

GONGLU SUIDAO GAOXIAO BAPO
JINGXI KONGZHI JISHU YUANLI YU SHIJIAN

公路隧道高效爆破 精细控制技术原理与实践

罗志光 张长亮 涂 维 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

广东省交通运输厅科技计划项目资助
(项目编号:科技-2015-02-037)

公路隧道高效爆破精细控制 技术原理与实践

罗志光 张长亮 涂 维 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书依托“公路隧道高效爆破精细控制成套技术研究”课题,全面系统地阐述了公路隧道岩体三相不耦合爆破技术、周边轮廓线精细化控制以及爆破施工动态设计和监控管理体系。全书分3部分,共10章,包括三相不耦合装药模型研究、SHPB块度试验和轴向不耦合装药试验、轴向不耦合数值试验模拟方案、偏心不耦合装药爆破模型研究、径向不耦合数值模拟方案、现场试验、动态爆破设计体系、爆破监控管理体系。结尾附有断面扫描图、现场爆破工艺流程及爆破效果图。

本书可供从事公路隧道控制爆破施工的工程技术人员参阅,也可供高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道高效爆破精细控制技术原理与实践 / 罗志光, 张长亮, 涂维编著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016. 12

ISBN 978-7-114-13518-7

I. ①公… II. ①罗… ②张… ③涂… III. ①公路隧道—爆破技术—研究 IV. ①U459.2②TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 314613 号

书 名: 公路隧道高效爆破精细控制技术原理与实践

著 作 者: 罗志光 张长亮 涂 维

责任编辑: 黎小东

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 720×980 1/16

印 张: 15.5

字 数: 236 千

版 次: 2016 年 12 月 第 1 版

印 次: 2016 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13518-7

定 价: 50.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

近年来,随着我国城市化建设的加快,铁路、公路、地铁隧道建设项目日益增多,“数量多、长度大、大埋深、大断面”是21世纪我国以及世界隧道工程发展的总趋势。然而隧道建设是复杂的,由于地质条件及地貌特征的差异,几乎每一座隧道都是一次全新的实践与探索。

工程爆破一直以来在我国隧道开挖领域有着不可替代的位置,而隧道超欠挖也一直以来困扰着爆破作业人员。本书依托“公路隧道高效爆破精细控制成套技术研究”课题,以广东省江门至罗定江罗高速为工程背景,在江罗高速三岔顶隧道现场展开隧道爆破试验,并进行相应的室内试验、理论和数值模拟等研究,最终编写而成。

本书主要包括以下三部分:(1)公路隧道岩体三相不耦合爆破技术,主要研究掏槽眼的装药形式,首次采用固液气三相装药形式,期待得到高效的装药形式;(2)公路隧道周边轮廓线精细化控制研究,隧道周边眼的装药控制研究是隧道光面爆破的研究重点,也是控制爆破超欠挖的主要方面,而对周边眼的装药形式的研究也必然是本书的研究重点;(3)爆破施工动态设计与监控管理体系,针对现有隧道爆破现场施工管理混乱的现象,提出公路隧道爆破施工动态设计与监控管理的系统管理方法,探索更有效的现场设计管理动态一体化方法。

其中,第一部分“公路隧道岩体三相不耦合爆破技术”和第二部分“公路隧道周边轮廓线精细化控制研究”为本书的核心内容。第一部分阐述了轴向不耦合装药情况下水不耦合介质和空气不耦合介质对爆破效果的影响,分别通过理论推导和数值模拟进行分析研究;同时,在试验室进行了SHPB块度试验,对现场的岩石特性进行了研究。第二部分通过研究周边眼的装药形式和不耦合装药系数等,最终达到控制隧道周边轮廓线超欠挖的目的;这一部分主要是从周边眼的偏心不耦合装药情况展开研究,通过理论推导和数值模拟研究最终得到周边眼的优化装药形式;

