

岩石力学与
工程研究著作丛书

岩石爆破损伤机理及 对围岩损伤作用

◎杨小林 著



科学出版社

岩石力学与工程研究著作丛书

岩石爆破损伤机理及 对围岩损伤作用

杨小林 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

基于岩石爆破损伤理论,本书将岩石爆破过程分为应力波的动力作用和爆生气体的准静态作用两个阶段,建立了岩石爆破损伤模型和岩石在爆生气体作用下的裂纹扩展模型,提出了岩石爆破损伤断裂的全过程理论,并探讨了含瓦斯煤体的爆破作用机理以及煤体爆破裂纹扩展规律。结合工程实例,分析了掘进爆破对围岩的损伤作用规律及影响程度,探讨了隧道周边定向断裂爆破机理和技术参数,提出了隧道围岩爆破损伤的评价方法。通过对爆破地震效应的监测和分析,确定了隧道在不同开挖条件下的爆破振动危害判据和安全技术措施。

本书可供爆破工程、矿山建设、交通和水利建设等领域的科研、工程技术人员以及高校研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石爆破损伤机理及对围岩损伤作用/杨小林著. —北京:科学出版社, 2015.1

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-042765-6

I. ①岩… II. ①杨… III. ①凿岩爆破-破损机理-研究 IV. ①TD23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 291885 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:257 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编:孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编:冯夏庭

副主编:何满潮 黄润秋 周创兵

秘书长:黄理兴 刘宝莉

编 委:(按姓氏汉语拼音排序)

蔡美峰	曹 洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	金丰年	景海河	鞠 杨
康红普	李 宁	李 晓	李海波	李建林
李世海	李术才	李夕兵	李小春	李新平
廖红建	刘宝莉	刘汉东	刘汉龙	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
余诗刚	盛 谦	施 斌	谭卓英	唐春安
王 驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨 强	杨光华
岳中琦	张金良	赵 文	赵阳升	郑 宏
周创兵	周德培	朱合华		

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下硐室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击地压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO₂ 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO₂ 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

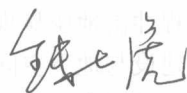
近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对攻克上述科学与工程难题陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很多很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统的总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,以反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由 58 位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21 世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007 年 11 月 28 日

序

钻爆法施工是隧道与地下工程中应用最早、范围最广、适应性最强的施工方法,是山岭隧道、岩石地下工程,以及矿山采掘工程中最经济合理的施工方法。爆破开挖是钻爆法施工的先行关键工序,爆破效果和安全性直接关系到隧道后续施工的质量和安全。20世纪70~80年代,随着我国铁路建设的快速发展,在隧道施工中逐步形成了高效掘进设备、全断面微差爆破、中深孔光面爆破技术的配套工法,使掘进爆破技术接近国际先进水平。但是,随后的30年,隧道与地下工程爆破技术和工艺基本上停滞不前,甚至在装备和效益方面还出现了倒退现象,安全事故也时有发生。究其原因,除了隧道的地质和环境条件越来越复杂外,主要还是爆破理论的研究、爆破技术和爆破器材的发展跟不上隧道施工技术发展的需求;另外,对于隧道爆破理论和技术的研究重视不足,投入的研究力量和经费不足,也使隧道爆破理论和技术研究远远落后于隧道施工技术的发展。因此,急需加强岩石隧道与地下工程的钻爆法施工技术和理论的研究,以提高掘进爆破质量、降低爆破危害、保证施工安全。

20世纪末以来,隧道爆破技术和安全方面面临的条件越来越复杂:一是特殊条件下的山岭隧道爆破,如青藏铁路的风火山冻土隧道、关角隧道的断层破碎带,渝怀铁路圆梁山隧道的岩溶地质带,西康铁路秦岭隧道的硬岩、包茂高速包家山隧道的硬岩和千枚岩地段,石太客运铁路专线的水平岩层,以及滇缅铁路面临的高地应力、高地温、含天然气和瓦斯地层等条件下的掘进爆破。二是水下隧道爆破技术,如厦门翔安海底隧道、青岛海底隧道和浏阳河水下隧道等爆破。三是城市地下工程的开挖爆破,如深圳、青岛、海南等城市地铁和地下工程爆破等。以上隧道钻爆法施工中面临以下四个方面的技术难题:①爆破设计和安全评价的理论依据及计算方法;②不同隧道、岩层和地质条件下的爆破方案优选和参数优化;③爆破效果、风险和安全评价方法及标准;④爆破实时监测评价与反馈设计和施工的爆破信息化技术等。因此,如何从岩石爆破理论研究出发,探讨岩石爆破破碎机理,确定爆破对围岩的损伤程度以及围岩爆破松动圈范围,以及科学合理的爆破设计方法及优化技术,是隧道爆破理论和技术发展中急需解决的问题。

