

国家自然科学基金项目（51474206, 51264035, 51004101）资助

江苏高校优势学科建设工程项目（PAPD）资助

中央高校基本科研业务费专项资金项目（2014QNA49）资助

# 大断面硬岩巷道 快速掘进成套技术研究与实践

王旭锋 张东升 邵鹏 著

Daduanmian Yingyan Hangdao

Kuaisu Juejin Chengtao Jishu Yanjiu Yu Shijian

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(51474206,51264035,51004101)资助

江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014QNA49)资助

# 大断面硬岩巷道快速掘进 成套技术研究与实践

王旭锋 张东升 邵鹏 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大断面硬岩巷道快速掘进成套技术研究与实践/王旭锋,张东升,邵鹏著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2014.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2512 - 2

I. ①大… II. ①王… ②张… ③邵… III. ①大断面—岩巷—巷道掘进 IV. ①TD263.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 237763 号

书 名 大断面硬岩巷道快速掘进成套技术研究与实践

著 者 王旭锋 张东升 邵 鹏

责任编辑 姜志方

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 7 字数 135 千字

版次印次 2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷

定 价 33.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

岩石巷道在我国煤矿巷道掘进工程中占有较大比重,且往往是矿井生产建设的咽喉工程。近年来,煤炭开采规模和强度不断增大,由岩巷施工速度慢导致矿井采掘接替紧张的现象较为普遍,并制约了矿井的高效建设与可持续发展,且在硬岩巷道掘进中尤为突出。

本书以岩巷钻爆施工为工程背景,针对深井、高地压、大断面、硬岩巷道的特点,综合运用现场调研、理论分析、实验室测试与计算、现场工业性试验等手段,归纳并总结了影响岩巷掘进效率的主要因素;以提高掘进爆破效率为切入点,基于聚能爆破理论,通过对聚能装置结构参数与聚能爆破参数进行系统分析,研究了岩巷掘进聚能爆破新技术,提出了合理的爆破设计方案与施工工艺,形成了大断面硬岩巷道高效聚能爆破快速掘进成套技术。主要研究成果有:

① 从理论上分析了聚能爆破条件下岩石裂纹的形成和发展规律及影响聚能效果的因素,从能量分布角度揭示了爆破射流对岩石的作用机理。

② 针对现场地质条件,确定了聚能装置材料的最佳配比与聚能装置结构的合理参数,合理设计了周边眼参数和掏槽方式,开发出了基于“多向聚能双楔形掏槽+线性聚能巷道成型控制”的高效破岩成套技术及配套的快速装药工艺,并研发了一套完整的聚能装置生产系统、快速生产技术及配套工艺,实现了聚能装置的高效快速生产。

③ 开发并实施了岩巷高效聚能爆破、耙斗装岩机带式输送机一体化、水平矸石仓快速排矸、滑板式耙斗装岩机快速移设与防滑、矸石物料并行运输等技术与工艺,形成了倾角 $16^{\circ}$ 以下“凿岩台车+滑板式耙斗装岩机+水平矸石仓排矸+带式输送机”国产装备机械化快速施工作业线,开发出了大断面硬岩巷道高效聚能爆破快速掘进成套技术,实现了大断面硬岩巷道的快速掘进。

全书共有六章。第一章介绍了本书的研究背景、意义和国内外研究现状;第二章对聚能爆破破岩效果进行了理论与数值模拟分析;第三章介绍了聚能爆破高效破岩技术及现场试验效果;第四章介绍了大断面长距离硬岩巷道机械化配套技术及应用效果;第五章介绍了大断面硬岩巷道机械化快速施工技术及实施效果;第六

章对本书所做的工作进行了总结。

在本书的编写过程中,参考了许多国内外文献资料,现场实施工作得到了平顶山天安煤业股份有限公司领导、工程技术人员及课题组相关人员的大力支持。本书的出版得到了相关项目的资助,在此一并致谢。由于作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2014年10月

