



矿山岩爆机理 与防治实践

张晓春 ◎ 著



东南大学出版社

东南大学科技出版基金资助

矿山岩爆机理 与防治实践

张晓春 ◎ 著



东南大学出版社

内 容 提 要

岩爆是威胁矿山安全生产的重大灾害之一,其显现具有突发性和灾害性,但其蕴蓄过程又具有空间性和时间性,因此,在深刻理解岩爆发生机理的基础上,可对岩爆发生的空间位置与时间效应进行预测,采取有效的防治措施,从而避免和减小岩爆所造成的损失。本书的第一章至第八章为岩爆发生的机理研究部分,包括岩石裂隙演化与损伤能量耗散特性、岩壁裂纹失稳扩展与片帮型岩爆、黏弹性失稳分析——岩爆的时间延迟、矿山岩爆的模拟试验研究、岩爆的数值模拟研究、应力波诱发岩爆的动力学机理、应力波导致围岩层裂结构及岩爆机理分析。第九章至第十章为岩爆发生机理与防治在实际工程中的应用,包括煤矿岩爆机理与防治实例和金属矿山岩爆机理与防治。

本书可供从事采矿和深部高应力隧道科研、设计、生产技术及管理工作者阅读参考,也可供高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿山岩爆机理与防治实践 / 张晓春著. —南京:
东南大学出版社, 2010. 11
ISBN 978-7-5641-2485-4

I. ①矿… II. ①张… III. ①矿山—岩爆—防治
IV. ①TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 204706 号

矿山岩爆机理与防治实践

出版发行 东南大学出版社(南京市四牌楼 2 号 邮编 210096)

电 话 (025) 83793191(发行); 57711295(传真)

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

经 销 全国各地新华书店

印 刷 徐州新华印刷厂

版 次 2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 10.5

字 数 262 千字

印 数 1—1 500 册

书 号 ISBN 978-7-5641-2485-4

定 价 28.00 元

(凡东大版图书因印装质量问题,请直接向读者服务部调换。电话:025-83792328)

前 言

岩爆是指矿井、深部硐室、隧道等采掘空间周围岩体在高应力作用下局部失稳,弹性应变能突然释放,使岩体向采掘空间抛射的一种动力破坏现象。它是矿山生产与建设等深部地下工程中的重大灾害之一,常造成重大的人员伤亡和巨大的经济损失。

岩爆现象常发生于金属矿山、煤矿、深部隧道和水工地下工程中。

自有记载的第一次发生于1738年英国南史塔福煤田岩爆至今,两百多年来,岩爆危害几乎遍布世界各采矿国家。随着开采深度的增加和采掘规模的日益扩大,岩爆的频度和强度也日益增大。同时,矿山岩爆灾害的发生具有时间和空间上的不确定性。因此,矿山岩爆因其诱发因素众多、发生的突然性和破坏性而成为岩石力学、矿压研究中的重大问题,其发生机理及防治技术研究已成为矿山压力研究的焦点之一。

本书的主要内容是作者近十年来承担和参与相关课题研究的成果,其中许多内容已在国内外重要刊物上发表,有的已在实际工程中采用并取得了良好的效果。全书分为十章。第一章介绍了国内外矿山岩爆灾害的概况,总结了岩爆机理研究取得的成果以及防治体系。第二章介绍了岩石裂隙演化与损伤能量耗散特性,概述了岩石裂纹演化及其力学特性的研究进展,分析了岩石损伤的能量耗散及岩爆能量。第三章研究了岩壁裂纹失稳扩展与片帮型岩爆机理,内容包括井巷围岩局部裂纹扩展条件,近自由面的裂纹扩展模型及应力判据,片帮型岩爆机理,劈裂结构形成的能量耗散与冲击能量分析,时间相关的裂纹扩展与岩爆的延迟性。第四章为黏弹性失稳分析——岩爆的时间延迟,针对深部矿山开采的片帮型岩爆,考虑围岩在高地应力作用下流变特性,研究岩爆发生时间上的滞后性,主要内容包括,中厚软岩板静载弯曲时中面特性的时间相关分析,岩石板梁结构时间相关变形的稳定性分析,岩爆层裂板结构的屈曲载荷—时间特性研究。第五章介绍了矿山岩爆的模拟试验研究,主要包括,相似材料模拟试验和煤质材料的模拟试验。第六章为岩爆的数值模拟研究,采用RFPA98对围岩层裂及内部岩体局部弱化和质点的位移进行数值模拟,进而分析岩体物理力学参数对岩爆的影响。第七章、第八章就应力波诱发岩爆的动力学机理进行了分析研究,主要内容包括应力波在弹性介质、黏弹性介质中的传播规律,应力波在自由界面的反射效应和叠加效应分析,应力波在岩体中传播规律的数值模拟,应力波作用下围岩层裂结构形成的机理和应力波导致围岩层裂结构及冲击破坏的数值模拟。第九章、第十章为矿山岩爆机理与防治实例,分别介绍了作者承担或参与的两座煤矿和一座金矿岩爆发生的实录、机理和治理措施。

