌渣流砂事故原因分析及经验教训》《复杂环境深孔控制爆破技术》等论文。以上论文分别发表于《工程爆破》《爆破》《四川水力发电》《山西水利科技》。

在乌干达卡鲁玛水电站尾水隧洞工作期间（2013.11—2019.4）：在缺少专用光爆细药卷（ $\phi 20 \sim 22\text{mm}$ ）和绑扎光爆药串用的竹片，甚至缺少 $\phi 25\text{mm}$ 药卷的情况下，通过改变传统光面爆破装药结构、装药方法、设计方法，成功地在乌干达卡鲁玛尾水隧洞软岩、硬岩开挖中实现了光面爆破；为了提高硬岩开挖单循环进尺，采用了水平 V 形掌子面与分部楔形掏槽相结合的方法，最终将大断面隧洞单循环进尺提高到 3.75m 以上，钻孔利用

率提高到 98.5%~100%；在乌干达雨水充沛地区土质围岩竖井开挖中，采用沿竖井中心钻设排水导孔至下部联通洞的方法，成功地解决了井内积水这一难题；主持的项目共获得 4 项国家发明专利、2 项国家实用新型专利、3 项省部级科技进步奖，形成了 7 项省部级工法，撰写了《微量装药软岩光面爆破技术》《隧洞开挖光面爆破装药结构的改进与应用》《隧洞底板开挖光面爆破实验》《分部楔形掏槽在硬质岩石隧洞开挖中的应用》等 12 篇论文，分别发表于《工程爆破》《爆破》《四川水力发电》《山西水利科技》。

最后，感谢中国水电五局有限公司总经理刘光、总工程师吴高见同志在本书的编写过程中给予的指导、帮助。

由于本人工作阅历、学识水平有限，书中难免存在错误和不足之处，希望读者批评指正，不吝赐教。

教授级高工 杨玉银

2019 年 8 月于成都

序 一

地下工程是我国水电、公路、铁路工程的重要组成部分。目前我国的地下工程开挖主要采用钻爆法。钻爆技术水平的高低，直接影响着隧洞的开挖质量，进而影响施工安全、进度和效益。在地下工程开挖中，尤其是隧洞的开挖，为了形成平整规则的开挖轮廓，主要采用光面爆破技术。

光面爆破是新奥法施工的有效保证，它可以将爆破对围岩的振动降到最低限度，有效减轻爆破对围岩的扰动，爆后不产生或很少产生爆震裂隙，原有的节理、裂隙、结构面等不因爆破振动开裂、延伸、掉块，从而保持围岩稳定，有效减少超挖。光面爆破对围岩扰动的控制和良好的开挖轮廓，有效提高了围岩的自稳能力，对洞室的安全稳定起到了非常重要的作用。良好的超挖控制，可以有效减少超挖石方量和超填混凝土量，减少喷混凝土等支护工程量，从而大幅降低施工成本；同时有效减少了围岩支护时间，减少了超挖外运和超填混凝土的浇筑时间，为快速掘进、快速衬砌施工打下了坚实的基础。由此可见光面爆破对地下工程开挖的重要性。

