

冯叔瑜、刘清荣教授的勉励文

改革开放以来社会主义建设事业飞速发展，爆破事业是发展速度最快的行业之一。据了解，目前全国从事爆破作业的专业人员百多万人，专业爆破公司近五百家，其中具有专业职称的一万三千余人，是爆破事业突出发展的具体表现。特别值得提出的，一大批专业的青年爆破工作者脱颖而出，他们中有许多是获得博士、硕士和学士学位的专业人才。这标致着爆破技术由工艺进步到科学技术的巨大转变，中国工程爆破协会的成立则证明是爆破工作得到社会重视的特殊行业。

一万三千多名具有高、中、初级技术职称的专业人员，其中大部份都是年富力强的青年，更有相当多的精英人才。他们素质好，进取精神强，为爆破事业理论与实践作出贡献的成绩突出，为爆破事业发展的奉献精神令人感动。《当代中国青年爆破工作者论文专辑》的出版发行，表明了近年来我国青年爆破工作者的具体成就。对全国爆破工作者来说，应该是一件值得称颂的重大事件。我想，展现在读者面前的50多篇论文，只是诸多青年同仁当中的一部份；随后将会有更多的好文章奉献出来供读者参考学习。

目前爆破理论与实践仍有相当距离，工程爆破的设计仍以经验为主。作为一门科学技术是大有作为的广阔天地，今后的发展有赖于一代或几代青年同仁的艰苦努力，开拓前进才能获得突破性的进展。

爆破作用机理是长期来探索前进的问题之一，至今除了几何模型外，还没有成熟地建立起合适的模型和模拟理论为世可公认。由于爆破的对象十分复杂，特别是岩体的复杂多变，对岩石在爆破作用下的物理和力学量的测量技术还未能解决。最近有人从材料本构关系去探索，不失为另一条蹊径；分形几何的应用为预测爆破后的块度给配也有所前进；计算机的利用，在建立计算机模型，人工神经网络、专家系统的优化设计及CAD技术等都在探索前进中。

新品种的爆破器材和新的起爆技术，国内外都有很大进步，但也还有许多等待开发的项目。总的来说是围绕提高爆炸能量有效利用率的问题。如何解决好炸药与岩石和其他爆破体匹配，就是其中之一。

大家知道，爆破在工程建设中的广泛应用做到了许多人力或机械力所不能完成的工作，为人们带来了巨大的经济效益，但随着伴生的安全问题也给人们造成重大的破坏或危害，仍有谈虎变色的感觉，也给爆破技术的推广应用造成许多限制。准确合理的爆破地震安全预报与个别飞石的随机性等等，仍然困惑着广大的爆破工作者。

以上举例，仅是工程爆破中亟待解决的众多问题的一部份。而这些领域的探索与解决，只能寄希望于青年一代的爆破工作者！青年是我们的希望。在此专辑出版之前，谨此写上几句，表示祝贺，並愿共勉之。

前 言

《爆破》编辑部编辑出版青年爆破工作者论文专辑，是为我们全国各行各业从事工程爆破专业科研、教学、生产、管理及技术服务的青年朋友们办了一件大好事。值此出版发行之际，我代表中国力学学会工程爆破专业委员会青年活动站的全体同志向《爆破》编辑部的全体同志表示衷心的感谢。

中国力学学会工程爆破专业委员会青年活动站在工程爆破专业委员会的老前辈，老专家们的指导下，现已在全国各地有条件的地区（城市）建立了二十多个活动分站，在青年活动站登记的青年工作者已近400人。这些同志大都是科研、教学、生产、管理及技术服务第一线的尖兵，并在专业、学术上取得了一定的成绩，有的在国内外爆破领域中已具有一定的影响。这本文集就是他们理论探索、技术创新和工程实践的结晶和总结。在此，我也向每位作者表示祝贺和感谢，祝贺你们取得了良好的成绩，感谢你们的勤奋努力。同时，也衷心希望全体青年爆破工作者在自己的工作岗位上刻苦学习和钻研，提出新理论，创造新技术，解决新问题，为我们广大读者提供高水平、高质量的论文，为我们社会主义祖国贡献更大地力量！

朱振海

1994年11月25日于北京

[社论] 大力培养爆破队伍接班人

本刊编辑部

(莫超仪、童扶才、朱庆华、曾其萃、李寒波执笔)

正当我国以举世瞩目的成就跨越建国四十五周年，並以豪迈向二十一世纪的时候，回顾我国爆破事业所走过的历程，展示的累累硕果，尤如颗颗璀璨的明珠，光芒四射，令人欢欣；展望未来，我们爆破工作者更加豪情满怀。

四十五年，弹指一挥间，经过几代爆破工作者的努力，我国的爆破技术，在相当的领域里已达到世界先进水平。在我国国民经济建设中，从高空拆爆到水下除障；从气势宏大的移山填海到微观检测的技术；从理论到实践，都有新突破、新成果，成为国民经济建设的先行者、排头兵，起着极其重要的作用。

在党和政府的重视和关怀下，我国爆破事业有了长足的发展，爆破专业技术队伍不断壮大，爆破技术人才如雨后春笋，竞相破土而出。今天，一支百万的爆破专业技术大军正活跃在生产教育和科研的战场上，他们之中，不乏一批具有深厚专业理论基础和扎实实践功夫的年青博士、硕士，他们是爆破事业的接班人和世界先进爆破技术的创造者。他们在老一辈爆破专家的带领下，勇于探索、开拓和进取，把自己的青春和智慧奉献给爆破事业；在经过长期实践锻炼成长起来的专业爆破大军中，更有一批富于献身的青年爆破技术工作者，他们在较为艰苦的生活环境下，完成了一项又一项艰巨的爆破任务，解决了一个又一个的爆破技术难题。

