

深层超深层硬脆性地层岩爆倾向性判别方法研究

于海洋¹, 陈军海^{2,3*}, 李丹丹^{2,3}, 易浩¹, 曾义金^{2,3}, 李鑫^{2,3}

1 中国石化西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011

2 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206

3 中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206

* 通信作者, chenjh.sripe@sinopec.com

收稿日期: 2020-12-11

国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U19B6003-05)、中国石化重点实验室项目(KL20036)和中国石化基础前瞻项目(P21074-1)联合资助

摘要 在四川、新疆等地区深井、超深井钻井过程中, 硬脆性地层易发生持续崩落掉块, 导致频繁卡钻。基于传统井壁失稳理论, 现场主要采用逐步提高钻井液密度的方式应对该复杂难题, 但效果并不理想, 一些深度超过 7000 m 的重点油气井在提高钻井液密度后, 井壁崩落掉块现象不但没有减缓, 反而会瞬时垮塌而填埋钻具, 很多井只能侧钻, 甚至还有一些井并眼报废。由于缺乏理论支撑, 硬脆性地层井壁崩落掉块难题一直无法有效防控, 成为了制约深井超深井的钻井关键难题之一。本文基于硬脆性地层井壁崩落掉块现象与隧道开挖等工程中的岩爆情况相似, 聚焦灰岩、白云岩、页岩等井壁崩落掉块较为频繁的硬脆性地层, 通过开展大量单轴压缩及抗拉岩石力学实验, 结合单轴压缩实验中岩石的破坏形态、破碎程度、声响等直观情况, 基于岩爆理论, 将该类地层分成了弱岩爆、中等岩爆、强岩爆 3 个岩爆倾向等级, 并采用强度脆性指数 R 和弹性能量指数 W 进行了综合分析, 建立了基于岩石单轴抗压强度的强度脆性指数 R 和弹性能量指数 W 求取模型, 确定了判别岩爆倾向等级的 R 及 W 区间值, 提出了一套深井超深井钻井中硬脆性地层岩爆倾向性及分级综合判别方法。研究表明, 本文研究的 3 种岩性的岩爆倾向性顺序为: 白云岩 > 灰岩 > 页岩, 与现场井壁崩落掉块难易程度及现象一致, 验证了本文硬脆性地层岩爆倾向性及分级综合判别方法的合理性, 为基于硬脆性地层分类的井壁失稳防控理论方法研究提供了坚实铺垫。

关键词 深井超深井; 硬脆性地层; 岩爆; 表征指数; 分级

Study of a rock burst tendency identification method in deep and ultra-deep hard/brittle formations

YU Haiyang¹, CHEN Junhai^{2,3}, LI Dandan^{2,3}, YI Hao¹, ZENG Yijin^{2,3}, LI Xin^{2,3}

1 Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi 830011, China

2 State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China

3 Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 102206, China

Abstract During the drilling of deep wells and ultra-deep wells in Sichuan and Xinjiang, hard and brittle formations are prone to continuous crumbling and falling blocks, resulting in frequent drill jams. Based on the traditional well destabilization theory,

引用格式: 于海洋, 陈军海, 李丹丹, 易浩, 曾义金, 李鑫. 深层超深层硬脆性地层岩爆倾向性判别方法研究. 石油科学通报, 2021, 03: 441-450
YU Haiyang, CHEN Junhai, LI Dandan, YI Hao, ZENG Yijin, LI Xin. Study of a rock burst tendency identification method in deep and ultra-deep hard/brittle formations. Petroleum Science Bulletin, 2021, 03: 441-450. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.035

these complex problems were mainly tackled by gradually increasing the drilling fluid density in the field, but the results were not satisfactory. Some key oil and gas wells with a depth of more than 7,000 m, after increasing the drilling fluid density, the well wall crumbling and falling blocks not only did not slow down, but instantly collapsed burying the drilling tools. Many wells can only be drilled sideways, and there are even some boreholes scrapped. Due to the lack of theoretical support, the problem of crumbling and falling blocks in hard and brittle formations has been unable to be effectively prevented and controlled, and has become one of the key drilling problems that restrict the drilling of deep and ultra-deep wells. Based on the similarity between the phenomenon of crumbling and falling blocks in hard and brittle formations and rock burst in tunneling and other projects, this paper focuses on the hard and brittle formations such as limestone, dolomite, and shale, where well wall crumbling and falling blocks are more frequent. In this paper, rock mechanics experiments such as rock compression and tensile strength are carried out systematically. Through the comparative analysis of the shape of falling blocks during the drilling process and the rock failure shape in rock mechanics experiments, the related phenomena are explained by the rock burst theory, and the rock burst behavior is classified. Based on rock burst theory, rock burst is divided into three categories: weak, medium, and strong. And a comprehensive analysis was conducted using the strength brittleness index R and the elastic energy index W . The calculation models of the strength brittleness index R and the elastic energy index W based on uniaxial compressive rock strength are established, and the interval values of R and W for rock burst identification are also determined. A set of comprehensive identification methods for rock burst tendency and classification of surrounding rocks in hard and brittle formations during the drilling of deep wells is proposed. This paper shows that the order of rock burst propensity of the three studied lithologies is: dolomite > limestone > shale, which is consistent with the severity and phenomenon of crumbling blocks in the well wall, verifying the reasonableness of this paper on rock burst propensity of hard and brittle formations and the graded comprehensive discrimination method, providing a solid background for the study of theoretical methods of well wall instability prevention and control based on the classification of hard and brittle formations.