本书的理论工作源于笔者博士论文和博士后出站报告,工程应用部分来源于博士与博士后期间的现场工作实践以及承担的灵宝黄金股份有限公司岩爆防治科研项目。特别感谢笔者的博士生导师杨挺青教授,博士后指导教师缪协兴教授的指导和帮助。

笔者衷心感谢中国矿业大学的李玉寿老师、马文鼎老师、卢爱红博士,大屯孔庄煤矿的

吴继忠总工,灵宝黄金股份有限公司的王军强经理、李飞工程师和郭晓技术员,感谢他们给予大力帮助和支持。

在本书的撰写过程中,笔者参阅了大量的国内外有关岩爆的专业文献,谨向文献的作者表示衷心的感谢。

限于笔者的水平与经验,书中疏漏与不当之处,恳请读者不吝指正。

张晓春

2010. 5. 10

目 录

1 绪论	1
1.1 国内外岩爆实况	1
1.1.1 金属矿山岩爆情况	1
1.1.2 煤矿矿山岩爆情况	2
1.1.3 隧道和水电工程中的岩爆情况	4
1.2 岩爆发生机制研究进展	4
1.2.1 强度理论、刚度理论和能量理论	5
1.2.2 冲击倾向性理论	6
1.2.3 稳定性理论——围岩局部表面失稳、分叉与突变	7
1.2.4 岩爆时间相关性	7
1.2.5 其他研究	8
1.3 岩爆的试验研究与数值模拟	9
1.3.1 试验研究	9
1.3.2 数值模拟	9
1.4 岩爆的预测、预报方法概述	10
1.4.1 钻屑法	10
1.4.2 声发射(地音)与微震监测	10
1.4.3 地球物理监测方法	10
1.4.4 各种方法的综合预测预报	10
1.5 岩爆防治方法概述	11
1.5.1 长期防治	11
1.5.2 直接防治	12
2 岩石裂隙演化与损伤能量耗散特性	13
2.1 岩爆岩体结构特点	13
2.1.1 煤矿岩体的宏观结构特点及破坏方式	13
2.1.2 岩体的流变特性	13
2.1.3 岩爆岩体的宏观结构特性	14
2.2 岩石裂纹演化及其力学特性	14
2.2.1 岩石变形及破坏过程	15
2.2.2 微裂纹(缺陷)扩展模型	15
2.2.3 裂纹群的演化及相互作用	16

2.2.4	裂纹扩展的声发射效应	17
2.2.5	微裂纹扩展的变形—时间相关性	18
2.3	岩石损伤的能量耗散及岩爆能量分析	19
2.3.1	材料损伤变形与能量耗散	19
2.3.2	岩石弹脆性损伤力学分析与岩爆能量指数	20
3	岩壁裂纹失稳扩展与片帮型岩爆	24
3.1	井巷围岩局部裂纹扩展条件	24
3.2	近自由面的裂纹扩展模型及应力判据	25
3.2.1	单一裂纹模型	25
3.2.2	多裂纹模型	26
3.2.3	有支护时近自由表面的裂纹扩展	27
3.3	片帮型岩爆机理	28
3.3.1	矿山片帮型岩爆机理描述	28
3.3.2	临界深度分析	29
3.4	岩巷薄壁稳定性分析	29
3.4.1	四边夹支双向受均布压力 p_z 和 p_x 的情况	30
3.4.2	承载边为夹持约束,另一对边自由的情况	31
3.5	劈裂结构形成的能量耗散与冲击能量分析	31
3.5.1	圆形巷道围岩劈裂形成过程中的能量耗散	31
3.5.2	冲击能量分析	33
3.6	时间相关的裂纹扩展与岩爆的延迟性	33
3.6.1	时间相关的裂纹扩展	34
3.6.2	裂纹贯穿前膨胀导致的自由面的位移	34
4	黏弹性失稳分析——岩爆的时间延迟	36
4.1	中厚软岩板静载弯曲时中面特性的时间相关分析	36
4.1.1	中厚板弯曲的控制方程	36
4.1.2	黏弹性中厚板中面位置确定	38
4.1.3	应用分析与讨论	39
4.2	岩石板梁结构时间相关变形的稳定性分析	41
4.2.1	两端固定板梁蠕变屈曲的控制方程	42
4.2.2	压屈的时间相关性分析	43
4.2.3	分析讨论	44
4.3	岩爆层裂板结构的屈曲载荷—时间特性研究	45
4.3.1	黏弹性薄板的压屈方程	45
4.3.2	矩形薄板压屈载荷—时间关系	46
4.3.3	岩爆的时间相关及应力扰动的讨论	50
4.3.4	算例	51