建国以来，为了全面开展爆破技术的科学研究，培养爆破专业技术人才，我国建立了一批各种专门从事爆破技术的科研院所，有关高等院校设立相关专业。这一战略决策，为爆破事业的大发展提供了可靠的基地保障。然而，随着改革开放的进一步深化和扩大，国民经济建设的进一步发展，许多新的国家项目上马，对爆破技术的应用更加广泛，要求也越来越高，对爆破人才的需求量会更大。而现有爆破队伍的数量和质量状况，却还不能达到这种发展的需求。我们的爆破队伍，从总体上来说，青年技术人员的比例偏低，而且这一比例还有下降的趋势；高等学校培养出来的爆破专业毕业生，有相当数量在改行择业；各科研院所和现场施工单位的青年爆破人员缺少必要条件进行深造提高。研究和解决这些问题，是爆破事业的稳定和发展的关键，培养和造就爆破队伍接班人问题刻不容缓。

要培养和造就爆破队伍的接班人，首要的问题是制订吸引人才的政策，提供优越的条件和环境，把高校毕业生吸引到生产第一线。建国以来，高校毕业生实行的是计划分配的体制，这就保证了大批学有专长的毕业生充实到生产第一线，他们在社会主义建设事业中发挥了积极的作用，从而成为我国现有爆破队伍的中坚力量。但是，随着人才管理体制的改革，高

校毕业生分配由单一的计划分配转变为双向选择的体制，毕业生可以根据自己的志向选择条件更优越，更能发挥自己才智的地方和岗位。人才流动已成为大趋势，用人单位必须审时度势地认真予以对待，努力创造“筑巢引凤”的条件，把大批学有专长的毕业生吸引到爆破事业上来。把握了毕业生分配的这一重要环节，爆破队伍的人才就有了保障。

我们有逾百万的爆破专业技术的现职人员，造就和提高这支队伍，是培养爆破接班人的重要途径，我们对此予以足够的重视。为此，可以采取多种形式、多层次的方法进行人才的培养。在这支队伍中，有一批学术造诣深的老教授、老专家，他们是爆破事业的领路人，要充分保护好他们，给他们创造良好学术环境，配备助手，使他们丰富的学识得以总结、流传下来；我们有一批活跃在学科前沿的研究生队伍，要充分发挥他们理论基础扎实，思维活跃的优势，给他们提供的条件，使他们能在爆破学科的前沿施展才华，赶超世界爆破技术的先进水平；在爆破现场的第一线，有一大批具有丰富实践经验的爆破技术人才，要创造必要的条件，使他们的经验得以总结提高。其中的优秀者可以送往高校深造；为了普遍地提高现场施工人员的业务素质，还可在全国各省区和交通、水利水电、采掘、铁路、建材等部门举办各种类型的培训班、研讨班等。通过多种形式、多层次的系统培养，我们相信，一马当先、万马奔腾的局面将会涌现出来，爆破事业亦将会获得新发展。

爆破事业是社会主义事业的组成部分，爆破工作具有艰苦性和危险性，只有勇于献身的人才能在爆破事业上开创出丰硕业绩。我们的前辈爆破专家，为了获取研制出静态爆破剂的最佳配方和效果，不惜献出自己的全副身心，甚至于生命。“人生的价值在于奉献而不在于索取。”我们的前辈为年青的一代爆破工作者，作出了光辉的榜样。

物质是基础、精神是动力，我们在培养爆破队伍接班人的工作上，不仅要在思想上激励青年人的爱国热情和为爆破事业而献身的精神，还要在实际工作和生活帮助和关心他们解决实际困难。要注重提高爆破从业人员的社会地位，广泛宣传他们在社会主义建设中的重要地位和作用。同时，各有关部门还应在可能的条件下，尽力改善和提高爆破从业人员的工作环境和生活条件，并根据青年人的特殊需求，为他们排忧解难，免除他们的后顾之忧，使他们安于事业、安于工作，成为爆破事业的优秀接班人，为我国的爆破事业做出更大的贡献。

爆 破

1994年12月

第11卷 专辑

(总第48期)

当代中国老一辈杰出的爆破专家冯叔瑜、刘清荣教授的勉励文·····	(I)
前言·····	朱振海 (II)
社论·····	本刊编辑部 (III)

目 次*

74.315
509

●岩石破碎理论●

爆炸载荷作用下节理岩体破裂规律的研究·····	张 奇 (1)
非爆破法确定岩石爆破能耗的研究·····	陈运钊 (6)
岩石爆破破碎机理的探讨·····	张电吉 (9)

●爆破理论●

岩石中爆破扩腔过程的理论分析·····	宗 琦 (12)
非均质含裂隙岩体预裂爆破成缝的理论分析·····	·····高文学 等 (17)
爆炸破碎区的评价·····	·····高尔新 (23)
岩体爆破成缝的试验研究·····	·····高文学 等 (28)

●起爆、传爆●

导爆管反射四通闭合起爆网路的可靠性试验及评价·····	·····张敢生 (32)
万吨级大爆破多段次梯段式微差起爆网路·····	·····齐世福 (38)

●峒室爆破●

应用利文斯顿漏斗理论研究峒室松动爆破W/H参数·····	赵 根 (46)
------------------------------	------------

●水压爆破●

水压爆破岩石的破坏特征·····	陈士海 等 (50)
水压爆破药量计算公式分析及应用·····	程 康 (58)
水压毫秒爆破拆除复杂厂房·····	郑长青 (62)

●控制爆破●

预裂爆破及质量监控在边坡施工中的应用研究·····	王在泉 等 (66)
大孔距手工眼控爆拆除框架结构锅炉房和立柱轻顶车间·····	姜占才 (72)
应用加强松动爆破在高陡山顶上排险·····	韦克武 (75)
宽孔距微差挤压爆破在矿山的应用·····	龙 钰 等 (78)
定向爆破砖烟囱临界爆破切口园心角的研究·····	李守巨 (80)
重心偏侧轻高框架结构大楼控制爆破·····	谢先启 (84)
箱涵分集药包控制爆破研究·····	高文学 (87)
危险烟囱的爆破拆除·····	(90)

