

DOI:10.13828/j.cnki.ckjs.2017.04.010

金属矿千米深井高应力特性岩爆发生规律与防治措施研究*

张涛¹, 胡静云², 林峰², 李庶林³, 杨德源¹, 余正方¹, 高伟¹

(1. 玉溪大红山矿业有限公司, 云南 玉溪市 653100; 2. 长沙矿山研究院有限责任公司微震与声发射监测技术研究所, 湖南 长沙 410012; 3. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门市 361005)

摘要:针对大红山铁矿进入千米深井开采后,在巷道、竖井和大断面硐室的基建开挖过程中发生的多次不同程度的岩爆动力地压现象等严重的地压灾害问题,首先对千米深部采区的高地应力特性进行了研究,得到了其深部高地应力处于超过亚临界深度的状态,但还没有达到临界深度的总体评价结果;其次采用模糊综合评价法获得了不同岩性在不同埋深的岩爆倾向性,得到了深部采区岩体总体上具有中等岩爆倾向性,在最深-40 m水平的局部,大理岩、片岩和磁铁矿的岩爆倾向性趋于强烈的结论;其次全面统计了基建过程中发生的岩爆案例,获得了岩爆发生与埋深、地应力、岩性等的关系与规律,得到了岩爆数量随埋深的增加呈指数关系增加的规律;最后提出了易爆岩层巷道与硐室的岩爆动力地压灾害的防护措施。

关键词:金属矿山;千米深井;高应力特性;岩爆倾向性;岩爆规律

0 前言

岩爆的发生机制与机理十分复杂,影响岩爆发生的因素有很多,包括岩层自身的岩爆倾向性属性、节理构造形成的岩体结构类型、节理构造自身的物理力学性质、原岩应力、地下水、岩体开挖扰动应力场、岩体开挖后临空面与原有节理构造形成的结构等等,上述影响因素多且具有耦合非线性特征,形成一个开放的复杂系统,研究难度相当大。目前国内对外对岩爆的研究虽取得了较多研究成果,但仍有许多未解难题需要探索^[1-24]。

从2016年开始,大红山铁矿采矿深度逐渐进入767 m至1261 m范围,最大开拓深度达到1301 m,原岩应力场由水平构造应力控制,原岩应力较大^[4,25-28]。采矿工程巷道与硐室断面大,主要布置在变钠质熔岩、辉长辉绿岩、大理岩、磁铁矿与片岩等坚硬岩层中,矿体水文地质条件简单。上述开采技术条件表明大红山铁矿深部开采中将面临潜在的较严重的岩爆威胁^[4,25-26]。深部开采范围内Ⅱ₁矿组分合采和分采2个部分,采矿规模共550万t/a,主要采矿方法为无底柱分段崩落法,多采区大规模同

时开采将导致开采扰动应力更加剧烈与频繁,会增大岩爆发生的频度与强度。

本文通过研究,拟获得深部采区高应力特性、各岩层各深度下岩性的岩爆倾向性强弱程度;通过统计基建过程中,仅受巷道掘进扰动应力下,巷道与硐室围岩的岩爆案例与规律,为下一步全面大规模开采中,巷道与硐室围岩结构进一步受采动应力扰动下,预测岩爆可能在哪些区域更容易发生及其发生的强弱程度,并提出科学、经济实用的防治措施,确保人员与设备在深部大规模开采过程中不遭受岩爆动力灾害的伤害。

1 深部采区高应力特性研究

根据《大红山铁矿岩体力学性质研究及原岩应力场测定》报告,可得原岩地应力分布规律为:

(1) 矿区原岩应力场中最大主应力方向的倾角都小于26°,最小倾角仅为2.89°,平均倾角为14.35°,大红山铁矿的最大主应力是由水平构造应力主导的。矿区最大主应力方向的方位介于北16°东到北65.68°东之间,平均方位为北40.84°东,最大主应力近南北向。

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51674218);国家重点研发计划项目(2016YFC0600702)。

(2) 最大主应力随深度变化的一元回归方程为: $\sigma_1 = 1.337 + 0.047 H$ (MPa); 中间主应力随深度变化的一元回归方程为: $\sigma_2 = 0.59 + 0.022 H$ (MPa); 最小主应力随深度变化的一元回归方程为: $\sigma_3 = 1.01 + 0.012 H$ (MPa), 式中 H 为埋深。