最后，对广东省江罗高速三岔顶隧道现场的装药试验数据进行了分析研究。

本书首次提出“固液气三相不耦合爆破装药”模型，并对掏槽眼和周边眼的装药形式进行了现场和理论的优化设计以及现场施工管理的优化。同时，对含节理的周边眼控制爆破研究也是一大重要创新点。本书可作为爆破理论和不耦合装药理论研究的相关参考书籍，也可作为爆破施工的参考文献。同时，对从事公路隧道控制爆破施工的工程技术人员也具有一定的参考价值。

本书主要由广东省公路建设有限公司江罗分公司罗志光、张长亮，中铁十一局集团第五工程有限公司涂维编著。参与本书编写的人员还有：招商局重庆交通科研设计院有限公司陈力华高工，广东省公路建设有限公司江罗分公司王照伟、张鑫敏和王伟力。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者提出宝贵意见。

作 者

2016 年 12 月

目 录

引言	1
第 1 章 概述	3
1.1 研究背景	3
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究内容和意义	8

第 1 部分 公路隧道岩体三相不耦合爆破技术

第 2 章 三相不耦合装药模型研究	13
2.1 炸药爆炸一般破岩机理	13
2.2 水介质的爆破功效模型研究	15
第 3 章 SHPB 块度试验和轴向不耦合装药分析	32
3.1 SHPB 块度试验（动荷载下灰岩损伤局部化试验研究）	32
3.2 空气和水轴向不耦合装药分析	42
第 4 章 轴向不耦合数值试验模拟方案	59
4.1 轴向不耦合装药系数对爆破效果的影响	59
4.2 轴向不耦合装药情况下，围岩级别对爆破效果的影响	96
4.3 轴向不耦合装药情况下，不同 RQD 值对爆破效果的影响	105
4.4 本章小结	118

第 2 部分 公路隧道周边轮廓线精细化控制研究

第 5 章 偏心不耦合装药爆破模型研究	123
5.1 研究现状	123
5.2 模型推导	124
5.3 算例分析	129
5.4 本章小结	132

第 6 章 径向不耦合数值模拟方案	134
6.1 径向不耦合装药的爆破影响, 不同不耦合系数影响	134
6.2 径向不耦合装药的爆破影响, 不同围岩级别影响	143
6.3 径向不耦合装药的爆破影响, 不同 RQD 值影响	148
6.4 本章小结	154
第 7 章 现场试验	156
7.1 现场工程概况	156
7.2 现场试验方案	166
7.3 钻孔电视	175
7.4 现场爆破试验	178
7.5 爆破后抛石分布图	185
7.6 不同方案的经济指标	186
7.7 现场试验结果分析及建议	188

第 3 部分 爆破施工动态设计和监控管理体系

第 8 章 动态爆破设计体系	193
8.1 隧道爆破现状	193
8.2 隧道动态爆破设计关键因素	194
8.3 隧道动态爆破设计基本概念	202
8.4 公路隧道裂隙岩体光面爆破动态控制体系	204
8.5 钻孔摄像头开发方案	209
第 9 章 爆破监控管理体系	212
9.1 爆破有害效应产生机理及危害	212
9.2 爆破有害效应控制	213
9.3 爆破安全监理	214
9.4 工程爆破有害效应监测	216
9.5 工程爆破有害监控方案设计	219
9.6 爆破有害过程监控	220
第 10 章 主要结论	226
10.1 结论	226