5 矿山岩爆的模拟试验研究	52
5.1 试验的基本思想和内容	52
5.2 相似材料模拟试验	53
5.3 煤质材料的模拟试验	59
5.4 试验分析与讨论	60
5.5 裂纹扩展及板模型失稳临界应力评估	62
6 岩爆的数值模拟研究	63
6.1 岩石破坏分析系统 RFPA'98 概述	63
6.2 数值计算模型	63
6.3 计算结果及分析	65
7 应力波诱发岩爆的动力学机理	70
7.1 应力波传播的基本方程	70
7.2 应力波在弹性介质中的传播规律	71
7.2.1 应力波在半无限弹性介质中的传播	71
7.2.2 应力波在分界面处的传播特性	72
7.3 应力波在黏弹性介质中的传播规律	73
7.4 应力波在自由界面的反射	75
7.4.1 弹性波遇自由界面的反射效应	75
7.4.2 入射应力波和反射应力波的叠加	77
7.4.3 叠加效应分析	77
7.5 应力波在岩体中传播规律的数值模拟	80
7.5.1 数值分析模型的建立	80
7.5.2 应力波在弹性介质中传播的数值模拟	80
7.5.3 应力波在黏弹性介质中传播的数值模拟	82
8 应力波导致围岩层裂结构及岩爆机理分析	85
8.1 应力波作用下围岩层裂结构形成的机理	85
8.1.1 应力波作用下围岩层裂结构的形成	85
8.1.2 动载作用下层裂板的稳定性分析	87
8.2 应力波导致围岩层裂结构及冲击破坏的数值模拟	88
8.2.1 数值分析模型	88
8.2.2 岩体失效准则选取及应力波的处理	89
8.2.3 数值模拟方案	90
8.2.4 计算结果分析	90
9 煤矿岩爆机理与防治实例	107
9.1 三河尖煤矿岩爆发生机理	107

9.1.1	岩爆发生的环境及特点	107
9.1.2	煤层冲击倾向性分析	108
9.1.3	三河尖煤矿岩爆发生机理分析	110
9.2	三河尖煤矿岩爆预测、预报	112
9.2.1	地质动力区划分析法	112
9.2.2	钻屑法	113
9.2.3	顶板动态监测法	116
9.3	三河尖煤矿岩爆的综合防治技术	117
9.3.1	改革采区、巷道布置及巷道支护方法	117
9.3.2	实施煤体注水法	118
9.3.3	实施煤层卸载与诱发爆破	120
9.4	孔庄煤矿岩爆危险程度评定与防治	122
9.4.1	岩爆发生的实录及特点	122
9.4.2	岩爆危险性评定方法	123
9.4.3	孔庄煤矿岩爆危险程度评定	127
9.4.4	孔庄煤矿Ⅲ ₂ 采区岩爆防治实践	128
10	金属矿山岩爆机理与防治实例	133
10.1	崮鑫金矿地质条件及岩爆实录	133
10.1.1	崮鑫金矿岩爆发生的地质条件	133
10.1.2	崮鑫金矿岩爆实录与特点	135
10.2	矿区深部围岩地应力测试	136
10.2.1	凯塞效应法地应力测量原理	137
10.2.2	崮鑫金矿岩样实测与结果	139
10.3	崮鑫金矿竖井岩爆发生机理	141
10.3.1	围岩最大主应力与岩爆发生部位的关系	142
10.3.2	竖井围岩裂隙扩展与局部层裂失稳	143
10.4	崮鑫金矿竖井及平洞掘进时岩爆治理措施与实施结果	144
10.4.1	崮鑫金矿竖井岩爆治理措施研究	144
10.4.2	平洞掘进岩爆防治	148
10.5	岩爆区域采掘时采矿技术与规程	150
10.5.1	有岩爆倾向深埋硬岩矿床采矿技术	150
10.5.2	岩爆区域防治岩爆的技术与管理规程(草稿)	152
	参考文献	153

1 绪 论

1.1 国内外岩爆实况

岩爆是指矿井采掘空间周围岩体在高应力作用下局部失稳,弹性应变能突然释放,使岩体向采掘空间抛射的一种动力破坏现象。它是矿山生产中易发生的重大灾害之一,常迫使采区或整个矿井停产,造成重大的人员伤亡和巨大的经济损失。

自有记载的第一次发生于 1738 年英国南史塔福煤田岩爆至今,两百多年来,岩爆危害几乎遍布世界各采矿国家。德国、南非、前苏联、美国、波兰、印度、加拿大、日本、澳大利亚、意大利、捷克、匈牙利、保加利亚、瑞典、挪威、新西兰、法国、比利时、荷兰、南斯拉夫、土耳其和我国等二十多个国家和地区都记录有岩爆现象。随着开采深度的增加和采掘规模的日益扩大,岩爆的频度和强度也日益增大。矿压专家预言,岩爆机理及防治研究将成为“21 世纪矿山压力研究的焦点”。

岩爆现象常发生于金属矿山、煤矿和地下水工工程中。下面按这三个方面简述其发生情况。

1.1.1 金属矿山岩爆情况

印度科拉尔矿区的金矿和南非维特瓦加尔斯兰金矿,开采深度超过 3 000 m,发生过多 次强烈岩爆。据丹克豪斯的统计,1963 年南非 6 个金矿的总产量为 850 万吨,共发生 281 次岩爆现象。印度巨矿脉和奴底朱格两矿在 1957—1962 年间,分别发生 84 次和 66 次岩 爆,相应采深分别为 2 000 m 和 3 000 m。