Keywords deep and ultra-deep wells; hard/brittle formations; rock burst; characterization index; classification

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.035

四川、新疆等地区深井超深井钻井中, 硬脆性地层井壁围岩崩落掉块频繁, 造成钻井阻卡严重, 更是存在井壁瞬时大量掉块埋钻具现象, 已使多口超7000 m的重点井多次侧钻或井眼报废, 成为了制约深层超深层油气钻探的关键难题之一。传统井壁失稳理论主要考虑岩石强度、岩石组构特征、地应力等关键因素, 分析得到维持井壁稳定的坍塌压力, 据此设计钻井液性能与密度^[1-5], 硬脆性地层岩石普遍具有强度高、水敏性弱等特征, 传统井壁失稳理论分析该类地层井壁稳定性较好, 使得设计的钻井液密度较低, 无法平衡井壁坍塌压力, 造成该类地层钻开后井壁围岩持续崩落掉块, 现场只能依靠经验提高钻井液密度, 并不能有效解决井壁围岩掉块, 甚至会因钻井液密度过高加剧掉块或引起地层破裂漏失。笔者针对井壁崩落掉块最为频繁的灰岩、白云岩、页岩等硬脆性地层开展岩石力学实验时发现, 岩石破坏时存在瞬间爆裂、体积破碎、岩块呈不规则裂开等现象, 并伴有不同程度的响声, 类似于矿山开采、隧道开挖等工程中的岩爆现象, 说明该类地层具有岩爆倾向, 将地层此种特征考虑到井壁失稳研究中至关重要。

岩爆是在高地应力条件下, 隧道、矿山等地下工程开挖过程中硬脆性围岩因开挖卸荷导致应力重新分布, 从而使储存于岩体中的弹性应变能突然释放, 产

生爆裂、松脱、颗粒弹射甚至抛掷等破坏现象的一种动力灾害^[6]。国内外学者针对地下工程开挖岩爆问题进行了比较系统研究, 从强度理论、能量理论、冲击倾向性理论和时间相关性理论等方面揭示了岩爆发生机理^[6-9], 根据岩爆时岩体破坏变形程度给出了岩爆烈度分级^[10-13]。从岩性角度给出了强度脆性指数、弹性能量指数、岩爆能量比法等十余种评价岩爆倾向性方法^[14-24], 其中, 强度脆性指数 R 与弹性能量指数 W 最为常用, 并且针对浅部地层工程开挖中的砂岩、灰岩、花岗岩、大理岩等岩性给出了岩爆倾向性定量评价准则, 一般认为 $R < 10$ 时无岩爆, $10 \leq R < 18$ 为中等程度岩爆, $R \geq 18$ 为强烈岩爆; $W < 2$ 时无岩爆, $2 \leq W < 5$ 为中等程度岩爆, $W \geq 5$ 为强烈岩爆^[25]。但石油钻井的地层埋藏深, 岩性、岩石力学特征及应力条件等地层环境更加复杂, 有必要基于隧道、矿山等地下工程开挖岩爆理论, 开展深层超深层硬脆性地层的岩爆行为及倾向性判别方法研究, 针对该类地层进行合理分类, 进而指导深井超深井钻井中硬脆性地层井壁失稳机制及防控理论方法研究。

本文基于岩爆理论, 聚焦井壁崩落掉块最为频繁的灰岩、白云岩、页岩等硬脆性地层, 系统开展了岩石压缩和抗拉岩石力学实验, 通过对比分析岩石力学实验中岩石破坏形态及特征, 进行了岩爆烈度分类,

并采用岩石强度脆性指数 R 和弹性能量指数 W 进行了岩爆倾向性综合分析，建立了 R 和 W 与岩石单轴抗压强度间的对应关系，找出了基于 R 和 W 的岩爆倾向性定量评价准则，提出了一套深井超深井钻井中硬脆性地层的井壁围岩岩爆倾向性及分级判别方法。

1 岩爆烈度分级及倾向性判断模型

1.1 岩爆烈度分级

对于矿山开采、隧道开挖等工程，岩爆烈度是岩石爆破对地下洞室、矿山坑道或矿体本身产生的直接破坏，以及由此诱发的其他矿区、地面建筑等间接破坏。对于石油钻井，硬脆性地层井壁围岩岩爆则是产生岩石崩落掉块、井壁垮塌等不同程度的井下复杂情况，进而给钻井带来阻卡、埋钻具、井眼报废等不同严重程度的复杂事故。因此，需要进行岩爆烈度分级，以支撑井下复杂及事故的判别。

岩爆烈度分级是描述岩爆强烈程度与破坏规模的指标，通常简称为岩爆分级，岩爆分级主要侧重于实际的表现现象，即根据岩爆发生时岩体爆裂面的形态特征、破坏程度、声学特征等方面进行分级。岩爆烈度一般分为 3 级：(1) 轻微岩爆活动：岩石有松脱和破裂，有微弱发自岩石的声音。(2) 中等程度的岩爆活动：有不容忽视的岩石脱落、抛射，块度较大，并伴随有明显爆裂声。(3) 严重的岩爆活动：岩石瞬时发生严重崩落，崩落岩石多为小块体与小岩片，具有强烈爆裂声，声响剧烈。

1.2 岩爆倾向性判断模型

除了基于岩爆表现现象进行岩爆行为定性判别及分级外，还可以通过能量理论来定量判断岩爆倾向性，进而实现科学有效的岩爆分级。能量理论认为岩爆发生需满足 2 个条件：一是能量条件，岩石破坏时释放的能量除满足破坏需要外，有剩余的能量使岩石发生剥离或弹射；二是强度条件，岩石所处的应力水平较高，能够使岩石发生破坏。但能量理论对岩性及岩石结构特征等条件描述并不充分，工程实践表明岩爆通常发生在结构完整的硬脆性地层中。综合能量理论和工程实践，选取岩石弹性能量指数、强度脆性指数两项指标用于岩爆评价。