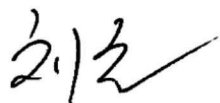
本书作者杨玉银同志在中国水电五局承建的乌干达卡鲁玛水电站尾水隧洞施工中，成功地将光面爆破技术进行了创新与应用，取得了显著的经济效益。该隧洞共两条，总长 17.3km，开挖断面面积 $155.7 \sim 196.5\text{m}^2$ ，属超长、大断面隧洞。在隧洞开挖期间，杨玉银同志主持了该隧洞的开挖技术工作，带领工程技术人员攻克了多项光面爆破技术难题：采用微量装药软岩光面爆破技术，实现了极软岩、软岩条件下的光面爆破，创造了软岩平均超挖 3.75cm 的好成绩；在缺少 $\phi 25\text{mm}$ 药卷的情况下，合理调整光面爆破装药结构，成功地采用 $\phi 32\text{mm}$ 药卷实现了光面爆破；在乌干达缺少专用光爆炸药和绑扎光爆药串竹片的条件下，成功地用导爆索起爆了光爆孔内处于自由状态的间隔装药。在卡鲁玛水电站尾水隧洞的施工中，在不具备光爆施工条件的情况下，杨玉银同志通过改进、创新光面爆破技术，在尾水隧洞 10 个主要开挖作业面的边顶拱和底板全面实现了光面爆破，半孔率达到 90% 以上；边顶拱平均超挖 10cm 左右，底板平均超挖 16cm 左右，成功地减少了超挖超填，降低了开挖成本；创造了支洞开挖单面月进尺 235.2m，提前 80 天进入主洞，主洞上层开挖单面月进尺 257.1m，提前 165 天完成主洞开挖

任务的好成绩，在非洲东部创造了“卡鲁玛速度”。

杨玉银同志自 1990 年参加工作以来，一直从事地下工程方面的工作，积累了丰富的施工经验，取得了丰硕的科研成果。依托参建的地下工程项目，他以解决施工中出现的实际施工问题为目的，深入开展科研工作，深度挖掘开挖技术潜力，在地下工程施工技术，尤其是在爆破技术方面取得了令人瞩目的成绩。

本书以地下工程爆破技术为主线，全面系统地展示了作者在长期地下工程实践中形成的新技术、新工艺、新方法。书中提出的一些见解、方法、参数，均经过实战检验，并得到推广应用，取得了良好的经济效益和社会效益。本书的出版将对地下工程技术的发展产生积极的推动作用。

中国水电五局教授级高工、总经理



2019 年 3 月 28 日

序 二

我与本书作者杨玉银同志相识于1999年的爆破工程技术人员考核培训班。二十年来，亦师亦友，见证了他在地下工程技术和土石方开挖技术方面的进步和突破，见证了他从一名普通技术人员成长为教授级高工，进而成为中国爆破行业协会专家的全过程。

在我国的地下工程开挖施工中，钻爆法仍占据主导地位，开挖爆破技术水平的高低直接影响着开挖进度和效益。目前，我国地下工程钻爆技术已经达到了比较成熟的水平，但科学发展无止境，技术发展无尽头，随着地下工程开挖实践的发展，在具体爆破施工中仍会遇到一些新问题。在解决这些新问题的同时，作者形成了一些新技术、新方法、新工艺，对现有爆破技术进行了有效的补充和完善。

作者在长期的地下工程开挖实践中，发现现有爆破技术仍存在一些难以克服的难题，比如：在硬岩隧洞开挖中，采用常规爆破技术时，钻孔利用率仅达到80%~90%，掌子面会留有一定深度的残孔，残孔深度会达到30~60cm，甚至更大；在极软岩、软岩隧洞开挖中，采用传统的光面爆破技术很难形成整齐的开挖轮廓，爆破后超挖严重；在传统的光面爆破施工中，专用光爆细药卷难于买到，只能将药卷按照一定间距绑扎到竹片上，制成光爆药串，并存在工艺复杂、成本较高、操作难度大等问题。这些都在一定程度上影响了开挖进度和开挖质量。因此，地下工程技术人员需要在实践中不断进行探索研究，努力进行科研攻关，以改进和提高现有爆破技术。

