

中国地质大学学术著作出版基金资助

岩石深孔爆破技术新进展

周传波 何晓光 郭廖武 张敢生 著



中国地质大学出版社

中国地质大学学术著作出版基金资助

岩石深孔爆破技术新进展

周传波 何晓光 郭廖武 张敢生 著

中国地质大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

岩石深孔爆破技术新进展/周传波,何晓光,郭廖武,张敢生著. —武汉:中国地质大学出版社,2005.3

ISBN 7-5625-1988-9

I. 岩…
II. ①周…②何…③郭…④张…
III. 爆破工程—理论与应用—研究
IV. TD23

岩石深孔爆破技术新进展

周传波 何晓光 郭廖武 张敢生 著

责任编辑:徐润英

责任校对:胡义珍

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号)

邮编:430074

电话:(027)87482760

传真:87481537

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cn>

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:310千字 印张:12.25

版次:2005年3月第1版

印次:2005年3月第1次印刷

印刷:中国地质大学出版社印刷厂

印数:1—1000册

ISBN 7-5625-1988-9/TD·25

定价:35.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

近几十年来,随着大、中型钻孔机械的出现和改进,深孔爆破技术在我国国民经济中的应用得到了迅速的发展。目前,它是石方开挖和露天采矿施工中的主要爆破方法。在俄罗斯、美国等技术先进的国家,深孔爆破在筑路工程中的应用已占整个爆破工程量的90%以上。在我国大中型矿山的剥离、开挖、水利水电工程的基础开挖及铁路新线建设中的路堑开挖中,使用的主要爆破方法也是深孔爆破。

理论来源于实践,又指导实践。半个多世纪以来,我国的深孔爆破技术在大量实践的基础上已有长足的进步和发展,广大爆破技术工作者在实践中取得了许多宝贵的成果与经验。但爆破的理论研究工作仍落后于工程实践,现有的一些深孔爆破技术应用方法大都基于经验或半经验法,缺乏足够的理论依据。本书归纳了作者近年来从事深孔爆破技术理论与应用研究的主要成果,包括利文斯顿爆破漏斗理论现场应用技术、深孔爆破的岩体可爆性评价、深孔爆破一次成井掏槽方式的数值模拟优化、深孔爆破物理模型试验、异直径深孔爆破技术研究、一次爆破成井现场应用研究、深孔爆破块度分布预测模型研究、深孔爆破振动效应的测试与分析等内容。著写本书的目的:一方面在于引导大家应用当今科学的理论和方法研究和解决深孔爆破技术应用问题,使其向科学化、控制化的方向发展;另一方面期望其在深孔爆破技术实践应用中,起到参考借鉴作用。

本书可供从事冶金、煤炭、道路交通、水利水电、军工等部门涉及爆破理论及其工程技术应用的科研人员、工程技术人员,以及涉及爆破理论与技术领域的高等院校相关专业的师生参考。

由于写作时间仓促,加之作者水平有限,书中的错误在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2004年11月于武汉

目 录

第一章 爆破漏斗试验技术在深孔爆破中的应用	(1)
§ 1.1 问题的提出	(1)
§ 1.2 利文斯顿(C. W. Livingston)爆破漏斗理论	(1)
§ 1.3 爆破漏斗试验在深孔一次成井爆破中的应用	(3)
§ 1.4 爆破漏斗试验在确定大直径深孔采矿爆破参数中的应用	(10)
§ 1.5 基于爆破漏斗试验技术的炸药单耗确定	(22)
第二章 深孔爆破的岩体可爆性评价	(25)
§ 2.1 问题的提出	(25)
§ 2.2 岩体可爆性的影响因素与分级方法综述	(25)
§ 2.3 评价指标的选择与测定方法	(29)
§ 2.4 深孔爆破地段岩体可爆性评价与结论	(35)
第三章 深孔爆破一次成井掏槽方式的数值模拟优化	(36)
§ 3.1 问题的提出	(36)
§ 3.2 深孔一次爆破成井研究与应用现状	(36)
§ 3.3 爆破数值模拟研究进程	(41)
§ 3.4 三维动力有限元算法原理	(43)
§ 3.5 掏槽方式优化数值模拟	(52)
§ 3.6 本章结论	(67)
第四章 深孔爆破物理模型试验	(69)
§ 4.1 研究现状及意义	(69)
§ 4.2 爆破模型试验的理论依据	(70)
§ 4.3 深孔爆破一次成井物理模型试验	(73)
§ 4.4 井下深孔采矿爆破的模型试验	(92)
第五章 异直径深孔爆破技术研究	(95)
§ 5.1 绪论	(95)
§ 5.2 变直径深孔爆破应力场的三维有限元分析	(97)
§ 5.3 变直径深孔爆破效果的实验室模拟	(108)
§ 5.4 变直径深孔爆破高速摄影研究	(116)
§ 5.5 本章结论	(122)
第六章 深孔一次爆破成井现场应用研究	(124)
§ 6.1 现场应用条件概况	(124)
§ 6.2 凿岩与爆破	(126)
§ 6.3 爆破振动监测	(129)
§ 6.4 爆破效果与经济效益	(132)

第七章 深孔爆破块度分布预测模型研究..... (134)

§ 7.1 概述 (134)

§ 7.2 现场小台阶爆破模型试验中的相关理论 (140)

§ 7.3 现场小台阶模型试验与结果 (147)

§ 7.4 试验数据分析处理 (154)

§ 7.5 爆破块度分布预测模型在实际中的应用 (163)

§ 7.6 结论 (168)

第八章 深孔爆破振动效应的测试与分析..... (170)