10.2 展望.....	227
附录 1 断面扫描图	228
附录 2 现场爆破工艺流程和爆破效果图	229
参考文献.....	234

引 言

掘进爆破技术发端于 17 世纪初期,当时匈牙利人在进行矿山巷道的掘进时,首次采用了黑火药进行爆破施工,此时的爆破技术非常落后,施工人员采用手工方式开凿炮眼,工作进度缓慢、效率低下,这种方式延续了 100 多年,到了 18 世纪中期,随着风动凿岩机的发明及大规模的使用,手工开凿方式才逐渐被淘汰。在欧洲仙妮丝铁路隧道修建时,第一次采用了药卷方式进行爆破,而在修建圣哥达隧道时,这种技术已经日趋完善。到了 20 世纪中期,瑞典人发明了光面爆破技术,该技术通过控制不同的炸药能量,使得爆破后能够较好地维护围岩的完整性,提高围岩的稳定性,减少了超欠挖量。随后,美国人对此技术进行了进一步的改进,并形成了隧道缓冲爆破法、隧道预裂爆破法等一系列先进的爆破方法。

我国隧道掘进爆破技术经历了以下过程:20 世纪 50 年代初期,我国的隧道掘进爆破主要依靠人工开眼打钻的方式进行,这种方法不仅效率低,而且存在着很大的安全隐患。到 20 世纪 60 年代,我国隧道掘进技术有了很大的发展,垂直掏槽技术和倾斜掏槽技术得到了广泛应用,并且在铁路隧道施工中开始引入光面爆破技术,另外爆破炸药也开始使用硝化甘油炸药和硝铵炸药。随着我国多年的隧道爆破工程实践和技术积累,到了 1985 年,我国成功解决了在断层破碎地质条件下的大断面隧道控制爆破技术,从而一举使我国成为隧道爆破技术强国。

然而,公路隧道在爆破施工中超、欠挖现象非常严重。超、欠挖问题不仅对洞室岩体自身结构稳定性造成极为不利的影响,而且也带来了巨大的经济损失。公路隧道掘进的超欠挖肯定会对施工产生不良的影响,首先会影响工程的进度,超挖会造成“三长”现象,即出渣时间长、支护时间长以及衬砌时间长;其次,超欠挖会影响工程质量,比如超欠挖会影响支护厚度,当厚度达到一定值时,工程质量就会被认定为不合格,超挖的凹陷部位还会影响混凝土的附着,同样影响工程质量;最后,超欠挖会提高工程造价,超欠挖会使工程的材料成本和人员成本增加,从而导致工程造价不断提高。

超欠挖的形成原因可以归结为以下两点:①客观原因,主要指地质原

因。围岩一般会存在着明显的裂隙或节理，那么在爆破完成以后，围岩没有按照炮孔的切割线得以破坏，就会沿着裂隙或节理的结构面形成破坏，从而导致了超欠挖。②主观原因，主要指爆破技术。如果使用炸药的药量偏大，就会形成超挖，而药量偏小，就会形成欠挖，如果炸药的起爆间隔时间短，信号的叠加范围就会扩大，导致振动速度较高，也会造成超挖。另外，如果光爆层厚度较小，孔与孔之间的光面裂纹未贯通之前就容易形成爆破裂口，在围岩产生龟裂面，也会产生超欠挖。

对于超欠挖问题，在工程实践中主要通过光面爆破法和预裂爆破法来解决。光面爆破法的特点是轮廓线上的炮眼（周边眼）是在其他炮眼爆破后最后起爆，周边轮廓线上炮眼数较少。根据断面不同，施工方法可分为光面层光面爆破法和全断面一次爆破光面爆破法。预裂爆破法与光面爆破法正好相反，是在轮廓线上钻凿密集的炮眼，并先于其他炮眼起爆，这样使该轮廓线上形成裂缝，然后再在其他炮眼起爆后构成光滑的平整壁面；预裂爆破可以起到较好的隔振作用，一般适用于岩体较为完整的硬岩、中硬岩中深眼及深眼爆破。

目前，工程中常见的光面爆破装药方法可归为两类：一类利用固体炸药和气体进行爆破；另一类即水压爆破，利用固、液两相介质进行爆破。但是，在公路隧道领域当前采用固、液、气三相耦合和不耦合关系的爆破方法尚不够成熟。现行的公路隧道爆破设计施工方法对裂隙岩体尤其是碎裂岩体关注不够，此外碎裂岩体爆破还停留在经验或半经验施工状态下，节理岩体在爆炸载荷作用下其破坏机理的研究，仍然是不很清楚和不很全面的，有待进一步的研究发展。公路隧道施工领域还没有对爆破工程进行单独的系统监控管理和动态设计，停留在低级的人为操控和经验施工层次。