依托三十年来参建的地下工程项目，作者在该领域创造性地提出了多项新技术、新工艺、新方法：国内首次提出了水平V形掌子面的概念，将钻孔利用率提高到100%成为现实；提出了周边密空孔钻爆法，使中小断面软质围岩隧洞开挖轮廓得到了有效控制；提出了光面爆破孔内间隔装药传爆技术，用一只雷管引爆并传爆了光爆孔内的间隔装药，这是对传统光面爆破装药结构的进一步补充完善；提出了六空孔平行直孔掏槽，使中小断面隧洞掏槽效率达到100%；创造性地提出了微量装药软岩光面爆破技术，使大断面极软岩、软岩隧洞开挖光面爆破技术水平得到了进一步提高；对传统的光面爆破装药结构进行了改进，在不采用竹片绑扎光爆药串的条件下，成功地用导爆索起爆光爆孔内自由放置的间隔装药，这是对光面爆破的又一突出贡献；提出了分部楔形掏槽的概念，将常规集中布置掏槽孔方式改为上部掏槽和下部掏槽两部分，在尽量减少掏槽孔的情况下，有效增大了掏槽范围，扩大了掏槽空腔，保证了掏槽效果。

本书是作者三十年对地下工程施工技术不断研究探索的智慧结晶，是一本具有实战指导作用的图书。本书的出版将对地下工程技术的发展产生重要的指导和促进作用。

中国水利水电科学研究院教授 張永哲

2019年3月31日于北京

目 录

地下工程综述.....	(1)
-------------	-------

第一篇 进洞方法

土质围岩隧洞口掘进的特殊施工方法.....	(13)
土洞斜井进洞施工技术研究.....	(18)
微量装药软岩光面爆破技术在隧洞洞口开挖中的应用.....	(24)

第二篇 爆破技术

水平 V 形掌子面在赵山渡引水工程隧洞开挖中的应用	(37)
小断面隧洞开挖单循环进尺试验研究.....	(41)
掏槽面积对隧洞开挖钻孔利用率影响试验研究.....	(47)
提高隧洞开挖爆破钻孔利用率方法.....	(52)
分部楔形掏槽在硬质岩石隧洞开挖中的应用.....	(57)
周边密空孔钻爆法在软质围岩隧洞开挖中的应用.....	(66)
光面爆破孔内间隔装药传爆方法的改进与应用.....	(69)
隧洞开挖光面爆破新技术.....	(76)
隧洞开挖爆破超挖控制技术研究.....	(82)
微量装药软岩光面爆破技术.....	(89)
光面爆破技术在卡鲁玛水电站尾水隧洞开挖中的改进与应用.....	(100)
隧洞开挖光面爆破装药结构的改进与应用.....	(107)
隧洞底板开挖光面爆破实验.....	(115)
精细化管理在隧洞光面爆破施工中的作用.....	(121)
利用爆炸方法取出断入钻头内的钎梢.....	(128)
南水北调穿黄河隧洞爆破振动控制技术研究.....	(132)

第三篇 开挖支护

富水泥结碎石斜井隧洞施工技术.....	(141)
万家寨引黄工程土洞斜井一次支护方案优化.....	(147)

超前探水预注浆技术在南水北调东线穿黄河隧洞工程施工中的应用…………… (151)

第四篇 塌方处理

汾河水库泄洪隧洞 F₃ 断层塌方分析及处理…………… (161)
中长管棚在隧洞特大塌方处理中的应用…………… (167)
隧洞典型塌方案例分析及经验教训…………… (174)
永宁河四级电站导流洞塌方分析及处理…………… (180)

第五篇 施工技术与管理

境外长大隧洞快速掘进施工技术…………… (187)
分部分块开挖施工工艺在特大涌水土洞斜井开挖中的应用…………… (197)
雨量充沛地区土质围岩竖井开挖技术研究…………… (201)
隧洞混凝土衬砌钢筋保护层不足问题处理方法…………… (209)
许岙隧洞掘进施工与管理…………… (216)
地下水引起隧洞底板拱起开裂的原因分析及预防…………… (222)
主洞斜井出渣施工方法的改进与应用…………… (226)
自制简易注浆器在境外隧洞工程施工中的应用…………… (232)
自制多臂钻扶钎胶套在乌干达卡鲁玛水电站尾水隧洞工程钻孔施工中的应用…………… (237)

第六篇 安全管理

在建工程项目安全督察工作的基本思路与建议…………… (243)
水电工程在建项目现场安全督察管理经验分析…………… (248)
某隧洞特大涌渣流砂事故原因分析及经验教训…………… (253)