(1) 弹性能量指数 W

弹性能量指数 W 是 Neyman 于 1972 年根据煤矿问题提出来的^[26]，由于其概念明确、方法简单，国内外

学者在岩爆倾向性判断中应用较多。如图 1，将样品单轴加载到其抗压强度 S_c 的 70%~80%，然后卸载到抗压强度的 5%，卸载所释放的弹性应变能为 ϕ_{sp} ，耗散的弹性应变能为 ϕ_{st} ，二者的比值即为弹性能量指数 W 。

$$W = \frac{\phi_{sp}}{\phi_{st}} \quad (1)$$

弹性能量指数也称为冲击倾向指数，其值越大，破坏时释放的能量越大。岩石的积累弹性应变能是岩爆发生的主要内部因素，从能量学观点考虑，岩爆过程是围岩积聚弹性应变能的释放过程，聚集的能量越多，发生岩爆时释放的能量就越大，岩爆烈度就越强，而弹性应变能的聚集能力可采用弹性应变能指数定量判定。

(2) 岩石强度脆性指数 R

由于岩爆通常发生在脆性岩石中，岩爆发生不仅与岩石的单轴抗压强度有关，也与岩石抗拉强度关系密切，因此，根据岩石的单轴抗压强度 S_c 和抗拉强度 S_t 的比值，评价岩石的岩爆倾向性。

$$R = \frac{S_c}{S_t} \quad (2)$$

式中， S_c ——岩石单轴抗压强度，MPa； S_t ——岩石抗拉强度，MPa。

一般来说， R 越大说明岩石的脆性越大，则岩爆发生的倾向性越大。

岩石弹性能量指数 W 反映能量条件，岩石强度脆性指数 R 反映岩性及强度条件，两项指标相互独立、

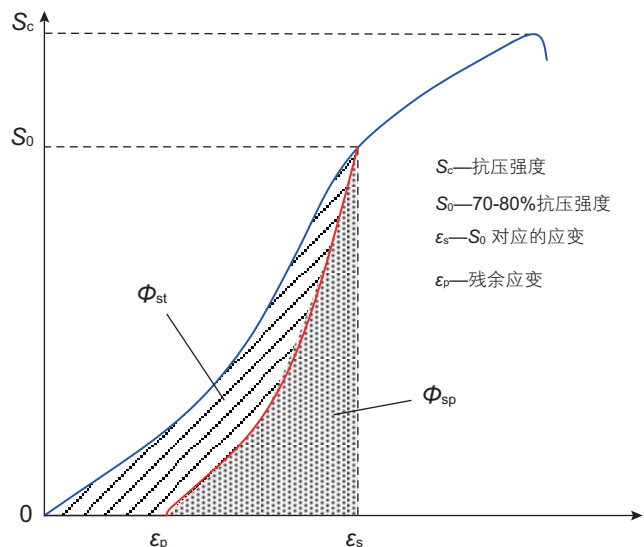


图 1 弹性能量计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of elastic energy calculation

互为补充,综合两者可以对岩爆发生的可能性进行较为全面的描述。

2 实验方案及结果分析

2.1 实验方案

为了研究深井超深井硬脆性地层井壁围岩岩爆行为特征,实验选取了中国南方龙马溪组、临湘组、洗象池群等层位的不同埋深的页岩、灰岩、白云岩,取心深度为2032.15 m~7299.23 m,系统开展岩石单轴压缩及抗拉岩石力学实验,均采用国际岩石力学学会实验推荐标准方法。岩石单轴压缩实验采用 $\Phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 标准试样,岩样端面平整度控制在0.02 mm以内;抗拉实验采用直径为 $25\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ 圆柱,厚度切割为直径的0.25~0.75倍。

岩石单轴压缩实验采用美国TerraTek公司岩石力学三轴应力测试系统,轴向加载方式采用应变加载控制,加载速率为 10^{-6} mm/s ,测试时全程监测轴向和径

向应变。抗拉强度实验采用美国TerraTek公司巴西劈裂仪,加载速率为0.035~0.05 MPa/s。

2.2 实验结果分析

本次研究针对不同深度的页岩、灰岩及白云岩开展了41组单轴抗压及抗拉实验,实验结果如表1所示。根据岩样破裂后的形态及破裂时响声,对岩爆剧烈程度进行直观分成3种类型:弱岩爆、中等岩爆、强岩爆,并统计在表1中。

