

基于便携式里氏硬度测试的煤冲击倾向性分级判别准则

赵毅鑫^{1,2,3}, 杨哲^{1,2}, 谢榕濠^{1,2}, 王涛^{1,2}, 赵良辰^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京) 共生能源精准开采北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083;
3. 中国矿业大学(北京) 煤矿灾害预防与处置应急管理部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 判别煤的冲击倾向性是评估煤矿冲击地压危险程度的主要依据之一, 考虑到现有判别煤冲击倾向性分级的流程相对复杂。为此, 提出了一种基于便携式里氏硬度测试的煤冲击倾向性判别方法。对来自4个煤矿的20个煤样开展里氏硬度测试、纵波波速测试和单轴压缩试验, 获取了煤里氏硬度与岩石力学参数之间的拟合关系式, 并探究了不同里氏硬度煤样在受压破坏过程中的能量演化规律。定义了描述煤样破坏时能量释放速率的系数 K_{PE} , 并分析了 K_{PE} 与传统煤冲击倾向性指标的关联。基于里氏硬度与 K_{PE} 之间的关联, 构建了基于里氏硬度的煤冲击倾向性分级判别准则。为验证该准则的合理性, 将其判别结果与国家标准及煤屑弹射质量比 F 的判别结果进行对比, 并在鄂尔多斯盆地某强冲击地压矿井选择了2个工程应用场景进一步对该准则的工程应用效果进行检验。结果表明: 煤里氏硬度与单轴抗压强度、弹性模量具有强相关性, 而与纵波波速相关性较弱; 里氏硬度越大, 煤样的储能及释放能力越强。不同冲击倾向煤样的 K_{PE} 差异显著, 且与传统冲击倾向性指标相关性较好, 表明 K_{PE} 可用于煤冲击倾向性分级判别。煤样的 K_{PE} 与里氏硬度呈幂函数正相关, 表明随里氏硬度的增加, 煤样的冲击倾向性显著变化。基于便携式里氏硬度测试的煤冲击倾向性分级判别准则与国家标准、煤屑弹射质量比 F 的判别结果具有较好的一致性, 同时在2种工程应用场景下的应用效果良好, 表明该方法具有一定的可行性和可靠性。

关键词: 里氏硬度; 煤; 冲击倾向性; 能量演化

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)01-0297-14

Classification criteria for coal bursting liability based on portable Leeb hardness testing

ZHAO Yixin^{1,2,3}, YANG Zhe^{1,2}, XIE Ronghuan^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, ZHAO Liangchen^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory for Precise Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Disposal in Coal Mining, Ministry of Emergency Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Determining the bursting liability of coal is one of the main basis for evaluating the bursting risk degree of coal burst mine. Considering the complexity of existing classification procedures for determining coal bursting liability, a new method based on portable Leeb hardness testing is proposed. Combined with the Leeb hardness test, longitudinal wave velocity test and uniaxial compression experiment on 20 specimens from four coal mines, a fitting relationship between coal Leeb hardness and rock mechanics parameters was established. The energy evolution law during the compression failure

收稿日期: 2024-07-04 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0777

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52225402)

作者简介: 赵毅鑫(1977—), 男, 河南洛阳人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zhaoyx@cumtb.edu.cn

引用格式: 赵毅鑫, 杨哲, 谢榕濠, 等. 基于便携式里氏硬度测试的煤冲击倾向性分级判别准则[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 297-310.

ZHAO Yixin, YANG Zhe, XIE Ronghuan, et al. Classification criteria for coal bursting liability based on portable Leeb hardness testing[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 297-310.



移动阅读

process of specimens with different Leeb hardness values were investigated. A coefficient K_{PE} was defined to describe the energy release rate during the failure of specimens, and the correlation between K_{PE} and traditional indicators of coal bursting liability was analyzed. Based on the relationship between Leeb hardness and K_{PE} , a coal bursting liability classification criteria based on Leeb hardness was established. To validate the rationality of this criterion, its classification results were compared with those based on the national standards and the ejection mass ratio of coal cuttings F . Two engineering application scenarios from a strong coal burst mine in the Ordos Basin were selected to further assess the criterion's effectiveness in practical applications. The results show that the Leeb hardness of coal demonstrates a strong correlation with uniaxial compressive strength and elastic modulus, whereas there is no significant correlation with longitudinal wave velocity. The larger the Leeb hardness is, the stronger the energy storage and energy release of the specimens in uniaxial compression tests. The K_{PE} values varied significantly among specimens with different bursting liabilities and showed strong correlation with traditional bursting liability indicators, indicating that K_{PE} can be effectively used for coal bursting liability classification. The K_{PE} of specimens was positively correlated with Leeb hardness in a power function relationship, suggesting that as Leeb hardness increases, the bursting liability of specimens changes markedly. The coal bursting liability classification criteria based on portable Leeb hardness testing shows good consistency with national standards and the ejection mass ratio of coal cuttings F classification results, and performs well in two engineering application scenarios, indicating that the method has a certain degree of feasibility and reliability.

Key words: Leeb hardness; coal; bursting liability; energy evolution

0 引 言

冲击地压是指矿山开采过程中,储存在煤层、岩层中的弹性变性能瞬时非稳态释放而产生剧烈破坏的动力现象,常伴随有煤岩体瞬时位移、抛出、气浪、巨响等现象,破坏性极强,严重影响煤矿安全、高效生产^[1-3]。煤岩的冲击倾向性是煤岩本身发生冲击式破坏的固有属性^[4],是发生冲击地压的必要条件^[5]。随着我国煤矿开采深度和生产强度的不断增大,冲击地压成为我国煤矿深部开采面临的主要动力灾害之一^[6],为此进行冲击地压的预测及防治,提高风险防控水平,已得到学界和业界普遍关注^[7]。GB/T 25217《冲击地压测定、监测与防治方法》^[8](下称国标)中规定要将冲击倾向性作为矿井评价冲击地压危险性的依据。因此,测定煤的冲击倾向性显得尤为重要。

国标中规定煤冲击倾向性可通过单轴压缩试验测定 4 项指标:单轴抗压强度 R_C 、冲击能量指数 K_E 、弹性能量指数 W_{ET} 和动态破坏时间 D_T 后经综合判别得出。此外,针对冲击倾向性指标,学者们从强度、破坏时间、刚度、变形特征及能量角度展开了大量研究^[9]。在强度指标方面,郝宪杰等^[10]考虑硬煤单轴加载下峰后阶段能量的非稳态释放,构建了硬煤冲击倾向性的脆性度指标分级。在能量指标方面,赵阳等^[11]通过建立能量源扰动条件下的能量传递模型,提出能量释放比例系数 φ 及能量传递效率系数 β ,并建立基于这 2 种系数的冲击倾向性评价方法;宫凤强等^[12-13]基于煤样在单轴加载过程中峰前弹性应变能与总输入应变