因此，本书以广东省江罗高速公路为工程背景，以第十二合同段三岔顶特长隧道为例，依托广东省公路建设有限公司、广东省公路建设有限公司江罗分公司、中铁十一局集团第五工程有限公司和重庆大学协作，经广东省交通运输厅批准立项的“公路隧道高效爆破精细控制成套技术研究（编号：科技-2015-02-037）”科技攻关项目，从现场试验、理论研究、室内试验和数值模拟等方面进行了全面阐述，最终得到了关于固、液、气三项不耦合理论体系，偏心不耦合控制理论体系和现场爆破施工动态设计与监控管理体系。

第1章 概 述

1.1 研究背景

近年来,随着我国城市化建设的加快,隧道及地下工程建设项目日益增多,铁路、公路、地铁隧道“数量多、长度大、大埋深、大断面”是21世纪我国以及世界隧道工程发展的总趋势^[1]。据统计,截至2010年年底,我国建成的铁路隧道总长度已经超过7000km,公路隧道总长度超过3000km;全国轨道交通规划线路总长度超过4000km,需建设隧道的线路所占比例很大。西部大开发中铁路、公路、地铁、地下公用设施、西气东输、水电站工程等隧道建设量达到450km/a。我国到2020年前规划建设的隧道达到5000座,长度超过9000km,其中采用光面爆破技术施工的深埋长大隧道占了相当大的比例,未来隧道及地下工程光面爆破技术的发展潜力巨大。

本课题的深入研究探讨具有非常重要的现实指导意义,对提高公路隧道爆破技术具有非常重要的研究意义,对降低公路隧道的施工成本具有非常重要的现实意义。本课题拟填补碎裂岩体精细爆破控制技术的空白,提高掘进效率,降低施工风险,最终达到隧道成本降低、施工安全高效的目的。

1.2 国内外研究现状

自20世纪50年代瑞典Hagthorpe和Dahlborg等首次提出隧道及地下工程光面爆破技术以来,经过美国科学家Holmes的技术改进后,现已得到广泛应用,并成为隧道及地下工程中一种主要施工工法。美国Lwenston水电站、Niagara水电站、英国英吉利海峡隧道、挪威洛达尔隧道、日本青函隧道等都采用了光爆技术。我国自20世纪60年代中后期开始在煤炭、冶金等行业进行光面爆破研究以来,在铁路、交通、土建、水利、水电、矿山、城市建设领域的隧道及地下工程中开展了大量光面爆破研究工作,积累了丰富的

的经验,取得了不少的研究成果。但在实施过程中,受岩石是非均质各向异性不连续体、光面爆破作用机理不成熟、爆破设计参数大多依据经验公式法和工程类比经验确定、施工技术落后等因素的影响,现场经常出现爆破超欠挖情况,人为随意调整爆破参数的问题也较为突出,存在着巨大的隐患,如果得不到科学合理控制,会给工程建设造成巨大的损失。

光面爆破一直是隧道及地下工程安全生产的关键技术问题。目前,有关隧道及地下工程光面爆破关键技术的研究在于以下3个方面:光面爆破机制、光面爆破参数、光面爆破控制管理。