(3) 大红山地应力场的侧压系数 λ (即水平应力与垂直应力之比) 的最小值为 0.56, 最大为 4.81。

从 2016 年开始, 大红山铁矿采矿深度逐渐进入 767 m 至 1261 m 范围, 最大开拓深度达到 1301 m, 由原岩地应力场随深度变化的一元回归方程可知, 在这一深度范围内, 最大主应力处于 37.4 MPa 至 62.5 MPa 之间, 中间主应力处于 17.5 MPa 至 23.3 MPa 之间, 最小主应力处于 10.2 MPa 至 16.6 MPa 之间, 原岩应力较大。

除了考虑原岩地应力外, 生产巷道与硐室开挖后形成的掘进扰动应力也是评价岩爆发生强度的重要因素之一。在各分段布置的几何尺寸与形状不同的生产巷道与硐室中, 本文仅考虑巷道与硐室的轴向与最大主应力相垂直这一最不利情形, 即巷道与硐室轴向近似东西方向布置。采用 ANSYS 大型三维有限元数值模拟软件, 对 +370 m 开拓水平布置的巷道因掘进开挖引起的应力集中进行了数值模拟计算。巷道断面为三心拱, 断面宽度为 4.8 m, 高度为 3.8 m, 巷道开挖可近似按平面应变问题研究。巷道开挖后数值模拟的最大主应力分布见图 1。由图 1 可知, 最大主应力产生于底板与直墙的交角处, 为 112.25 MPa, 但分布区域有限, 对巷道的整体变形与岩爆强弱程度影响不大。在巷道顶板区域中最大主应力为 89.62 MPa, 分布区域较大, 对巷道的岩爆强弱程度影响较大, 相比 37.4 MPa 的最大水平原岩应力, 应力集中系数约为 2.4。

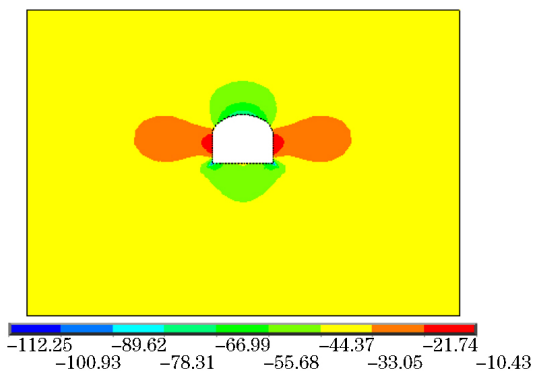


图 1 370 m 水平巷道开挖最大主应力分布/MPa

谢和平等^[1,6]提出深部的新概念: 深部不是深

度, 而是一种力学状态, 是由地应力水平、采动应力状态、围岩属性共同决定的力学状态, 可以通过力学分析给出定量化表征。李庶林, 谢和平等^[1,6]综合考虑原岩应力状态、开采扰动应力水平和岩体性质 3 方面因素, 提出了深部开采的亚临界深度、临界深度和超临界深度, 3 个概念:

(1) 定义一: 亚临界深度 H_{scr} 满足条件:

岩体在采动应力作用下进入脆塑性破坏的临界点。 H_{scr} 可表示为。

$$H_{scr} = h \left| \sigma_{eq} = \sigma_s, \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{1}{10} \sigma_1 \right.$$

(2) 定义二: 临界深度 H_{cr1} 应同时满足以下 2 个条件:

若处于临界深度 H_{cr1} 处, 岩体处于准静水应力状态; 若处于临界深度 H_{cr1} 处, 自重应力 σ_v 已经达到围岩的弹性极限 σ_{te} 。临界深度 H_{cr1} 可表示为:

$$H_{cr1} = \max\{h_1, h_2\} = \begin{cases} h_1 & | K_1 = 1 \\ h_2 & | \sigma_v = \sigma_{te} \end{cases}$$

式中, K_1 为最大水平应力与自重应力的比值。

第一个条件是地应力实测规律, 即临界深度以下的岩体处于二向等压的地应力状态; 第二条是深部开采临界深度的一个基本量化指标, 表明深部岩体的自重应力超出岩体的弹性极限, 深部岩体易发生塑性大变形和高烈度的动力破坏。

(3) 定义三: 超深部临界深度 H_{cr2} 应同时满足以下 2 个条件:

超深部临界深度 H_{cr2} 处, 岩体处于静水应力状态; 超深部临界深度 H_{cr2} 处, 岩体已处于全塑性状态, 应力状态满足岩体屈服强度准则。超临界深度 H_{cr2} 可表示为:

$$H_{cr2} = \max\{h_1, h_2\} = \begin{cases} h_1 & | K_1 = K_2 = 1 \\ h_2 & | \alpha I_1 + \sqrt{J_2 - k} = 0 \end{cases}$$

式中, K_2 为最小水平应力与自重应力的比值。

根据上述临界深度的定义, 在大红山铁矿 767 m 至 1301 m 的开采深度内, 在巷道掘进的扰动应力下, 巷道与硐室的围岩已经处于超过亚临界深度的状态, 但还没有达到临界深度的状态。当采深超过亚临界深度 H_{scr} 时, 开采扰动下围岩体已达到弹性极限, 岩体出现大变形并可能产生弱岩爆, 但围岩尚处于弹性阶段, 围岩结构是相对稳定的, 常规的巷道支护、动力灾害防治手段是有效的。当采深超过临界深度 H_{cr1} 时, 认为矿山进入了深部开采阶段, 此时高地应力水平和岩体中变形能高度集聚, 易导

致岩爆等动力灾害的频繁发生,同时将发生塑性流动失稳,传统的顶板控制与围岩支理论将不再适用,需要进行改进与探索。

2 岩爆规律与防治

2.1 岩爆倾向性评价结果

参考文献[4]结合大红山铁矿岩样的力学特性、岩石的埋藏深度以及巷道掘进后围岩应力扰动情况,采取弹性应变能储存指数法、强度脆性系数判别法、变形脆性系数判别法、最大主应力判别法以及切向应力准则法5个指标,得到岩爆倾向性综合评价结果(见表1)。

表1 岩爆倾向性综合评价结果

水平/m	大理岩	辉长辉绿岩	变钠质熔岩	片岩	磁铁矿
370	中	弱	中	中	中
280	中	弱	中	中	中
180	中	中	中	中	中
80	中	中	中	中	中
-40	中~强	中	中	强	强

综合预测结果表明:从370 m水平开始,5种岩石总体上具有中等岩爆倾向性,随着深度增加,辉长辉绿岩岩爆倾向性由弱转为中等,在最深-40 m水平,大理岩的岩爆倾向性趋于强烈,片岩和磁铁矿将达到强烈岩爆。

2.2 岩爆案例统计及规律分析

深部II₁矿组主矿体二期工程520万t/a进入了千米深井硬岩高地应力开采环境,最大开拓水平到达了一40 m,开拓深度达到了1301 m,最大原岩应力约为62 MPa,巷道与硐室的围岩已经处于超过亚临界深度的状态,二期工程面临较为严重的岩爆灾害。从2012年至2015年,在其开拓系统的施工过程中,施工人员多次经历了轻微至中等岩爆现象,据不完全统计,550万t/a二期工程开拓工程中历次发生的岩爆灾害(见表2),共发生轻微岩爆22起,中等岩爆8起,强烈岩爆0起,岩爆强弱程度的定义见表3,其中将近65%的岩爆现象是在0~-40 m水平发生的,初步显示了随着埋深的增加,岩爆的频次与强度也随之增加的规律。岩爆在巷道、硐室与竖井等各种工程类型中均有发生,在变钠质熔岩、辉长辉绿岩、大理岩与片岩等岩性中均有发生,岩爆的具体发生部位主要在巷道与硐室的顶板与边帮,岩爆最初发生时间一般是在巷道与硐室掘进放炮后当天至15 d之内,岩爆持续时间一般为几

十秒至15 d。

岩爆数量与埋深的规律关系见图2,将近65%的岩爆现象是在埋深1261~1301 m范围内发生的,岩爆数量随埋深的增加呈指数关系增加,说明在大红山铁矿基建过程中埋深与原岩应力是岩爆是否发生的最主要原因。

2.3 易爆岩层防护措施

岩爆防治措施的主要原则是根据岩性岩爆倾向性、节理构造与应力场等因素,及时查明岩爆危险的岩层,采取区域性的防范措施与局部性的解危措施^[29]。对于金属矿山来讲,区域性防范措施主要为采取合理的开拓布置与开采方式,例如巷道与大型硐室的轴向尽量与最大水平应力方向平行或小角度斜交。局部性解危措施主要包括岩体注水或浇水软化、爆破泄压、钻孔泄压、爆破主动诱发、支护加固等^[7]。