第七篇 其他

综合控制爆破技术在坪上集水廊道开挖中的应用…………… (261)
复杂环境深孔控制爆破技术…………… (266)
复杂环境下路基开挖深孔控制爆破…………… (272)
内护筒栓塞法在深水条件下埋管断桩处理中的应用…………… (278)
“侧钻法”在水下深孔灌注桩底沉渣厚度检验中的应用…………… (283)
张峰水库输水总干多跨连续肋拱结构施工技术…………… (289)
长河坝水电站坝体砾石土心墙料掺拌试验探讨…………… (294)
浅谈海外 EPC 水电项目降本增效管理…………… (299)

附录 1	作者在实践中常用工作语言释义	(306)
附录 2	作者在工程实践中采用的实用技术	(308)
附录 3	微量装药软岩光面爆破参数	(311)
附录 4	周边密空孔钻爆法建议爆破参数及其设计方法	(313)
附录 5	较软岩、硬岩光面爆破参数及其设计方法	(314)
附录 6	专利内容介绍	(316)
附录 7	获得专利、工法、中国企业新纪录情况	(318)
附录 8	获得科技进步奖情况	(320)
附录 9	获得荣誉情况	(322)
后 记	(324)

地下工程综述

地下工程是指在地面以下的土体或岩体中修建的建筑物。其主要是在地面以下进行，直接受到工程地质、水文地质和施工条件制约，往往是控制整个枢纽工程施工进度的关键线路，也是项目能否按时履约和盈利的关键。

1 地下工程的特点

一般地下工程具有以下特点：

- (1) 施工作业空间狭小，循环工序经常穿插进行，相互的施工干扰比较大。
- (2) 对于长隧洞由于施工进度需要，需设置施工支洞，从而增加工作面。
- (3) 受招标单价限制、超挖工程量影响，我国地下工程开挖方式主要以手风钻为主，多臂钻为辅，掘进机以国外引进为主，主要用于特长圆形隧洞。
- (4) 国内地下工程开挖主要采用钻爆法施工，测量放线、钻孔、装药、爆破、出渣等工序在同一作业面内周期性循环。
- (5) 地下工程开挖，岩体既是开挖对象又是支护对象，在支护过程中，要充分发挥围岩的自稳能力。
- (6) 在开挖过程中，需要根据围岩变化情况及时调整爆破设计参数及支护参数。
- (7) 地下工程施工不受外界气候影响，但安全问题比较突出，经常出现塌方、冒顶、地下水涌出、有害气体等安全问题。

2 地下工程分类

2.1 按工作性质分类

按工作性质可分为过水隧洞和无水隧洞。其中，过水隧洞按水量多少又分为有压隧洞和无压隧洞两类。

2.2 按用途分类

按用途可分为勘探洞（井）、施工支洞、主体洞室。

2.3 按断面大小分类

根据《水工建筑物地下工程开挖施工技术规范》(DL/T 5099—2011)^[1]，地下工程规模可按洞室断面面积 A 和跨度 B 的大小划分为以下几类。

- (1) 特小断面： $A \leq 10\text{m}^2$ 或 $B \leq 3\text{m}$ 。
- (2) 小断面： $10\text{m}^2 < A \leq 25\text{m}^2$ 或 $3\text{m} < B \leq 5\text{m}$ 。
- (3) 中断面： $25\text{m}^2 < A \leq 100\text{m}^2$ 或 $5\text{m} < B \leq 10\text{m}$ 。

(4) 大断面： $100\text{m}^2 < A \leq 225\text{m}^2$ 或 $10\text{m} < B \leq 15\text{m}$ 。

(5) 特大断面： $A > 225\text{m}^2$ 或 $B > 15\text{m}$ 。

2.4 按洞室轴线与水平面的夹角分类

根据《水工建筑物地下工程开挖施工技术规范》(DL/T 5099—2011)，地下洞室按照洞轴线与水平面的夹角 α 可划分为平洞、斜井、竖井。其中，平洞又分为隧洞和大型洞室。