能之间的线性变化规律,精细计算了煤样峰值应力点的弹性应变能,提出剩余弹性能量指数 C_{EF} 表征煤样的冲击倾向性。能量指标也常常与破坏时间指标相结合形成综合性指标,如张绪言等^[14]认为煤冲击倾向性是一个关于能量与时间的函数,提出剩余能量释放速率指数 W_T 评价煤的冲击倾向性;卢志国等^[15]根据煤样在单轴加载过程中峰前弹性应变能与轴向应力的非线性变化规律,综合考虑试件峰值强度、能量积累能力、破坏过程能量耗散及破坏时间,提出有效弹性释放速率指数 K_{ET} 评价煤的冲击倾向性;潘一山等^[16]综合冲击能量指数 K_E 及动态破坏时间 D_T ,提出了冲击能量速度指数 W_{ST} ,并考虑外界作用的影响提出临界软化区域系数 K_p 和临界应力系数 $K_{KE\phi}$ 对煤层的冲击危险性进行进一步评价。在刚度指标方面,代树红等^[17]发现模量指数 K_λ 与煤冲击倾向性存在相关性,认为 K_λ 可用于评价煤的冲击倾向性。但是以上的判别方法均基于单轴压缩试验去实现对煤冲击倾向性的判别,需通过现场取心,加工成标准样后在实验室中进行单轴压缩试验得出。整体流程较为复杂,同时取样过程中受原生地质因素影响较大,如遇取心破碎无法成样时需重新取心导致工作量倍增,为此研究其他针对煤冲击倾向性的间接测试方法十分必要。现有的间接测试法如点载荷试验法^[18]、压痕试验法^[19]、划痕试验法^[20]、施密特锤击法^[21]、钻孔触探法^[22]、针贯入法^[23-24]及里氏硬度测试法^[25]等。受限于仪器的便携性及适用性,目前仅有针贯入度 (NPI)^[23]与煤冲击倾向性形成了相关判别准则,而其他仪器指标与煤

冲击倾向性关联的研究与现场应用案例却鲜有报道。因此,采用其他可在原位使用的便携式测试仪器进行冲击倾向性分级判别的研究,形成一套可在原位对煤冲击倾向性实现快速判别的方法,能够对现有冲击倾向性判别方法形成有益的补充。

里氏硬度计是一种便携的回弹硬度测试仪器。测试可在岩心、岩块样品或岩体上快速、方便、无损进行,其测试不依赖样品的完整性,目前广泛应用于研究岩石的力学特性,如可磨性^[26]、渗透率^[27]、弹性模量^[28]及单轴抗压强度^[29]等。针对岩石里氏硬度的测试流程目前并未形成一套共识,众多学者对测试方法及测试影响因素展开了大量研究。主流的测试方法分为单次测试法(SIM)及重复测试法(RIM),SIM法指对测点进行一次测试,以该次读数作为结果;而RIM法则对测点进行重复测试,测点的读数在重复测试下会收敛到一个稳定值,以该值作为反映岩石材料性质的指标。2种测试方法都取得了较好的测试效果,如AOKI等^[30]发现RIM法可在具有薄风化层的岩石表面得到与岩石内部未受风化区域相近的硬度;YILMAZ^[31]对比研究了2种测试方法结果与岩石单轴抗压强度关联,发现SIM法结果与单轴抗压强度的拟合度最高。在测试影响因素方面,现有研究表明^[32-34]含水率对里氏硬度有较为明显的影响,而粗糙度对其影响较小;当待测样品的体积大于 60 cm^3 且厚度大于 13 mm 时测试结果受体积效应的影响不显著;当样品长径比大于 1.5 时,从轴向和径向的测量结果较为接近;此外,测试支撑物种类对结果没有显著影响。综上,关于里氏硬度与岩石特性的研究丰富。然而,里氏硬度与煤冲击倾向性的关联目前鲜有研究。

笔者对来自4个煤矿的煤样进行里氏硬度测试,结合样品的纵波波速测试和单轴压缩试验结果,建立里氏硬度与煤物理力学参数的关系式,并定量分析不

同里氏硬度煤样的能量储存、释放特性;定义表征煤样在峰后能量释放速率的指数 K_{PE} 进行冲击倾向性评价,并根据里氏硬度与 K_{PE} 的拟合关系式建立基于里氏硬度的煤冲击倾向性分级判别准则;通过对比该分级准则与国标、煤屑质量弹射比分级结果的差异对其合理性进行验证,从而形成基于便携式里氏硬度测试的煤冲击倾向性分级判别准则;最后针对2种工程应用场景开展里氏硬度测试,验证分级判别准则的工程应用效果。

1 试验设计

1.1 样品的选择及制备

本次试验所采用的样品分别取自内蒙古塔拉壕煤矿 3^{-1} 煤、红庆河煤矿 3^{-1} 煤、山西寺家庄矿 15 号煤和陕西府谷中能亿安矿 5^{-1} 煤,煤种包括长焰煤、无烟煤和烟煤,分别命名为TLH、HQB、SJZ、FG。按ISRM的建议,将样品加工成标准圆柱试样($\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$),其中端面不平行度 $< 0.1\text{ mm}$,轴向偏差 $< 25^\circ$ 。并采用ZBL-U510型非金属超声波测试仪对加工后煤样进行纵波波速测试,测试时传感器与煤样间涂抹耦合剂以减少信号衰减。

1.2 试验方法

里氏硬度计是由瑞士学者LEEB发明的无损测量金属材料硬度的设备^[35],其测试原理如图1a所示。测试时,探头上直径为 3 mm 的碳化钨球形冲击体以一定的冲击速度(v_i)冲向待测物体后再以一定回弹速度(v_r)弹回,仪器会自动记录这2个速度并计算其比值,将该比值乘 $1\ 000$ 所得的数值称为里氏硬度,即 L_D ,其表达式为

$$L_D = \frac{v_r}{v_i} \times 1\ 000 \quad (1)$$

里氏硬度的测试采用瑞士PROCEQ公司生产的

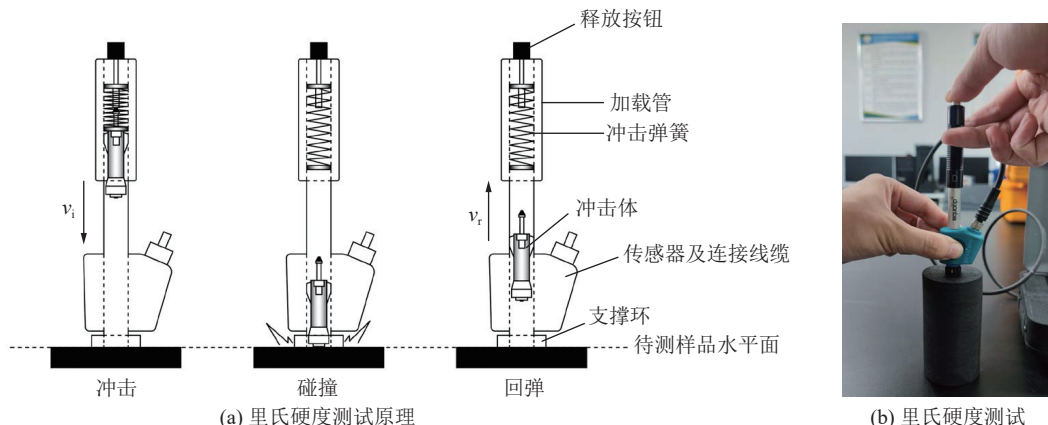


图 1 里氏硬度测试原理及测试示意

Fig.1 Principle of Leeb hardness test and diagram of testing process

Equotip 550 仪器及配套的 Leeb D 探头 (下称 D 探头) 进行试验, 如图 1b 所示。为保证测试效果, 测试过程中选取相对光滑平整且无明显裂缝的位置布置测点进行测试, 为保证每次测试的独立性, 各测点之间间隔 3~5 mm。