根据大红山铁矿岩层自身的岩爆倾向性、节理裂隙构造、无底柱分段崩落法采矿方法等特点,因地制宜地采取的易爆岩层的巷道与硐室的防护措施有:巷道与硐室掘进时采用光面爆破,减少对围岩整体性的破坏;对掘进后发生岩爆的巷道或硐室的围岩岩体进行浇水软化;对预期易爆岩层内的巷道与硐室进行支护加固。

2.3.1 光面爆破

在深部采区的二期工程基建中,对重要巷道与硐室的掘进,设计中要求采用光面爆破。采用光面爆破的作用是:减少对巷道与硐室围岩的爆破破坏,保护围岩体自身的强度,提高触发岩爆发生的应力极限;光面爆破后巷道与硐室表面不会形成坑坑洼洼的不规则形状,能较大程度地降低应力集中程度与范围,尽量避免达到岩爆发生的应力条件。

2.3.2 掘进过程中的浇水弱化

掘进后,若巷道或硐室掌子面等发生岩爆,则采取浇水软化的应对措施。岩石一般都具有浸水软化的特点,水通过岩石的孔隙、裂隙、节理、层理等弱面进入岩体内,经过物理化学作用,扩大了裂隙,溶解了部分矿物,增加了含水量,从而破坏了岩体的整体性,降低了岩体的强度,增加了岩体的塑性变形能力,降低了岩体集聚弹性应变能的能力,减弱了其发生岩爆的概率与程度。

但不同岩石之间浸水后岩体的软化程度差别较大,浸水软化只有达到一定程度后,才具有实用价值。

表2 大红山铁矿550万t/a二期工程开拓过程中的岩爆统计

年/月	埋深/地点	工程类型			岩爆部位			岩爆的强弱程度			岩爆最初发生时间与开挖时间的间隔	岩爆持续时间
		巷道	硐室	竖井	顶板	边坡	底板	轻微岩爆	中等岩爆	强烈岩爆		
2013/07	861 m/1-4溜井			√		√		√			2 d	20 d
2013/11	911 m/6#胶带	√				√		√			2 d	2 d
2012/03	921 m/4#进风井联道	√				√	√	√			1 d	10 d
2015/01	921 m/5-3溜井			√		√		√			2 d	20 d
2015/07	941 m/1#探矿穿脉	√				√		√		掘进爆破结束后,进行撬毛洒水后2~5 min		30 s
2015/07	961 m/2#、3#进路	√				√		√		掘进爆破结束后,进行撬毛洒水后2~5 min		30 s
2012/09	1081 m/东沿脉	√				√		√		10~15 h		2 d
2015/04	1081 m/1#卸载站		√			√			√	1 d		50 d
2015/06	1081 m/3#卸载站		√			√		√		1 d		7 d
2015/05	1081 m/废石溜井			√		√		√		1 d		7 d
2012/06	1221 m/大件道	√				√		√		3 d		15 d
2013/08	1261 m/变电硐室		√			√			√	开挖当天		15 d
2013/04	1261 m/回风联道	√				√		√		14 d		7 d
2013/08	1261 m/废石胶带斜井	√				√	√	√		16 d		5 d
2013/07	1261 m/回风联道绕道	√				√		√		8 d		2 d
2013/09	1261 m/废石破碎硐室		√			√	√		√	3 d		5 d
2013/12	1261 m/废石破碎硐室		√			√	√	√		5 d		4 d
2014/01	1261 m/停车线	√				√		√		4 d		3 d
2014/04	1261 m/盲竖井联道	√				√		√		19 d		6 d
2014/06	1261 m/7-1转运胶带	√				√		√		4 d		4 d
2014/07	1261 m/7-2转运胶带	√				√	√		√	3 d		5 d
2014/04	1261 m/转运胶带联道	√				√	√		√	2 d		3 d
2013/10	1301 m/大件道	√				√	√	√		15 d		7 d
2014/07	1301 m/水泵房	√				√			√	4 d		3 d
2014/08	1301 m/管子斜道	√				√			√	1 d		8 d
2014/09	1301 m/水仓联道	√				√		√		6 d		5 d
2014/09	1301 m/沉沙池	√				√		√		4 d		6 d
2014/10	1301 m/1#水仓	√				√			√	5 d		3 d
2014/10	1301 m/2#水仓	√				√		√		3 d		3 d
2014/11	1301 m/矿石破碎机基础		√			√		√		4 d		5 d