(1) 光面爆破机制主要有以下研究进展:随着科技的进步,借助于高速摄影、动光弹等先进手段的爆破机制研究也取得了进展。大多数学者认为爆破成缝机理主要是应力波与爆生气体的共同作用,并把损伤力学理论、断裂力学理论引入到岩石力学的研究中,从宏观和细观方面研究工程爆破时岩石动态损伤机制,为光面爆破机制的进一步发展做出了突出贡献。王家来等^[2]以爆破过程中应变波的动作和爆生气体的准静压作用为基础,修正了爆生裂纹传播的全过程理论;刘殿书^[3]在Kusmaul损伤模型基础上,认为岩石材料的损伤只影响单元的抗拉和抗剪能力,但岩石介质在损伤发生后仍能使压应力得到传递;张继春^[4]提出了考虑工程岩体的尺寸效应、将宏观结构弱面引入岩体爆破物理过程以建立块度模型,并应用连续介质损伤理论研究爆破过程中岩体软弱面的破裂机制,建立了岩体爆破块度的损伤力学模型(BDM);杨小林等^[5]以现有岩石爆破损伤模型和岩石损伤断裂理论为基础,采用Taylor方法建立一个新的岩石爆破损伤模型,提出岩石在爆炸应力波作用下的损伤断裂准则;高文学等^[6]研究了脆性岩石动态损伤演化规律,利用能量法则建立了岩石动态损伤演化方程,构建了一个反映岩石冲击压缩、拉伸损伤的理论模型;刘军等^[7]建立一个各向异性的损伤模型模拟单孔台阶爆破中预留岩体在爆炸冲击载荷下的损伤演化特征;付玉华等^[8]分析了深部岩体巷道光爆层原岩应力场、光面爆破机制和振动损伤特征,基于爆炸应力波和爆生气体综合作用理论,对损伤条件下深部岩体巷道光面爆破参数进行研究;左双英等^[9]基于FLAC3D,将考虑累积应变和荷载作用时间的Yang-Li率相关动力损伤模型与Mohr-Coulomb弹塑性本构进行耦合,将围岩破坏过程中的损伤特性反映在荷载增量迭代计算中,形成了弹塑性动力损伤本构模型,探讨了爆破诱发的质点振动衰减特征及围岩损伤分布规律;孟凡

兵等^[10]建立了爆破荷载作用下中夹岩累积损伤新计算方法,并应用该方法对大坪山隧道中夹岩爆破施工过程中的累积损伤进行预测,对小净距隧道中夹岩爆破累积损伤规律进行了研究;傅洪贤等^[11]以贵阳—广州铁路棋盘山隧道为工程背景,在隧道掌子面后方隧道拱顶5m范围的围岩内安装定制的速度传感器,测试隧道拱顶部位围岩的爆破振动速度,研究隧道掌子面附近围岩的振动规律;郭尧等^[12]利用爆破振动监测、谱分析及声波检测技术,并结合现场试验与数据拟合,对比分析了这两种爆破方法对围岩影响的大小,研究了光面与预裂爆破在隧道开挖中对围岩的影响;Cui ZD^[13, 14]基于爆破理论,利用现场监测和数值模型技术,对隧道围岩稳定性进行分析,提出了一种用于隧道围岩的水—砂复合爆破新技术;BenselamaAM等^[15]基于爆破材料和参数,对隧道内爆炸波的演变规律进行数值模型研究;Saiang D等^[16]利用数值分析的方法研究了爆破振动对浅埋隧道脆性围岩的影响;Ramulu M等^[17]研究了连续爆破振动对玄武岩体的损伤影响。