§ 8.1 问题的提出 (170)

§ 8.2 现场测试 (170)

§ 8.3 测试与结果 (176)

§ 8.4 测试数据处理与分析 (179)

§ 8.5 爆破震动影响因素灰关联分析 (181)

§ 8.6 结论与建议 (183)

参考文献..... (185)

第一章 爆破漏斗试验技术在深孔爆破中的应用

§ 1.1 问题的提出

在爆破理论的发展过程中,爆破漏斗理论和实验研究一直占有重要的地位,因为它不仅可以作为合理选择爆破参数、提高爆破效率的基础,而且可以通过对不同的炸药进行爆破漏斗实验和对比分析,为选用炸药提供依据等。由于爆破漏斗的这些基础性作用,在爆破实践与理论研究中,该技术方法得到广泛应用。

众所周知,在特定的岩石条件下的深孔爆破,不同性能的炸药与爆破参数,其爆破作用过程和破碎效果有很大的差异,合理的布孔参数、与岩石相匹配的炸药及其用药量是决定深孔爆破技术效果的必要前提。深孔爆破技术成功应用的关键是,针对不同的岩石条件,必须了解岩石的可爆性,并选择与此爆破物理力学性质相匹配的炸药及其用量,确定合理的爆破参数。

当岩石条件和炸药品种一定时,装药量的合理与否对爆破效果起着决定性的作用。药量过大,会使岩石过度破坏或产生大量抛掷以及形成空气冲击波;药量过小,又将达不到预期的爆破效果。当岩石条件改变时,因岩石的非均质性和多变性,不同的岩石所需药量不同,即使是同一种岩石,由于裂隙、层理等的影响,所要求的爆破药量也不可能一样,这就使得纯理论的装药量计算几乎不可能。

目前,工程上大都根据经验公式确定上述影响参量,然而,由于种种因素的影响,经验数据的选定往往具有很大的盲目性,从而使得实际爆破效果常常与预期目标相差较远。对于球状药包爆破可通过爆破漏斗模拟试验直接利用立方根相似定律进行求算。但对于深孔爆破技术而言,采用的是垂直自由面的柱状药包或平行自由面的条形药包,如何确定装药量,及其他相关参量,本文根据利文斯顿爆破漏斗理论,以最佳单位炸药消耗量不变为原则,探索通过小药量下的爆破漏斗模拟试验,推求这些参数或为这些参数的确定提供依据。

综上所述,建立在利文斯顿爆破漏斗理论基础上的现场爆破漏斗试验,在深孔爆破技术中具体应用目的可归纳为如下几个方面:

- (1)选择与岩石爆破相适应的炸药品种;
- (2)确定炸药单耗;
- (3)为深孔爆破应用地段的岩石可爆性分级提供依据;
- (4)为深孔凿岩、爆破参数选择、计算提供依据。

§ 1.2 利文斯顿(C. W. Livingston)爆破漏斗理论

1.2.1 基本理论

利文斯顿爆破漏斗理论又称能量平衡理论,按照利文斯顿的观点,球状药包在岩石内爆炸

时,岩石的变形和破坏取决于岩石单元体通过爆破能量的多少,当岩石条件一定时,爆破能量的大小又取决于药包的重量,炸药爆炸释放的能量主要消耗在岩石的变形、破碎、破裂、抛掷以及形成空气冲击波和对空气做功。当一定量装药埋置深度由深向浅逐渐变化时,通过岩石单元体的爆破能量将逐渐增加,岩石的变形和破坏加重。利文斯顿将使能量变化的埋深分为三种:临界埋深(L_c)、最佳埋深(L_j)、过渡埋深(L_g)。在临界埋深时,岩石所吸收的能量刚好达到饱和状态,岩石表面开始隆起或破裂,但无漏斗生成;当药包埋深大于临界埋深时,爆破能量完全被岩石吸收,岩石呈弹性变形,当药包埋深小于临界埋深时,爆破能量除被岩石吸收外,还有一部分能量用于抛掷和形成空气冲击波,产生爆破漏斗。从传给爆破岩体的能量观点来看,药包埋置深度不变而改变药包重量,同药包重量不变而改变药包埋置深度会有相同的效果。据此,利文斯顿研究了在药包重量不变的情况下药包埋置深度对岩石破坏的影响,提出了药包处于临界埋深 L_c 与装药量 Q 之间的关系为:

$$L_c = E \cdot Q^{1/3} \quad (1-1)$$

式中: L_c ——临界埋深(m);

E ——应变能系数,对于特定的岩石与炸药, E 为常数;

Q ——球状药包重量(kg)。

随着埋深 L 的减小,漏斗体积增大,当 $L = L_j$ 时,漏斗体积最大,此时爆破能量利用率最高;埋深 L 继续减小,漏斗体积也随之减小,消耗于抛掷和形成空气冲击波的能量增大,此时药包埋深称为过渡埋深 L_g 。

利文斯顿把药包埋深与临界埋深的比值称为深度比,用 Δ 表示,即:

$$\Delta = \frac{L}{L_c} \quad (1-2)$$

因此,最佳埋深可表示成:

$$L_j = L_c \Delta_j = \Delta_j \cdot E \cdot Q^{1/3} \quad (1-3)$$

式中: Δ_j ——最佳埋深比, $\Delta_j = L_j / L_c$ 。对于特定的岩石和炸药 Δ_j 为常数。

按上述理论,利文斯顿采用固定药量改变埋深的方法进行爆破漏斗试验,获得了大量的数据,根据试验结果作出了漏斗特征曲线,如 $V/Q \sim L/L_c$ 曲线等。同样,采用埋深不变改变药量进行爆破漏斗试验,所得结果与上述结果是一致的,即漏斗特征曲线相同。