## 目次

1 绪论 .....	(1)
1.1 问题的提出与研究意义 .....	(1)
1.2 国内外研究现状 .....	(2)
1.3 存在的主要问题 .....	(4)
1.4 主要研究内容与方法 .....	(4)
2 聚能爆破理论分析 .....	(5)
2.1 聚能效应及基本原理 .....	(5)
2.2 聚能结构裂纹力学扩展分析 .....	(8)
2.3 聚能结构影响因素 .....	(13)
2.4 聚能装置结构参数对破岩效率影响的数值分析 .....	(15)
3 聚能爆破高效破岩技术 .....	(27)
3.1 聚能装置生产工艺 .....	(27)
3.2 多向聚能爆破高效掏槽技术 .....	(31)
3.3 巷道成型控制技术 .....	(37)
3.4 现场实测 .....	(48)
4 大断面长距离硬岩巷道机械化配套技术 .....	(61)
4.1 提高岩巷掘进速度的技术途径 .....	(61)
4.2 岩巷快速掘进机械化作业线配置现状 .....	(62)
4.3 大断面长距离硬岩巷道机械化配套 .....	(66)
4.4 现场实施 .....	(80)
5 大断面硬岩巷道机械化快速施工技术 .....	(87)
5.1 巷道基本情况 .....	(87)

5.2 快速施工基本原则	(88)
5.3 设备配套方案	(88)
5.4 施工工艺	(91)
5.5 快速掘进技术推广管理	(95)
5.6 实施效果	(97)
6 结论	(98)

参考文献	(100)
------	-------

(1) .....  
(2) .....  
(3) .....  
(4) .....  
(5) .....  
(6) .....  
(7) .....  
(8) .....  
(9) .....  
(10) .....  
(11) .....  
(12) .....  
(13) .....  
(14) .....  
(15) .....  
(16) .....  
(17) .....  
(18) .....  
(19) .....  
(20) .....  
(21) .....  
(22) .....  
(23) .....  
(24) .....  
(25) .....  
(26) .....  
(27) .....  
(28) .....  
(29) .....  
(30) .....  
(31) .....  
(32) .....  
(33) .....  
(34) .....  
(35) .....  
(36) .....  
(37) .....  
(38) .....  
(39) .....  
(40) .....  
(41) .....  
(42) .....  
(43) .....  
(44) .....  
(45) .....  
(46) .....  
(47) .....  
(48) .....  
(49) .....  
(50) .....

# 1 绪 论

## 1.1 问题的提出与研究意义

我国煤炭资源丰富,分布地域广阔,煤炭产量居世界首位,是我国国民经济和社会发展的基础。多年来,煤炭在我国一次能源生产和消费结构中占很大比例,当前经济的快速增长对煤炭工业发展提出了更高的要求。巷道掘进是煤炭开采的先行工序,并因其工程量大及工期长而在煤矿生产中占有重要地位。我国每年岩石巷道(简称岩巷)的掘进工程量在 2 000 km 以上,在巷道总掘进量中占有较大比重,且往往是矿井建设的咽喉工程。因此,提高岩巷施工技术,加快掘进速度,对缩短矿山基建周期、实现矿山稳产高产等具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

由于岩道掘进速度相对缓慢等因素使得矿井接替紧张的现象在煤炭资源开采过程中普遍存在,使得基于提高掘进爆破效率、优化支护参数、合理配置施工工序的岩巷快速掘进技术在煤矿建设和生产中占有重要的位置,是克服采掘失衡突出矛盾、节约资源和建设高产高效矿井的迫切需要,同时也是目前国内外矿山施工技术的发展趋势。

平顶山矿区是以中国平煤神马集团为主体开发的大型矿区,因地理位置便利、煤炭资源储量丰富等优越条件成为我国重点煤炭建设基地之一,是河南省煤炭的主要产区,煤炭产量约占全省煤炭产量的 1/3。近年来,中国平煤神马集团大力发展采掘机械化,特别是巷道掘进的机械化,使集团下属各个矿井的掘进机械化水平得到大幅提高,如在十一矿-593 m 水平西翼轨道大巷、首一矿己组集中运输大巷中采用岩巷机械化快速掘进成套技术,配备凿岩台车和侧卸式装岩机,达到了月单进 130 m 以上的成绩。但受掘进设备对地质条件适应性限制的影响,目前,多数硬岩巷道的掘进还主要采用气动凿岩机配耙斗装岩机的施工方式,其单进速度也处于全国平均水平,有较大提升空间。中国平煤神马集团经过多年的开采,浅部煤炭资源储量接近枯竭,各个矿井已经或即将向深部延深。因此,研究岩巷的快速掘进技术,对提高矿井开采规模、缓解接替紧张等有重要意义<sup>[3-5]</sup>。