* 本专辑目次以《中国图书资料分

周边控制爆破中爆炸载荷的确定·····	卢文波 (92)
孔桩开挖控制爆破技术·····	刘国靖 等 (97)
砖混结构高耸筒式构筑物的控爆拆除·····	郑德明 (99)
试论控制爆破中的控制·····	陈华腾 (102)
中深孔微差爆破在土石方开挖工程中的应用研究·····	陈桂林 等 (106)
药室爆破拆除工字型钢筋混凝土立柱大车间·····	姜占才 (108)
80m高钢筋混凝土烟囱爆破拆除·····	吴剑峰 (111)
薄型混凝土构筑物控制爆破·····	杨振宏 (115)
石材爆破开采的理论与设计·····	李新平 等 (117)
建筑物群中的楼房定向控制爆破·····	陈华腾 (120)
●装药、充填设备及方法●	
预制钢套管内装药爆破的对比试验及应用·····	姜占才 (126)
市区建筑物地基开挖陡边坡爆破最大一响装药量的确定·····	付洪贤 (129)
●爆破振动●	
地下爆源引起的表面振动·····	蒋进军 等 (132)
爆破振动的研究现状及展望·····	卢文波 等 (138)
爆破地震波效应与防震·····	陈华腾 (142)
高边坡中群峒开挖及其爆破振动安全监测·····	吕学清 (146)
露天矿爆破震动对构筑物的影响·····	高全臣 等 (149)
●爆破的应用●	
爆炸处理消除焊接残余应力的工业应用·····	谭胜禹 等 (152)
●数学、计算机在爆破中的应用●	
条形装药土中爆炸冲击波及空腔的数值模拟·····	龙 源 (156)
用灰色理论分析爆破对矿柱的影响·····	吕学清 (162)
●水下爆破●	
水下爆破的几个问题·····	陈华腾 (165)
●岩石块度研究●	
岩体爆破天然结构体块度分布统计方法研究·····	程 康 (170)
●爆破安全技术●	
爆破毒气及其分析·····	林大泽 (173)
煤矿许用炸药爆速变化对爆破安全性影响的研究·····	陶 林 (177)
拆除爆破与安全·····	商 健 (181)
●爆破力学●	
岩石动力特性初探·····	沈兴付 等 (184)
平巷掘进引起的围岩变形与塌方·····	胡春林 等 (188)
●爆破振动监测●	
乌江鸡冠岭崩塌变电房危岩体抢救防治工程的爆破监测·····	沈兴付 等 (192)
●爆破教学●	
实行全程控制,搞好实爆课教学·····	郑国跃 (195)

爆炸载荷作用下节理岩体破裂规律的研究*

张 奇 (西安矿业学院 710054)

摘要: 本文通过小药量模拟实验和电测技术, 分析了节理岩体内爆炸应变波的传播规律及破裂形式, 为提高节理岩体的控制断裂质量提供理论依据。

关键词: 爆炸荷载, 爆破工程, 岩体破裂。

节理裂隙发育岩体内光面爆破及控制断裂是困难的, 往往达不到理想的爆破效果, 产生大量的超挖和欠挖^[1, 2]。如何提高节理裂隙发育岩体的光爆成形质量, 是爆破工程技术人员的一个重要课题。

本文的目的在于通过小药量的模拟实验和应变波的测量, 找出节理岩体的爆破机理及破裂规律, 试图为节理岩体的控制断裂奠定一些基础。

1 模型

试件分为两部分: 一部分是砂浆水泥制成的长方体, 另一部分是结构面。

1.1 砂浆水泥长方体

材料: 水泥: 砂子: 水 = 1 : 2 : 0.45 (重量比)。

尺寸: 400 × 200 × 50 mm。

强度: 单向抗压 $[\sigma] = 10.0 \text{ MPa}$

1.2 结构面

(1) 分次浇灌 将预制砂浆水泥长方体按一定距离摆放在木模中, 再用水泥砂浆充填, 形成界面的这种结构面强度太低, 有时稍一挪动就裂开, 因此不理想。

(2) 用环氧树脂将预制好的砂浆水泥长方体粘结起来形成结构面, 这种结构面具

有较高强度, 但不能保证结构面的厚度, 且界面不平整, 有较多空隙, 影响模拟效果。用水泥、水和环氧树脂混合后作为结构面可以克服上述缺点。

(3) 用888建筑用胶作为结构面(粘结材料)也可以提供较高的结构面强度, 但粘结面也存在空隙, 影响模拟效果。

(4) 用水泥浆作为粘结材料形成的结构面具有一定强度, 粘结面内基本上无空隙。这种结构面的平均厚度为 3 mm。

2 实验

试件长为400mm, 高200mm, 宽根据情况选取。结构面间距50mm。炮孔与结构面平行, 孔深为9.5cm, 直径为1.45cm。装药为8号电雷管, 孔口用黄土堵塞。

2.1 宏观断裂实验

宏观断裂实验共进行35次(块)。图1中是其中的六个典型实验的结果平面图。由图2可以看出, 爆炸裂缝基本发生在结构面上或从炮孔开始沿垂直结构面的方向传播。破碎主要发生在炮孔所在的层位上。这六个实验中的试件其结构面都是水泥浆粘结形成的。

2.2 模拟实验中的爆炸应变波测量

在由水泥浆粘结形成的平行结构面的试

* 参加部分实验的还有王小林、代俊、王野平、负永峰、霍志芳。

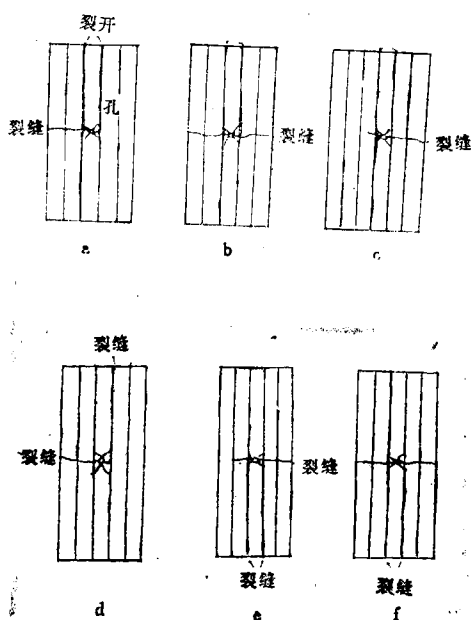


图1 模拟实验中的宏观断裂形式

件中,通过电测得到平行于结构面方向和垂直于结构面两个方向的爆炸应变波波形。试件尺寸及结构面间距、炮孔尺寸和装药同宏观断裂实验。应变片采用BE120—6AA箔式,其尺寸为 $6.0 \times 2.7\text{mm}$,贴在 $4 \times 4 \times 4\text{cm}$ 的应变砖上,预埋在试件内。预埋深度为 8cm 。用环氧树脂将应变片粘在应变砖并注意应变片脚线与试件绝缘,最后可以保证应变片与试件之间的绝缘电阻在200兆欧以上。甚至将应变砖(粘有应变片)浸水2小时以后,仍可保证应变片与试件之间的电阻在200兆欧以上。电测系统如图2。