美国金属矿岩爆主要发生在爱达荷州科尤尔、德亚历内矿区,主要开采锌、铅和银矿石, 最大开采深度超过 2 000 m,1956—1971 年间,在加莱娜矿发生了 128 次强烈岩爆。此外, 克达伦铝、铅矿床也多次发生岩爆现象。

前苏联金属矿岩爆现象首次发生在 20 世纪 60 年代,北乌拉尔铝土矿、塔什塔戈里铁矿 均是岩爆常发矿区。

在我国随着开采深度的增加,岩爆问题也越来越严重。铜陵有色金属公司狮子山铜矿 的冬瓜山矿床,在埋深约 1 000 m 处,多次出现较大规模的深井岩爆;杨家杖子矿、青城子 矿、玲珑金矿、大厂锡矿区、红透山铜矿等也有岩爆现象出现。

表 1-1 为金属矿山部分岩爆实例。

表 1-1 金属矿山部分岩爆实例

矿 山	岩爆频发深度	矿石种类	岩石种类	主要采掘方法
印度科拉尔矿区	最底部:3 024 m(1959 年) 采掘区:2 100 m(1954 年)	金	角闪闪长岩	充填回采法和倾斜回采法并用
南非维特奥特斯兰金矿区	采掘区: 2 400~2 700 m(1960 年) 3 300 m 以上的竖井	金	石英岩	长壁回采法
加拿大安大略州波丘潘金矿区	岩爆频发区: 1 200~1 800 m(1963 年)	金	长石石英斑岩 碳酸盐熔岩 密勒湖斑岩	充填回采法 方框支架开采法 倾斜分层开采法
加拿大安大略州可克兰—雷克金矿区	最底部:2 430 m(1965 年)	金	火山灰岩 正长岩 碳酸盐岩脉	充填开采法
加拿大安大略州萨德伯里矿区巴辛矿区	最底部:1 980 m(1965 年) 岩爆频发区 1 200 m 附近	镍 铜	碧玉硫化矿物 苏长岩	充填开采法 分块崩落开采法
美国密执安州莱克苏必利尔铜矿	岩爆频发区:1 200 m 附近 (1920 年)	铜	砾岩 杏仁状岩 暗色岩	
美国爱达荷州克达伦铜矿区	岩爆频发区: 斯塔尔矿区 1 200 m 附近 (1967 年) 加利纳矿区 1 800 m 附近 (1967 年)	铅 锌 银	石英岩 磷铁矿 黝铜矿矿脉	
苏联塔什塔戈里铁矿	岩爆频发区:1 000 m 附近 (1978 年)	铁	石英岩 正长岩	
铜陵冬瓜山铜矿	岩爆频发区:1 000 m 附近	铜		

1.1.2 煤矿矿山岩爆情况

煤矿岩爆危害几乎遍布世界各采煤国家,有二十多个国家和地区记录有岩爆现象。世界上第一次有记载的岩爆发生在 1738 年英国的南史塔福煤田。之后前苏联、南非、德国、波兰、美国、加拿大等都曾发生岩爆事故。在波兰岩爆已成为煤矿重大灾害之一,全国 67 个煤矿中 36 个煤矿具有岩爆危险,占 55%。大约 50%的煤产量采自有岩爆危险的煤层。20 世纪 40 年代波兰煤矿发生的岩爆最多,1949 年发生了 350 次岩爆。在 1950—1960 年间,波兰平均每年发生 226 次,而以后的各年里,每年大约发生 20 次岩爆。在 1949—1982 年间波兰共发生破坏性岩爆 3 097 次,造成 401 人死亡,12 万 m 井巷被破坏。岩爆对德国采矿业的危害也是非常严重,图 1-1 为德国北莱茵-威斯特伐伦州 1953—1980 年硬煤矿井伤亡事故的发生情况,虽然总的事故数从 1953 年的 604 次降到 1980 年的 62 次,岩爆和冒顶事故从 225 次降到 15 次。

我国煤矿岩爆灾害也极为严重。1933 年抚顺胜利矿发生的煤矿岩爆是我国最早有记录的岩爆。以后,随着开采深度的增加和采掘范围的扩大,北京矿务局的门头沟、城子、房山等六个矿井和坑口,抚顺矿务局龙凤矿和老虎台矿,山东枣庄矿务局陶庄矿、八一矿,开滦矿