(2) 光面爆破参数主要有以下研究进展:目前,光面爆破参数的研究主要包括理论公式计算法、工程经验类比法、试验模拟法以及现场试验等,国内外关于光面爆破参数的研究成果较多。Fokin^[18]对爆破参数的计算方法进行优化改进;宗琦等^[19]依据光面爆破成缝理论,对装药不耦合系数、空气柱长度、装药集中度、炮孔间距和光爆层最小抵抗线等参数进行了理论分析;Mancini^[20]对隧道爆破精度控制技术进行了研究;刘春富等^[21]对弯山隧道钻孔台车深孔光面爆破参数进行了试验研究,包括掏槽眼布置、装药结构、起爆手段等;罗大会等^[22]研究了三峡工程高边坡岩体开挖中的大孔径光面爆破技术;Kahriman^[23, 24]研究了花岗岩开挖实施爆破过程中粒子速度的预测,并对隧道工程爆破诱发的地面振动参数进行研究;顾义磊等^[25]对隧道光面爆破合理爆破参数进行研究,提出了以超欠挖量、炮痕率、围岩损伤程度为指标的隧道光面爆破质量验收标准;张志呈等^[26]从光面爆破的偏心不耦合、中心不耦合和护壁不耦合3种不同装药结构出发,研究了不同装药结构光面爆破对岩石的损伤情况;Fumihiko^[27]对光面爆破引爆线进行了研究;Mandal^[28]对光面爆破模式进行了研究;Sellers^[29]对控制爆破技术在隧道等工程中的应用进行研究;王红生^[30]对小净距隧道群控制爆破参数进行了研究;毛建安^[31]对不同级别围岩采用针对性的爆破设计,认为适当加密周边眼、合理确定光面爆破层厚度、采用小直径药卷不耦合装药结构、保证

爆破眼同时起爆是光面爆破成功应用的关键；王孝荣^[32]对周边眼间距、最小抵抗线、炮眼密集系数、不耦合系数、装药集中度、装药结构以及起爆方式等爆破参数进行优化，优选出最佳隧道围岩的掏槽方式和钻爆参数；Shin JH 等^[33]对爆破参数进行分析，利用数值模拟技术，研究了爆破振动对既有软岩隧道的影响；Park D 等^[34]利用炮眼底部采用空气间隔装药，研究了爆破振动对隧道的影响；RodriguezR 等^[35]在考虑隧道及爆破参数设置的基础上，对隧道内部爆破振动波进行了分析预测，指出荷载-距离曲线能较好地预测爆破振动波的分布。

由此可知，目前国内外关于光面爆破参数的研究主要是针对爆破各相关参数，如周边眼间距、周边眼最小抵抗线、周边眼密集系数、不耦合系数、装药集中度、装药结构、装药形式、装药量、药卷直径、起爆方式、掏槽方式以及地质构造、岩石性质、爆破器材等，并从不同角度与不同程度对其作用原理、适用条件、预测效果等方面进行分析比较与检验，提出了一些建设性的意见与建议，但并没有从理论上给出一套较合理且全面的光面爆破各参数的计算公式。

(3) 光面爆破控制管理主要有以下研究进展：光面爆破控制管理技术是国内外隧道及地下工程的研究热点和难点，也是工程安全、科学、合理与快速施工的关键，是隧道及地下工程建设的重要组成部分，贯穿于深埋长大隧道建设的全过程，同时，国内外学者也对其进行了很多富有成效的研究。Sharma 等^[36]对计算机仿真技术在光面爆破中的应用进行研究；Xu Guoyuan 等^[37]对采空区受爆破震动的影响进行数值模拟预测；Li Xiaohong 等^[38]基于 BP 神经网络对预裂爆破进行专家系统设计研究；Kittler 等^[39]研究了爆破过程中监控量测的重要性；方崇^[40]基于燕尾突变理论，利用炮孔利用率、半孔率和不平整度对光面爆破效果进行了综合评价；Kamali^[41]利用神经网络技术对光面爆破引起的地面振动进行预测研究；叶培旭等^[42]结合南山下隧洞下穿温福客运专线钱仓山隧道工程，实时监测近距离交叉隧洞爆破施工对既有隧道的振动影响，并对爆破振动监测与信息化施工进行了研究；周向阳等^[43]结合上跨正在运行地铁的南京红山南路隧道群钻爆法开挖工程，对上跨运行地铁最近距离为 4.16m 的钻爆法开挖工程进行爆破振动安全控制，通过建立爆破监督管理制度与信息化爆破振动监测等多种手段对爆破安全进行有效的管理，确保了正在运行地铁的安全；Fekete S 等^[44]研究了三维激