(1) $\alpha \leq 6^\circ$ 为平洞。

(2) $6^\circ < \alpha < 75^\circ$ 为斜井。其中，对于缓斜井， $6^\circ < \alpha \leq 48^\circ$ ；对于陡斜井， $48^\circ < \alpha < 75^\circ$ 。

(2) $\alpha \geq 75^\circ$ 为竖井。

3 地下工程围岩分类

3.1 围岩的概念

在地下工程开挖施工中，洞室开挖后周围的岩体简称围岩。洞室开挖后，周围岩体均会发生显著应力变化，这一变化对围岩的稳定有很大影响。

3.2 围岩分类

洞室围岩的稳定性是围岩分类的主要依据。围岩分类是针对不同的工程要求，将围岩的工程地质条件归纳为不同类别，以评定洞室围岩的性质，判定围岩稳定性，确定在洞室开挖中的支护形式和施工方法。

根据《水力发电工程地质勘察规范》^[2] (GB 50287—2006) 和《水工建筑物地下工程开挖施工技术规范》(DL/T 5099—2011)，围岩详细分类应以控制围岩稳定的岩石强度、岩体完整程度、结构面状态、地下水和主要结构面产状等五项因素之和的总评分为基本判据，围岩强度应力比为限定判据，并应符合表 1 的规定。围岩工程地质分类中五项因素的评分：按照规范 [1] 中规范性附录 B 0.3 确定。围岩强度应力比：按照规范 [1] 中规范性附录 B 0.2 确定。

表 1 围岩工程地质分类表

围岩类别	围岩稳定性	围岩总评分 T	围岩强度应力比 S	支护类型
I	稳定。围岩可长期稳定，一般无不稳定块体	$T > 85$	> 4	不支护
II	基本稳定。围岩整体稳定，不会产生塑性变形，局部可能产生掉块	$85 \geq T > 65$	> 4	不支护或局部锚杆或喷薄层混凝土。大跨度时，喷混凝土、系统锚杆加钢筋网
III	稳定性差。围岩强度不足，局部会产生塑性变形，不支护可能产生塌方或变形破坏，完整的较软岩可能暂时稳定	$65 \geq T > 45$	> 2	喷混凝土、系统锚杆加钢筋网

续表

围岩类别	围岩稳定性	围岩总评分 T	围岩强度应力比 S	支护类型
Ⅳ	不稳定。围岩自稳时间很短，规模较大的各种变形和破坏都可能发生	$45 \geq T > 25$	> 2	超前锚杆、系统锚杆、挂网、喷混凝土，必要时加钢构架
Ⅴ	极不稳定。围岩不能自稳，变形破坏严重	$T \leq 25$	—	超前小导管、系统锚杆、挂网、喷混凝土加钢构架，必要时进行混凝土衬砌

注：Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类围岩，当其强度应力比小于本表规定时，围岩类别宜相应降低一级。

3.3 围岩地质状况描述

(1) Ⅰ类围岩：岩石新鲜完整；受地质构造影响轻微，节理裂隙不发育或稍发育；结构面无不稳定组合，断层走向与洞轴线正交；洞壁干燥或只有轻微潮湿现象，沿个别节理裂隙有微弱渗水；开挖后成形好。

(2) Ⅱ类围岩：岩石新鲜或微风化；受地质构造影响一般，节理裂隙稍发育或发育；结构面组合基本稳定，仅局部有不稳定组合，断层等软弱结构面走向与洞轴线斜交或正交；洞壁潮湿，沿一些节理裂隙或软弱结构面有渗水或滴水；开挖后局部成形差。