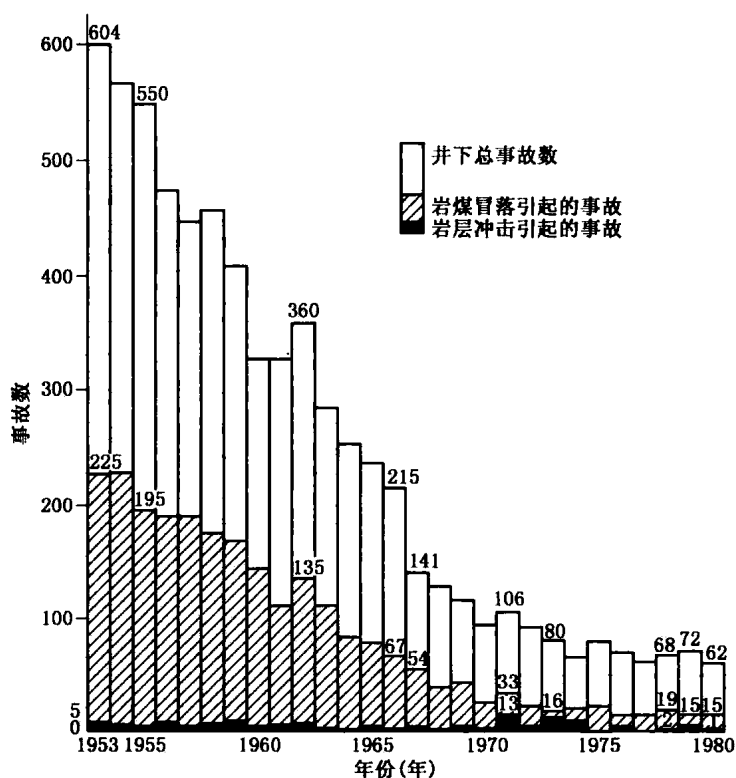


图 1-1 德国岩爆事故的发生情况

务局的唐山矿,阜新矿务局高德矿、五龙矿以及四川德阳天池煤矿等矿务局都发生过岩爆。截至 1985 年的不完全统计,我国有岩爆危险的煤矿达到 32 个,其中统配煤矿 27 个,隶属于 14 个矿务局,地方矿 5 个。截至 1985 年,我国已发生的破坏性岩爆 1 800 多次,震级从里氏 0.5 级至 3.8 级,造成严重的危害,伤亡几百人,破坏巷道约 13 km,停产 1 300 多天。1985 年以后,山东新汶、河南义马、重庆松藻等矿务局也相继出现岩爆现象。随着开采深度的增加和开采范围的扩大,近年来,虽然采取了不少措施,但岩爆的次数并未明显减少。根据粗略统计,共发生破坏性岩爆 2 000 余次,伤亡几百人,破坏生产巷道近 20 km。随着我国煤炭生产的发展,矿井开采深度正在以每年 10 m 的速度增加,伴随而来的是岩爆灾害的日益严重。20 世纪 50 年代以前只有两个矿井发生了岩爆。20 世纪 50 年代增加到 7 个,20 世纪 60 年代为 12 个,20 世纪 70 年代达到 22 个,进入 20 世纪 80 年代以后,猛增到 50 多个。图 1-2 为我国部分煤矿发生岩爆次数与采深的关系,图 1-3 为波兰煤矿发生岩爆次数与采深

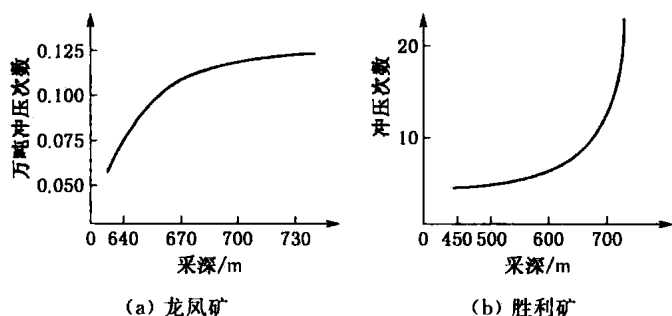


图 1-2 我国部分煤矿发生岩爆与采深的关系

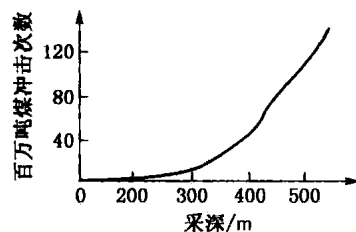


图 1-3 波兰煤矿岩爆与采深的关系

的关系。从这两个图中可以看出采深越深发生岩爆的可能性越大。表 1-2 给出了 1994 年我国煤矿岩爆统计情况。

表 1-2 我国煤矿岩爆统计表

局	矿	初始时间	冲击次数	最大震级	局	矿	初始时间	冲击次数	最大震级
鸡西	滴道	1983.09	9		大同	煤峪口	1972.04	7	
鹤岗	南山	1981.03	5			永定庄	1962.06	16	
辽源	西安	1954.01	266		枣庄	陶庄	1976.01	146	3.6
抚顺	龙凤	1975.01	675	2.5		八一	1976.01	6	
	老虎台	1955.01	30	3.7	南桐	砚石台	1979.08	19	
	胜利	1933.01	44		义马	千秋	1988.01	7	
北票	台吉	1970.05	64	3.8	地方	天池	1959.10	37	
沈阳	牛心台	1972.09	57			五一	1980.12	10	
北京	门头沟	1947.05	288	3.8		擂鼓	1981.03	10	
	城子	1961.01	14	3.4		花鼓山	1984.09	2	
	房山	1958.12	17	3.0	江苏	姚桥	1993.01	4	
	长沟峪	1970.01	1		徐州	三河尖	1991.01	102	
	大台	1961.01	7			旗山	1991.07	45	
开滦	唐山	1963.01	46		新汶	华丰	1991.01	102	
大同	忻州窑	1981.01	35						