1.2.2 爆破漏斗试验原理

利文斯顿爆破漏斗理论是建立在球状药包试验基础上的,球状药包爆破时的装药量是根据立方根相似定律计算的,爆破立方根相似定律是指同一种炸药在同一类岩石中爆破,药量为 Q_0 时爆出某一特定效果的爆破漏斗各参数,与药量改变为 Q_1 时爆出的另一爆破漏斗各参数应满足:

$$\frac{L_{j1}}{L_{j0}} = \left(\frac{Q_1}{Q_0} \right)^{\frac{1}{3}}; \frac{R_{j1}}{R_{j0}} = \left(\frac{Q_1}{Q_0} \right)^{\frac{1}{3}}; \frac{V_{j1}}{V_{j0}} = \frac{Q_1}{Q_0} \quad (1-4)$$

式中: Q_0 、 Q_1 ——分别为小型爆破漏斗试验和大直径深孔爆破所用的药包重量(kg);

L_{j0} 、 L_{j1} ——分别为小型爆破漏斗试验药包重量为 Q_0 时,大直径深孔爆破药包重量为 Q_1 时的最佳埋深(m);

R_{j0} ——小型爆破漏斗试验,当药包重量为 Q_0 ,且处于最佳埋深 L_{j0} 时的最佳漏斗半径(m);

R_{j1} ——为大直径深孔爆破,当药包重量为 Q_1 ,且处于最佳埋深 L_{j1} 时的最佳漏斗半径 (m);

V_{j0} 、 V_{j1} ——分别为小型爆破漏斗试验在 Q_0 、 L_{j0} 状态时及大直径深孔爆破在 Q_1 、 L_{j1} 状态时的爆破漏斗体积(m^3)。

根据最佳单位耗药量不变(单位耗药量是指破碎单位体积原岩的炸药消耗量),并假设不同药量下爆破漏斗形状相似的基本原则,也可以得到深孔爆破柱状装药条件下的不同爆破漏斗各参数关系与式(1-4)相同,只是公式中以炮孔深度 L 取代了球状药包的炸药埋深或抵抗线。

式(1-4)说明,通过采用重量为 Q_0 的球状药包进行小型爆破漏斗试验,求得最佳埋深、最佳漏斗半径和最佳爆破漏斗体积之后,即可以求出在重量为 Q_1 的球状药包进行大直径深孔爆破时的各相应参数。

§ 1.3 爆破漏斗试验在深孔一次成井爆破中的应用

武钢大冶铁矿地下采矿车间采用无底柱分段崩落法回采矿石,分段高度为 10m、12m。回采工作中,切割天井的用量大。为提高生产效率和生产安全,降低生产成本,拟试验研究深孔爆破法一次成井技术替代人工切割井。

对深孔一次爆破成井而言,在确定的掏槽方式与保证凿眼质量的前提下,选定与岩性相匹配的炸药及炮孔孔网参数是十分重要的。为此,爆破漏斗试验应用于该矿深孔一次成井爆破中的具体目的可归纳为:

根据该铁矿炸药厂提供的粘性硝铵和 2# 岩石两种炸药品种,通过单孔球状药包爆破漏斗试验选择与矿岩爆破相适应的炸药品种;确定标准爆破漏斗和最佳爆破漏斗时的炸药单耗,为一次爆破成井的岩体可爆性评价提供依据;在单孔爆破漏斗试验的基础上,进行变孔距同段爆破漏斗试验,确定炮孔间距与最佳爆破漏斗半径的关系,为凿岩、爆破参数设计提供依据。

本次爆破漏斗试验的基本方法是通过单孔爆破漏斗试验,绘出爆破漏斗的特征曲线,求得试验条件下的临界埋深、应变能系数、最佳埋深、炸药单耗等参数。之后,以最佳埋深为装药深度,进行变孔距多孔同段爆破漏斗试验,以验证和选择深孔爆破的孔间距。所以,小型爆破漏斗试验对大直径深孔凿岩、爆破设计有着重大的指导意义。

1.3.1 试验地点的确定

为客观、真实地确定一次爆破成井的相关参量,现场爆破漏斗试验地点选择在与深孔一次爆破成井试验地点岩性相同或接近的地段。

经现场调查,试验地点选择在一60m 水平 7#~9# 回采巷道间的上盘切割巷及 7# 回采巷道的上盘段的帮壁上。漏斗试验平面位置如图 1-1 所示。

为了解矿体节理裂隙对爆破漏斗试验的影响程度和确定试验钻孔的直径与孔距,试验炮孔凿岩前对试验地段的岩体裂隙地质情况进行了现场调查,调查结果发现,该区域岩性主要为蚀变的闪长岩,岩体主要成块状分布,裂隙不太发育,岩体稳定性较好,与一次爆破成井试验地段的岩体地质情况基本一致。