本书作者长期从事爆破理论、隧道和井巷掘进爆破技术的教学和研究工作,早在1993年就与隧道工程局合作,解决了我国第一条瓦斯隧道——侯月线云台山隧道瓦斯揭煤爆破难题,为铁路瓦斯隧道爆破安全规程制定提供了依据。21世纪以来,应用岩石爆破理论研究的成果,与中铁隧道集团等企业开展合作,参与了

高原冻土、岩溶地层、煤系地层隧道、海底及水下隧道、城市地铁等复杂条件下的隧道和地铁爆破施工项目,解决了隧道爆破设计、施工和安全方面的重大技术难题,同时也积累了大量的工程经验,发展了岩石爆破和围岩损伤理论。本书是作者近 20 年来在该方面的研究总结,在岩石爆破理论方面,采用细观损伤力学和断裂力学的基本理论来研究煤岩爆破破坏作用,提出岩石和煤体的爆破损伤断裂模型,并分析煤岩爆破过程,在现有岩石爆破理论基础上有新的突破。在爆破机理方面,介绍爆破模拟试验、损伤测试技术和方法,以及爆破数值模拟计算方法,系统研究煤岩爆破机理及安全危害机理,探讨岩石爆破破碎和围岩损伤机理,具有重要的理论价值。在工程应用方面,建立岩石爆破损伤围岩的力学模型和计算方法,创新了隧道围岩爆破损伤的评价方法,通过大量的现场爆破测试和推广应用,提出相应的控制爆破技术和安全技术措施,具有工程应用价值。

本书作为隧道掘进爆破理论及围岩控制爆破技术方面少有的专著,可以为高校师生、科研人员以及现场工程技术人员提供有益的借鉴和参考。书中有关爆破损伤机理及围岩损伤评价的研究方法和研究成果,可以为隧道和矿山掘进爆破理论和技术的研究起到抛砖引玉的作用,也希望更多的爆炸力学和爆破理论研究者投身到我国的隧道和地下工程爆破技术和安全技术的研究开发中,为我国的工程爆破和交通建设的发展贡献力量。

中国工程院院士:



2013 年 6 月 29 日

前 言

随着国民经济的迅速发展,工程爆破的应用范围越来越广、爆破环境越来越复杂、爆破规模也越来越大,爆破技术的发展和应用的加快基本建设速度、降低了成本,但同时也给周围环境带来了危害。在岩土介质的爆破开挖中,在将设计开挖范围内的岩石爆破下来的同时,爆破振动对围岩必然产生损伤和破坏,从而影响围岩的稳定性。这些都给工程爆破的灾害如爆破振动、爆破飞石、空气冲击波和噪声等对环境影响的控制和安全作业提出了新的要求和研究课题。由于炸药爆炸对岩石的破碎是一个瞬间的复杂过程,岩石爆破破碎机理研究的难度主要体现在三方面:一是爆炸荷载加载过程是一个瞬间的高温、高压和高能量过程;二是煤岩体爆破介质的物理力学性质和结构特征的复杂性,导致爆破加载过程的非连续性;三是目前的爆破工艺基本还停留在经验阶段,受人为因素的影响较大,这些客观和主观因素的影响使岩石爆破破碎过程十分复杂,也具有偶然性。因此,对岩石爆破损伤断裂机理进行深入研究已成为现代岩石爆破技术和工程迫切需要解决的问题。