1.1.3 隧道和水电工程中的岩爆情况

在隧道掘进中,由于埋深较大和特殊的地质条件,岩爆现象也时有发生。挪威西海岸沿峡弯的 Heggura 公路隧道修建过程中,当岸坡坡角大于 45°,坡顶高出海平面 1 000~1 500 m,隧道平行陡岸时,在边拱及靠近峡弯一侧的拱顶曾发生岩爆。我国成昆铁路北段乌斯河等几座隧道在施工过程中也曾发生岩爆。近年来,秦岭隧道、秦岭铁路隧道、秦岭终南山隧道、西康铁路秦岭特长隧道二线等均出现过较为严重的岩爆现象。在我国的川藏公路二郎山隧道发生了 200 多次岩爆现象。

在水电工程中,如瀑布沟水电站,天生桥水电站引水隧洞,岷江太平驿电站引水隧洞,锦坪水电站勘探平硐,二滩水电站引水隧洞,鱼子溪Ⅰ、Ⅱ级引水隧道和应秀弯隧洞均发生过岩爆。

1.2 岩爆发生机制研究进展

长期以来,岩爆作为岩石力学的重大难题之一,一直是国内外学术界和工程界关注的重要研究课题。岩爆发生机理十分复杂,各国学者在对岩爆现场调查及实验室研究的基础上,

从不同角度相继提出了一系列的重要理论,如强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向理论、三准则理论和变形系统失稳理论等。20 世纪 60 年代以后,在岩爆的研究中,人们逐渐认识到岩爆是裂纹扩展及变形局部化导致的失稳现象,与具有裂隙的各向异性岩石介质的力学性质和围岩在外加载荷作用下应力应变场的演化与失稳密切相关。

1.2.1 强度理论、刚度理论和能量理论

(1) 强度理论

早期的强度理论主要涉及岩体的破坏原因,认为井巷和采场周围产生应力集中,当应力达到岩石强度的极限时,岩体突然发生破坏,形成岩爆。早期的强度理论还对岩体形成应力集中的原因提出了各种假说,如 20 世纪 30 年代末的拱顶理论和悬臂梁理论等等。

近代强度理论以“矿体—围岩”系统为研究对象,其主要特点是考虑“矿体—围岩”系统的极限平衡,认为煤(岩)体的承载能力应是“煤体—围岩”系统的强度,导致煤(岩)体破坏的决定因素不仅仅是应力值大小,而是它与煤(岩)体强度的比值。岩爆发生的应力条件为

$$\sigma \geq \sigma^* \quad (1-1)$$

此时的研究不仅有定性的分析与推断,而且给出了各种表达式和解析解,并开始用实验室和井下实测资料进行具体问题的定量分析。

20 世纪 70 年代强度理论得到进一步的发展,Brauner 提出煤(岩)体夹持理论,并导出煤(岩)体极限压应力 p_k 的计算公式

$$p_k = (\sigma_c + \tau_0 c \tan \varphi) \left[\exp \left(\lg \varphi \frac{x}{M} \right) - 1 \right] + \sigma_c \quad (1-2)$$

式中: τ_0 ——煤体—围岩交界处黏结力;

σ_c ——煤体单向抗压强度;

x ——计算点到煤壁的距离;

M ——采高;

φ ——煤体—围岩交界处的摩擦角。

李玉生等的研究将此理论进一步完善,把式(1-2)修正为

$$p_k = \sigma_0 \exp[K \lg \varphi (2L - 1)] \quad (1-3)$$

式中: σ_0 —— $L = 1.5$ 处的煤体的残余强度;

φ ——煤岩交界处的外摩擦角;

K ——三轴残余强度系数。

夹持理论较好的揭示了煤体—围岩力学系统的极限平衡条件,但与实际结果比较还存在一定差距。

强度理论在说明煤矿岩爆发生机理时,具有简单、直观和便于应用的特点。但对岩爆动力学特征的描述不够,而且不能反映岩爆的时间相关性。现场资料表明,井巷和采场周围岩体经常出现局部应力超过其强度极限的现象,即使具有强烈冲击倾向的煤层也并没有发生突然破裂。多数情况下岩体平稳地进入强度后变形阶段,少数情况发生突然破裂形成岩爆,

这说明强度理论提出的判据不够充分。

(2) 刚度理论

刚度理论是由 Cook 等人根据刚性压力机理论而得到的。该理论认为:矿山结构的刚度大于矿山负载系统的刚度是发生岩爆的必要条件。近年来 Petukhov 在他所提出的岩爆机理模型中也引入了刚度条件。但他进一步将矿山结构的刚度明确为达到峰值强度后其载荷—变形曲线下落的刚度。在刚度理论中,如何确定矿山结构刚度是否达到峰值强度后的刚度是一难题,它不能由试验测定。数值方法可能是有效途径之一,但目前的结果仍存在一定的偏差,需要开展进一步的研究工作。