本文采用 SIM 法及 RIM 法对样品的测点进行测试获取里氏硬度。根据前人的研究^[29,36], 如图 2 所示, 岩石的里氏硬度在 20 次以内的重复测试下往往会逐渐升高并在第 10 次冲击后收敛到一个稳定值, HISASHI 等^[30]认为该稳定值代表了岩石未受到风化时致密内部的硬度; 考虑到采矿工程的特性, 风化是原位测试中无法逃避的影响因素, 因此对测点进行 20 次重复测试, 以第 1 次读数作为 SIM 法结果, 以后 10 次均值为 RIM 法结果。考虑到煤非均质性对测试结果的影响, 按照 CORKUM、ÇELIK 等^[29,37]的建议, 以 10 组 SIM 法及 RIM 法的测试结果均值作为所研究样品的最终里氏硬度测试结果, 2 种方法所得结果分别称为 L_S 及 L_R 。此外, 尽管 D 探头的冲击能量较低 ($11 \text{ N} \cdot \text{mm}$), 但是在测试中会出现部分测点在重复冲击下发生破坏的情况, 导致读数骤降, 这种情况所得数据应及时舍去。

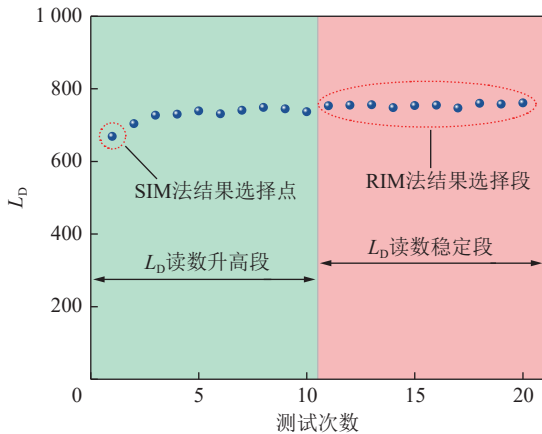


图 2 里氏硬度随冲击次数变化

Fig.2 Variation of Leeb hardness values versus impact number

对于完成里氏硬度测试后的煤样采用 MTS E45.305 万能试验机进行单轴压缩试验 (图 3), 以测定煤样的

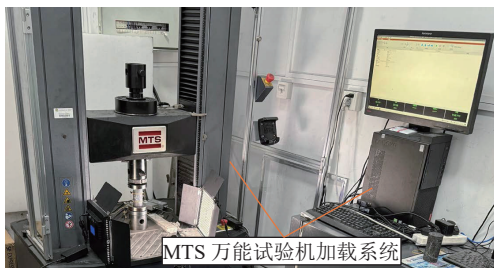


图 3 煤样单轴压缩试验

Fig.3 Uniaxial compression test of coal samples

冲击倾向性指标; 万能试验机采用加载速率设置为 0.06 mm/min 的位移控制加载, 最大荷载为 300 kN 。

2 煤里氏硬度与物理力学参数关联性分析

图 4 为不同煤样的典型应力应变曲线, 根据曲线的峰值点应力及线弹性阶段的斜率得到单轴抗压强度 R_C 、弹性模量 E , 并将其与测试所得 L_S 、 L_R 及纵波波速 v_p 汇总至表 1。

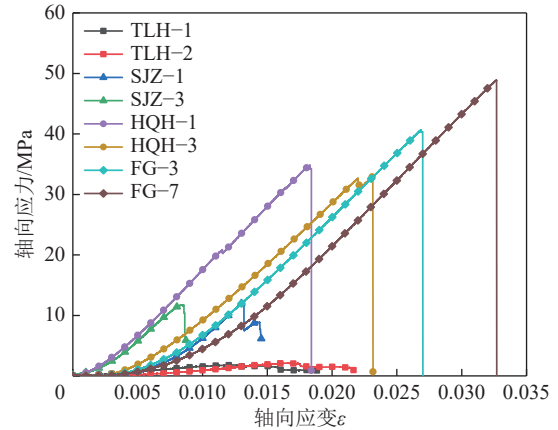


图 4 不同煤样的典型应力应变曲线

Fig.4 Typical stress-strain curves of different coal samples

表 1 煤样里氏硬度及力学参数汇总

Table 1 Summary of Leeb hardness and mechanical parameters of coal samples

样品编号	里氏硬度		单轴抗压强度 R_C /MPa	纵波波速 v_p /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	弹性模量 E /GPa	密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	L_S	L_R				
TLH-1	402	464	1.80	979.45	0.19	1.20
TLH-2	505	555	2.13	1 272.74	0.20	1.24
TLH-3	447	565	1.91	907.24	0.20	1.18
TLH-4	391	444	1.35	1 082.03	0.16	1.23
SJZ-1	645	670	12.28	1 670.55	1.89	1.46
SJZ-2	653	677	11.65	1 774.53	1.93	1.45
SJZ-3	654	696	11.73	1 605.79	1.94	1.43
SJZ-4	648	672	12.23	1 674.05	1.98	1.43
HQH-1	719	736	34.85	1 532.09	2.19	1.31
HQH-2	728	750	38.30	1 557.87	2.11	1.30
HQH-3	719	753	32.95	1 410.43	1.97	1.29
HQH-4	728	746	33.65	1 507.11	1.98	1.29
HQH-5	722	751	27.38	1 370.25	1.95	1.30
FG-1	730	744	29.02	1 279.84	1.84	1.39
FG-2	737	751	43.91	1 518.91	2.16	1.40
FG-3	747	753	40.63	1 462.54	2.11	1.39
FG-4	709	725	29.44	1 391.26	1.54	1.33
FG-5	738	729	39.35	1 472.96	1.99	1.39
FG-6	701	712	21.38	1 288.70	1.43	1.33
FG-7	729	735	48.87	1 485.69	2.16	1.38

由表 1 可看出, 本次试验煤样的 L_S (10 次 SIM 法结果均值)、 L_R (10 次 RIM 法结果均值)、 R_C 及 E 的分布分别为 390~750、1~50 MPa 及 0.2~2.2 GPa, 分布范围较广, 试验结果具有一定的普适性。本次试验所得各力学参数之间的相关性矩阵如图 5 所示, 左侧下三角(图 5a~图 5j)为横纵坐标所对应的力学参数之间的拟合曲线, 如图 5g 为横坐标里氏硬度 L_S 与纵

坐标单轴抗压强度 R_C 间的拟合曲线。此外, 采用不同线型区分所得拟合曲线的拟合优度 R^2 , R^2 在 0.6 以上时为实线, 反之则为虚线。对角线图(序号为 1~5)为横坐标所代表的各力学参数的频率直方图。右侧上三角的数值为横纵坐标所对应参数之间的 R^2 , 根据 R^2 采用不同颜色区分各参数之间的相关性^[38]。各参数间 $R^2 > 0.6$ 的拟合关系式见表 2。