本书通过研究爆炸能量的合理转化技术与岩石断裂破碎控制技术,并将其运



用于工程实际,以期提高岩巷的掘进速度,解决影响采掘失调的主要问题,为提升企业经济效益和社会效益提供必要保障。同时,通过聚能爆破技术的研究开发,能够大幅提高巷道成型质量,提高岩巷普掘单进水平,节约成本,减轻工人劳动强度,改善劳动作业环境,具有一定的理论价值和较高的现实意义<sup>[6-9]</sup>。

## 1.2 国内外研究现状

20世纪70年代初期,我国投入大量人力和物力,对聚能爆破进行了长时间系统深入的研究,并采用了HELP程序进行数值计算,显著提高了我国学术界和工程界对聚能爆破的认识。

国防科技大学曾新吾等对线性聚能装药爆破进行了理论研究,提出了一端起爆的线性聚能装药射流形成的不定常理论模型,并指出,法国杜福尼(M. Defourneaux)的定常射流模型是该模型的一个简单特例<sup>[10-13]</sup>。

20世纪80年代中期,中国矿业大学杨永琦教授进行了聚能装置的切割机理和应用研究,研制出聚能爆破切割装置,并将其用于露天矿排水钢管的切割<sup>[14]</sup>。

四川宝兴大理石矿采用无罩双侧聚能爆破切割大理石,爆破后,装药孔间形成了完整光滑的断面,在炮孔的其他方向没有产生可见裂纹,留下的炮孔壁面未受到任何损伤,其断面光滑程度和切割深度两项主要技术经济指标均优于非聚能爆破切割。这主要是在于双侧聚能爆破时,爆破能量具有定向作用,主要用于形成切割面,因而其他方向的能量受到了抑制而减弱,除了能降低不平整度和提高成材率之外,还有减少爆破震动和飞石的特点<sup>[15]</sup>。

董新国等通过对聚能效应的研究,发现聚能效应产生的聚能流具有很大的破坏作用和穿透能力,在岩巷掘进中利用聚能装药爆破可消除残眼,提高炮眼利用率<sup>[16]</sup>。

中国矿业大学的郭德勇教授在煤层深孔聚能爆破现场试验的基础上,应用ANSYS/LS-DYNA对煤体致裂过程进行了模拟,探讨聚能爆破作用下煤体力学行为及裂隙扩展机理。其研究表明,爆破改变了煤体应力状态,聚能效应导致煤体力学性质在聚能方向发生显著变化。此外在聚能方向上煤体粉碎区范围相对较小,而裂隙扩张半径明显大于非聚能方向<sup>[17]</sup>。

武汉工程大学的陈清运教授结合锦屏二级水电站引水隧洞地下工程的岩爆问题,探讨了采用聚能爆破技术降低岩爆的可行性,并进行了浅孔和深孔聚能爆破的对比试验。其研究表明,聚能爆破在高地应力条件下的成缝和切槽效果较普通预裂爆破大为提高,采用聚能爆破技术降低岩爆灾害是可行的<sup>[18]</sup>。

瑞典爆破基金会曾用压有V形槽的药柱进行了周边爆破和岩块切割的研究,

得出以下结论:

① V形槽药柱可在槽对应的炮孔壁上开出相对较深和较宽的槽,并在爆轰波压力的持续作用下,延伸扩展成为预期方向的径向裂纹;

② 爆破后,裂纹面被熏黑,说明此裂纹产生于岩石破碎的初期阶段;

③ 尽管节理位于炮孔壁附近,但爆生气体未进入节理面而是进入爆轰波初期预制的裂纹,因此减少了对保留岩体的破坏;