(3) 能量理论

能量理论从能量转化角度解释岩爆的成因,是岩爆机理研究的一大进步。该理论认为矿体—围岩系统在其力学平衡状态破坏所释放的能量大于所消耗的能量时发生岩爆。20 世纪 70 年代 Brauner 提出岩爆的能量判据,该判据考虑了能量释放与时间因素的相关性。其后,吴耀琨等对此加以补充修正,引入空间坐标系以说明岩爆发生的条件应同时满足能量释放的时间效应和空间效应。

冲击发生的能量源分析至关重要。Petukhov 认为冲击能量由被破坏的岩石积蓄的能量和邻接于煤柱或岩石层边缘部分的弹性变形能所组成,即从外部流入的能量赋予岩爆以动力,并把岩爆动力指数定义为

$$K_u = \frac{W_{BH}}{W_p} \quad (1-4)$$

式中: W_{BH} ——克服受压、剪、拉或它们综合作用于岩石材料的阻力之后,从外部介质流入的能量;

W_p ——材料破坏时需要的能量。

剩余能量理论认为剩余能的存在是围岩动力失稳的力学原因,该理论 20 世纪 70 年代由美国人提出,其后得到了进一步的发展和应用。

能量理论说明矿体—围岩系统在力学平衡状态时,释放的能量大于消耗的能量,岩爆就可能发生,但没有说明平衡状态的性质及其破坏条件,特别是围岩释放能量的条件,因此,岩爆的能量理论判据尚缺乏必要条件。

1.2.2 冲击倾向性理论

冲击倾向性是指煤(岩)石介质产生冲击破坏的固有能力或属性。煤(岩)体冲击倾向性是产生冲击矿压的必要条件。冲击倾向性理论是波兰和前苏联学者提出的,我国学者在这方面做了大量的工作,提出用煤样动态破坏时间(D_t)、弹性能指数(W_{ET})、冲击能指数(K_E)三项指标综合判别煤的冲击倾向的试验方法。此外,我国学者在试验方法、数据处理及综合评判等研究中取得了一定的研究进展。

冲击倾向性理论的另一重要方面是顶板冲击倾向性的研究,而且也越来越引起人们的重视。这方面的研究包括顶板弯曲能指标和长壁开采方式下顶板断裂引起的煤层冲击等。

显然,用一组冲击倾向性指标来评价煤(岩)体本身的冲击危险具有实际意义,并已得到了广泛的应用。然而,岩爆的发生与采掘和地质环境有关,而且实际的岩石物理力学性质随

地质开采条件不同而有很大差异,实验室测定的结果往往不能完全代表各种环境下的岩石性质,这也给冲击倾向性理论的应用带来了局限性。

1.2.3 稳定性理论——围岩局部表面失稳、分叉与突变

稳定性理论应用于岩爆问题最早可追溯到 20 世纪 60 年代中期 Neville Cook 的研究。刚性试验机的出现使人们可以获得受压岩石的全应力—应变曲线,得到岩石峰后变形的描述,从而可以研究采动岩体的平衡以及这种平衡的稳定性。Lippmann 将岩爆处理为弹塑性极限静力平衡的失稳现象,进一步又提出煤层冲击的“初等理论”。同一时期,章梦涛根据煤(岩)石变形破坏的机理,认为煤(岩)石介质受采动影响而在采场周围形成应力集中,煤(岩)体内高应力区局部形成应变软化介质与尚未形成应变软化(包括弹性和应变硬化)的介质处于非稳定平衡状态,在外界扰动下的动力失稳,形成岩爆,提出岩爆的失稳理论,并得到了初步的应用。

在目前的研究中,以断裂力学和稳定性理论为基础的围岩近表面裂纹的扩展规律、能量耗散和局部围岩稳定性研究备受关注。大量研究表明裂纹的扩展方向受最大压应力方向控制,围压对裂纹的扩展起限制作用。Vardoulakis 研究指出近自由表面的裂纹一旦开始扩展,将失去稳定,导致表面局部屈曲,临界屈曲应力随自由表面与裂纹间距离的减小而急剧减小。Dyskin 对壁面附近裂纹扩展方式及裂纹贯穿后的壁面稳定进行了分析,认为压应力集中造成初始裂纹以稳定的方式向平行于最大压应力方向扩展,这种扩展与自由表面相互作用加速了裂纹的增长并最终导致失稳扩展,裂纹面出现分离,分离层屈曲破坏形成岩爆,并建立了一个二维裂纹扩展模型以计算非稳定裂纹起裂点的应力大小。Bazant 等分析了近壁裂纹扩展引起的能量耗散及尺度效应,使对岩爆的能量估算成为可能。张晓春等在这方面结合实际情况对近表面裂纹扩展,壁面局部稳定性作了初步的研究,探讨了煤矿巷道附近围岩层裂区的形成和破坏机理,通过理论分析和试验模拟,建立了煤矿片帮型岩爆发生的层裂板结构失稳破坏模型,认为巷道或采场壁面的局部稳定是由高应力集中区内形成的层裂板结构区的稳定控制的,岩爆是煤壁形成的层裂板结构区的局部压屈。齐庆新等在煤与岩石以及煤层之间摩擦滑动实验研究基础上,考察了煤矿岩爆煤岩层间结构黏滑失稳机制。