(1) 弱岩爆

岩爆形态表现为岩石破裂形成多条裂缝,多沿弱面结构破碎,岩样主体结构依然完整,常伴有微弱破裂声音,如图2(a)所示。

(2) 中等岩爆

岩爆形态表现为岩石破裂形成大尺寸块体断裂,断口锋利,呈现典型的断裂特征,并伴有明显的破碎爆裂声音,如图2(b)所示。

(3) 强岩爆

岩爆形态表现为块体由片状逐渐过渡为不规则块

表1 岩石力学实验结果

Table 1 Results of rock mechanics experiments

序号	岩样编号	深度/m	岩性	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	岩爆程度	序号	岩样编号	深度/m	岩性	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	岩爆程度
1	py1-1	2032.15	白云岩	75.16	9.12	强	22	jy11-2	4189.47	灰岩	48.10	7.77	中
2	dy1-1	2057.75	灰岩	78.44	12.78	中	23	dys1-9	4191.58	页岩	56.21	11.47	弱
3	py1-2	2106.52	页岩	100.39	5.77	强	24	dys1-1	4191.62	灰岩	106.67	14.17	强
4	py1-3	2153.15	页岩	113.76	7.96	强	25	dys1-2	4198.17	白云岩	100.07	9.31	强
5	zhy1-1	2158.27	白云岩	42.32	7.11	弱	26	dys1-3	4219.40	灰岩	101.26	15.55	中
6	zhy1-2	2165.78	页岩	43.47	8.05	弱	27	dys1-4	4219.45	白云岩	136.62	17.86	强
7	zhy1-3	2170.91	灰岩	70.28	8.89	强	28	dys1-5	4219.49	白云岩	177.04	18.30	强
8	zhy1-4	2175.81	页岩	58.28	7.93	中	29	dys1-6	4219.53	页岩	201.02	18.48	强
9	zhy1-5	2178.30	页岩	13.87	12.38	弱	30	dys1-7	4223.89	灰岩	175.74	18.15	强
10	zhy1-5	2179.14	页岩	41.45	6.93	弱	31	dys1-8	4228.85	页岩	77.11	10.59	中
11	zy1-1	2185.64	灰岩	39.02	9.86	弱	32	ls2-1	4357.02	灰岩	67.09	7.38	强
12	zy1-2	2185.72	页岩	49.33	9.79	弱	33	ny1-1	4413.43	灰岩	146.81	12.76	强
13	zy1-3	2185.76	页岩	61.92	9.93	中	34	ps1-1	5954.79	页岩	39.28	11.06	弱
14	zy1-4	2185.81	白云岩	65.99	10.27	中	35	ps1-2	5958.40	灰岩	33.68	5.65	弱
15	dy3-1	2274.30	白云岩	78.07	12.12	中	36	ps1-3	5958.40	白云岩	49.14	6.81	中
16	zy1-5	3173.45	页岩	101.03	13.78	中	37	ps1-4	5964.00	页岩	40.48	10.42	弱
17	dy4-1	3731.66	白云岩	114.32	10.88	强	38	ps1-5	5964.11	页岩	48.80	10.22	弱
18	dy5-1	3819.62	白云岩	90.51	12.12	中	39	ps1-6	5967.77	灰岩	48.01	10.17	弱
19	yy1-1	3879.69	灰岩	123.12	14.18	强	40	ms1-1	7120.50	页岩	102.85	24.10	弱
20	yb10-1	3960.50	页岩	43.99	9.39	弱	41	ms1-2	7299.23	灰岩	148.21	21.94	中
21	jy11-1	4188.44	灰岩	36.69	7.65	弱							

体，在较小的应变下突然崩裂为较小块体群体，岩样主体呈现典型的碎裂型态，常伴有强烈的破碎爆裂声音，如图 2(c)所示。

通过应力—应变曲线进行分析，发现岩爆程度与

全应力—应变具有一定的关联性，具体表现为：(1) 对于不发生或发生弱岩爆岩样，在达到单轴抗压强度之后，岩样通过体积变形持续吸收轴压能量，体现在应力—应变曲线上为应力缓慢降低，轴向及径向应变扩

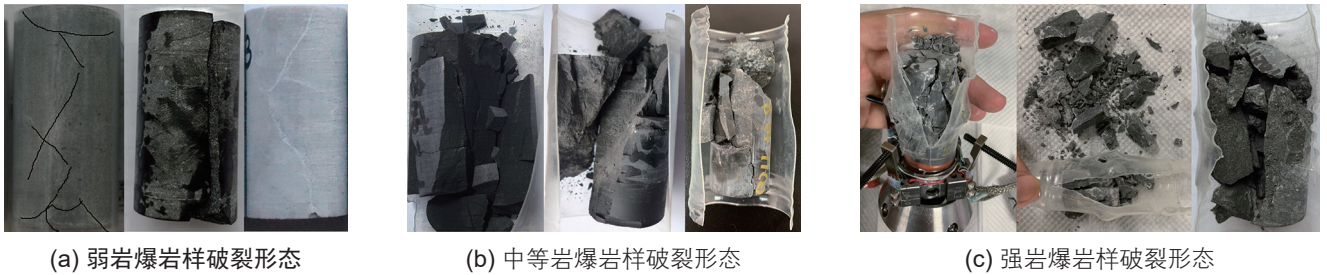


图 2 岩石单轴压缩实验呈现的不同岩爆剧烈程度表现形态

Fig. 2 The different fracture pattern of rock burst intensities in uniaxial compression test