(3) Ⅲ类围岩：岩石微风化或弱风化；受地质构造影响严重，节理裂隙发育，部分张开且充泥，岩体呈碎石状镶嵌结构；结构面组合不利于围岩稳定者较多，断层等软弱结构面走向与洞轴线斜交或近平行；地下水活动显著，洞壁潮湿，沿节理裂隙或断层带有渗水、滴水或呈线状涌水；开挖后成形稍差。

(4) Ⅳ类围岩：岩石弱风化或强风化；受地质构造影响严重，软弱结构面分布较多，节理裂隙局部极发育，部分张开且充泥，岩体呈碎石状镶嵌结构或碎石状压碎结构；结构面组合不利于围岩稳定，断层等软弱结构面走向与洞轴线近平行；地下水活动显著，沿节理裂隙或断层带有渗水、滴水或呈线状涌水；开挖后成形差。

(5) Ⅴ类围岩：岩石强风化或全风化、受地质构造影响严重，节理裂隙极发育，断层带宽度大于 2m，岩体呈角砾、泥砂、岩屑状散体结构；结构面呈零乱不稳定组合，断层等软弱结构面走向与洞轴线近平行；地下水活动强烈，有较大涌水量，常引起不断坍塌；开挖后成形很差，围岩极易坍塌或冒顶。

4 围岩岩质类型划分

地下工程施工中，围岩的坚硬程度是爆破设计中确定掏槽孔、崩落孔的孔距、排距、单孔装药量，以及周边孔间距、抵抗线、线装药密度等爆破参数的重要依据。

在《公路隧道设计规范》^[3] (JTG D70—2004) 和《水利水电工程地质勘察规范》^[4] (GB 50487—2008) 中均规定：岩石单轴饱和抗压强度大于 30MPa 为硬质岩，小于等于 30MPa 为软质岩。同时将硬质岩分为坚硬岩和中硬岩（或称较坚硬岩），软质岩分为极软岩、软岩、较软岩，并在《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004) 中对岩质类型判断做了定性、定量规定，详见表 2。表 2 中， R_b 为岩石单轴饱和抗压强度 (MPa)，

f 为岩石坚固系数。

表 2 岩质类型定性、定量划分

岩质类型		定性鉴定	代表性岩石	定量指标	
				R_b/MPa	f
硬质岩	坚硬岩	锤击声清脆，有回弹，振手，难击碎；浸水后大多无吸水反应	新鲜~微风化的花岗岩、正长岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、片麻岩、石英片岩、硅质板岩、石英岩、硅质胶结的砾岩、石英砂岩、硅质石灰岩等	$R_b > 60$	$f > 6.0$
	中硬岩	锤击声较清脆，有轻微回弹，稍振手，较难击碎；浸水后有轻微吸水反应	①弱风化的坚硬岩； ②新鲜~微风化的熔结凝灰岩、大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质胶结的砂页岩等	$60 \geq R_b > 30$	$6.0 \geq f > 3.0$
软质岩	较软岩	锤击声清脆，无回弹，较易击碎；浸水后指甲可刻出印痕	①强风化的坚硬岩； ②弱风化的较坚硬岩； ③未风化~微风化的凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、泥质砂岩、粉砂岩、页岩等	$30 \geq R_b > 15$	$3.0 \geq f > 1.5$
	软岩	锤击声哑，无回弹，有凹痕，易击碎；浸水后手可掰开	①强风化的坚硬岩； ②弱风化~强风化的较坚硬岩； ③弱风化的较软岩； ④未风化的泥岩等	$15 \geq R_b > 5$	$1.5 \geq f > 0.5$
	极软岩	锤击声哑，无回弹，有较深凹痕，手可捏碎；浸水后可捏成团；揉搓可成流沙状	①全风化的各种岩石； ②各种半成岩	≤ 5	≤ 0.5

5 隧洞开挖方法

5.1 洞口开挖

(1) 洞口明挖。土方开挖采用反铲直接挖装自卸汽车，运往弃渣场。石方开挖一般采用手风钻钻孔、边坡预裂、松动爆破的施工方法。开挖工作自上而下分层进行。明挖量较大时，按照一般明挖方法，自外向内、自上而下、分层分台阶开挖。