④ 在节理稀疏带中,爆炸所产生的裂纹可以越过与其垂直的节理面向前扩展,而在节理发育带,爆破后的岩面并不平整,有大块松动的岩石掉下;

⑤ 在均质岩石中,爆破后的岩面其不平整度仅有 10 mm 左右,装药的最大孔距为 1.8 m,比原有参数提高了 3.5 倍;

⑥ 该药柱使用的不利之处主要是向炮孔中装药时精确度要求较高,V形槽所对应方向必须准确,当炮孔壁不太平整时尤其要小心安放,药柱连接间隙不得超过 1~2 mm<sup>[19-22]</sup>。

美国桑迪亚国家试验室于 1988 年进行了小锥角罩聚能装药和爆炸成型弹丸在凝灰岩中的穿孔试验。试验结果是罩口径为 118 mm 的小锥角罩聚能装药在凝灰岩中穿孔深度 1 350 mm,口部孔径 38 mm,孔底直径 13 mm;罩口径为 127 mm 的爆炸成型弹丸在凝灰岩中穿孔深度 600 mm,口部孔径 140 mm,孔底直径 50 mm<sup>[23]</sup>。

在矿山开采中,芬兰和南非研制了一种处理溜井堵塞的聚能翻转弹,炸药爆炸后,药型罩翻转形成金属弹丸,可将 1 000 mm 厚的石英岩穿透。

聚能装药对土层穿孔比对金属穿孔深很多,一般可达 10 倍口径,可用来引爆钻入土层很深的定时炸弹。通信兵在紧急情况下可用聚能装药在地上钻孔,迅速埋杆架线<sup>[24]</sup>。

线性聚能装药从 20 世纪 60 年代开始就被广泛应用于宇航和军事领域,如导弹和航天飞机中的自毁系统和分离装置,以及条形反坦克履带地雷等。其工业应用还包括结构物的精确爆破,国外已将这种切割装药应用于高层建筑物和高耸钢结构结构的爆破拆除,它能准确控制解体方式和倒塌方向。罗伊·加布里埃尔(Roy Gabriel)于 2002 年为切割报废的澳大利亚皇家海军舰船船体设计了线性聚能切割器,切割取得圆满成功。南非射流爆破有限公司(Jet Demolition Ltd)利用聚能切割器成功地拆除了多种大型钢结构建筑物。美国戴肯(Dykon)公司应用聚能切割爆破技术成功地拆除了一座炼油厂的钢结构反应塔。1992 年美国还利用线性聚能装药拆除了塔尔瓦拉(Tallawarra)发电站的设备<sup>[25]</sup>。

### 1.3 存在的主要问题

目前聚能爆破的理论研究已较为成熟,聚能爆破工程应用的研究则还比较少,且主要应用于巷道周边爆破成型的控制或者金属切割,而聚能爆破用于岩石破碎的研究极少见。同时,目前的研究针对性与适用性不强,特别是对于煤矿个体条件的特殊性,没有较为合适的参照。

本书针对平煤四矿的具体条件,归纳总结了影响其巷道掘进效率的主要因素,以掘进爆破效率为切入点,基于聚能爆破理论,对聚能装置结构参数与聚能爆破参数进行系统的研究、分析和实践,最后形成合理的、标准的爆破设计方案和施工工艺。

### 1.4 主要研究内容与方法

本书采用聚能爆破破岩技术,在综合考虑爆破效果的基础上,研究合理的掏槽方式、炮眼布置、装药结构等,并现场实测不同爆破参数的破岩效果,通过不断调整参数形成最佳的爆破方案,主要研究内容包括:

- ① 通过现场调研、理论分析,全面掌握影响巷道掘进效率的主要因素;
- ② 高效切割聚能结构参数及聚能结构快速成型技术;
- ③ 多向聚能爆破高效掏槽技术;
- ④ 线性切割爆破的成型控制技术;
- ⑤ 大孔距多向聚能切割爆破合理参数设计和破碎质量控制技术。

本书采用现场调研、理论分析、实验室模拟分析及现场工业性试验相结合的综合研究方法,研究岩石巷道掘进爆破的新技术,通过发展新的岩石爆破理论方法,结合现场实际加以应用和完善,在现有爆破技术基础上形成大断面硬岩巷道高效聚能爆破快速掘进技术,提高巷道爆破掘进效率与作业安全性。