钻爆法施工由于对地质条件适应性强、开挖成本低,在岩石隧道与地下工程、涵洞、矿山井巷工程的施工中得到了广泛应用。在隧道和地下工程的掘进循环作业中,爆破是一个先行和主要工序,其他后续工序都要围绕它来安排,爆破的质量和效果都将影响后续工序的效率和质量。掘进爆破的主要任务,是在保证安全的条件下,高速度、高质量地将岩石按规定断面爆破下来,并且尽可能不损坏围岩;爆破后的岩石块度和形成的爆堆,应有利于装载机械发挥效率。因此,掘进爆破是隧道与地下工程建设中非常重要的关键工序。但是,在岩土工程中普遍存在开挖和保护岩体两类互相矛盾且必须解决的问题。炸药在岩体内爆炸时,在将开挖范围内的岩石爆破下来的同时,必然要对保留岩体造成损伤和破坏,从而使围岩的力学性能劣化,这种劣化在上覆岩层的压力作用下,会使其损伤进一步演化,从而使岩层的承载力及稳定性降低。因此,对围岩稳定性评价不仅要考虑岩体性质和岩层压力,还必须考虑爆破作用的影响,该方面的研究也已成为隧道及矿山采掘工程中迫切需要解决的难题。

在爆炸载荷作用下,岩石中所发生的损伤和破坏是一个复杂的动态演化过程,该过程由于炸药爆炸后生成的高温、高压气体产物和岩石的动态本构关系难以精确确定,以及岩体本身的非均质性和各向异性,使研究岩石爆破损伤断裂问题十分复杂和困难。本书以隧道和矿山采掘工程中常见的岩石和煤岩介质为研

究对象,针对他们在爆炸作用下的破坏、损伤断裂机理进行理论和试验研究,区别于现有的岩石爆破机理研究,在以下四个方面进行了探索性的研究:一是对岩石爆破损伤断裂的细观机理进行分析,建立岩石在爆炸应力波和爆生气体作用下的爆破损伤断裂的细观机理;二是对煤体的爆破作用机理进行探讨,提出含瓦斯煤体中的爆破破坏和损伤理论;三是针对围岩的爆破损伤断裂作用,提出爆破损伤岩石的力学模型,以及围岩在爆破地震波作用下的损伤破坏理论和安全判据等;四是结合国家重点交通工程建设和城市地铁建设工程,提出围岩损伤控制爆破技术概念,探讨定向断裂爆破机理、技术参数和工程应用方法等。

本书是作者近20年来对煤岩爆破机理和工程应用研究的总结。主要研究内容得到攻读博士期间的导师中国矿业大学王树仁教授,博士后合作导师北京交通大学王梦恕院士的指导和学校的支持。试验研究和数值模拟工作是在河南理工大学工作期间完成的,主要成果来源于土木工程学院的合作团队成员梁为民教授、余永强教授、负小有博士、王新生博士,以及指导的研究生褚怀保、王金星、刘红岩、沈立晋、迟明杰、刘永胜、孔令强、王以贤、王卫超、孙博等的合作研究,并引用了部分共同的成果。现场应用成果得到中铁隧道集团、中铁十五局集团、二十局集团及深圳地铁公司等合作单位的支持,在此一并表示感谢。

该书出版得到国家“十二五”科技支撑项目(2012BAJ17B03)以及国家自然科学基金项目(No. 50874039、No. 51204096)的资助。

由于作者水平所限,本书难免存在不足之处,恳求读者批评指正!

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 工程爆破作用及其分区	1
1.1.1 工程爆破作用分区	1
1.1.2 不同爆破作用区域的损伤断裂机理	3
1.2 掘进爆破的现状与进展	4
1.2.1 掘进爆破的特点和适应条件	4
1.2.2 掘进爆破的新进展	6
1.2.3 爆破效果的评价	7
1.3 岩体爆破损伤断裂理论进展	8
1.3.1 岩石爆破理论模型	8
1.3.2 岩石爆破损伤断裂机理	9
1.4 开挖爆破对围岩的损伤作用	11
第 2 章 岩体爆破损伤断裂机理	14
2.1 岩石爆破损伤模型及损伤变量	14
2.1.1 现有岩石爆破损伤模型及评述	14
2.1.2 岩石损伤变量的定义及有效弹性模量	17
2.2 岩石爆破损伤断裂过程和破坏准则	20
2.2.1 岩石爆破损伤断裂过程	20
2.2.2 岩石爆破损伤断裂准则	20
2.3 爆炸冲击波作用下的岩体破坏作用	22
2.3.1 孔壁岩石中的初始冲击波参数	22
2.3.2 破碎区半径	23
2.3.3 数值计算结果分析	24
2.4 爆炸应力波作用下的岩体损伤模型	24
2.4.1 基本假设	25
2.4.2 基于 Taylor 方法的岩石爆破损伤模型	25