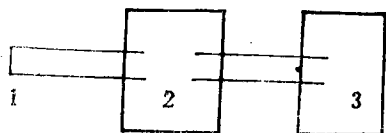


图2 应变测试系统

1—e片; 2—前置放大器; 3—SJT型记忆示波器

图3是垂直于结构面方向上距炮孔中心 15.5cm 外测得的应变波形。图4是垂直于结构面方向上距炮孔中心 5.5cm 的应变波形并测出垂直于结构面和平行于结构面两个方

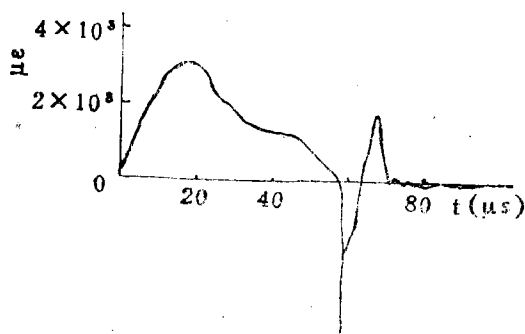


图3 垂直于结构面方向上距孔中心 15.5cm 的应变波形

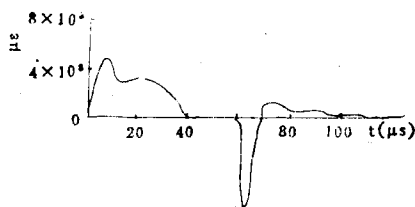


图4 垂直于结构面方向上距孔中心 5.5cm 的应变波形

向上的爆炸应变波峰值随距离的变化情况。由测试结果可知:

- (1)应变波近距衰减较快,远距衰减较慢;
- (2)两个方向的应变波幅值相差不明显。

2.3 试件中波速的测量

为了验证实验条件下,结构面对应力波波速的影响,测出不同方位上的应力波波速。

- (1)在 $200 \times 200 \times 50\text{mm}$ 的均质试件(不含结构面)中,P波波速为 3600m/s ;

(2) 在含有三个结构面(结构面间距为50mm)的试件中,垂直于结构面方向上的P波波速为3333m/s。其中结构面为水泥浆粘结,结构面厚度为3mm;

(3) 在含有四个结构面(结构面间距为50mm)的试件中,垂直于结构面方向上的P波波速为3256m/s。其中结构面为水泥浆粘结,结构面厚度为3mm。

2.4 结构面强度实验

结构面抗剪实验装置如图5。

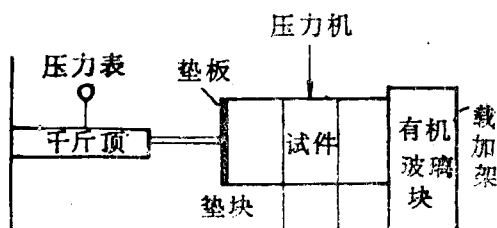


图5 结构面强度实验装置

改变侧压油缸的压力,就可得到一组结构面剪切强度与侧压力之间的对应值。由这组对应值可以得到图6。图6中 σ 为侧压力, $[\tau]$ 为剪切强度极限。

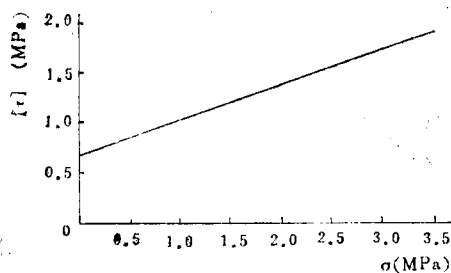


图6 水泥浆粘结结构面的剪切强度

由图6可知,结构面的强度远小于不含结构面试件的强度值。对于不含结构面的均质试件,其抗剪强度

$$[\tau_1] = \frac{[\sigma]}{2}$$

式中 $[\sigma]$ 是相应的单轴抗压强度、 $[\sigma]=10$ MPa,

因此,

$$[\tau_1] = 5 \text{ MPa}$$

无侧压情况下的结构面剪切强度 $[\tau] \approx 0.6$ MPa所以 $[\tau_1]/[\tau] \approx 8.3$ 即不含结构面均质试件的剪切强度大约是结构面剪切强度的8.3倍。

3 断裂机理分析

文献[3]曾指出,岩体内结构面对爆破作用的影响体现在两个方面:一是结构面强度的影响,二是结构面对应力波传递的影响。两者既是独立的,又是互相制约的。结构面强度对应力波传播的影响主要与应力波强度有关。当应力波强度很小时,结构面强度对应力波传递不存在影响。这时只有结构面与介质的耦合程度(包括充填材料的波阻抗特

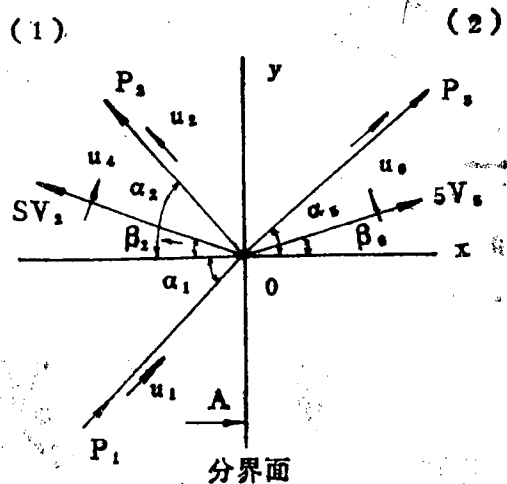


图7 波在特殊分界面上的透射

性和结构面的宽度)对应力波传递存在影响。在本文的实验条件下,通过弹性波波速测试可知,垂直于结构面方向的弹性波波速与平行于结构面方向的弹性波波速相差很小,说明在本文的实验中,结构面与介质的耦合对应力波传递的影响不明显。而通过结构面强