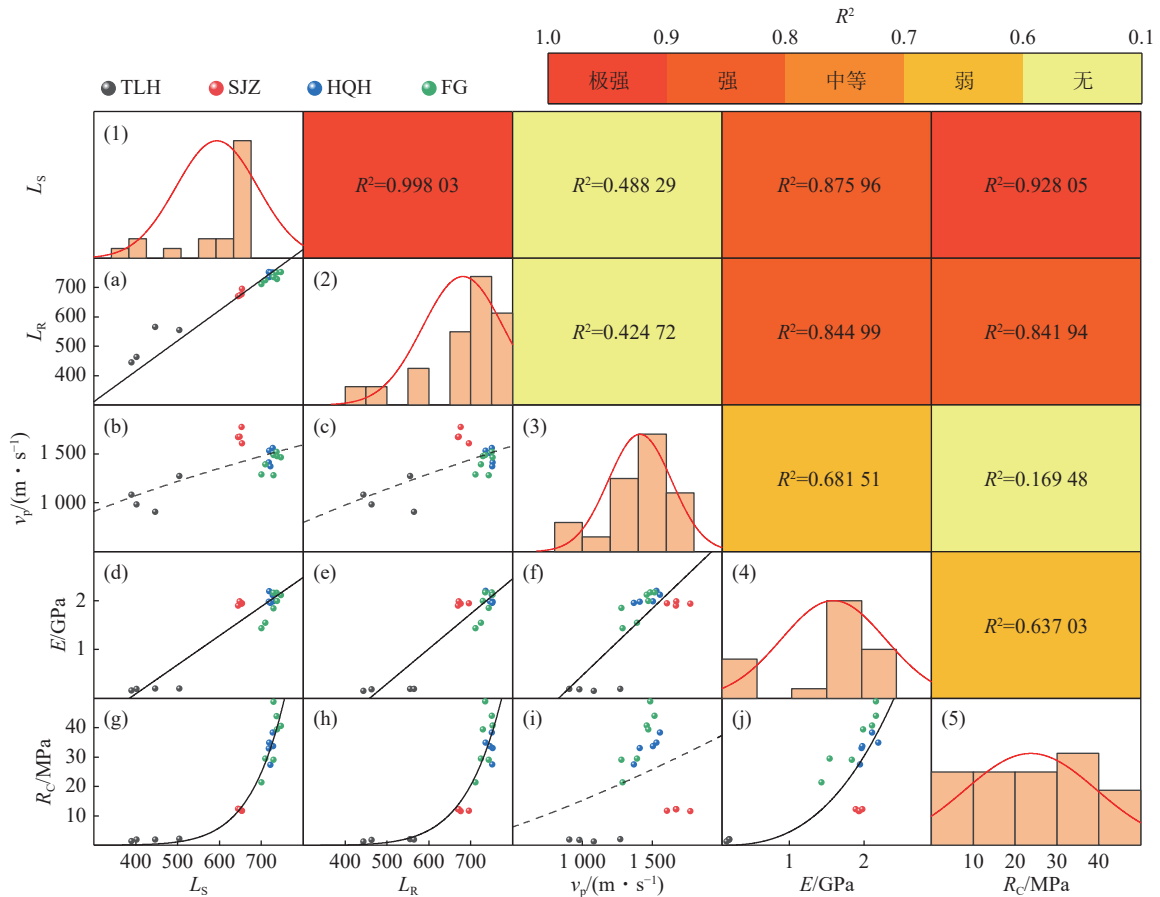


图 5 各力学参数间的相关性矩阵

Fig.5 Correlation matrix between mechanical parameters

表 2 煤样各力学参数的拟合关系式

Table 2 Fitting relationship of mechanical parameters of coal samples

参数	拟合关系式	R^2
R_C /MPa	$R_C = 1.21074 \times 10^{-25} L_S^{9.24805}$	0.92805
	$R_C = 8.89773 \times 10^{-25} L_R^{8.91408}$	0.84194
	$R_C = 4.57941 E^{2.72796}$	0.63703
E /GPa	$E = 0.00596 L_S - 2.29004$	0.87596
	$E = 0.00711 L_R - 3.24535$	0.84499
	$E = 0.00272 v_p - 2.23896$	0.68151
L_R	$L_R = 1.03722 L_S$	0.99803

从 R^2 上看, L_S 、 L_R 与单轴抗压强度 R_C 与弹性模

量 E 分别具有幂函数及线性正相关性, R^2 分别为 0.92805、0.84194 及 0.87596、0.84499, 表明随着里氏硬度的增加, 煤样抵抗破坏及弹性变形的能力越强。此外, R_C 同时也是判别冲击倾向性国标中的 4 项指标之一, 因此 L_S 、 L_R 与 R_C 的这种关联性为其评价冲击倾向性提供了可能。

本次试验中 L_S 、 L_R 与 v_p 无明显的相关性 ($R^2 = 0.48829$ 、 0.42472), 如图 5b、图 5c 所示, 通过拟合后可以看出数据点的分布虽然具有一定的宏观规律, 但难以量化界定。主要原因是 v_p 反映的是煤样的整体裂隙发育情况, 而 D 探头的冲击能量较低, L_S 、 L_R 反映的是煤样表面一定范围内材料回弹冲击时的特性, 较难体现出整体裂隙的发育情况。同时 v_p 的测试结

果也会受矿物成分的影响,如图 5i 所示,同一煤种 v_p 与 R_C 间往往具有较好的正相关规律性,即 R_C 越高, v_p 越高;但是考虑不同煤种时却丧失了这种规律性,如 SJZ 煤样与 HQH 煤样的 R_C 均值分别为 11.97、33.43 MPa,但是前者 v_p 均值却是后者的 1.14 倍。XRD 测试表明, SJZ 煤样主要矿物种类为方解石 (24%)、菱铁矿 (2.1%)、黄铁矿 (2.8%)、非晶质 (40%) 及黏土矿物 (31.1%), 而 HQH 煤样为石英 (4.6%)、方解石 (36.4%)、重晶石 (10.7%)、非晶质 (40.0%) 及黏土矿物 (8.3%), 不同煤样的矿物组成有所差异,因此矿物组成是影响 v_p 测量的因素之一,这一点同样也在 MIGUEL 等^[39]对碳酸岩的研究中体现。此外,根据本次试验结果,4 种标准煤样的 L_S 、 L_R 间具有较强线性关联性, R^2 为 0.998 03; v_p 与 E 、 E 与 R_C 分别具有线性及幂函数关联性, R^2 分别为 0.681 51 及 0.637 03。

3 不同里氏硬度煤样应变能积累与释放特征

3.1 煤样加载过程能量演化规律

不同里氏硬度煤样的 R_C 、 E 及 v_p 均存在差异,因此煤样受载过程中的能量积累、释放特性也往往存在一定的差异性。分析不同里氏硬度煤样在单轴加载下能量演化规律,有助于定量分析不同里氏硬

度煤样的能量积累及释放特性。根据所得应力应变曲线计算单轴压缩过程中各煤样的总输入应变能密度 W , 弹性应变能密度 U_E 及耗散应变能密度 U_p 。由于没有进行卸载试验,根据以往研究^[40],卸载曲线直线段斜率与加载曲线直线段斜率近似相同,故采用弹性模量 E 近似代替卸载模量 E_u ;此外,计算中假设煤样在变形过程中无能量损失,始终处于封闭的能量系统内^[41],计算式如下:

$$\begin{cases} W = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \\ U_E = \frac{\sigma^2}{2E} \\ U_p = W - U_E \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 、 ε 分别为应力应变曲线上的应力和应变。

此外采用能量耗散率 G_p 描述加载过程中耗散应变能的变化趋势,定义如下:

$$G_p = \frac{dU_p}{dt} \quad (3)$$

不同煤样典型应变能演化规律如图 6 所示,应变能演化规律存在一定的相似之处。弹性应变能曲线与应力应变曲线的变化趋势基本一致,而耗散应变能曲线与其变化趋势相反。峰前阶段,弹性应变能曲线随总应变能增加而单调增长,外部输入的总应变能大