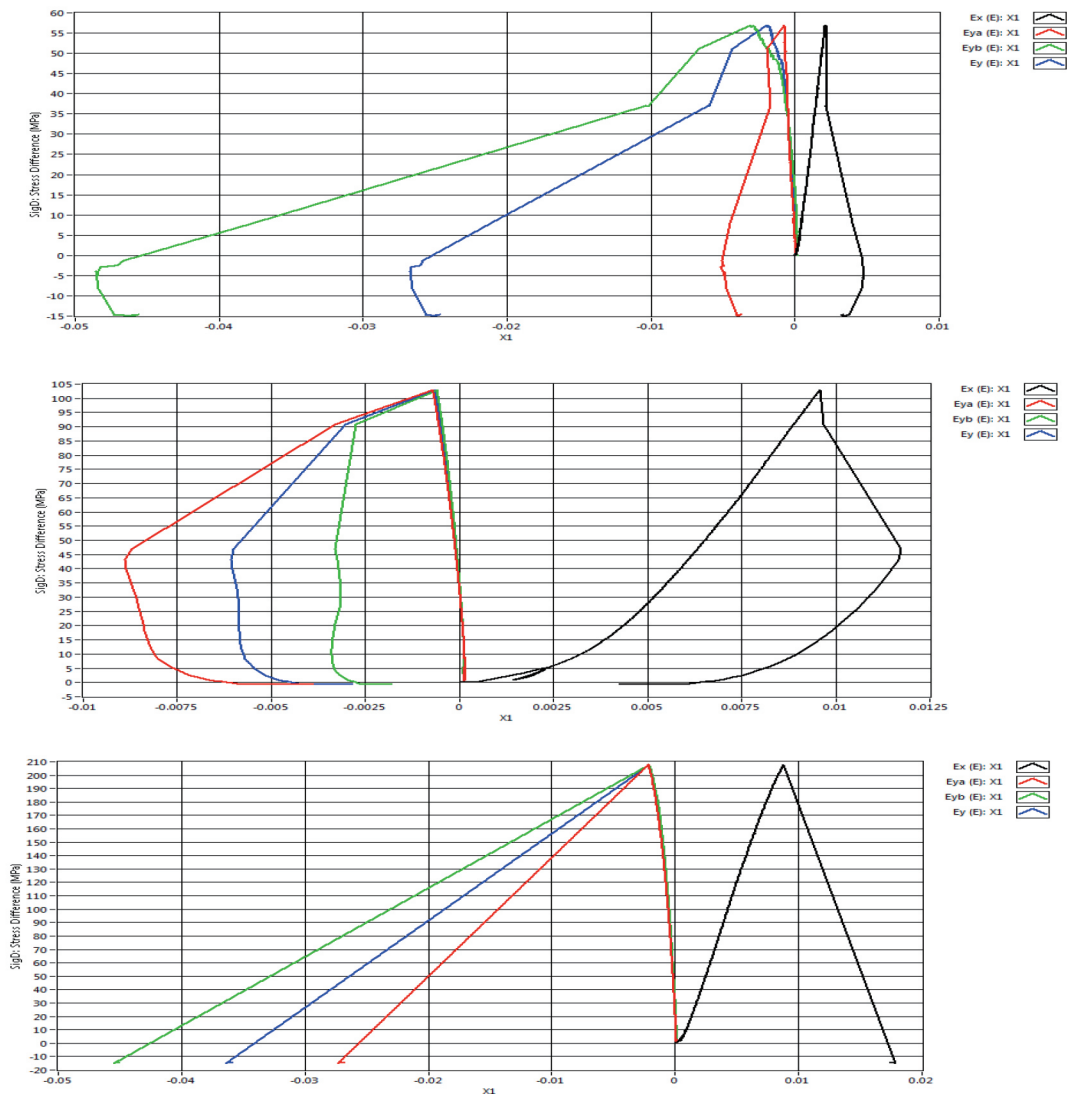


图 3 不同等级岩爆应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of different rock burst grades

大明显, 应力—应变曲线平滑下降, 最终达到稳态的残余应力, 如图 3(a)所示; (2) 对于中等岩爆岩样, 应力—应变曲线在达到单轴抗压强度之后, 曲线有明显的跌落, 跌落值在 20%~60%之间不等, 但由于岩样主体结构保持完整, 仍具有一定吸收轴向应力的能力, 应力—应变曲线在瞬间跌落后有小幅上升, 并最终能够达到稳态的残余应力, 如图 3(b)所示; (3) 对于发生强岩爆岩样, 随着轴压的增加, 岩石不进入塑性屈服阶段, 由弹性阶段直接达到单轴抗压强度, 岩石迅速崩裂, 应力—应变曲线瞬间跌落, 很多时候会跌落至零点, 岩样无法通过扩容吸收多余能量, 持续增加轴压, 应力—应变曲线不再增长, 如图 3(c)所示。

3 岩爆倾向性综合分析

3.1 岩爆倾向表征指数分析

(1) 弹性能量指数

根据实验结果绘制不同井深的岩样岩爆等级与岩石弹性能量指数关系散点图, 如图 4 所示虽然数据分布具有一定的离散性, 但弹性能量指数 W 一定程度反映了岩爆的发生倾向, 总体而言: (1) $W < 2$ 为弱岩爆; (2) $2 \leq W < 3.7$ 为中等岩爆; (3) $W \geq 3.7$ 为强岩爆。

对于处于线弹性状态下的岩体来说, 外力所作的功与岩体内部所存储的弹性能基本相等, 耗散能近似于 0。而在岩石(峰后)破坏过程中, 岩体内弹性能的增加会低于外力所作的功, 因而耗散能大于 0。耗散能的一部分消耗于岩石内部损伤的发展, 其余部分则转化为岩体的声能、热能及动能等形式, 这种声能及

动能的能量形式与工程中的岩爆现象是相关的, 因此, 耗散能的幅值越高, 则可能发展为岩体动力破坏的能量就越多, 岩爆的可能性也就越高。但考虑到岩石破裂岩储能能力不同(多与岩石抗压强度与历史所受围压性能相关), 且岩爆发生时所需能量不同, 另外, 受岩石非均质性的影响, 岩石单轴压缩实验应力—应变曲线也会存在差异性, 弹性能量指数 W 计算要求高, 因此, 通过弹性能量指数判断岩爆发生倾向具有一定的局限性。

(2) 强度脆性指数

根据岩石的抗压及抗拉强度计算得到岩石强度脆性指数 R , 图 5 为不同井深的岩样岩爆程度与岩石强度脆性指标关系散点图, 可以看出 R 值越大, 岩石脆性越大, 破坏过程中释放的能量和岩爆发生的趋势都更大。具体分级: (1) $R < 6$ 对应于弱岩爆, 应力降特征明显, 多为深部纵裂爆破能量释放所致; (2) $6 \leq R < 7.5$ 对应于中等岩爆, 拉伸破坏和剪切破坏导致大颗粒不规则块体和岩石碎块锐利破裂; (3) $R \geq 7.5$ 对应于强岩爆, 拉伸破坏和剪切破坏共同作用, 在小应变下突然破裂成相对较小的岩块颗粒群。

因此, 在地应力、地质构造等其他条件一致时, 岩石的脆性强度指标越高, 岩石的脆性越强, 越容易发生岩爆; 利用岩石的单轴抗压强度和抗拉强度的比值, 能够较好的评价岩石的岩爆倾向性。

3.2 岩爆倾向性综合分析

在深/超深井硬脆性地层中, 井壁围岩力学特征是影响岩爆发生的基本条件, 特别是岩石的抗压强度, 而且岩石单轴抗压强度是比较容易获取的一个岩石力

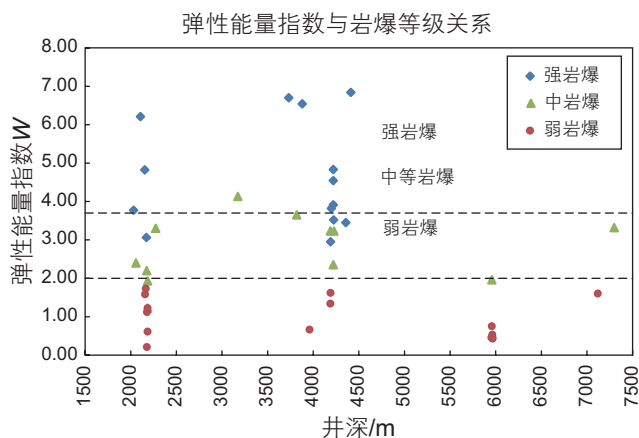


图 4 弹性能量指数与岩爆等级关系分布图

Fig. 4 Distribution diagram of the relationship between elastic energy index and rock burst degree