度的实验结果可知, 结构面的抗剪强度很小, 相对于爆炸应力波强度可以忽略不计。由于结构面抗剪强度较小, 从而影响到应力波遇结构面后的传播方式, 改变了爆炸应力分布状态, 产生了特定的断裂形式。

在图 7 中, $x=0$ 的平面代表结构面, 设有一纵波倾斜入射, 在介质 (1) 中产生反射纵波和反射横波, 同时在介质 (2) 中一般有透射纵波和透射横波。由于结构面的抗剪强度 $[\tau] \approx 0$ 因此, 介质 (1) 和 (2) 在分界面处除垂直入射的 A 点以外, 其他点均为倾斜入射。斜入射的 A 点以外, 其他点均为倾斜入射。斜入射的应力波使结构面产生滑动。

在分界面处, 有 $\tau_{xy}|_{x=0} = 0$, 因此 (2) 介质中, 主应力的方向发生了变化。爆炸应力波遇结构面以前, 径向和环向是主应力方向, 径向受压, 环向受拉。遇结构面以后, x, y 方向成为主方向。 x 方向受压, y 方向受拉。岩石抗拉强度远小于抗压和抗剪强度爆炸裂缝一般是垂直拉应力方向发展的。因此爆炸裂缝自孔壁出发, 遇结构面以前是径向发展的, 遇结构面以后, 裂缝在 x 方向上发展。因为结构面除 A 点外将产生滑动, 因此径向裂缝遇结构面后终止。由断裂力学可知, 拉应力作用下的断裂强度因子

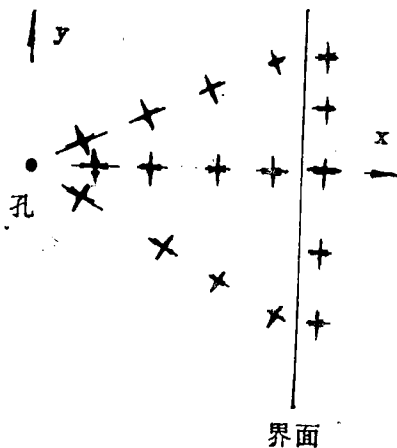


图 8 爆炸应力分布

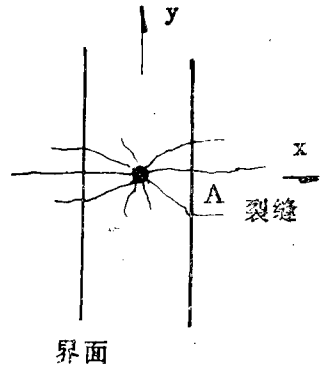


图 9 爆炸裂缝遇结构面改变方向

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

式中 σ 为拉应力 (与裂纹方向垂直); a 为裂缝长度; $\pi = 3.14$ 。裂缝越长, 断裂强度因子越小, 越有利裂缝扩展。裂缝遇结构面后, 若要在介质 (2) 中重新发展, 断裂强度因子较大, 裂缝产生和扩展的机会将明显减少, 裂缝长度也必然受到影响。

在 A 点, 无反射波和透射横波, 入射波在该点的主应力方向与 x, y 方向一致, 结构面受压, 不会产生滑动和破坏。因此爆炸应力波在该点将毫无影响传递到介质 (2)。而爆炸裂缝也将通过结构面进入介质 (2) 继续扩展, 断裂强度因子无变化。说明在通过 A 点的径向方向上裂缝的发展与均匀介质的情况完全相同。这与本文中的实验结果是吻合的。

爆炸应力波在炮孔所在的层位传出, 在平行于结构面的方向上, 应力波顺利前传, 而在其他方向, 一旦遇到结构面, 其传播方式和幅值都将发生变化。垂直于结构面入射的入射波幅值最大, 且在该点的透射压力也不会因结构面滑动 (此点无滑动) 而降低。而在其他点则不然, 一是入射波幅值较小; 二是由于结构面滑动, 波幅将发生较大衰减。因此在结构面上, 当 $y > 0$ 时拉应力随 y 增大而减小; 当 $y < 0$ 时, 拉应力随 y 的绝对

值增大而减小。在垂直入射的 A 点, 拉应力为最大, 这也是垂直入射方向上裂缝优先发展的一个原因。

在模拟实验中发现, 装药爆炸以后, 炮孔所在层位一般以炮孔所在位置为界, 断裂为两部分沿结构面方向向两侧抛出, 孔壁近区呈破碎状态, 垂直入射方向在 A 点 (结构面) 附近结构面没有破坏, 仍贴在一起。由于爆炸应力波遇第一结构面后传播方式发生了变化及以应力波的衰减, 其他层位 (炮孔非所在的层位) 保持在原来位置, 一般没有破坏。

通过上述分析可以看出, 在层状岩体

药或球装药爆炸产生的应力分布已不再是轴对称和点对称问题。爆炸应力场的分布更为复杂。层状岩体内不易取得理想的控制爆破效果, 其原因也就在于此。许多问题有待深入研究。

参考文献

- 1 张奇. 爆炸与冲击. 1988, 8(1). 68
- 2 张奇. 山西矿业学院学报. 1989, 7(2). 136
- 3 高金石、张奇. 爆破理论与爆破优化. 西安: 西安地图出版社, 1993, 56.

Study on crack law of jointed rock under load of explosion

Zhang Qi (Xian Mining Institute, 710054)

Abstract

Through the model experiments of small explosive charge and electric measure technique, the propagation law of explosion strain wave and cracking pattern in the jointed rock are analysed in this paper. The study provides theoretical basis to improve the controlled crack effect the of jointed rock.

Key words: explosion load, blasting engineering, rock cracking.