(2) 洞口削坡。必须自上而下进行，严禁上下垂直作业。同时做好边坡危石撬挖、清理工作，边开挖边进行坡面加固，坡面加固一般采用锚、网、喷支护。

(3) 截水沟设置。洞顶及两侧边坡设置截水沟，截水沟以上地表水以自排为主。截水沟一般采用浆砌石砌筑。应尽量减少明挖开口范围，以减少汇水面积。

(4) 马道设置。坡面较高时，每隔 6.0~15.0m 设置马道，宽 2.0m 左右，马道内侧设排水沟，排水沟可采用砖砌。

(5) 围岩稳定确认。削坡支护完毕，准备进洞前，应对洞脸及两侧边坡岩体稳定情

况进行重新确认，待确认坡面岩体稳定或采取加固措施后，方可开挖洞口。

(6) 洞口段开挖进洞方法。中小断面洞口段开挖可采用全断面开挖、及时支护的方法；断面较大时，也可采用先导洞后扩挖的施工方法。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类围岩可采用浅孔小药量、光面爆破；Ⅳ、Ⅴ类围岩在开挖进洞前需采取超前支护、洞口及两侧墙预加固的措施，洞口外一定范围内浇筑明洞；根据具体情况，采用密孔隔孔装药，或周边密空孔钻爆法，或微量装药软岩光面爆破技术。

大断面或特大断面进洞，可采用分部分层开挖、导洞先行进洞的方法，边开挖边进行支护。

5.2 洞身开挖

平洞洞身的开挖方法应在确保施工安全的前提下，根据围岩类别、断面大小、出渣机械设备、工期要求、施工技术水平等因素综合确定。

(1) 中小断面开挖。条件允许时优先采用全断面开挖，一般高度在 9.0m 以内的断面均可采用全断面开挖。

(2) 大断面开挖。大断面、特大断面宜采用分部、分层开挖法。先进行上层开挖，待上层开挖完毕再进行下层开挖。上层开挖高度根据挖装设备能力，一般控制在 7.0~9.0m。

(3) Ⅳ、Ⅴ类围岩开挖。地下水丰富，围岩稳定性差时，可采用分部开挖法，尽可能采用超前支护、挂网、喷混凝土结合钢支撑或钢格栅。

(4) 常用施工方法。主要有全断面开挖法、短台阶开挖法、掌子面核心土支撑法等。全断面开挖法主要用于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类围岩；短台阶开挖法主要用于Ⅳ、Ⅴ类围岩，台阶长度根据断面大小和挖掘设备能力，宜选取 3.0~8.0m；掌子面核心土支撑开挖法主要用于土质围岩。

(5) 单循环进尺。根据断面大小、钻孔设备选择。一般在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类围岩中，采用手风钻钻孔时，钻孔深度取 2.0~4.0m；采用多臂钻钻孔时，钻孔深度取 4.0~5.0m。在Ⅳ、Ⅴ类围岩中，钻孔多采用手风钻，根据自身钻爆作业能力，钻孔深度取 0.5~2.2m。

5.3 超挖控制

根据规范 [1]，地下建筑物开挖不宜欠挖，对于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类围岩，平均径向超挖值：平洞边顶拱应不大于 20cm；底板开挖由于钻机操作上比边顶拱更难，因此需再放宽 5cm，超挖应不大于 25cm；缓斜井、斜井、竖井应不大于 25cm。因地质原因产生的超挖需根据实际情况确定。

6 钻孔爆破

6.1 爆破器材

(1) 炸药。地下工程施工中，经常伴有较为丰富的地下水，因此，爆破作业中最为常用的炸药是具有防水作用的乳化炸药。常用药卷直径有 20mm、25mm、32mm、35mm、38mm 五种。其中，25mm、32mm、35mm 较为常见。周边孔主要选用