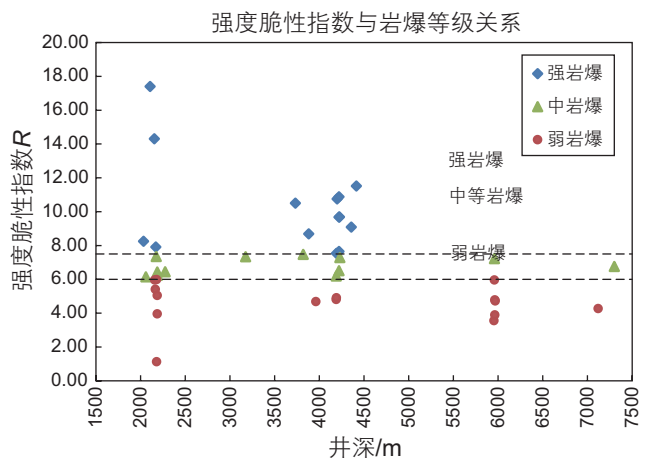


图 5 岩石强度脆性指数与岩爆等级关系分布图

Fig. 5 Distribution diagram of the relationship between rock strength brittleness index and rock burst degree

学参数，因此，可以建立弹性能量指数、强度脆性指数与岩石单轴抗压强度间的关系，有利于达到岩爆倾向性定量分析的目的。同样，进一步探索弹性能量指数与强度脆性指数交互关系、不同岩性岩石的岩爆倾向性，可以促进深井超深井硬脆性地层并壁围岩岩爆倾向性判别方法建立。

(1) 岩石弹性能量指数与单轴抗压强度交互关系分析

利用岩石力学实验结果绘制了岩石弹性能量指数 W 与单轴抗压强度 S_c 间交互关系图版(见图 6)，通过回归得到了弹性能量指数与单轴抗压强度间的关系模型：

$$W = 0.6333e^{0.0143S_c} \quad (3)$$

式中， S_c ——岩石单轴抗压强度，MPa。

从图 6 可以看出，该关系式对弱岩爆的符合率较高，但中等岩爆及强岩爆的定量分析具有误差较大。

(2) 岩石强度脆性指数与单轴抗压强度交互关系分析

图 7 是绘制的岩石强度脆性指数 R 与单轴抗压强度 S_c 交互图版，可以看出岩石强度脆性指数与单轴抗压强度呈正相关关系：

$$R = 0.4457S_c^{0.6319} \quad (4)$$

式中， S_c ——岩石单轴抗压强度，MPa。

可以看出，岩石的单轴抗压强度越高，其储能性质越好，强度脆性指数越高，可能发生的岩爆程度越高。整体而言，该模型对于弱岩爆、中等岩爆具有较好的符合率，对于强岩爆则误差较大。

(3) 岩石强度脆性指数与弹性能量指数交互关系分析

进一步探索了岩石强度脆性指数 R 与弹性能量指

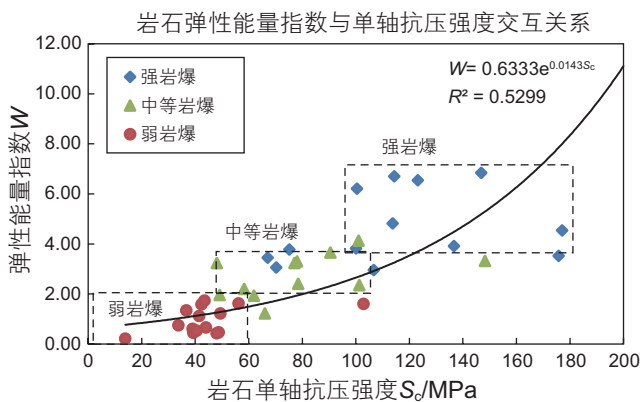


图 6 岩石弹性能量指数与单轴抗压强度交互关系
Fig. 6 The relationship between rock elastic energy index and uniaxial compressive strength

数 W 交互关系，图 8 为绘制二者之间的交互图版，强度脆性指数 R 与弹性能量指数 W 存在如下关系。

$$R = 3.852e^{0.1952W} \quad (5)$$

从图 8 可以看出，强度脆性指数 R 与弹性能量指数 W 交互关系可以更好的定量分析岩爆倾向性及进行岩爆分级，对于弱岩爆、中等岩爆、强岩爆均具有较好的符合性。

(4) 3 种岩性岩石的岩爆倾向性分析

绘制了白云岩、灰岩、页岩 3 种岩性的岩石单轴抗压强度 S_c 及强度脆性指数 R 间的交互关系图，见图 9，可以看出，页岩基本分布于弱岩爆区域，灰岩在弱岩爆、中等岩爆和强岩爆均有分布，规律性不强，白云岩则处于中等岩爆及强岩爆区。总之，3 种岩性岩石发生岩爆倾向性的顺序为：白云岩 > 灰岩 > 页岩。

通过上面分析可以看出，利用岩石单轴抗压强度可以较好的获取强度脆性指数、弹性能量指数，但，强度脆性指数与单轴抗压强度间的关联性更好。另外，利用强度脆性指数及弹性能量指数间的交互关系更加利于岩爆倾向性判别。