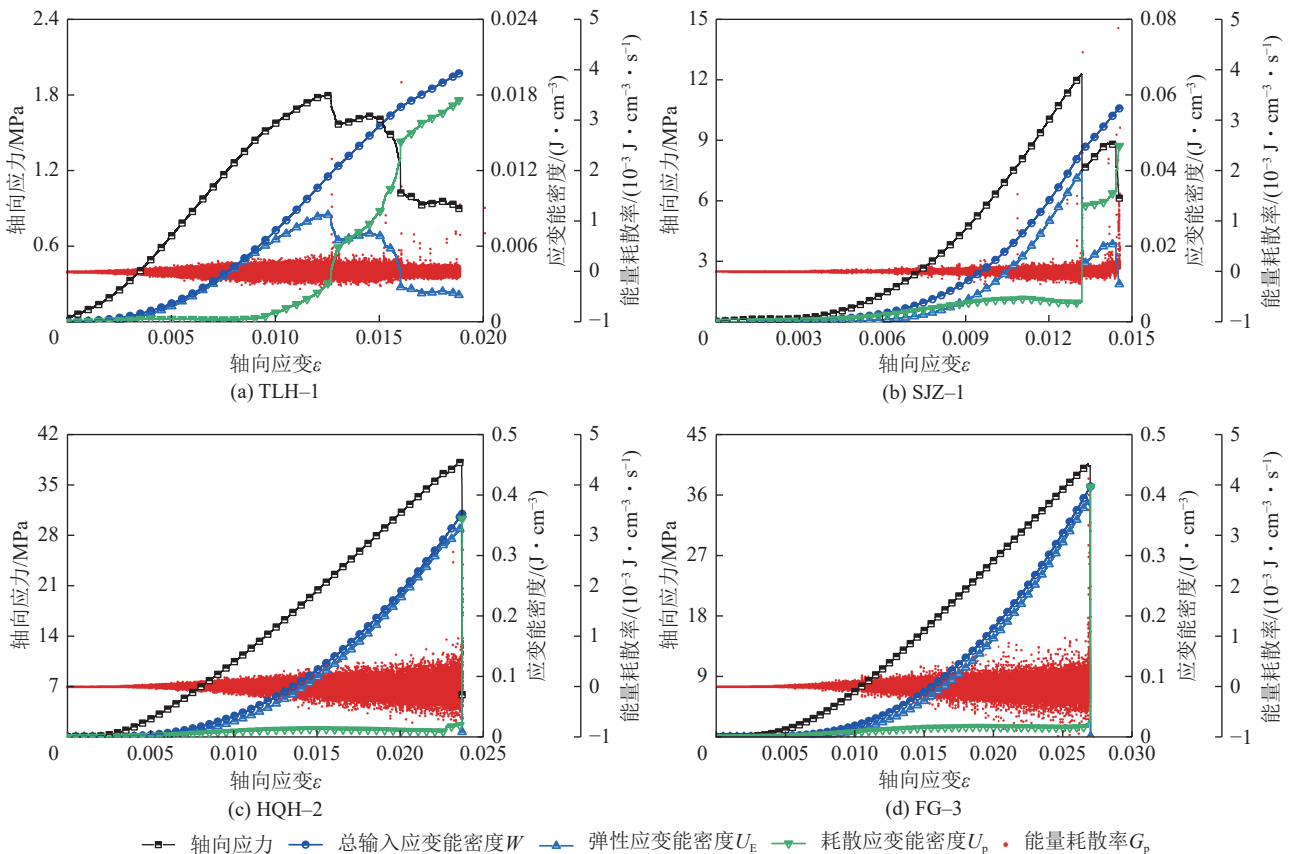


图 6 不同煤样典型应力应变曲线及应变能演化规律

Fig.6 Typical stress-strain curves and strain energy evolution laws of different coal samples

表 3 煤样 E_{SESR} 、 D_{SESR} 及 K_{PE} 指标Table 3 Coal samples E_{SESR} , D_{SESR} , and K_{PE} indices

编号	$E_{\text{SESR}}/$ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	$D_{\text{SESR}}/$ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	$K_{\text{PE}}/$ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
TLH-1	676.09	768.56	0.23
TLH-2	681.82	777.57	0.96
TLH-3	747.81	934.91	0.42
TLH-4	359.51	321.00	0.10
SJZ-1	3 025.04	2 834.16	119.49
SJZ-2	2 868.93	2 510.17	104.87
SJZ-3	4 210.46	3 384.12	64.93
SJZ-4	3 621.02	3 277.42	86.19
HQH-1	15 148.01	15 221.96	5 191.06
HQH-2	14 666.86	14 347.77	6 939.36
HQH-3	11 912.83	11 922.74	5 515.32
HQH-4	12 664.72	12 473.41	5 054.89
HQH-5	10 725.10	11 606.32	6 647.85
FG-1	9 833.73	7 737.34	3 037.03
FG-2	16 307.19	17 436.21	10 166.33
FG-3	14 570.03	14 680.49	10 973.96
FG-4	10 112.86	9 859.23	5 737.33
FG-5	11 710.11	11 721.72	7 488.10
FG-6	8 079.24	6 755.47	474.76
FG-7	16 935.03	16 948.32	7 695.06

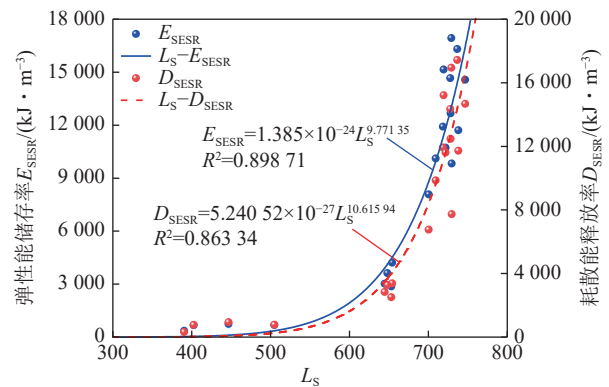
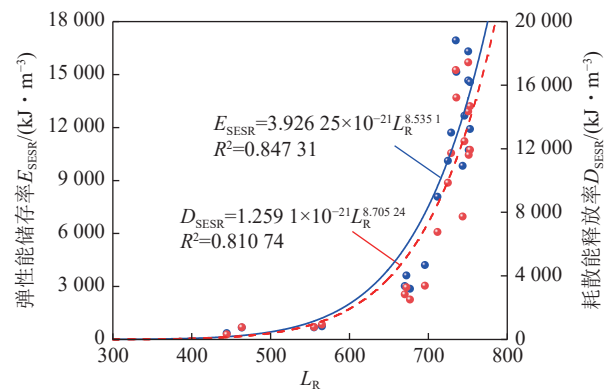
5 869.70、93.87、0.43 $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, FG 煤样的 K_{PE} 均值是 TLH 的 15 314 倍、SJZ 的 69 倍、HQH 的 1.1 倍, 不同种类煤样的 K_{PE} 存在较大差异。

按照文献[23]中所采用的方法进行计算, 得到了本次试验所采用煤样对应应在 GB/T 25217.2—2010 中的 4 项冲击倾向性指标 (D_{T} 、 W_{ET} 、 K_{E} 、 R_{C}), 计算结果见表 4。此外, 对于具有强冲击倾向性的煤样, 其峰后往往难以具有残余强度。因此在本次试验数据的基础上, 收集了文献[12, 45]中经国标综合判别为强冲击倾向性的煤样数据, 计算了 K_{PE} 及相应的 4 个冲击倾向性指标数据。通过拟合得到了 K_{PE} 与 4 个冲击倾向性指标之间的关联, 如图 9 所示, D_{T} 随 K_{PE} 的增大而减小, 呈反比例关系; W_{ET} 、 K_{E} 、 R_{C} 随 K_{PE} 的增大而增大, 呈正比例关系。表明煤样在单轴压缩加载下的强度、破坏时间及能量释放行为均与 K_{PE} 具有关联性。