2.3.3 井巷支护加固措施

大红山铁矿岩爆倾向性的评价结果表明,对埋深在861~1221 m之间的巷道与硐室,若只在巷道掘进扰动应力条件下,则预期岩爆倾向性最大为中等岩爆,对于该深度范围内的巷道与硐室的岩爆防护,采用非让压锚杆+金属网+喷射混凝土的联合支护系统即可。对埋深在1261~1301 m之间、即0 m与-40 m水平的巷道与硐室,若只在巷道掘进扰动应力条件下,在大理岩、片岩与磁铁矿岩层中的巷道与硐室的最大岩爆程度可能为强烈岩爆,对于该深度范围内的巷道与硐室的岩爆防护,采用让压锚杆+金属网+喷射混凝土的联合支护系统。

大红山深部II₁矿组主矿体550万t/a二期工

程40 m水平巷道的典型支护设计见图3,喷射混凝土支护采用的水泥标号为C30,锚杆为20 mm砂浆锚杆,长度为2.5 m,锚杆排距与间距均为1 m。部分巷道采取的支护效果照片见图4。

随着深部II₁矿组主矿体550万t/a二期工程于2016年底投产,在深部开采过程中,由于开采扰动应力的叠加作用,将增加预期的岩爆倾向性程度,作业人员将会面临更加严重的岩爆与矿震等动力地压灾害的威胁,岩爆与矿震动力地压灾害轻则损失人员与设备、重则破坏采场作业面,更严重的则会使整个采场报废,因此,进一步开展在深部开采扰动应力条件下的岩爆与矿震防治工作将是矿山重要的地压研究课题。

表3 岩爆强弱程度的定义

岩爆强弱程度	分级依据
轻微岩爆	围岩表层无声响或不易察觉的微弱响声,劈裂的岩块自由下落或松弛后下落,表现为岩爆坑较浅,爆落岩片尺寸小,小于0.25 m,数量少,多为破裂剥落型,对施工影响小。
中等岩爆	爆裂脱落、剥离现象较严重,岩屑或岩块向临空面弹出,伴有清脆爆裂声,表现为岩爆坑连续分布,规模较大,坑径可达数米,坑深一般小于2 m,爆落岩片尺寸较大,一般大于0.25 m小于0.75 m,数量多,多为弹射型及破裂剥落型,对施工有一定影响。
强烈岩爆	岩爆时伴有巨响,具有锐利边缘的大小岩石碎片迅猛飞出,表现为岩爆坑连续分布,坑深一般都在2 m以上,爆落岩片尺寸大,一般大于1.5 m,数量多,且造成围岩大面积开裂失稳,严重威胁施工人员及设备安全,对正常施工及硐室安全影响大。
剧烈岩爆	剧烈的爆裂弹射甚至抛掷性破坏,有似炮弹巨响,岩爆具有突发性,并迅速向围岩深部发展,影响深度可大于2 m,严重影响甚至可以摧毁工程,严重的岩爆象小地震一样,可在100多公里之外测到,测到的最大震级为4.6级。