经现场取样测试,所得试验地段的主要岩石物理力学性质如表 1-1 所示。

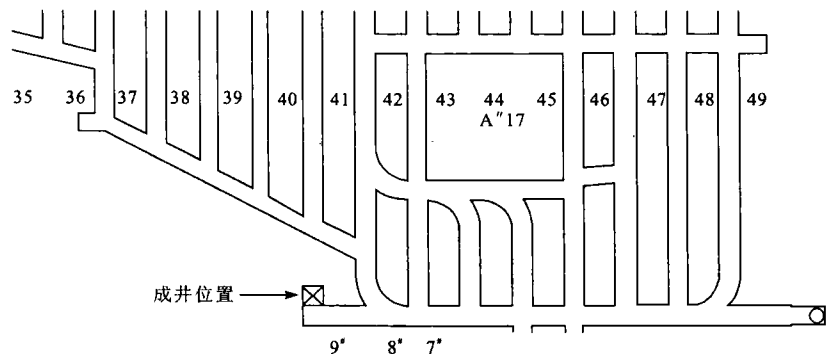


图 1-1 漏斗试验的平面位置示意图

表 1-1 爆破漏斗试验地段岩石物理力学性质测试值

试样编号	岩性	天然密度(g/cm³)	单轴抗压强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	变形模量(GPa)	泊松比	弹性模量(GPa)
1	灰绿 夹红色 闪长岩	2.85	112	5.4	82.0	0.22	83.5
2			121	6.43	88.0		106.3
3			139	6.45	133.3		141.7
平均			124	6.09	101.1		110.5

1.3.2 爆破漏斗试验的炮孔布置

本次现场爆破漏斗试验分为单孔和变孔距多孔同段爆破漏斗试验。

单孔爆破漏斗试验布孔的原则是要求各孔爆破后形成的漏斗互不干扰，孔口尽可能有足够大的平整自由面，钻孔轴线要垂直于帮壁，深孔和浅孔交替布置。根据类似岩性爆破漏斗试验结果的爆破漏斗半径，设计相邻炮孔间距均在 2.5m 以上。设计孔深 0.4~1.2m，1#~14# 共 14 个孔按设计埋深布置。

根据现场条件，单孔爆破漏斗试验采用矿山自产的粘性粒状硝铵炸药和 2# 岩石炸药两种炸药品种，其性能如表 1-2 所示。试验采用 42mm 孔径的炮孔。孔间距 2.5~3m，钻孔孔口距巷道顶底板 1.5~1.6m，孔深 0.4~1.3m。在每个炮孔内装填带有 1 个起爆药包的硝铵粘性炸药或 2# 岩石炸药(250g 或 300g)，采用球状药包装药，药卷直径 40mm。单孔爆破漏斗试验布孔如图 1-2 所示的 1#~14# 炮孔。

表 1-2 两种炸药性能参数表

炸药种类	密度(g/cm³)	爆速(m/s)	猛度(mm)	爆力(ml)
2# 岩石炸药	0.9~1.10	3 200	12	320
粘性硝铵炸药	0.85~0.95	2 800	18	280

根据单孔爆破漏斗试验结果的最佳爆破漏斗深度，钻凿 4 个孔间距分别为 0.9m、1.2m、1.6m 的炮孔，以最佳炮孔埋深为药包装药深度，炮孔内分别装填 300g 的匹配性炸药。同时，为了解空孔对爆破效果的影响，还利用 4 个爆破孔间原声波测试留下的 5 个 φ56mm 的空孔，以观察装药孔与孔空的最佳间距。其炮孔布置见图 1-2、图 1-3 中的残孔 1#~5#。

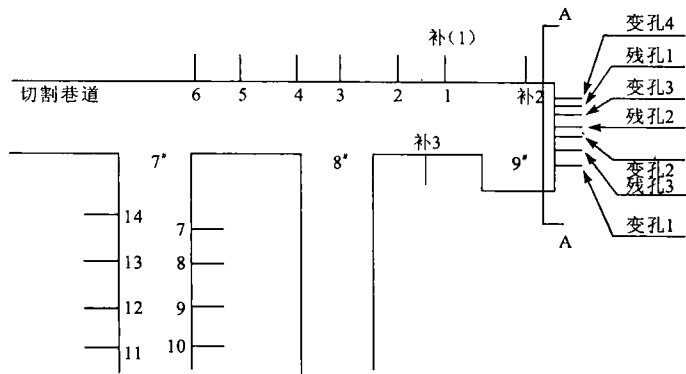


图 1-2 单孔与多孔漏斗试验炮孔平面布置示意图

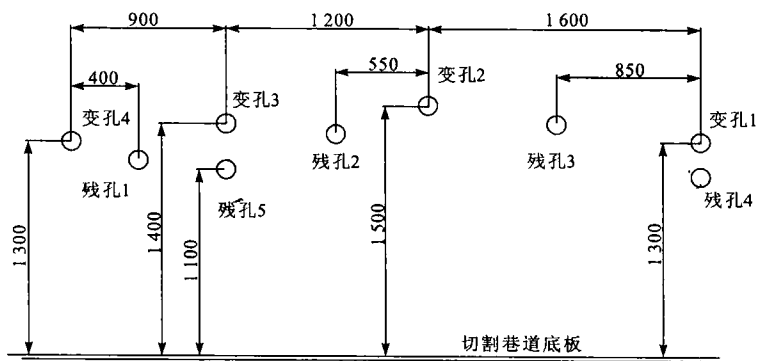


图 1-3 多孔漏斗试验炮孔立面布置示意图(单位: mm)

多孔同段爆破漏斗试验采用单孔爆破漏斗试验选定的炸药,共布孔径为 42mm 的水平孔 4 个,孔深以第一次试验所得的最佳漏斗深度为准。其炮孔布置见图 1-2、图 1-3 中的变孔 1#~4#。

1.3.3 炮孔直径与炮孔内的装药、堵塞

根据爆破漏斗相似定律误差分析结果,当爆破漏斗试验结果(L_{j0} 或 R_{j0})存在误差为 δ 时,则导致大直径深孔爆破漏斗参数(L_{j1} 或 R_{j1})的绝对误差 Δ 为:

$$\Delta = \delta \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_0} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{D}{d} \cdot \delta \tag{1-5}$$