2.5	爆生气体作用下的岩石裂纹扩展	26
2.5.1	爆生气体作用下岩石内的应力场	26
2.5.2	爆生气体驱动压力作用下的裂纹扩展	27
2.5.3	爆生气体压力场作用下爆破中区的裂纹扩展	30
2.5.4	算例	32
2.6	岩体内的爆破损伤场	33
2.6.1	岩体内的爆破损伤过程	33
2.6.2	岩石在爆炸载荷作用下的损伤场	34
第3章	煤体的爆破作用机理	38
3.1	煤体的工程性质	38
3.1.1	煤体的物理力学性质	38
3.1.2	煤体的结构特征	39
3.1.3	煤体的孔隙特征	39
3.1.4	煤体的工程分类	40
3.2	煤体的爆破作用机理	42
3.2.1	煤体中爆破作用特点	42
3.2.2	煤体中的爆破作用原理	43
3.2.3	煤体的爆破损伤断裂准则	44
3.3	煤体爆炸应力场及其破坏准则	45
3.3.1	含瓦斯煤体的有效应力	45
3.3.2	煤体中的爆炸应力波	47
3.3.3	爆生气体作用下煤体中的应力场	48
3.4	煤体爆破损伤及其作用模型	49
3.4.1	煤体中的爆破损伤变量	49
3.4.2	煤体中的爆破损伤模型	50
3.4.3	煤体在爆生气体作用下的断裂准则	50
3.5	含瓦斯煤体的爆破裂纹扩展	51
3.5.1	煤体在爆破作用下的应力强度因子	52
3.5.2	爆生气体和瓦斯气体作用下爆破近区的裂纹扩展	55
3.5.3	爆生气体和瓦斯气体压力作用下爆破中区的裂纹扩展	56
3.5.4	煤体爆破裂纹扩展分析	57
第4章	岩体内的爆破地震波及其振动特征	61
4.1	爆破地震波及其振动效应	61
4.1.1	爆破地震效应	61
4.1.2	爆破地震波及其特征	62

4.1.3 影响爆破地震波传播的主要因素	65
4.2 岩体爆破地震波的震源分析	66
4.2.1 岩体爆破地震波的震源	66
4.2.2 岩石爆破作用的非弹性介质状态区	71
4.2.3 岩石爆破作用的地震作用区	72
4.3 爆破振动判据及安全标准	73
4.3.1 爆破振动危害作用	73
4.3.2 爆破振动危害控制标准	74
第5章 煤岩体中爆炸应力波及爆破损伤试验	77
5.1 爆破模拟试验测试技术	77
5.1.1 超动态应变测试系统	77
5.1.2 爆炸应力测试系统	79
5.2 岩体内爆炸应力波的测试分析	80
5.2.1 试验方案及试验条件	80
5.2.2 爆炸应变波的测试及分析	82
5.3 煤岩模拟材料中的爆炸应力波测试分析	86
5.3.1 试验模型和测试方法	87
5.3.2 模拟煤体爆炸应力波测试结果	87
5.3.3 模拟煤体爆炸应力波测试结果分析	90
5.4 岩体爆破损伤作用的试验研究	92
5.4.1 爆破损伤岩石的力学特性试验	92
5.4.2 爆破损伤岩石的细观损伤力学模型	93
5.4.3 岩体爆破损伤测试	94
5.5 煤岩爆破裂纹扩展试验	96
5.5.1 煤岩爆破裂纹扩展的模拟试验方案	96
5.5.2 煤岩爆破裂纹扩展的模拟试验结果分析	98
第6章 煤岩体爆破作用的数值模拟	102
6.1 非线性动力有限元程序及力学模型	102
6.1.1 控制方程组	103
6.1.2 材料模型和状态方程	104
6.2 岩石爆破损伤作用的数值模拟	105
6.2.1 岩石爆破损伤模型	105
6.2.2 流体弹塑性模型	106
6.2.3 岩石爆破过程的计算流程	106
6.2.4 岩体爆破损伤的数值模拟	107