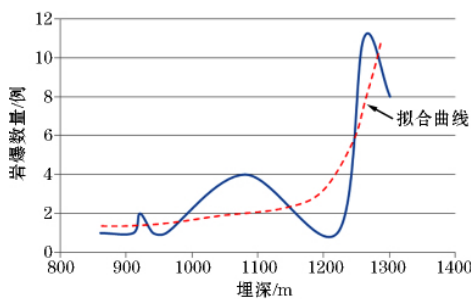


图2 岩爆数量与埋深的关系

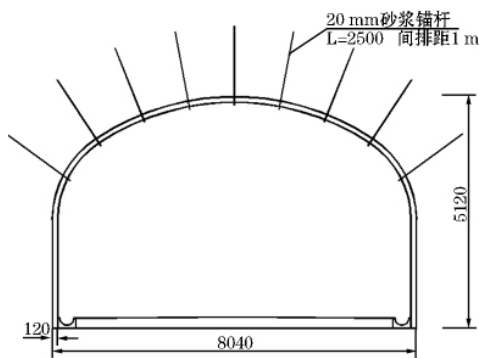


图3 典型巷道(硐室)支护设计/mm

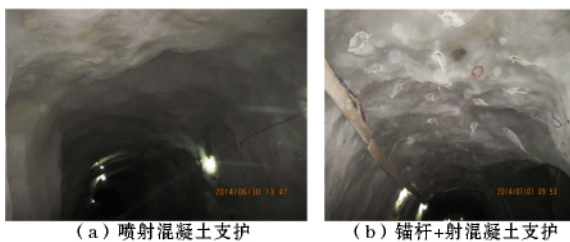


图4 深部二期工程部分开拓巷道支护效果

3 结论

(1) 大红山铁矿千米深井深部高应力特性:在767~1301 m的开采深度内,在巷道掘进的扰动应力下,巷道与硐室的围岩已经处于超过亚临界深度的状态,但还没有达到临界深度的状态,常规的巷道支护、动力灾害防治手段是有效的。

(2) 岩爆倾向性综合预测结果表明:深部采区岩体总体上具有中等岩爆倾向性。在最深—40 m水平,大理岩、片岩和磁铁矿的岩爆倾向性趋于强烈。

(3) 深部 II₁ 矿组主矿体二期工程基建过程中共发生轻微岩爆 22 起,中等岩爆 8 起,强烈岩爆 0 起,其中将近 65% 的岩爆现象是在埋深 1261~1301 m 范围内发生的,岩爆数量随埋深的增加呈指数关系增加,说明在大红山铁矿埋深与原岩应力是岩爆是否发生的最主要原因。

(4) 因地制宜采取的易爆岩层的巷道与硐室的防护措施有:巷道与硐室掘进时采用光面爆破,减少对围岩整体性的破坏,能较大幅度地降低应力集中程度与范围,避免达到岩爆发生的应力条件;对掘进后发生岩爆的巷道或硐室的围岩岩体进行浇水软化;对预期易爆岩层内的巷道与硐室进行支护加固,预期岩爆为中等岩爆,采用非让压锚杆+金属网+喷射混凝土的联合支护系统,预期岩爆程度为强烈岩爆时,采用让压锚杆+金属网+喷射混凝土的联合支护系统。

(5) 在深部开采过程中,由于开采扰动应力的叠加作用,将增加预期的岩爆倾向性程度,作业人员将会面临更加严重的岩爆与矿震等动力地压灾害的威胁,建议建立微震监测系统对岩爆前兆信息进行监测预警,以提高矿山的安全生产保障水平。

参考文献:

- [1] 李庶林,冯夏庭,王泳嘉,等.深井硬岩岩爆倾向性评价[J].东北大学学报,2001,22(1):60-63.
- [2] 李庶林.岩爆倾向性的动态破坏实验研究[J].辽宁工程技术大学学报,2001,20(4):436-438.
- [3] 黄玉仁,毛建喜,林朝阳,等.深埋长大隧道岩爆倾向性多指标评价[J].铁道工程学报,2014,31(7):89-94.
- [4] 黄波,李庶林,高真平,等.大红山铁矿深井大规模开采岩爆综合评价[J].金属矿山,2016(05):19-25.
- [5] 唐绍辉,吴壮军,陈向华.地下深井矿山岩爆发生规律及形成机理研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(8):1250-1254.
- [6] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究与探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.

(下转第 63 页)

斗面积等较难确定的参数。

(4) 本方法适用于含水层厚度较大、动流量有限、储量巨大的矿区。

参考文献:

- [1] 虎维岳,闫 丽.对矿井涌水量预测问题的分析与思考[J].煤炭科学技术,2016,44(1):13-18.
- [2] 吴振林,马永庆.矿山水害防治理论与方法[M].吉林:吉林科学技术出版社,2010.
- [3] 陈韶知,刘树才,杨国勇.矿井涌水量预测方法的发展[J].工

程地球物理学报,2009,6(1):68-72.

- [4] 郭德岭.矿井涌水量计算方法综述[J].大科技,2015(6).
- [5] 供水水文地质手册编写组.供水水文地质手册[M].北京:地质出版社,1983.
- [6] 宁黎元,熊舒宁.数值模拟查明地下水系统隐伏边界位置及其性质方法探讨[J].贵州地质,2012,29(1):48-51.