式中: D ——大直径深孔爆破孔径, $\phi=85\text{mm}$;

d ——小型爆破漏斗试验炮孔直径(mm)。

从上式可以看出,小型爆破漏斗试验孔径(d)与大直径深孔爆破孔径(D)相差越大,则爆破漏斗试验引起的误差值也越大。基于此分析,且考虑试验地段节理裂隙较发育,爆破漏斗试验的孔径不宜过小。但考虑爆破对巷道的稳定性影响、且现场凿岩条件的限制,试验炮孔采用 42mm 孔径的炮孔。

装药前,对个别较深的炮孔用炮泥调整到设计装药深度,而后用炮棍装填药包。药包装入设计位置后,再在孔口堵塞一定长度的炮泥。炸药起爆,对于无雷管起爆感度的粘性硝铵炸

药,采用重 50g 的 2# 岩石硝铵炸药作起爆药包,2# 岩石炸药用非电毫秒雷管直接起爆。每次爆破不相邻的炮孔 2~4 个。对个别爆后余孔较深、岩石较完整的残孔进行再利用,以增加爆破漏斗试验数据。

1.3.4 爆破漏斗体积与半径测量

(1) 爆破漏斗体积测量

以垂直炮孔轴线的平面(沿巷道中心线垂直巷道顶底板)作为基准面,如图 1-4、图 1-5 所示。在爆破前后,分别按 20cm×20cm 的网度测量巷道壁面和漏斗轮廓线距基准面的距离,求出各测点的爆破深度,按抛物线法(即辛卜生法)计算求得漏斗各断面的面积 S_i 。

$$S_i = \frac{B}{3} [(Y_0 + Y_n) + 2(Y_2 + Y_4 + \dots + Y_{2i} + \dots) + 4(Y_1 + Y_3 + \dots + Y_{2i+1} + \dots)]$$

式中: S_i ——漏斗某断面面积(m^2)($i=1,2,3,\dots$);

B ——测点间距, $B=0.2\text{m}$;

Y_i ——第 i 点爆破深度(m)。

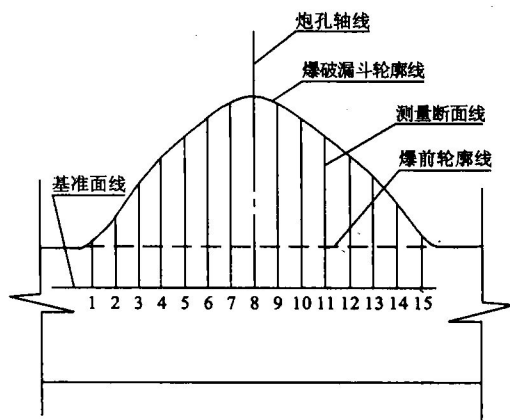


图 1-4 爆破漏斗体积测量方法示意图



图 1-5 爆破漏斗体积现场测量

各断面面积求出后,按棱台体求得漏斗体积 V :

$$V=\frac{B}{3}[(S_1+S_n)+2(S_1+S_2+\cdots+S_i+\cdots)\sum_{i=1}^n\sqrt{S_i\cdot S_{i+1}}]$$
 (1-6)

(2)爆破漏斗半径测量

炮孔爆破后,扣除漏斗口周围岩石片落部分,圈定漏斗口的边界。而后以炮孔为中心,间隔 45°直接量取 8 个不同方位的漏斗半径 R_i ,然后取其平均值作为漏斗半径。

1.3.5 爆破漏斗试验数据处理与结果分析

1.3.5.1 单孔爆破漏斗试验结果

经试验和统计、计算所得的两种爆破漏斗试验结果分别如表 1-3、表 1-4 所示。主要的单孔爆破漏斗如图 1-6 所示。

表 1-3 2# 岩石炸药单孔爆破漏斗试验数据

炮孔编号	药包中心埋深(m)	漏斗体积(m³)	漏斗深度(m)	漏斗半径(m)	埋深比	单位炸药爆破体积(m³/kg)	块度评价
1	1.02	0	0	0	1	0.000	
12	0.99	0.02	0.25	0.16	0.97	0.080	较均匀
7	0.76	0.026	0.40	0.41	0.75	0.087	较均匀
4	0.55	0.268	0.73	0.67	0.54	0.893	有大块、碎块
6	0.48	0.099	0.45	0.59	0.47	0.330	较均匀
13	0.47	0.076	0.36	0.53	0.46	0.304	个别大块
2	0.46	0.554	0.47	0.70	0.45	1.847	多大块
11	0.40	0.076	0.22	0.54	0.39	0.304	不均匀

表 1-4 粘性硝铵炸药单孔爆破漏斗试验数据

炮孔编号	药包中心埋深(m)	漏斗体积(m³)	漏斗深度(m)	漏斗半径(m)	埋深比	单位炸药爆破体积(m³/kg)	块度评价
8	1.20	0	0	0	1	0	
补 1	0.98	0	0	0	1	0	
10	0.81	0.064	0.26	0.32	0.83	0.156	均匀碎块
3	0.75	1.28	0.68	0.86	0.77	4.27	大块多
补 3	0.61	0.016			0.62	0.053	难爆
5	0.57	0.044	0.38	0.46	0.48	0.147	难爆、碎块
14	0.54	0.067	0.28	0.60	0.45	0.268	较均匀
9	0.53	0.439	0.43	0.71	0.44	0.463	块度不均
补 2	0.40	0.040			0.41	0.133	