综上, 不同煤样的 K_{PE} 存在较大差异, 同时 K_{PE} 与国标中 4 项指标均具有较好相关性, 因此 K_{PE} 可用于煤的冲击倾向性评价中。

4.2 分级判别准则的建立

通过对各类型煤样的 K_{PE} 与其对应的 L_{S} 、 L_{R} 进

(a) L_{S} 与 E_{SESR} 、 D_{SESR} 关联(b) L_{R} 与 E_{SESR} 、 D_{SESR} 关联图 8 煤样 L_{S} 、 L_{R} 与应变能积累、释放特性关联Fig. 8 Correlation between coal samples L_{S} , L_{R} and strain energy storage and release characteristics

行拟合, 发现存在以下关系:

$$K_{\text{PE}} = 2.56199 \times 10^{-57} L_{\text{S}}^{21.10098}, R^2 = 0.87237 \quad (8)$$

$$K_{\text{PE}} = 2.21079 \times 10^{-58} L_{\text{R}}^{21.10302}, R^2 = 0.75388 \quad (9)$$

L_{S} 、 L_{R} 与 K_{PE} 的拟合曲线如图 10a、图 10b 所示。拟合曲线均呈现幂函数关系, 且 R^2 均 > 0.75 , 表明里氏硬度与 K_{PE} 存在相关性, 即里氏硬度与煤冲击倾向性存在相关性。根据里氏硬度的定义 (式 (1)), 里氏硬度由样品的回弹速度确定, 表明里氏硬度反映的是待测样品表面的弹性; 而表面弹性又往往在一定程度上反映了岩石类材料的力学性能, 如单轴抗压强度、弹性模量、弹性能积累能力等, 因此里氏硬度在一定程度上能体现出煤的冲击倾向性。同时观察 2 条拟合曲线, 发现随着 L_{S} 、 L_{R} 的增长, 曲线斜率发生 2 次显著变化。以 $L_{\text{S}}-K_{\text{PE}}$ 为例, 曲线在 $L_{\text{S}}=600$ 处斜率从 0 开始加速提升, 而在 700 处斜率增长速度达到最大 (对于 $L_{\text{R}}-K_{\text{PE}}$ 而言这 2 处位置在 615、720), 处于这 2 处左右的 K_{PE} 相差 1~2 个数量级, 表明位于其两侧的煤样破坏瞬间能量释放速率存在显著差异, 冲击倾向性发生变化。

为得到不同冲击倾向性煤样的 K_{PE} 临界值, 综合

表 4 煤样冲击倾向性指标
Table 4 Bursting liability indexes of coal samples

编号	D_T/ms	判别	W_{ET}	判别	K_E	判别	R_C/MPa	判别	国标综合判别	F	判别	里氏硬度判别	
												L_S	L_R
TLH-1	64 125	无	2.74	弱	1.43	无	1.80	无	无	0.02	无	无	无
TLH-2	17 586	无	5.40	强	1.75	弱	2.13	无	无	0.03	无	无	无
TLH-3	44 146	无	7.67	强	0.89	无	1.91	无	无	0.02	无	无	无
TLH-4	53 063	无	0.90	无	11.90	强	1.35	无	无	0.02	无	无	无
SJZ-1	345	弱	7.55	强	4.00	弱	12.28	弱	弱	0.06	弱	弱	弱
SJZ-2	294	弱	3.40	弱	98.80	强	11.65	弱	弱	0.01	无	弱	弱
SJZ-3	455	弱	5.58	强	14.34	强	11.73	弱	弱	0.03	无	弱	弱
SJZ-4	424	弱	9.63	强	5.12	强	12.23	弱	弱	0.06	弱	弱	弱
HQH-1	54	弱	21.06	强	100.18	强	34.85	强	强	0.99	强	强	强
HQH-2	49	强	17.31	强	343.62	强	38.30	强	强	0.99	强	强	强
HQH-3	50	强	7.58	强	495.02	强	32.95	强	强	0.55	强	强	强
HQH-4	56	弱	35.22	强	151.62	强	33.65	强	强	0.53	强	强	强
HQH-5	34	强	37.47	强	5.27	强	27.38	强	强	0.77	强	强	强
FG-1	60	弱	15.45	强	30.31	强	29.02	强	强	0.83	强	强	强
FG-2	49	强	34.97	强	8.63	强	43.91	强	强	0.96	强	强	强
FG-3	36	强	23.00	强	68.96	强	40.63	强	强	0.82	强	强	强
FG-4	48	强	23.66	强	497.03	强	29.44	强	强	0.54	强	强	强
FG-5	52	弱	17.46	强	806.45	强	39.35	强	强	0.76	强	强	强
FG-6	296	弱	9.23	强	10.01	强	21.38	强	强	0.15	弱	弱	弱
FG-7	72	弱	22.53	强	174.35	强	48.87	强	强	0.99	强	强	强

式 (4) 与式 (7), 得到:

$$K_{PE} = \frac{W_E + W_B - W_r}{D_T} \quad (10)$$

对于无冲击倾向性煤样, 其 W_B 与 W_r 往往较小 (如 TLH-1, W_B 与 W_r 分别为 0.001 01、0.001 37 J/cm³); 对于强冲击倾向性煤样, 应力在峰值点后往往直接降为 0, 导致 W_B 与 W_r 几乎接近 0。因此, 为简化计算, 在 K_{PE} 临界值的计算中不考虑 W_B 与 W_r 。参考国标中 D_T 的临界值^[8]及最大储存弹性应变能指数临界值^[15,42,46], 并综合本次试验中各煤样在破坏过程中的煤屑弹射运动现象, 取 $K_{PE} < 100 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 为无冲击倾向性, $100 \leq K_{PE} < 3\ 000 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 为弱冲击倾向性, $K_{PE} \geq 3\ 000 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 为强冲击倾向性, 据此根据式 (8) 及式 (9) 得到分级判别准则的临界值, 取值结果适当取整, 见表 5。其中 L_S 、 L_R 的分级临界值分别为 595、705 及 610、720, 与 K_{PE} 拟合曲线的斜率变化处接近, 验证了 K_{PE} 的变化将会导致冲击倾向性的改变。