## 2 聚能爆破理论分析

### 2.1 聚能效应及基本原理

爆轰产物运动方向具有与表面垂直或大体垂直的基本规律。利用这一基本规律将药包制成特殊形状(如半球形空穴、抛物形空穴、双曲线形空穴、锥形空穴等),爆炸时,靠空穴闭合产生高压、高密度、高速度的运动气体流,使爆轰产物集聚,能量密度提高。沿轴线向外射出的高能量、高密度聚能流的现象称为聚能效应,又称诺尔曼效应。能形成聚能流的装药为聚能装药,能形成聚能流的装置为聚能装置<sup>[26]</sup>。

图 2.1 用同等药量的不同聚能装置,对中碳钢靶板的爆炸破坏深度进行了实验。从实验看出,普通药柱爆炸时,在靶面上只形成一个很浅的凹坑;接触端带锥形孔的药柱,破坏深度就显得增大很多,锥形凹坑的深度达到 6~7 mm,射流速度可达到 10 000~15 000 m/s,温度 4 000~5 000 °C,压力为 10~30 MPa;在锥形孔

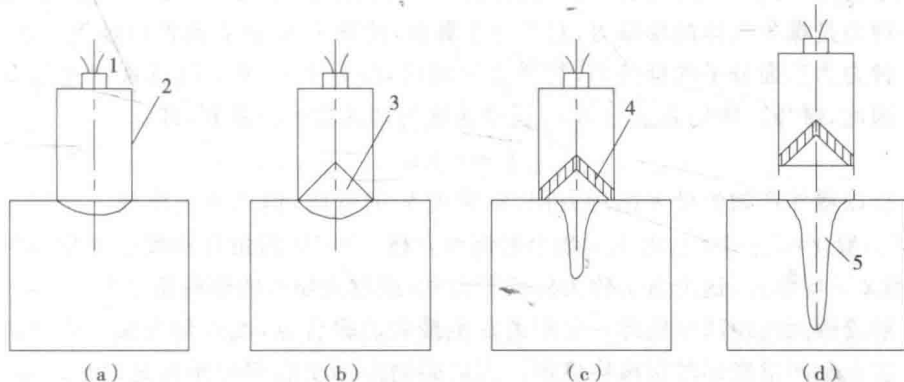


图 2.1 各种不同装药结构药柱对靶板的破坏情况

(a) 普通药柱;(b) 药柱接触端带锥形孔;(c) 药柱锥形孔上放钢制聚能罩;

(d) 有罩药柱离开靶面一定的距离

1——雷管;2——药柱;3——锥形孔;4——聚能罩;5——形成的凹坑

内放上钢制聚能罩后,破坏深度大大增加,破坏深度达到无罩药柱的 11 倍以上,射流射向介质的压力可达数千万至数亿帕;将药柱放在距离靶板 70 mm 位置上爆炸时,破坏深度进一步增大,达到无罩药柱的 17 倍以上。所以,当选取合适的距离时,射流的破靶(甲)深度可达 6~7 倍聚能罩直径<sup>[27]</sup>。

在普通药柱的一端沿轴向开一个凹槽,该凹槽即为轴对称轴向聚能,其原理如图 2.2 所示。

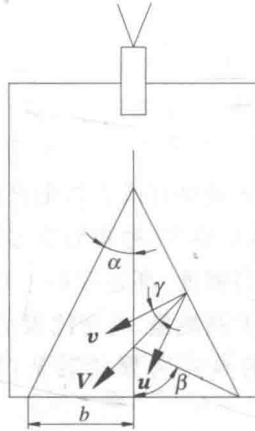


图 2.2 聚能射流原理

当药卷爆炸时产生的柱状爆炸液到达聚能槽(穴)的两翼面时,爆炸产物将改变原来的运动方向,爆炸波阵面后的爆炸产物表层某分子  $m$  受两种力的作用:第一种力是爆生气体的膨胀力,它垂直于翼面,使分子  $m$  垂直翼面以速度  $v$  运动;第二种力为后面分子的推挤力,它垂直于波面,使分子  $m$  垂直波阵面以速度  $u$  运动。因此,爆炸产物的表层分子  $m$  运动速度为两速度的向量和,即:

$$\mathbf{V} = \mathbf{v} + \mathbf{u} \quad (2.1)$$

所以爆炸产物的最大作用方向,即速度  $\mathbf{V}$  的方向,偏离翼面法线一个很小的角  $\gamma$ (一般  $\gamma = 7^\circ \sim 10^\circ$ ),由于无数个射流微元按  $7^\circ \sim 10^\circ$  的角互相聚合而形成射流(如图 2.3 所示)。这个角  $\gamma$  称为射流聚合角,或称为爆炸能辐射角之半。

射流微元在距凹槽底部一定距离发生最大的聚合点,此点称为聚能射流的焦点。焦点距凹槽底部的距离称焦距。当障碍物距凹槽底部的距离超过焦距后,由于爆炸产物的侧飞散,射流的能量密度降低,聚能效应将迅速衰减,甚至消失。因此,在焦点附近聚能效应最显著,破坏力最大。焦距可按下式计算:

$$R = b \tan \beta \frac{\sin \alpha \cos(\alpha + \gamma) + \sin \gamma}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad (2.2)$$

式中  $b$ ——聚能槽翼宽；  
 $\alpha$ ——聚能槽顶角之半；  
 $\beta$ ——压垮角。

总之,由于爆炸产物以速度  $V$  在凹槽内的对称方向互相碰撞聚合,爆炸产物流比朝其他方向飞散的爆炸产物流具有更高的速度和密度,形成一个具有一定厚度、能量密度极高的劈体能流面。显然在这个方向对障碍物的破坏力最大,如图 2.3 所示。

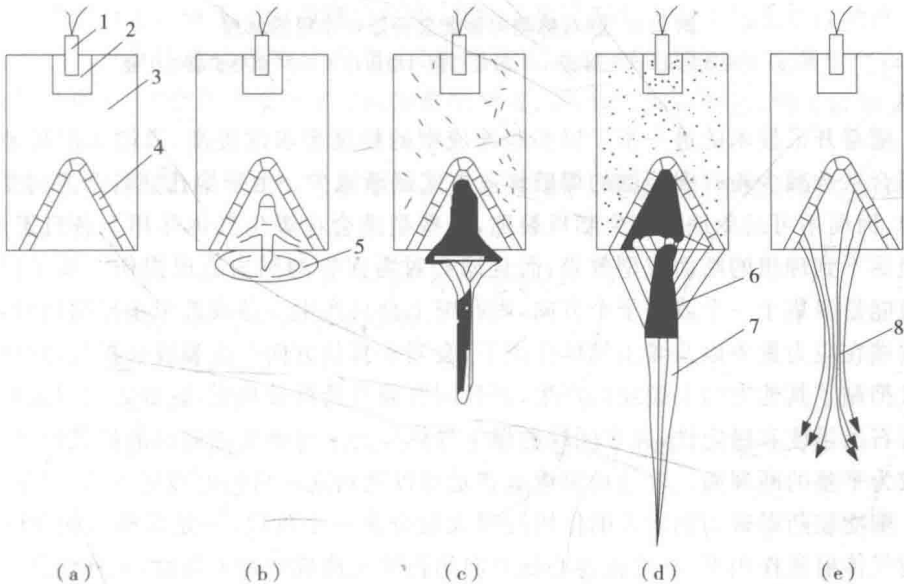


图 2.3 聚能射流形成过程

(a) 起爆前的药柱;(b),(c),(d) 射流形成过程;(e) 射流形成过程放大

1——雷管;2——起爆药柱;3——聚能装药;4——聚能罩;

5——崩落圈;6——杵体;7——聚能射流;8——焦点

轴对称聚能罩在炸药爆炸时,爆轰产物在几乎垂直于聚能罩表面的方向飞出并与熔化罩一起形成高速、穿透力很强的聚能射流。聚能流在焦点处获得最小的剖面和最大的能流密度与速度,聚能射流的能量密度比爆轰波的能量密度高一个数量级。根据这一原理,可设计侧向聚能竖向切割器,把轴向聚能变为侧向聚能,把聚焦点变为聚焦竖向(或横向)直线,且聚焦直线最好能位于待爆物壁内。