从爆破漏斗显示的新鲜岩面可以看出,2#、3#、4# 尤其是前两个漏斗,岩石结构面倾向与爆破作用方向一致,且其为急倾斜。这明显出现了有利于炸药能量利用以及岩块沿结构面抛掷的情况,这几个漏斗的爆堆也出现了沿结构面剥离的大块,因此出现了 2#、3# 漏斗体积过大的现象。为不失比较和一般性,在进行数据分析、处理时应剔除这两组数据。

由试验可以看出:

(1)节理裂隙对爆破漏斗形成有很大影响。具体表现在对漏斗形状、漏斗体积、爆破块度、炸药单耗等方面。如图 1-6 的 2#、3#、4# 漏斗由于岩石结构面倾向与炮孔轴向一致且急倾斜,故出现了爆破体积大、炸药单耗小、爆破块度大的情况;5#、12# 漏斗的岩石结构面走向、倾

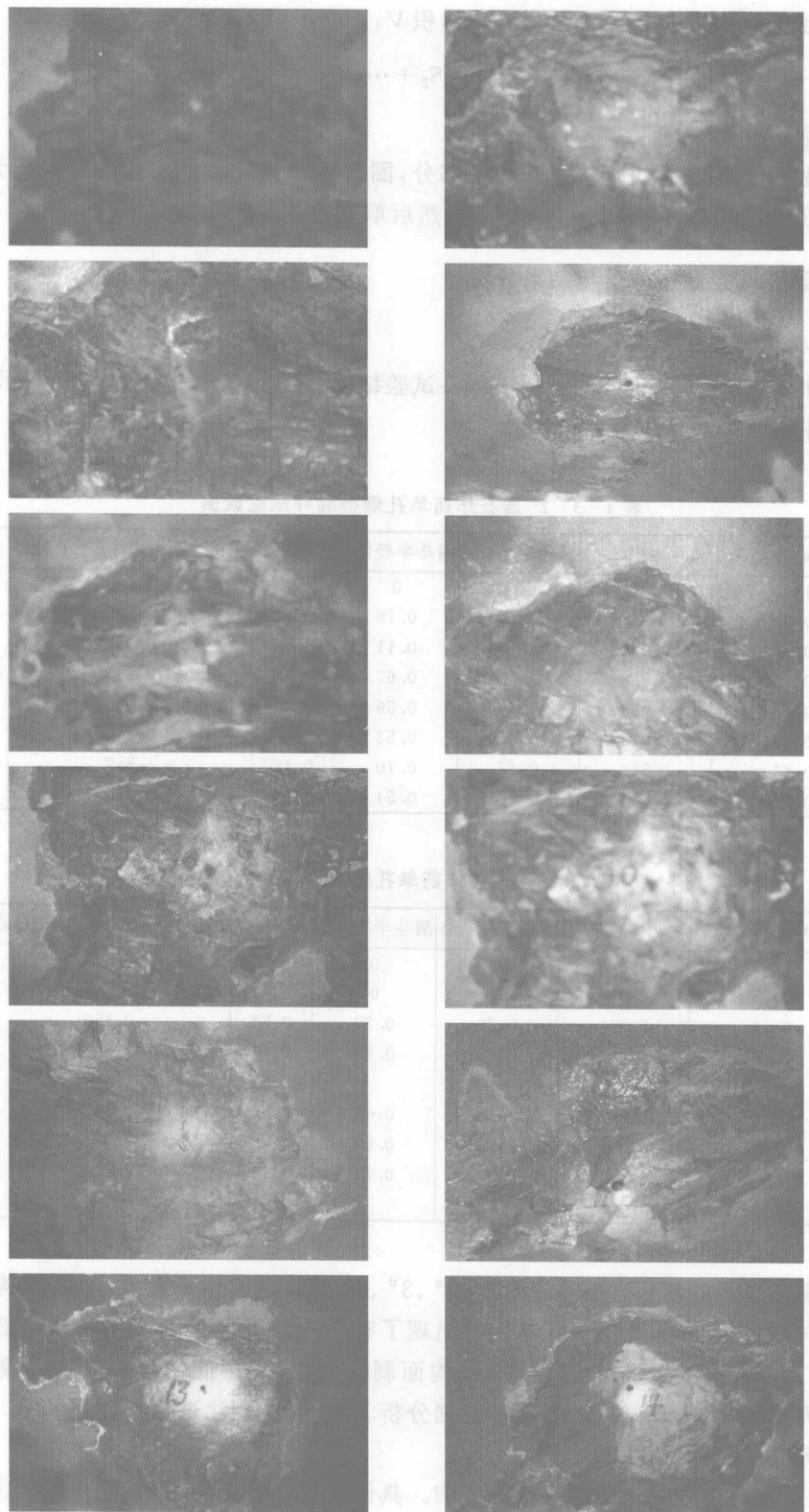


图 1-6 2#~14# 单孔爆破试验漏斗照片

向分别与爆破作用方向垂直和斜交,故分别出现了沿走向和倾向方向的狭长型漏斗,且爆破块度碎小、炸药单耗大的难爆现象。

(2)破漏斗体积总体较小。炸药单耗较高,表明矿岩坚硬、致密,属难爆型。

(3)采用 2[#] 岩石硝铵炸药时,炸药的临界埋深为 1.02m,最佳埋深为 0.55m,最佳埋深比为 0.54,最佳爆破漏斗体积为 0.893m³,应变能系数为 1.523,单位炸药消耗量为 1.12kg/m³。