6.3	隧道爆破开挖对围岩影响的数值模拟	112
6.4	爆破对临近隧道影响的数值模拟	114
6.5	含瓦斯煤体爆炸应力场的数值模拟	124
第7章	掘进爆破对围岩的损伤作用	127
7.1	掘进爆破对围岩的损伤与控制标准	127
7.1.1	爆破对围岩的损伤与破坏标准	127
7.1.2	柱状装药爆破的质点振动速度预测方法	129
7.2	爆破对岩体基本质量和围岩稳定性的影响	130
7.2.1	爆破对工程岩体稳定性的影响	130
7.2.2	爆破对岩体基本质量指标 BQ 的影响	131
7.2.3	爆破对围岩损伤的现场试验	132
7.3	爆破对临近隧道的影响	135
7.3.1	爆破对临近隧道的影响因素	136
7.3.2	掘进爆破对临近隧道的振动速度分析	137
7.3.3	地面爆破对临近隧道的振动影响	138
7.3.4	降低爆破振动的有效措施	139
7.4	掘进爆破的振动危害与控制	140
7.4.1	青藏铁路西格二线关角高原隧道爆破	140
7.4.2	青藏铁路风火山高原冻土隧道爆破	148
7.4.3	渝怀铁路圆梁山岩溶隧道爆破	153
7.4.4	深圳地铁开挖爆破	160
第8章	围岩损伤控制爆破技术	166
8.1	概述	166
8.2	围岩损伤控制爆破基本原理	167
8.2.1	光面爆破技术原理和方法	167
8.2.2	定向断裂控制爆破技术原理和方法	168
8.3	围岩损伤控制爆破技术及参数	169
8.3.1	周边定向断裂爆破的装药结构及其特点	169
8.3.2	水介质耦合切缝管定向断裂爆破技术	170
8.3.3	水介质耦合切缝管定向断裂爆破的破岩机理	175
8.3.4	光面爆破参数	176
8.4	围岩损伤控制爆破在隧道工程中的应用	178
8.4.1	隧道围岩损伤控制爆破方法及参数	178
8.4.2	隧道围岩损伤控制爆破效果分析	181
	参考文献	183

第 1 章 绪 论

随着国民经济的迅速发展,工程爆破的应用范围越来越广、爆破的环境越来越复杂、爆破的规模也越来越大,爆破技术的发展和應用加快了基本建设的速度、降低了成本,但同时也给周围环境带来了危害。20 世纪 80 年代以前,爆破工程基本上都是在荒郊野外、人烟稀少、周围环境简单的地区进行爆破作业,20 世纪 90 年代以来,在城镇、重点文物保护区和重要建(构)筑物附近等的爆破作业越来越多,环境越来越复杂,给爆破施工安全造成危害。例如,在水利和道路建设及露天采矿中,坝基、路堑等爆破开挖也会对基岩和边坡稳定性产生危害;在城市建(构)筑物的拆除爆破中,爆破对周围建筑和居民产生直接影响;在城市地下铁道的建设中,通过岩石地段时,爆破法开挖是经济合理的施工方法,在距离地面 10~30m 的地下爆破作业,爆破所产生的地震波对地面的建筑物将产生不同程度的影响;在铁路改造和新线建设中,大多采用两条平行的单线隧道来提高运行的安全性,增加运输能力,通常受地形条件或征地范围的限制,要求两隧道的间距尽可能减小,有时甚至不得不远小于规范限定的最小间距,然而,间距过小会造成临近隧道爆破地震的扰动危害;在岩土介质的爆破开挖中,在将设计开挖范围内的岩石爆破下来的同时,爆破振动对围岩必然要产生损伤和破坏,从而影响围岩的稳定性。这些都给工程爆破作用和爆破振动灾害等对周围环境的影响和安全控制提出了新的要求。