非爆破法确定岩石爆破能耗的研究

陈运轩

摘要 引入了“表面能耗”这一概念,分析比较爆破能耗与表面能耗的关系,且对冲击表面能耗与爆破表面能耗进行等效处理,提出了在试验室非爆破条件下确定爆破能耗的一种方法。

关键词 非爆破法, 爆破能耗, 表面能耗。

1 爆破能耗与表面能耗

1.1 爆破能耗

爆破能耗即爆破破碎单位体积岩石所消耗的能量。在爆破工程中常用炸药单耗表示。从理论上讲,当炸药性能和岩石性质一定时,爆破能耗应为一常数。可是,在实践中常常是理论与实际不相符,实际上不同抵抗线,炸药单耗并不相同。抵抗线越小,单耗越大。这是由于没有考虑爆破的块度效应。爆破破碎的体积相同,但块度不同则炸药单耗不一样。而块度组成是很复杂的。一次爆破的块度大到数米,小到几微米,要把块度的组成反应到爆破能耗中去则使问题复杂化了。怎样既简便又客观地反应炸药单耗的实质呢?本文提出的“表面能耗”就是针对上述问题提出的。

1.2 表面能耗

(1) 比表面积:单位体积或重量岩石其表面积的大小。单位: m^2/m^3 或 m^2/kg 。

(2) 表面能耗的引入

岩石的破碎过程实际上是使岩石块度变小的过程,而块度的变小又使岩石单位体积的表面积增大。因此,岩石的破碎过程其实

质是使单位体积岩石表面积增大的过程。岩石破碎过程的能量也是消耗在使表面积增大的过程中。我们将使岩石表面积增大所消耗的能量定义为“表面能耗”。单位为 kJ/m^2 或 kg/m^2 (将能量折算成炸药量时)。

1.3 爆破能耗与表面能耗的关系

如将能耗换算成药耗,则爆破能耗与炸药单耗是等效的。

$$\text{炸药单耗: } q = Q/V \quad (1)$$

式中, Q : 药量(kg); V : 爆破体积(m^3)。

炸药单耗有时并非为一常数,块度不同,炸药单耗也不同。

$$\text{表面能耗: } K = Q/S \quad (2)$$

式中, Q : 炸药量(kg); S : 爆破破碎后表面积增量(m^2)。

$$\text{式(1)} \div \text{式(2)} \text{得: } q/K = S/V = \delta \quad (3)$$

$$\delta = S/V = \sum S_d - S_0/V \quad (4)$$

式中, $\sum S_d$: 体积为 V 的岩体破碎后所具有的总表面积; S_d : 体积为 V 的岩体破碎前所具有的表面积。 δ : 比表面积增量。

假设块体为球体,破碎后平均块度为 d (直径),则碎块的体积为:

$$V_d = \frac{1}{6} \pi d^3 \quad (5)$$

体积为V的岩体破碎后的总块数n为:

$$n = V/V_d = V / \left(\frac{1}{6} \pi d^3 \right) \quad (6)$$

每块的表面积为 $S_d = \pi d^2$, 所以体积为V的岩体破碎为块度为d的岩块, 总表面积为:

$$\sum S_d = n \cdot S_b = \frac{V}{\frac{1}{6} \pi d^3} \times \pi d^2$$

$$\text{即} \quad \sum S_d = \frac{6V}{d} \quad (7)$$

设体积为V的岩体对应球体的直径为D, 则:

$$\delta = (\sum S_d - S_0) / V$$

$$= \left(\frac{6V}{d} - \pi D^2 \right) / V$$

$$\text{即} \quad \delta = \frac{6}{d} - \frac{6}{D} \quad (8)$$

一般 $D \geq d$, 应有:

$$\delta = \frac{6}{d} \quad (9)$$

所以公式(3)可变为:

$$q = \delta k = 6k \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \approx 6K/d \quad (10)$$

公式(10)即为爆破能耗或炸药单耗与表面能耗之间的关系。公式还表明炸药单耗与破碎块度成反比。

需要说明的是, 爆炸产生的能量绝大部分消耗于岩体破碎过程中, 还有一部分能量用来抛掷, 产生振动、冲击波和噪声。如果将后一部分能量折算到前一部分能量中去即爆炸能全部消耗于岩体破碎作用力上。这样处理后, 可使问题大为简化。

1.4 实例

已知爆破后平均块度为5cm的岩石其单耗为 1.8 kg/m^3 , 求平均块度为10cm的同种岩石的炸药单耗。

解: 已知 $q_5 = 1.8 \text{ kg/m}^3$

块度为5cm的岩石其比表面积增量为:

$$\delta_5 = \frac{6}{d} = \frac{6}{0.05} = 120 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

表面能耗为:

$$K_5 = q_5 / \delta_5 = 1.8 / 120 \text{ kg/m}^3 = 0.015 \text{ kg/m}^2$$

根据表面能耗的概念 $K_{10} = K_5$ 即块度为5cm的岩石与块度为10cm的岩石其表面能耗相同。

块度10cm的岩石其比表面积增量为:

$$\delta_{10} = \frac{6}{d} = \frac{6}{0.10} = 60 \text{ m}^2/\text{m}^3 = \frac{1}{2} \delta_5$$

$$\therefore q_{10} = \delta_{10} \cdot K_{10} = \frac{1}{2} \delta_5 \cdot K_5$$

$$= \frac{1}{2} q_5 = \frac{1}{2} \times 1.8 = 0.90 \text{ kg/m}^3$$

从上例中可以看出, 平均块度增大一倍, 则其单耗或爆破能耗将减小2倍, 由此可得出一个重要结论: 块度效应对爆破能耗影响极大。而不管块度如何, 爆破表面能耗却为一常量。这就是二者的区别。

2 冲击表面能耗的非爆破法确定

冲击表面能耗是指在冲击载荷的作用下使岩石表面积增大所消耗的能量。在实验室可用重锤冲击法确定:

用重锤冲击法, 具体确定冲击比表面能耗的方法如下:

以一定质量(m)的重锤做下落实验, 高度由小到大按一定距离递增。当增加到一定高度时, 岩石试件会破坏。临界高度对应的冲击功为 $A = mgH = \frac{1}{2} m v^2$ 。假设试件的