轴对称侧向聚能装药爆炸作用过程的原理如图 2.4 所示。聚能结构起爆后,爆轰波与聚能罩作用,结果形成两股射流,射流“刀型”速度可达数千米每秒,与介质(炮孔壁)碰撞,在介质内形成一定深度的切割裂缝,爆炸应力波和爆生气体准静

态压力进一步扩展聚能切割裂缝<sup>[28-30]</sup>。

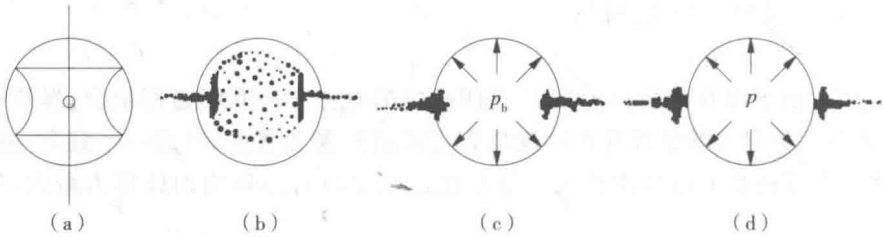


图 2.4 轴对称侧向聚能装药爆炸作用的原理

(a) 引爆前;(b) 产生射流;(c) 射流切割与动压作用;(d) 裂缝扩展与止裂

随着开采技术的进一步发展和断面成型的精度要求的提高,靠增大炮孔装药不耦合系数减少粉碎圈范围的爆破作业方式逐渐减少。由于炮孔壁各个方向受力均匀,因而不可避免地要产生随机裂隙,这些裂隙会在爆生气体作用下各自发展,不但达不到理想的断面成型效果,而且还会对需保护的围岩造成损伤。如果仅使爆破能量聚集于一个或若干个方向,则孔壁上会只产生一条或若干条导向切缝,切缝尖端在应力集中以及爆生气体作用下,会先于其他方向产生裂纹并扩展,这样同时又抑制了其他方向上裂纹的产生,而且同普通装药爆破相比,这种方式可提高保留岩石的强度和稳定性,并在同样的爆生气体压力下显著增加裂纹的扩展距离,形成较为平整的断裂面。聚能切割爆破就是可以达到这一目的的理想方法<sup>[31-34]</sup>。

聚能装药爆破切割岩石的作用过程大致分为三个阶段:一是爆破最初瞬间在高能气体射流作用下,在炮孔连心线方向的孔壁上造成初始短裂纹,或将炮孔压碎成为沿连心线方向为轴的椭圆孔,为下一步定向地切割创造有利条件;二是在爆生气体准静压作用下造成裂纹失稳、扩展、贯通,实现切割;三是爆生气体的残压作用将切割下来的岩块向外推移一定距离,为修整工作提供条件<sup>[35-39]</sup>。

## 2.2 聚能结构裂纹力学扩展分析

### 2.2.1 裂纹形成与扩展条件分析

聚能射流侵彻目标物的压力以及侵彻速度,均可应用冲击波理论来计算,其中射流遇障碍物的压力  $p_s$  可由如下公式计算:

$$p_s = \frac{\rho_{zc} v_{j\max}^2}{2} \quad (2.3)$$

式中  $\rho_{zc}$ ——聚能罩材料密度,若目标材料密度小于聚能罩材料密度,则应代换成

目标材料密度；

$v_{j\max}$ ——射流最大速度，与炸药性能、聚能罩形状、罩材料以及装药参数等因素有关。

显然，保证岩石定向断裂的关键问题是聚能射流应达到一定的速度。故需要选择合适的炸药，优化设计聚能结构及装药条件，才能使聚能射流速度和切割深度达到最佳。

聚能射流首先在炮孔孔壁形成初始导向切缝后，爆生气体充满整个炮孔，并作用在孔壁岩石上。由于导向切缝的存在，抑制了炮孔其他方向上随机裂纹的产生、扩展<sup>[40-43]</sup>。只有切缝尖端在应力集中、应力波在其尖端的绕射以及爆生气体的“气楔”作用下，才会产生按预定方向发展的裂纹。若炮孔间距合适，则可以形成贯通的断裂面。