(收稿日期:2017-04-20)

作者简介:赵 鹏(1983—),男,云南巧家县人,工程师,主要从事矿山水文地质及其防治水工作,Email:85368698@qq.com。

(上接第 32 页)

- [7] 赵本钧,滕学军.冲击地压及其防治[M].北京:煤炭工业出版社,1994.
- [8] 窦林名,何学秋.冲击地压防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001.
- [9] W. D. Ortlepp. Rock Fracture and Rockbursts[C]//The South African Institute of Mining and Metallurgy Johannesburg,1997.
- [10] 陈 颢,等.分形与混沌在地球科学中的应用[M].北京:学术期刊出版社,1989.
- [11] 中国科协学会学术部.岩爆机理探索[M].北京:中国科学技术出版社,2011.
- [12] 张晓春.矿山岩爆机理与防治实践[M].南京:东南大学出版社,2010.
- [13] 陈卫忠,吕森鹏,郭小红,等.基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1530-1540.
- [14] 张艳博,李海洋,姚旭龙,等.不同应力环境下巷道开挖卸荷岩爆模拟实验研究[J].中国矿业,2017(01):72-76,97.
- [15] 刘树新,鲁思佐,陈 阳.基于多重判据的某深部矿区岩爆倾向性研究[J].矿业研究与开发,2017,37(02):9-12.
- [16] 张晓君,林芊君,李海洲,等.基于超声波平测的巷(隧)道岩爆破裂演化试验研究[J].矿业研究与开发,2016,36(12):75-79.
- [17] 林芊君,张晓君,李海洲,等.基于真三轴加卸载试验的岩爆孕育演化数值模拟[J].矿业研究与开发,2016,36(06):90-93.
- [18] 于光远,张艳博,梁 鹏,等.不同侧压条件下花岗岩巷道岩爆声发射特征实验研究[J].中国矿业,2016(05):82-86.
- [19] 杨志国,王鹏飞.深井大规模矿床开采岩爆控制策略研究[J].中国矿业,2015(S1):311-314.
- [20] D. R. McCreath, P. K. Kaiser. Evaluation of Current Sup-

port Practices in Burst-prone Ground and Preliminary Guidelines for Canadian Hardrock Mines [C]//Balkema, Rotterdam; Rock Support in Mining and Underground Construction,1992.

- [21] Yaokun Wu, Wanbin Zhang. Evaluation of the Bursting Proneness of Coal by Means of its Failure Duration[C]//Balkema, Rotterdam; Rockbursts and Seismicity in Mines, 1997.
- [22] W. D. Ortlepp. Invited Lecture: the Design of Support for the Containment of Rockburst Damage in Tunnels-an Engineering Approach[C]//Balkema, Rotterdam; Rock Support in Mining and Underground Construction,1992.
- [23] P. K. Kaiser. Keynote Address: Support of Tunnels in Burst-prone Ground-Toward a Rational Design Methodology[C]//Balkema, Rotterdam; Rockbursts and Seismicity in Mines, 1993.
- [24] S. P. Singh. Chrmical Destressing to Alleviate Rockbursts [C]//West Virginia Univesty; Roc. 6th. Int. Conf. on Ground Contr. in Mining,1987.
- [25] 徐 刚,胡静云,李庶林.特大采空区侧上方采矿地压安全综合研究[J].矿业研究与开发,2016,36(10):109-115.
- [26] 徐士申.大红山铁矿露天地下联合开采衔接地压问题研究[J].矿业研究与开发,2016,36(02):32-38.
- [27] 包继锋,周富诚.大红山铁矿地表塌陷区综合治理方案研究[J].现代矿业,2016(02):135-137,146.
- [28] 徐士申.大红山铁矿工程地质灾害综合防治措施研究[J].矿业研究与开发,2016,36(01):99-105.
- [29] P. K. 凯 瑟, D. D. 坦南特, D. R. 麦克里思.易爆岩层中的平巷支护[J].国外金属矿山,1996(12):18-28.

(收稿日期:2017-02-16)

作者简介:张 涛(1979—),女,云南昭通人,工程师,主要从事采矿技术管理工作,Email:58670634@qq.com。