截面积为S, 则试件的冲击表面功为 $K = A/S$ 。将岩石试件做成杆状, 用多次试验的平均值表示该试件的冲击表面功。

3 冲击表面能耗与爆破表面能耗的等效特

性研究

所谓爆炸表面能耗是指在炸药爆炸作用下使岩石表面积增大所消耗的能量。爆炸所产生的冲击作用与重锤冲击作用有许多实质上的相同点,可进行等效处理或近似的等效处理。

3.1 载荷性质的等效特性

重锤下落对试件的作用可视为一种冲击荷载,而爆破作用是一种典型的冲击荷载。二者均为动荷载。从荷载性质来看两者是等效的。

3.2 作用对象的等效性

在实验室里试件一般为比较均匀、均质的岩石,而爆破的实际对象岩体,其地质条件是很复杂的,呈现出许多不同的特性。当岩体中存在着节理、裂隙等地质力学弱面时,二者不能安全等效。显然,力学弱面的存在降低了岩体的强度,从而减小了爆炸表面能耗,此时, $q_{爆} < q_{冲}$, $K_{爆} < K_{冲}$,如用一修正系数进行修正,则二者可以等效。

$$q_{爆} = f \cdot q_{冲}, f \leq 1。$$

$$K_{爆} = f \cdot K_{冲}, f \leq 1。$$

3.3 破碎机理的等效性

岩石在爆破作用下的破碎机理:爆轰气

体膨胀推力作用理论认为,岩石爆破破碎是由于装药空间爆轰气体产物的推力产生的剪切作用破坏的。炸药爆炸时,爆轰气体迅速膨胀,气体以极高的压力作用于炮孔壁而使岩层产生应力场。这种应力引起应变,岩石质点产生径向位移。而岩体是非均质体,特别是在有自由面存在的情况下,在最小抵抗线方向阻力最小,因而其位移速度最大,而在阻力不等的方向由于位移速度不同,必然造成剪切作用。如果剪切应力超过岩的动剪切强度,岩体就会产生剪切破坏。总之该理论认为岩体的破坏主要是剪切破坏。

重锤下落对试件的作用造成的破坏显然也是一种动载的剪切破坏。因此,二者在破坏机理上是等效的。

由于冲击表面能耗与爆破表面能耗在许多方面具有等效特性,因此可用冲击表面能耗替代爆破表面能耗。这样,我们在实验室用非爆破的方法就可确定岩石的爆破能耗,为炸药单耗的确定找出了一种新的方法。

参考文献

- 1 陈运轩, 爆破, 1984, 4
- 2 周浩然, 爆炸与冲击, 1986, 6(2)
- 3 陶颂霖, 凿岩爆破, 北京: 冶金工业出版社, 1987
- 4 张汉兴等, 爆破习题集及题解, 湖北省爆破学会, 1989

Studies on Determination of Energy Cost in Rock Explosion

Chen Yunxuan

Abstract In this paper, analysis and comparison have been made of the relation between explosive energy consumption and surface energy consumption by introducing the conception of surface energy consumption, and equivalent treatment taken on both impact surface and explosive energy cost. A new method is thereafter worded out of finding explosive energy cost under non-explosive condition in a laboratory.

Key words Non-explosion technique, Explosive energy cost, Surface energy consumption

岩石爆破破碎机理的探讨

张电吉

(武汉化工学院 430073)

摘要 根据不同微差间隔时间对模型进行的起爆试验,说明矿岩产生有效破碎不是由于应力波的充分叠加,而是由于滞后于应力波的裂纹间相互交错、叠加、切割的结果。不同炮孔周围裂纹的适量产生与发展,是引起岩石有效破碎的真正原因。

关于岩石爆破破碎机理的解释,常用的有三种理论:(1)爆轰气体产物膨胀推力破坏理论;(2)应力波反射破坏理论;(3)气体推力和反射波共同作用理论。用这些理论和假说可以解释爆破中岩石破碎及漏斗形成等许多现象,但还有许多现象尚无法解释。本文通过试验研究及理论分析,从岩体的微观裂纹及所受应力出发,应用断裂力学的观点,对岩石爆破破碎机理作进一步

探讨。

1 试验研究方案

为了进一步研究岩石破碎机理,用水泥砂浆试块进行模拟试验。试块的尺寸为 $60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 10\text{cm}$,中间有两个浇铸时预留的炮孔,孔间距为 10cm ,两孔孔径为 8mm 。试块的物理力学性质见表1。

每孔装黑索金猛性炸药 1.5g ,用特制小

表1 试块物理力学性质

名 称	容重(t/m^3)	抗压强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	每个试件重(kg)
水泥砂浆试块	1.84	4.478	0.599	66.24

型瞬发雷管起爆,两孔间的起爆时差用BS6-1型数字式微差起爆仪来实现。模型的装药结构见图1。选用9种不同的微差间隔时间,所用起爆时差分别为:0, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80ms,整个试验共爆模型50块。

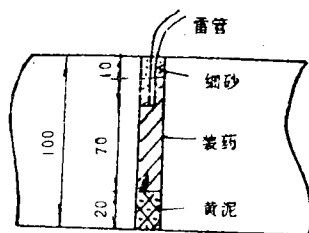


图1 装药结构简图

2 试验结果

对每次爆破后的碎块进行筛分,所得结果分别用Rosin-Rammler分布函数和单一

指标评价法进行分析处理。分析结果参见图2、图3及表2。

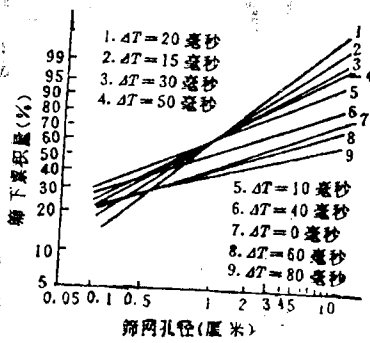


图2 R—R回归分析曲线

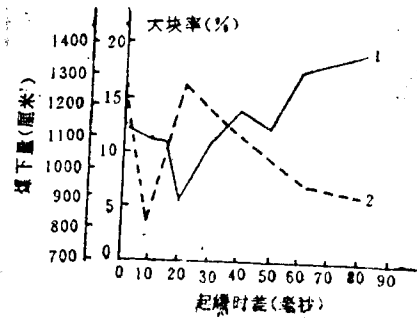


图3 单一指标评价曲线

1—大块率曲线；2—爆下量曲线

表2 模型爆后碎块筛分处理结果

微差时间 (ms)	R-R分布法回归 方程斜率n	平均块度 K_{50} (mm)	每次爆下总重量 (g)	大块率 (%)
0	0.67534	9.587	2334.2	12.65
10	0.73931	8.901	1521.4	11.08
15	0.80627	8.304	2011.3	10.55
20	0.81320	8.463	2321.0	5.02
30	0.79356	8.831	2156.5	10.71
40	0.71467	8.913	2023.8	13.54
50	0.76043	7.969	1874.5	11.99
60	0.56505	10.074	1765.5	17.50
80	0.51084	12.729	1677.3	18.96