4.3 分级判别准则合理性验证

为验证上述分级判别准则的合理性, 将分级所得结果与国标中的 4 项冲击倾向性指标单一及综合判

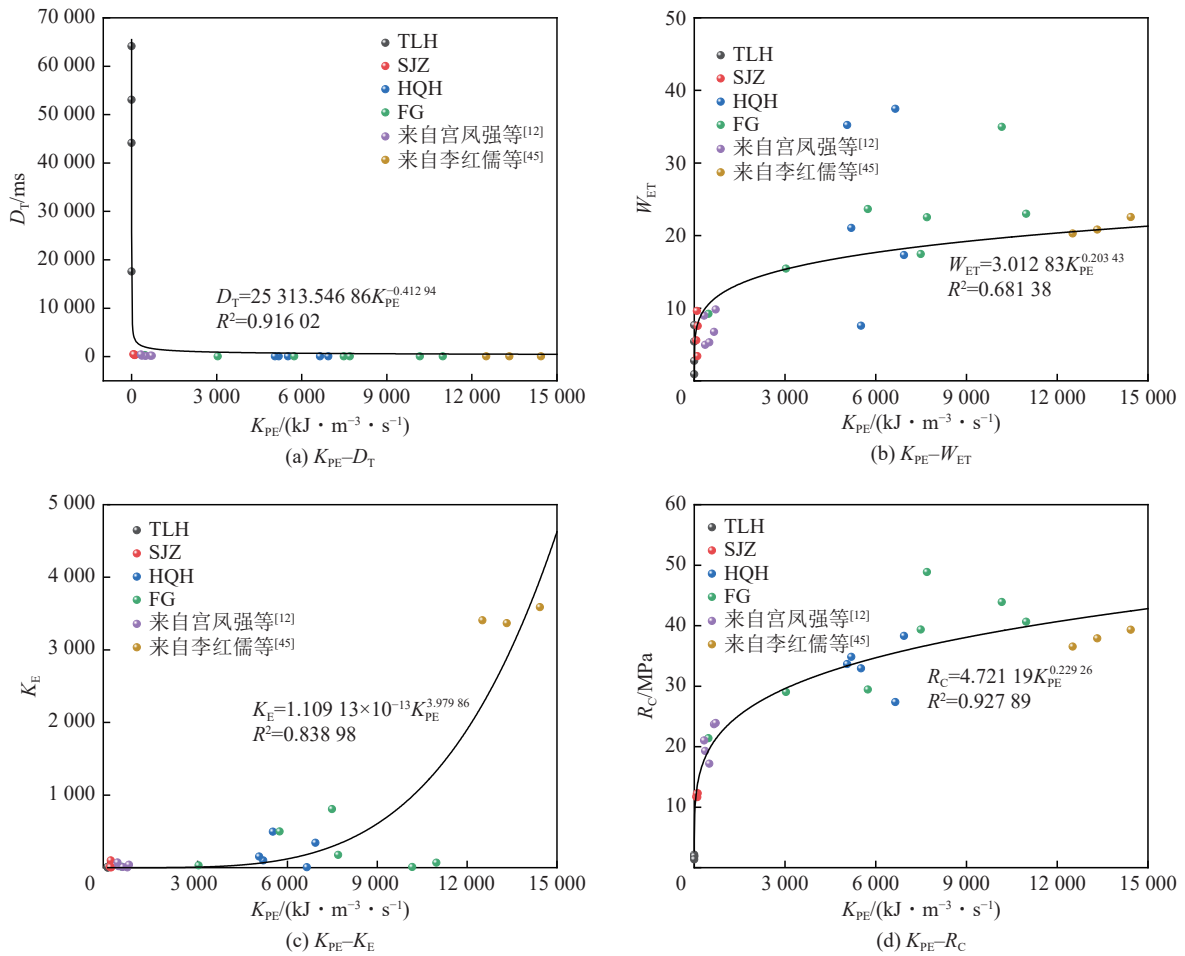
别所得的冲击倾向性分级结果进行对比。判别结果见表 4, 由表 4 可以看出, 以 L_S 、 L_R 的判别结果全部相同, 测试效果表现出较好的一致性。以国标中 4 项指标 (D_T 、 W_{ET} 、 K_E 、 R_C) 的单一判别的结果为基准, L_S 、 L_R 判别结果的误判率分别为 25%、35%、30%、5%; 以国标综合判别结果为基准, L_S 、 L_R 判别结果的误判率为 5%, 分级判别结果与国标单一及综合判别结果具有较好的一致性。

此外, 也采用煤屑弹射质量比 F 对分级结果进行验证。 F 描述了单轴加载下煤样破坏瞬间碎片及煤屑的运动情况, 能直观反映煤样的冲击倾向程度, 因此可对煤样在试验过程的冲击倾向性进行定性判别, 其计算式^[23]如下:

$$F = \frac{m_f}{m_f + m_c} = \frac{m_0 - m_c}{m_0} \quad (11)$$

式中: m_f 为煤样破坏后处于压头外的质量; m_c 为煤样破坏后处于压头上的质量; m_0 为试验前所测量的煤样总质量。

借鉴以往有关 F 的研究成果^[12,15,23,46], 本文取 $F < 0.05$ 时为无冲击倾向性、 $0.05 \leq F < 0.3$ 为弱冲击倾向

图9 煤样 K_{PE} 与冲击倾向性指标关联Fig.9 Correlation between K_{PE} and indexes of bursting liability

性、 $F \geq 0.3$ 时为强冲击倾向性。判别结果见表4, 以 F 判别的结果为基准, L_S 、 L_R 判别结果的误判率均为 10%, 分级判别结果与 F 判别的结果同样具有较好的一致性。

综上, 基于便携式里氏硬度测试的冲击倾向性判别结果与国标及煤屑弹射质量比 F 的判别结果均具有较好的一致性, 证明了分级的合理性; 同时里氏硬度测试的快速、便捷且不依赖于样品的完整性的特性, 避免了传统测试方法所需的复杂流程, 可及时为工程提供煤冲击倾向性与力学参数的相关信息。

5 现场应用效果评价

5.1 现场应用方案

为检验基于便携式里氏硬度测试的煤冲击倾向性分级判定准则的现场应用效果, 在鄂尔多斯盆地某强冲击倾向性矿井的 3⁻¹802 工作面开展里氏硬度测试。为最大限度模拟工程可能存在的使用场景, 如图 11 所示, 本文从以下 2 个方面开展测试。

1) 对工作面新采出的煤块样品开展测试, 样品尺

寸参考 JULIE、KEVIN、CORKUM^[27,30-31]等的研究结果, 选取厚度 ≥ 5 cm、体积 ≥ 90 cm³ 的样品开展测试, 共选取 13 块样品进行测试。

2) 对工作面胶带运输巷的实体煤壁侧巷帮开展原位测试, 测试范围在工作面超前 50 m 范围内。

在以上 2 种场景中开展里氏硬度测试, 在煤块样品上共获取 1 600 组数据, 原位共测得 40 组数据。

5.2 测试数据处理方法

较低里氏硬度回弹值往往表明样品表面松软、多孔或风化, 较高的回弹值表明风化程度较低或表面硬度较高^[47]。本次采用的煤块样品自采出后就用保鲜膜进行密封, 可认为受到的风化影响较小。因此研究煤块样品所得 L_S 、 L_R 结果间的关联, 即初始硬度及后续稳定硬度的关联性, 可以衡量测点是否受到风化影响。为此定义比例系数 k 去表征 2 者间的关联, 定义如下:

$$k = \frac{L_S}{L_R} \quad (12)$$

将对煤块样品所得的 L_S 、 L_R 数据进行汇总并绘

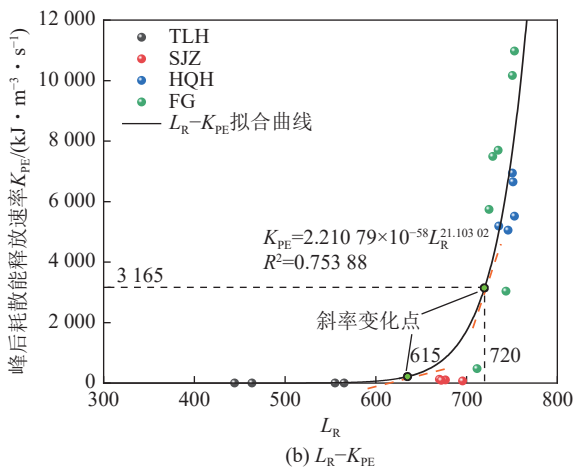
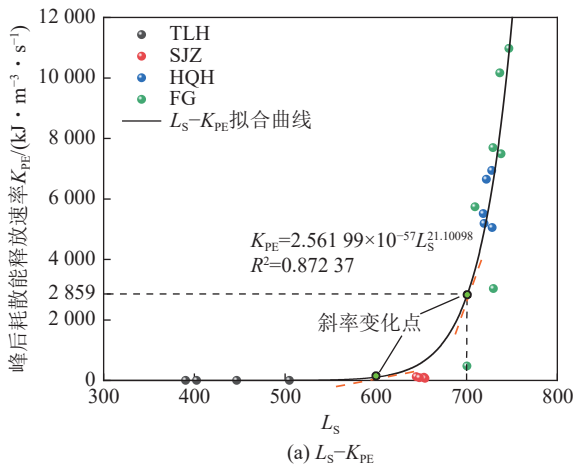