材料破坏的分叉理论是岩爆研究的一个重要方面,Vardoulakis 和 Deborst 等做了一系列的工作,并在数值计算上采用黏塑性、塑性应变梯度和 Cosserat 介质理论的本构关系等,以求实现对破坏失稳部位的预测。

近年来,突变理论在岩爆研究中也取得了一系列的进展。这包括:针对煤柱的非稳定问题,利用尖角突变模型,得到了判断岩石柱岩爆发生的必要条件和充分条件;分析水平力和垂直力控制的空间岩体系统失稳的分叉集以及由于它们变化而导致煤岩体状态突变的过程。这些研究在煤岩体的本构关系方面采用线性(弹性)和非线性(应变软化、损伤)模型。

1.2.4 岩爆时间相关性

随着煤炭开采深度的增加,岩体的流变特性已引起人们的注意。张晓春基于层裂结构板屈曲破坏的冲击模型,将岩石的流变本构关系引入,讨论了层裂结构板蠕变屈曲导致冲击

发生的机制,并对岩石板梁结构时间相关变形的稳定性进行了分析,综合得出了层裂结构板模型蠕变屈曲导致岩爆发生的延迟时间计算公式

$$t_a = F^{-1} \left(\frac{p_a}{\beta_m} \right) t \quad (1-5)$$

式中: F ——与材料蠕变特性相关的函数;

p_a ——给定的载荷;

β_m ——板模型的约束和大小相关的参数。

该式表明:在施加的压力 p_a 的作用下,经历时间 t_a 后,层裂结构板发生蠕变屈曲导致冲击现象的发生,进而说明在深部煤炭开采时,岩爆的发生不仅与压力水平和约束有关,而且还与材料的流变特性有关,岩爆的发生具有时间相关性。

缪协兴、张晓春等针对于高应力水平下的围岩裂纹的亚临界扩展,利用裂纹扩展的幂率关系,研究了裂纹扩展的时间关系,从而讨论了围岩稳定的时间相关因素。徐曾和等提出了黏弹性顶板下煤柱岩爆问题的一个简单力学模型,用尖点突变模型讨论岩爆滞后的时间因素。为考虑煤岩冲击倾向性判据,张晓春初步提出了软煤样蠕变第三阶段应变率作为冲击指标的可能性。

这都是岩爆时间滞后机理研究的新探索。随着煤矿开采深度的不断增加,煤岩体的流变特性日益突出,因此,采矿过程中变形与破坏的时间因素必须被考虑。

1.2.5 其他研究

谢和平的岩爆的分形特征与机理研究,将分形几何学引入岩爆的研究,从分形理论上解释岩爆机理。认为一个强的岩爆或地震实际上等效于岩体内破裂的一个分形集聚,这个破裂的分形集聚所需能量耗散 E 随分维 D 的减少而按指数律增加。

他还研究了岩爆特征及岩体结构效应,指出岩体结构对岩爆的发生和岩爆烈度具有控制作用,并结合岩石力学试验,提出了岩爆岩体的结构效应理论。

Ortlepp 和 Stacey 将几种不同岩爆机理加以区分,给出了起源机理和破坏机理的明确区别,讨论了起源机理的几种主要类型以及冲击发生时各种类型的支护方式。

Denis 和 Gill 提出对岩爆研究的反演方法。Du 和 Kemey 采用数值微裂纹模型研究孔洞冲击问题。周瑞忠通过对掘进面发生岩爆的两种计算(平面模型、空间模型)的断裂力学研究,讨论了发生岩爆的力学机理,给出了临界条件,并对岩爆发生的总体规律作出了定量描述。Antoni 和 Goszcz 提出用地震机理的黏—滑动地质动力学模型来解释某些采场中顶板岩爆问题。

Koll 和 Kuhnt 将岩爆按其发生机理划分为采矿(静力)岩爆和地质构造(动力)岩爆,指出采矿岩爆主要与开采面有关,地质构造岩爆与采矿活动间接相关,主要是由回采区域和远场环境里岩体内局部应力重分布引起。目前,一种新的并有实际应用价值的岩爆研究方法——地质动力区划方法得到了深入的研究和应用,张宏伟等通过对矿区构造应力场的数值分析和活动断裂构造的研究,利用动力区划方法,对北票、抚顺、平顶山和铁法等矿区的矿井动力现象进行了分析和预测,指出构造应力和地质构造形式对矿区动力现象具有控制作用。从现有资料来看,地质动力区划方法是分析构造应力对矿区动力现象作用的重要手段