1.1 工程爆破作用及其分区

1.1.1 工程爆破作用分区

炸药在岩土等介质中爆炸时,释放出来的能量以不同的作用形式表现出来,其中冲击波能量占 5%~20%,空穴和介质隆起能量约占 40%,噪声、热量及无用能量占 40%~60%,从中可以看出用于破碎和搬运介质的能量只占很少一部分,其余的无用能量中很大一部分以空气冲击波、飞石和爆破地震等工程灾害方式表现出来^[1]。在爆源近区和中区,由于应力波峰值高于岩石的抗拉强度,岩石被破坏,形成压碎区、裂隙区或爆破损伤;在爆破远区,应力波峰值低于岩石的强度,形成弹性应力波,即爆破地震波,它引起岩石质点的弹性震动。爆破地震的能量来源是炸药在岩土介质中的爆炸作用,在爆破的近区和中区岩石产生了破坏,爆破

震源范围内介质承受由剩余变形产生的荷载。在靠近破碎带震源边界处产生裂缝以及隐蔽的塑性形变,岩石体积没有可见的变化,但是,在整个地震源内仍产生某种不可逆的剩余形变,因此这部分岩石称为岩石的非弹性状态区或是非弹性变形区。

苏联的库图佐夫^[2]研究表明:在 $R < 0.6 \sqrt[3]{Q}$ 范围内,纵波强度最大,这个波的水平振速分量是爆炸地震波振动的主体,爆破振动位移、速度按 R^{-3} 比例衰减;在 $0.6 \sqrt[3]{Q} \leq R \leq 6 \sqrt[3]{Q}$ 的爆破振动影响范围内,爆炸地震波振动的主体波由纵波转变为表面波,此时爆炸地震波的水平振速分量由 80%~90% 降到 35%~42%,爆炸地震波振动位移、速度按 R^{-2} 比例衰减;在 $R > 6 \sqrt[3]{Q}$ 范围内,爆炸地震波以表面波为主,三个方向的振动速度分量相差不多,爆炸地震波振动位移、速度按 $R^{-2} \sim R^{-1}$ 比例衰减(其中 R 为距爆破点的距离, m; Q 为装药量, kg; 等效距离 $R' = R/\sqrt[3]{Q}$)。

库图佐夫^[2]根据等效距离将爆破地震的作用进行了分区,如表 1.1 所示。

表 1.1 爆破振动的作用分区

分区	岩石形变特征	等效距离/(m/kg ^{1/3})	衰减指数
非弹性介质状态	开放裂缝和强裂缝发展	0.1~0.6	3
	产生放射状和平行表面裂缝	0.6~3	2
	剩余的微形变	3~6	2
靠近地震作用区	非线性弹性形变	6~10	2
	非线性弹性形变	10~170	1.5
弱地震振动区	弹性形变	>170	1.0

因此,从震源开始到爆破地震影响区,总体可分为以下三个区^[3]:

(1) 非弹性介质状态。该区域主要是爆炸应力波的作用区,以沿水平方向传播的纵波为主,应力波的强度大于岩石的破坏强度,岩体产生了塑性变形和破坏,从爆破对周围环境的影响程度和范围来看,该区域属于爆炸的直接作用范围,在需要开挖的岩体或需要保护的围岩范围内,其研究方法一般采用爆炸动力学的方法。

(2) 地震作用区。该区域在岩体的破坏和弹性变形区之间,爆破地震波的强度小于岩体的破坏强度,不足以使岩体产生破坏,但由于爆破地震使岩体产生了非弹性形变,岩体产生损伤或破坏,该范围传播的波有体波和面波,如临近隧道的爆破振动和近地表的地铁爆破等都可能在该区域范围内,可以采用爆炸动力学和弹性动力学的方法进行研究。

(3) 弱地震振动区。该区域为地震波的弹性变形区,爆炸地震波的强度小于岩体的弹性极限,岩体产生弹性震动或损伤,对建(构)筑物产生振动危害,该范围