(4)采用粘性硝铵炸药时,炸药的临界埋深为 0.98m,最佳埋深为 0.53m,最佳埋深比为 0.44,最佳爆破漏斗体积为 0.439m³,应变能系数为 1.464,单位炸药消耗量为 2.160kg/m³。

(5)两种炸药爆破漏斗试验对比表明,对试验地段的矿岩条件而言,两种炸药的临界埋深和最佳埋深接近,应变能系数相差也不大,但最佳爆破漏斗体积和炸药单耗却相差很大,且就两组爆破漏斗试验的爆堆块度来看,2[#] 岩石硝铵炸药较均匀。因此,针对试验地段的情况,2[#] 岩石硝铵炸药与矿岩特性更匹配。

依据表 1-3、表 1-4 作两种炸药爆破漏斗的 $V/Q \sim L/L_c$ 曲线,如图 1-7、图 1-8 所示。

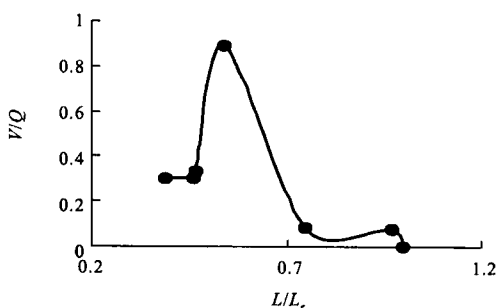


图 1-7 2[#] 岩石硝铵炸药爆破漏斗特性曲线

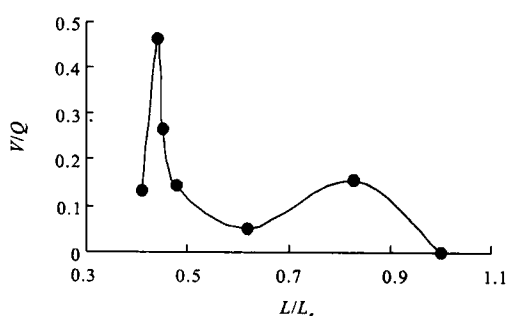


图 1-8 粘性硝铵炸药爆破漏斗特性曲线

根据最小二乘法原理,分别对两种炸药爆破漏斗试验数据进行三次项回归,所得的两种炸药的爆破漏斗体积(V)与药包埋深(L)以及 V 与爆破漏斗半径(R)之间的多项表达式为:

2[#] 岩石硝铵炸药:

$$V = 8.0896L^3 - 17.915L^2 + 12.396L - 2.5701 \quad (1-7)$$

理论最佳深度与体积: $L = 0.55\text{m}$ $V = 0.175\text{m}^3$

$$V = 3.8677R^3 - 2.8398R^2 + 0.5517R - 0.0029 \quad (1-8)$$

由上述两式得出标准爆破漏斗时的漏斗半径: $R = L = 0.6\text{m}$ 。此时,2[#] 岩石炸药单耗为 1.77kg/m³。

粘性硝铵炸药:

$$V = 6.2747L^3 - 13.449L^2 + 8.9589L - 1.7559 \quad (1-9)$$

理论最佳深度与体积: $L = 0.53\text{m}$ $V = 0.154\text{m}^3$

1.3.5.2 变孔距多孔同段爆破漏斗试验结果

以最佳埋深 0.55m 为药包埋深,用 2[#] 岩石炸药装填 4 个炮孔,经爆破试验和统计计算,所得的试验结果如表 1-5 所示。

由试验结果可以看出,不同孔间距同段爆破试验的爆破体积不同,孔 3、孔 4 沿炮孔中心连线贯通,形成沟槽,孔间无脊柱,沟槽深度略大于漏斗深度,块度较均匀。孔 1、2、3 之间都未拉成沟槽,其亦未与空孔贯通,基本上是各自独立的漏斗。因此在不偶合装药条件下,最大孔间距应不大于 0.9m。同时从变孔距多孔同段爆破漏斗试验结果可以看出,不装药空孔与装药

孔的间距应小于 0.4m。

表 1-5 2[#] 变孔距同段爆破漏斗试验结果

炮孔编号	药包埋深(m)	炮孔间距(m)	爆破体积(m ³)	炸药单耗(kg/m ³)	孔间距与最佳漏斗半径之比
1~2	0.55	1.6	0.126	2.38	2.39
2~3	0.55	1.2	0.281	1.07	1.79
3~4	0.55	0.9	0.363	0.83	1.34

1.3.6 应用效果

根据爆破漏斗试验的研究结果,现场的天井开挖,装药孔与中间大空孔的孔间距为 0.2~0.4m,掏槽孔、辅助孔、周边孔各装药孔间的空间距为 0.8~1.0m;采用压气装药器装填粉状 2[#] 岩石炸药进行现场爆破,装药线密度为 4.5kg/m。爆破后,经现场量测,天井断面尺寸为 2.1m×2.2m,炮孔利用率达 95%。实际观察可见,天井形成断面为方形直桶,四周壁及顶部平整,爆堆块度均匀,基本无大块。

综上所述,本文将利文斯顿爆破漏斗理论灵活地应用于一次爆破成井技术研究中。在一次爆破成井的应用现场,进行了系列单孔爆破漏斗试验以及变孔距多孔同段爆破漏斗试验。同时,在装药孔附近按不同的间距布置空孔,以观察实际爆破时的装药孔与平行空孔之间的间距关系。通过对爆破漏斗试验结果的分析研究,选择了与矿岩条件相匹配的炸药类型,得出了试验地段的岩体爆破漏斗特征曲线,为试验地段的可爆性分级及一次爆破试验的相关参数选取提供了依据,取得了良好的现场应用效果。