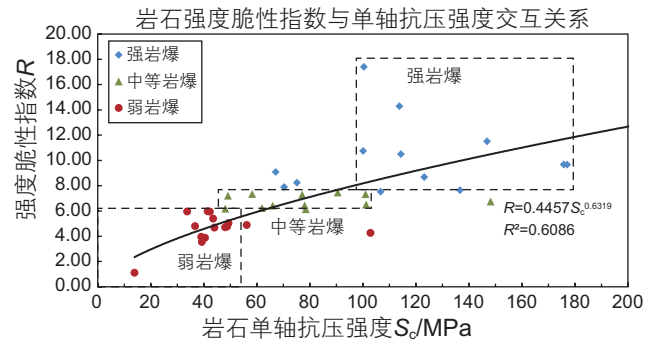


图 7 强度脆性指数 R 与单轴抗压强度交互关系图
Fig. 7 The relationship between rock strength brittleness index and uniaxial compressive strength

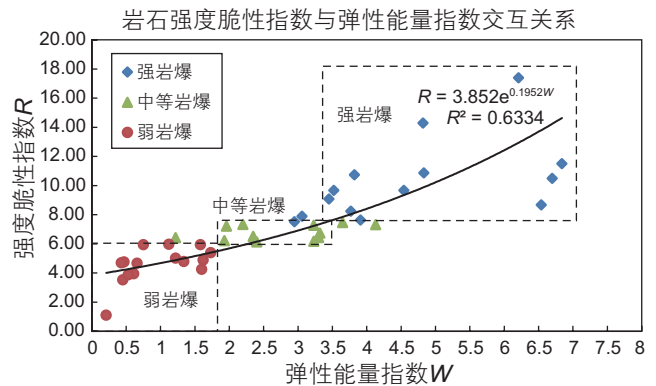


图 8 强度脆性指数与弹性能量指数交互关系
Fig. 8 The relationship between rock strength brittleness index and elastic energy index

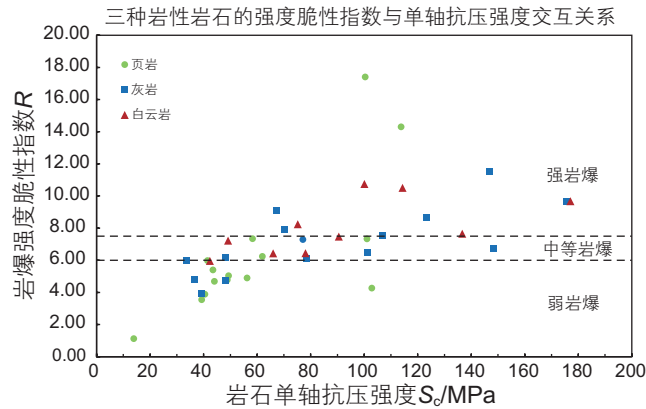


图9 3种岩性岩石的强度脆性指数与单轴抗压强度交互关系

Fig. 9 The relationship between uniaxial compressive strength and strength brittleness index of three types of lithological rocks

表2 深井超深井硬脆性地层岩爆倾向性综合因素分级表

Table 2 Classification of comprehensive factors of rock burst tendency in deep hard/brittle formations

分级依据	弱岩爆	中等岩爆	强岩爆
弹性能量指数 W	<2	2~3.7	≥ 3.7
强度脆性指数 R	<6	6~7.5	≥ 7.5
单轴抗压强度 S_0/MPa	<60	50~120	>110
破坏特征及程度	岩石破裂形成多条裂缝，多沿层理弱面破碎，岩样主体结构依然完整。	岩石破裂形成大尺寸块体断裂，断口锋利，呈现典型的断裂特征。	块体由片状逐渐过渡为不规则块体，在较小的应变下突然崩裂为较小块体群体，岩样主体呈现典型的碎裂型态。
声学特征	伴有微弱破裂声音。	伴有明显的破碎爆裂声音。	伴有强烈的破碎爆裂声音。

3.3 硬脆性地层井壁围岩岩爆倾向性判别方法

综合本次开展石油钻井中井壁围岩易发生崩落掉块的白云岩、灰岩、页岩岩爆倾向性研究，初步给出了深井超深井硬脆性地层岩爆倾向性判别方法，见表2。依据该岩爆倾向性判别方法可以解释深井超深井硬脆性地层井壁围岩频繁崩落掉块及瞬时垮塌现象，为有效制定有效的防控措施提供科学依据。

4 结论与建议

(1) 岩石力学实验研究表明，石油工业深井超深井钻井中遇到的硬脆性地层井壁围岩崩落现象可以用岩爆理论解释。利用岩石单轴压缩实验时岩石的破裂程度、声响等表观特征可以针对岩爆烈度进行合理的分级。

(2) 基于岩石力学实验确定的岩石强度脆性指数 R 与弹性能量指数 W 表明， R 值及 W 值越高，岩爆烈度越高，且 R 值及 W 值与岩爆分级之间具有较好对应关系，可以对深井超深井钻井中硬脆性地层井壁围岩岩爆倾向性进行判别与分级。本研究表明，白云岩岩爆倾向性更高，与实钻井壁失稳情况一致。

(3) 利用岩石单轴抗压强度可以求取强度脆性指数、弹性能量指数，综合利用强度脆性指数与弹性能量指数交互分析可以实现岩爆倾向性定量判别及分级，可以针对深井超深井钻遇的硬脆性地层进行合理分类。

(4) 本研究探索给出了石油钻井中硬脆性地层井壁围岩岩爆倾向性判别方法，还需要考虑复杂的钻井工况及地质环境等因素，系统开展井壁失稳机制及防控理论方法研究，进而解决硬脆性地层井壁崩落掉块难题。