根据岩石断裂动力学理论，在准静态压力作用下，裂缝(纹)尖端处的应力强度因子  $K_L$  为：

$$K_L = pF \sqrt{\pi(r_b + a)} \quad (2.4)$$

式中  $p$ ——裂缝(纹)中的准静态压力；

$a$ ——裂缝(纹)长度；

$r_b$ ——炮孔半径；

$F$ ——应力强度因子修正系数，是  $a$  与  $r_b$  的函数，如图 2.5 所示。

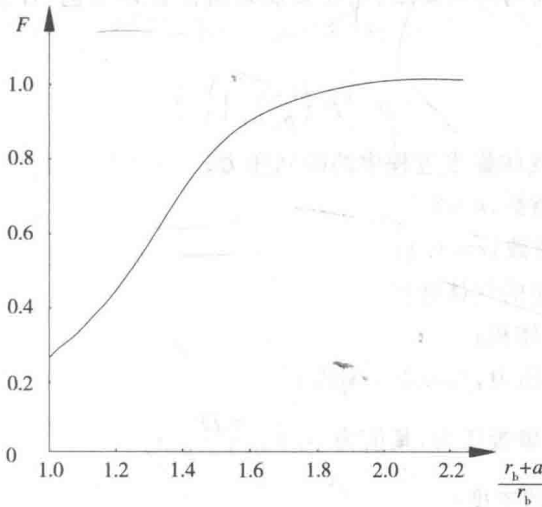


图 2.5  $F$  值曲线



记岩石动态断裂韧性为  $K_{LD}$ ，由岩石断裂动力学理论可知，若满足

$$K_L \geq K_{LD} \quad (2.5)$$

则裂缝(纹)就能继续起裂、扩展。

由式(2.4)，可将式(2.5)写成

$$p > \frac{K_{LD}}{F \sqrt{\pi(r_b + a)}} \quad (2.6)$$

反之，若

$$p \leq \frac{K_{LD}}{F \sqrt{\pi(r_b + a)}} \quad (2.7)$$

则裂缝(纹)不能扩展，或者说起裂后止裂。

对于定向断裂爆破来讲，炮孔内爆生气体的压力  $p$  就是裂缝(纹)起裂和扩展的驱动力。设炮孔孔壁上形成初始导向切缝后炮孔内压力为  $p_L$ ，则导向切缝需要满足如下条件，裂纹才能扩展：

$$p_L \geq \frac{K_{LD}}{F \sqrt{\pi(r_b + a_0)}} \quad (2.8)$$

式中  $a_0$ ——射流形成的初始导向切缝深度；

其余符号含义同前。

由于炸药爆轰瞬间产生的气体被“局限”于炸药体积  $V_c$  之内，可将爆生气体视为理想气体，且在孔内等熵膨胀，则在聚能射流停止作用前，任意瞬间炮孔内爆生气体压力  $p$  为：

$$p = p_k \left( \frac{p_0}{p_k} \right)^{\frac{r}{k}} \left( \frac{V_c}{V} \right)^r \quad (2.9)$$

式中  $p$ ——爆生气体膨胀过程中的瞬间压力；

$k$ ——等熵指数， $k=3$ ；

$r$ ——绝热指数， $r=1.4$ ；

$V$ —— $p$  对应的气体体积；

$V_c$ ——炸药体积；

$p_k$ ——临界压力， $p_k=200$  MPa；

$p_0$ ——平均爆轰压力，其值为  $p_0 = \frac{\rho_0 D^2}{2(1+k)}$ ；

$\rho_0$ ——炸药的密度；

$D$ ——炸药的爆速。

为减少或避免形成粉碎圈，保证爆破效果，要求爆炸作用对炮孔壁产生的冲击动压不大于岩石的极限动抗压强度，即  $p$  还需要满足：