§ 1.4 爆破漏斗试验在确定大直径深孔 采矿爆破参数中的应用

对采矿爆破而言,显然在不同的矿岩条件下,对于特定炸药,或特定的矿岩条件不同的炸药,其爆破参数不尽相同。特别是在大直径深孔采矿中,选择确定合理的爆破参数,对于提高爆破效果,降低采矿成本有着重要的意义。

安庆铜矿为一隐伏接触交代矽卡岩型富铜富铁矿床,矿区所在区域位于下扬子台拗西北侧、怀宁凹褶断束中段,亦即淮阳山字型构造前弧的东翼,北西临郟城-庐江断裂带,南东近沿江破碎带。该矿是一座大型地下矿山,日采选生产能力为 35 000t/d。安庆铜矿矿石储量主要分布在三个矿体,其中 1[#] 矿体为目前生产的主矿体。1[#] 矿体厚实、形态规整,铜金属量占矿山总储量的 80%以上。高阶段大直径深孔回采嗣后充填采矿法为 1[#] 矿体的主要采矿方法。采场崩矿方式为 VCR 法掏槽与倒梯段侧向崩矿联合爆破。分段凿岩、双阶段连续回采,回采阶段高度为 120m。凿岩设备为 Simba-261 型潜孔钻机,炮孔直径 165mm。采场垂直矿体走向布置,分矿房、矿柱两步骤回采,单个采场宽度 15m,采场实行嗣后充填。

目前,安庆铜矿 1[#] 矿体-400m 中段以上大部分采场已回采完毕,回采主体部位已移至-400m 以下中段。因此,采矿爆破对象的主要矿岩体地质结构、物理性质等均发生了不同程度的变化,为适应变化了的岩体特征,必须进行现场爆破漏斗试验,并在此基础上对矿岩体的可爆性作出评价,为采场爆破参数设计提供关键性依据。

1.4.1 系列爆破漏斗试验地点及其工程地质特点

首先应确定爆破漏斗试验的试验地点。爆破漏斗试验地点选择原则,一是使试验矿体地段与被开采区段矿岩性质相同或接近;二是尽量使试验集中在同一巷道内进行,以减少干扰正常生产。

根据以上原则,经现场勘察,单孔爆破漏斗试验地点主要确定在-560m中段5#矿柱穿脉内的Fe-Cu和Sk-Cu矿体中进行,因5#矿柱穿脉内的试验区域空间有限,少量试验安排在3#矿柱穿脉内的相同岩性矿体内进行;同理,多孔同段爆破漏斗试验地点确定在3#柱、7#柱穿脉内的相同岩性地段进行。

为了解矿体节理裂隙对爆破漏斗试验的影响程度,试验中对试验地段的岩体裂隙地质情况进行了现场调查,在对矿体及围岩岩性和结构面发育特征进行野外调查的基础上,进行了工程地质岩组划分,并采用DIPS程序对节理裂隙的发育特征进行了统计分析。经分析,可以得出以下结论:

(1)-560m中段5#穿脉矿体及围岩整体工程地质条件良好,岩石致密坚硬,岩体比较完整,结构面比较发育,岩体被结构面切割呈块状结构。

(2)按岩性划分,研究区可划分6个工程地质岩组:蚀变闪长岩、闪长岩型铜矿、矽卡岩、矽卡岩型铜矿、铁铜矿和铁矿。

(3)节理裂隙的空间分布规律在很大程度上受到区域地质作用的影响,F1断层对岩体结构面的发育及产状分布具有控制作用。研究区内节理裂隙以中陡倾角为主,“X”型剪节理比较发育,缓裂较少,其优势产状分别为: $63^{\circ}/39^{\circ}$ 、 $217^{\circ}/71^{\circ}$ 、 $324^{\circ}/75^{\circ}$ 和 $256^{\circ}/69^{\circ}$ 。

(4)就矿体内节理裂隙的发育密度而言,从大到小依次为铁矿:3.5条/m;闪长岩型铜矿:3.3条/m;矽卡岩型铜矿:3.2条/m,平均间距40~50cm;铁铜矿:3.15条/m,平均间距40~50cm。

(5)通过对Fe-Cu、Sk-Cu两种岩块的室内物理力学参数测定可知,两者抗压强度、弹性模量、泊松比等力学参数相差不大,均属于致密、坚硬的岩石。

1.4.2 现场爆破漏斗试验布孔

1.4.2.1 单孔爆破漏斗试验布孔

单孔爆破漏斗试验布孔的总体原则是,要求各孔爆破后形成的漏斗互不干扰,孔口尽可能有足够大的平整自由面,钻孔轴线要垂直于帮壁,深孔和浅孔交替布置。为使单孔爆破漏斗不相互影响,根据经验,相邻炮孔间距约3.5m,孔深1.20~2.5m,按设计埋深,在每个炮孔内装填乳化油炸药4.5kg(长径比为6),采用球状药包装药。

目前安庆铜矿大直径深孔生产爆破采用的是狮子山矿炸药厂生产的MRB岩石乳化炸药和向阳化工厂生产的RJ-2#岩石乳化炸药两种类型(两种炸药的出厂性能见表1-6),且-400m以下深部矿体的主要类型为含铜磁铁矿、矽卡岩性铜矿。

表 1-6 两种乳化炸药出厂性能表

炸药名称	厂家	爆速(m/s)	密度(g/cm ³)	猛度(mm)	殉爆距离(cm)
MRB	狮子山炸药厂	5 350	1.11	19	5
RJ-2#	向阳化工厂	5 129	1.06	14.5	3