参考文献

- Mechanical analysis of wellbore stability in extended reach wells [J]. *Journal of Geomechanics*, 1999, 5(001): 4–11.]
- [2] 邓金根, 蔚宝华, 邹灵战, 等. 南海西江大位移井井壁稳定性评估研究[J]. *石油钻采工艺*, 2003(06): 3–6+85. [DENG J G, YU B H, ZOU L Z, et al. Evaluation of wellbore stability of Xijiang extended reach well in South China Sea [J]. *Oil drilling and production technology*, 2003(06): 3–6+85.]
- [3] 金衍, 陈勉. 井壁稳定力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [JIN Y, CHEN M. *Wellbore stability mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2012.]
- [4] 楼一册, 金业权. 岩石力学与石油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006. [LOU Y S, JIN Y Q. *Rock mechanics and petroleum engineering* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.]
- [5] LI S, PURDY CC. Maximum horizontal stress and wellbore stability while drilling: Modeling and case study. SPE 139280, 2010.
- [6] 张艳博, 于光远, 田宝柱, 等. 花岗岩巷道岩爆声发射信号主频特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(005): 1258–1266. [ZHANG Y B, YU G Y, TIAN B Z, et al. Experimental study on main frequency characteristics of acoustic emission signal of rock burst in granite roadway [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2017, 38(005): 1258–1266.]
- [7] 徐婕. 煤矿深部砂岩卸荷特性及岩爆预测方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016. [XU J. Study on unloading characteristics and rock burst prediction method of deep sandstone in coal mine[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.]
- [8] 张艳博, 刘祥鑫, 梁正召, 等. 基于多物理场参数变化的花岗岩巷道岩爆前兆模拟实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(007): 1347–1357. [ZHANG Y B, LIU X X, LIANG Z Z, et al. Experimental study on rock burst precursor simulation of granite roadway based on multi physical field parameter variation [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(007): 1347–1357.]
- [9] 宫伟力, 汪虎, 何满潮, 等. 深部开采中岩爆岩块弹射速度的理论与实验[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(10): 2269–2278. [GONG W L, WANG H, HE M C, et al. Theory and experiment of ejection velocity of rock burst in deep mining [J]. *Acta Coal Sinica*, 2015, 40(10): 2269–2278.]
- [10] 谭以安. 岩爆形成机理研究[J]. *水文地质工程地质*, 1989, 000(001): 34–38. [TAN Y A. Mechanism of rock burst formation [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1989, 000(001): 34–38.]
- [11] 张镜剑. 岩爆五因素综合判据和岩爆分级[C]// 岩爆机理探索: 新观点新学说学术沙龙文集 51. 2010. [ZHANG J J. Comprehensive criterion and classification of rock burst by five factors [C]// *Exploration of Rock Burst Mechanism: New Viewpoints and New Theories*. 2010.]
- [12] 刘章军, 袁秋平, 李建林. 模糊概率模型在岩爆烈度分级预测中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(S1): 3095–3103. [LIU Z J, YUAN Q P, LI J L. Application of fuzzy probability model in classification prediction of rock burst intensity [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(S1): 3095–3103.]
- [13] 王吉亮, 陈剑平, 杨静, 等. 岩爆等级判定的距离判别分析方法及应用[J]. *岩土力学*, 2009, 30(007): 2203–2208. [WANG J L, CHEN J P, YANG J, et al. Distance discriminant analysis method and its application for rock burst grade determination [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2009, 30(007): 2203–2208.]
- [14] KIDYBI ń SKI, A. Bursting liability indices of coal [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1981, 18(4): 295–304.
- [15] SINGH S. Assessment of the rockburst proneness in hard rock mines [C]// *Conference on Ground Control in Mining*, 1986.
- [16] SINGH S P. Burst energy release index [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1988, 21(2): 149–155.
- [17] 冯夏庭. 地下峒室岩爆预报的自适应模式识别方法[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 1994, 015(005): 471–475. [FENG T X. An adaptive pattern recognition method for rock burst prediction in underground chamber [J]. *Journal of Northeast University: Natural Science Edition*, 1994, 015(005): 471–475.]
- [18] 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(自然科学版)*, 2001, 22(001): 60–63. [LI S L, FENG T X, WANG Y J, et al. Evaluation of rock burst tendency in deep mine [J]. *Journal of Northeast University*, 2001, 22(001): 60–63.]
- [19] 苗金丽, 何满潮, 李德建, 等. 花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(008): 1593–1603. [MIAO J L, HE M C, LI D J, et al. Acoustic emission characteristics and micro fracture mechanism of granite strain rock [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(008): 1593–1603.]
- [20] 贾义鹏. 岩爆预测方法与理论模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. [JIA Y P. Study on rock burst prediction method and theoretical mode [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.]
- [21] 郭建强, 赵青, 王军保, 等. 基于弹性应变能岩爆倾向性评价方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 034(009): 1886–1893. [GUO J Q, ZHAO Q, WANG J B, et al. Study on evaluation method of rock burst tendency based on elastic strain energy [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 034(009): 1886–1893.]
- [22] 杨凡杰, 周辉, 卢景景, 等. 岩爆发生过程的能量判别指标[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 000(S1): 122–130. [YAGN F J, ZHOU H, LU J J, et al. Energy discrimination index of rock burst occurrence process [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 000(S1): 122–130.]
- [23] 何满潮, 刘冬桥, 宫伟力, 等. 冲击岩爆试验系统研发及试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1729–1739. [HE M C, LIU D

- Q, GONG W L, et al. Development and experiment of rock burst experimental system [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1729–1739.]
- [24] 李鹏翔, 陈炳瑞, 周扬一, 等. 硬岩岩爆预测预警研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44: 447–465. [LI P X, CHEN B R, ZHOU Y Y, et al. Research progress on prediction and early warning of hard rock burst [J]. Acta Coal Sinica, 2019, 44: 447–465.]
- [25] 何满潮, 贾雪娜, 苗金丽, 等. 岩爆机制及其控制对策实验研究[C]// 岩石力学与工程的创新和实践: 第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 2010. [HE M C, JIA X N, MIAO J L, et al. Experimental study on rock burst mechanism and control measures [C]// Innovation and practice of rock mechanics and Engineering: Proceedings of the 11th National Conference on rock mechanics and engineering. 2010.]
- [26] NEYMAN B, SZECOWKA Z., ZUBEREK W. Effective methods for fighting rock burst in Polish collieries [C]// Proceedings of the 5th International Strata Control Conference. 1972, 23: 1–9.

(责任编辑 李世远 编辑 马桂霞)