光扫描技术在隧道爆破工程中的应用。因此,对光面爆破控制管理的研究主要体现在对爆破参数反复试验与优化、统筹法、神经网络模型、突变综合评价理论、计算机软件、计算机语言编制与开发等技术,并对其进行了深入的研究与实践,取得了丰富的研究成果。

此外,宗琦、杨哲峰等^[45,46]指出,隧道爆破施工时,径向不耦合系数是一个重要的参数,它直接影响爆破质量的好坏。为获得最优径向不耦合系数,基于武汉地铁2号线工程实例,运用 ANSYS 数值分析软件,建立了径向不耦合系数 K 为 1.0、1.4、2.1 时的三维模型。通过比较分析关键部位的应力值大小及分布规律,验证了经典爆破理论,得出了最优径向不耦合系数为 1.4~2.1。闫春岭等^[47]针对在隧道掘进施工中,传统的光面爆破直接用纯炮泥堵塞炮孔,这种方法往往使得炸药能量利用率偏低。针对这种情况,采取了水-土复合堵塞炮孔方法代替传统的光面爆破方法。通过理论分析及计算,得出水-土复合堵塞炮孔爆破时产生的孔壁压力远远大于纯炮泥堵塞炮孔时的压力值。结合工程实例进一步验证了水-土复合堵塞炮孔提高了炸药能量利用率的作用。刘为洲等^[48]提出应用水力增压爆破技术在露天深孔爆破中,介绍了其作用机理、装药结构及技术要点,并进行了砂浆模型试验和现场工业试验,在水柱与填塞物之间放置超前压塞药包。试验结果表明:采用水力增压爆破可提高延米爆破量和炸药利用率,大块率降低了 49.4%,爆破效果良好,该项技术对降低爆破粉尘亦具有良好效果。林云等^[49]利用大别山隧道爆破空气间隔装药试验所得岩体的力学特性以及材料的 Cowper-Symonds 破坏准则,采用 LS-DYNA 数值模拟,建立双孔不耦合装药爆破模型,模拟不耦合装药爆破的应力发展过程,得出了应力时程曲线;分析了装药长度在 1.4m、1.5m、1.6m、1.7m 和 1.8m 时,爆破孔壁压应力及孔壁破坏情况,得出了Ⅲ类围岩在孔深 3.5m 的情况下最佳不耦合系数为 1.94~2.18。杨玉银等^[50]提出针对隧洞开挖超挖严重、开挖断面成形差的情况,探讨了超挖造成的影响和危害,论证了单循环进尺与超挖量是平方关系,单循环进尺较小时采用长钻杆钻孔有利于减小外偏角、减少超挖,并从施工技术、爆破技术和施工管理技术的角度提出了隧洞开挖时控制超挖的有效方法,可供隧洞施工参考。而国外的研究现状主要是靠调整掏槽眼钻孔角度对爆破进行控制^[51-53]。

综上所述,国内外虽然在隧道及地下工程光面爆破技术领域积累了丰富的

的工程经验,但理论研究还相对滞后,不能满足工程建设的发展需求,光面爆破技术应该向着标准化、量化、数字化、智能化与自动化的方向发展。隧道及地下工程光面爆破技术主要是发展智能优化控制决策管理技术,制定光爆质量评定指标体系与技术标准,定量分析光爆开挖进尺与安全步距,开发基于无线网络技术的光面爆破智能优化控制管理决策系统,以实现实时数据和信息的交流,使其朝着标准化、量化、数字化、智能化与自动化的方向发展。这对于推动我国未来的隧道及地下工程技术发展、防治地质灾害、保证隧道及地下工程安全生产,具有重要的理论价值与实际意义。