试验数据分析表明,在该模拟爆破条件下,20ms为最佳爆破破碎效果的合理微差间隔时间。

在爆破时对模型的应变进行了测试,不同起爆时差的应变波形如图4所示。

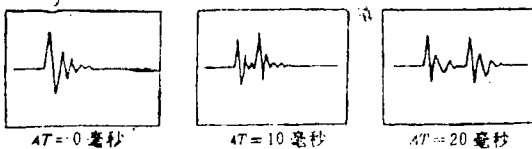


图4 不同起爆时差模型的应变情况

从应变波形图可看到,以齐发爆破时应力波的叠加最充分,只有一个波峰。随着间隔时间的增大,应力波叠加部分减少,到起

爆时差为20ms时,应力波的叠加就不明显了。但根据爆后碎块分析,在20ms时爆破破碎效果最好。这一现象说明,爆破破碎效果并不是起爆后介质中应力波的最大叠加引起的,而是另有其他原因。

3 岩石爆破破碎机理分析

从炸药起爆到岩体破碎成碎块,大体可分为以下几个过程:(1)炸药爆后应力波的产生及其在岩体中传播,并产生高温高压的爆轰产物(爆轰气体);(2)在应力的作用下岩体中产生裂纹,所产生的裂纹不断发展,且不同炮孔周围的裂纹相互交错、切割、叠加,将岩体分割成不同尺寸的碎块;(3)在高温高压爆轰产物作用下,将碎块

抛离岩体。在上述三个不同阶段中,决定爆破破碎效果好坏的关键在第二阶段,即裂纹的产生与发展。岩体之所以被破碎,就是因为有裂纹产生,这是引起岩体破碎的直接原因。因此,弄清岩体中裂纹的产生、发展及其相互作用的规律,便可找出引起岩体破碎的真正原因。模型中不同间隔时间起爆时,岩石破碎机理用下面三组简图来描述,见图5。

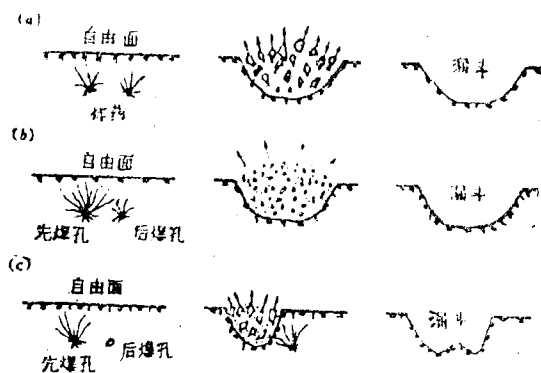


图5 不同时差起爆时介质破碎及漏斗形成示意图

a—齐发爆破; b—合理时差起爆;
c—起爆时差过大

在齐发爆破时(见图5(a)),由于两孔周围的裂纹几乎是同时产生,这样每孔周围的裂纹都是在没有新增自由面积和更多弱面出现的情况下扩展的,即两孔周围的裂纹还没能得到充分的交错、切割和扩张,便在两孔的爆轰产物齐力推动下,将两孔的间介质抛出,形成较好漏斗,这样虽然爆下量较多,但大块率很高。试验证明,齐发起爆时的大块率是合理时差起爆时大块率的2.5倍。

在合理时差起爆时(图5(b)),先爆炮孔周围的裂纹得到充分发育但尚未抛出碎块,这就为第二个起爆孔周围裂纹的产生与发展创造了更多的弱面,便于其周围裂纹产生和发展,且使得两孔周围的裂纹得到最佳的交错、切割和叠加,裂纹使两孔内的介质

切割成许多均匀的碎块,在两孔爆轰产物推力作用下抛出,并形成较理想的爆破漏斗,产生较均匀的碎块,达到最佳爆破效果。

随着微差间隔时间的增大,使得先爆孔周围的裂纹扩张完后,裂纹切割的碎块被爆生气体推出,而后爆孔起爆后产生的裂纹与前爆孔裂纹不能产生交错叠加,向单孔起爆趋势发展,后爆孔的能量没有得到充分利用,甚至有很大一部分能量,因爆生气体从先爆孔所形成的漏斗坑及裂纹中泄出而浪费掉,没有起到充分破碎介质的作用,故产生不良的爆破效果,如图5(c)所示。

4 结语

从应力波的测试及试验数据处理可知,引起岩石产生最佳破碎效果的原因,不是因为起爆孔产生应力波最大叠加结果,而是由于滞后于应力波的裂纹间相互充分交错、切割和叠加的结果。不同起爆孔周围裂纹的适时产生与发展,是引起岩石有效破碎的真正原因。在岩石被裂纹切割成许多碎块后,气态爆轰产物的推力作用,会进一步加大某些裂纹的扩展,并把碎块抛离岩体。

由于应力的存在,而使岩体中出现许多裂纹。不过在没有缺陷的地方,虽然应力波相遇时可能会相互叠加而使应力加强,但是一般切向应力分量是不会超过介质的动态抗拉强度的,所以一般不会产生裂缝。也就是说,岩体中超过一定强度的应力的存在,是产生裂纹的必要条件,但并不是充分条件。岩体裂纹的产生是由应力的大小及岩体结构性质两方面因素确定的,两孔以合理时差起爆之所以破碎效果较好,就是充分利用了这两个因素。但是,影响岩石破碎效果好坏的因素较多,加上岩体本身结构的复杂性,要想使一切参数都达到最佳匹配状态,这在实际中是很难做到的。笔者认为,在众多的影响因素中,选取合理微差起爆间隔时间是最经济可行的办法。