1.3 研究内容和意义

1.3.1 研究内容

(1) 公路隧道岩体三相不耦合爆破技术

传统的爆破只有固体炸药和气体的相互作用,本项目拟开发一种水袋、气体、水胶炸药三相材料组合的爆破技术,通过水压爆破产生水中冲击波、射流及二次压力波等作用来增强爆破效果,并且提出一种根据围岩完整度和坚硬强度布置炮眼位置、确定液相与气相比比例和装药量的新技术。

(2) 公路隧道周边轮廓线精细化爆破控制技术

现有公路隧道爆破施工超欠挖现象非常严重,针对隧道周边轮廓线的超欠挖情况最为有效的爆破控制技术就是对周边眼装药量和装药方式进行控制研究。所以,本书针对周边轮廓线的精细化控制爆破研究,提出了偏心不耦合装药形式。从理论和现场试验及室内数值模拟多方面展开了探讨研究工作。拟解决现有装药隧道超欠挖现象,提出适合现场施工的有效作业方法。

(3) 爆破施工动态设计与监控管理体系与应用

针对隧道爆破过程工程地质条件变化比较频繁的问题,为了降低施工风险,本项目提出爆破施工动态设计方法。该方法包括以下几个关键工序:地质调查、设计、反馈和分析。地质调查阶段主要是采用钻孔电视伸入掏槽眼调查掌子面节理裂隙发育情况,设计是指根据钻孔电视调查资料设计孔内炸药、水袋和气体的比例,反馈是指采用三维扫描仪获取爆破施工完毕后断面超、欠挖情况,分析是指将现场施工的数据集中到数据中心,根据施工风险

管理系统对设计参数进行验证与修正。所有的数据统一到一个自主开发的监控管理软件里,既便于资料整理,也能对爆破施工进行精细化控制。

1.3.2 研究意义

现有爆破理论的发展仍滞后爆破技术的要求,理论研究和生产实际仍有不小的差距,再加上爆破过程的瞬时性和岩体特征的模糊、不确定性,致使爆破理论众说纷纭。美国矿业局 W. L. Faurney 等人认为:“岩石破碎的过程仍然没有阐明,在公开文献中尚有许多混乱和相互矛盾的论点……。”南非矿业研究会高级工程师 J. R. Brinkman 也谈道:“岩石爆破破碎机理,目前仍存在着相互矛盾的观点。”针对以上问题和已有研究现状,作者提出以下三个课题:公路隧道岩体三相爆破技术、隧道周边轮廓线精细化爆破控制技术、爆破施工动态设计与监控管理体系与应用。本课题的深入研究探讨具有非常重要的现实指导意义,对提高公路隧道爆破技术具有非常重要的研究意义,对降低公路隧道的施工成本具有非常重要的现实意义。本项目拟填补碎裂岩体精细爆破控制技术的空白,提高掘进效率,降低施工风险,最终达到隧道成本降低、施工安全高效的目的。

现行的公路隧道爆破设计施工方法对裂隙岩体尤其是碎裂岩体关注不够,施工中超欠挖现象非常常见。本书旨在建立高效、精细的控制方法与可靠的公路隧道爆破工程施工管理评价体系;改善现有的施工工艺,降低施工成本。本课题应用前景非常可观,不仅可应用于公路隧道爆破施工,而且还可以推广应用于类似工程,如地铁隧道开挖爆破、铁路隧道开挖爆破、城市地下其他爆破工程以及矿山资源的开发等。

固、液、气三相爆破技术的研究深入可以突破现有爆破技术瓶颈。现有爆破理论明显落后于工程实践要求,爆破理论的发展仍滞后爆破技术的要求,理论研究和生产实际仍有不小的差距。固、液、气三相爆破技术可以起到推动爆破理论的进步发展,同时也有益于指导工程实践弥补爆破理论的发展滞后爆破技术的现象。

隧道周边轮廓线精细化爆破控制技术的研究可以有效改善现有公路隧道周边轮廓线超欠挖严重现象,可以有效节省工程由于超欠挖造成的工程成本损失。

爆破施工动态设计与监控管理体系与应用的研究是针对现有公路爆破检