图 10 煤样 L_S 、 L_R 与 K_{PE} 拟合曲线

Fig.10 Fitting curves of coal samples L_S , L_R and K_{PE}

表 5 冲击倾向性分级

Table 5 Classification of bursting liability

冲击倾向性	无	弱	强
$K_{PE}/(kJ \cdot m^{-3} \cdot s^{-1})$	< 100	$100 \leq K_{PE} < 3000$	≥ 3000
L_S	< 595	$595 \leq L_S < 705$	≥ 705
L_R	< 610	$610 \leq L_R < 720$	≥ 720
R_C/MPa	< 7	$7 \leq R_C < 14$	≥ 14
K_E	< 1.5	$1.5 \leq K_E < 5$	≥ 5
W_{ET}	< 2	$2 \leq W_{ET} < 5$	≥ 5
D_T/ms	> 500	$50 < D_T \leq 500$	≤ 50

制不同 k 的参考线, 如图 12 所示, 数据总体集中在 k 为 0.75~1.05, 处于这个区间的数据占到总体的 94%, 分布于这个区间的数据可认为受到风化的影响较小。由 k 的定义可知, 若测点受到风化影响, 初始读数即 L_S 往往偏小从而导致 k 发生变化, 故主要分布区间下限 0.75 可以检验测点 L_S 为受到较大的风化的影响, 即 $k < 0.75$ 的数据可认为受到风化的影响较大应及时舍去。经过 k 的检验在一定程度上能减少 L_S 结果受到风化的影响。

此外, 通过对煤块样品所得 L_S 、 L_R 进行拟合, 发现对于整体数据而言, 其 L_S 与 L_R 存在 k 为 0.89 的转化关系, 而在 4 种标准煤样的测试结果中经过对表 2 中拟合关系式进行换算得到的 k 则为 0.96, 表明 SIM 法及 RIM 法的测试效果在本次试验中受到煤种的影

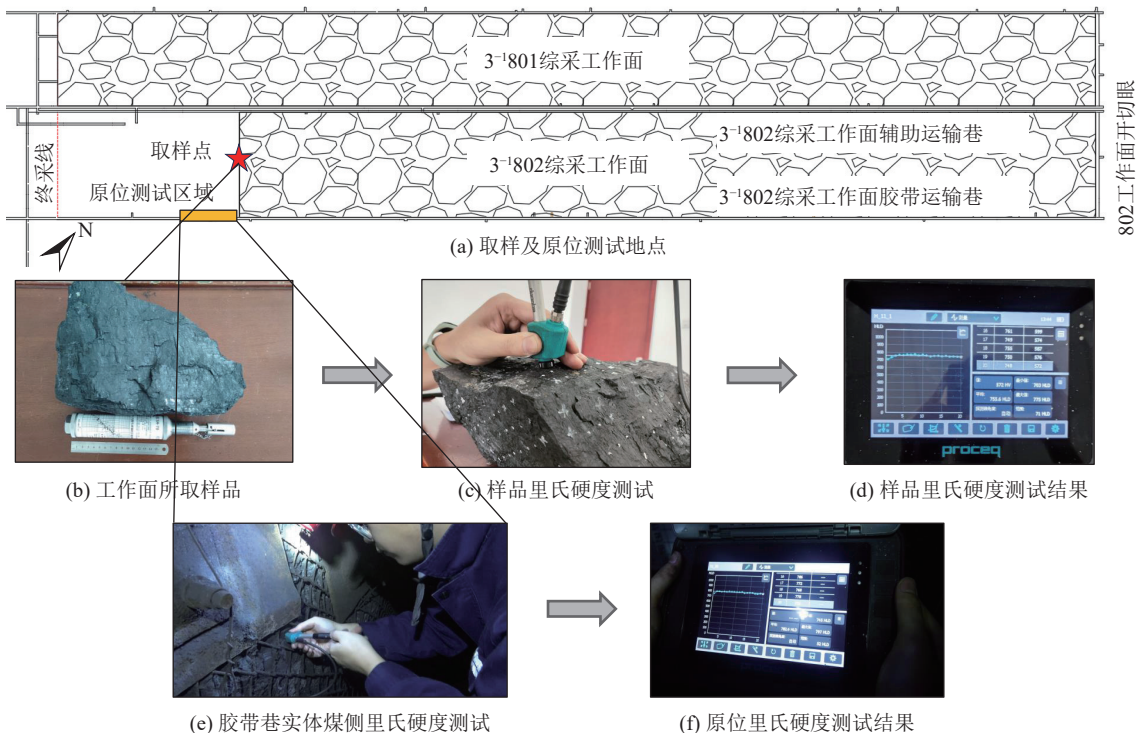
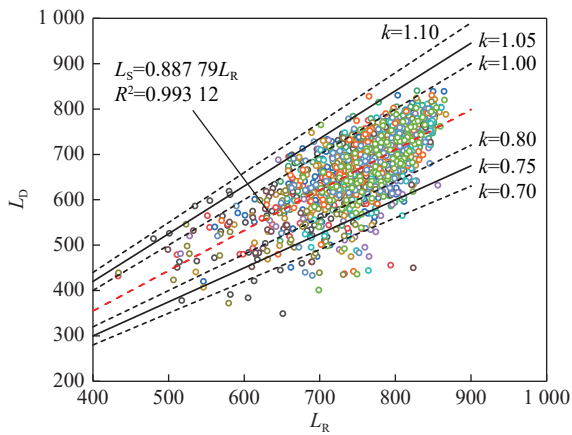


图 11 里氏硬度应用场景

Fig.11 Application scenarios for Leeb hardness testing

图 12 L_S 、 L_R 结果关联Fig.12 Correlation between L_S and L_R results

响较小。

5.3 测试效果

经过 k 检验后的数据分布如图 13 所示。由于对煤块样品的测试量远大于原位测试的测试量,因此出现了更多的异常值。以强冲击倾向性为判别基准,从数据均值的角度上来看,无论是原位测试还是煤块样品测试, L_R 的判别结果均为强冲击倾向性,而 L_S 的判别结果均为弱冲击倾向性;从总体数据的角度上来看, L_S 在原位测试、煤块样品测试中的误判率分别为 71.43%、58.40%,而 L_R 则为 37.50%、23.30%。可以看出相较于实验室试验,现场工程应用中的误判率相对较高,这是因为在室内试验中,所采用的试样经过加工后表面较为光滑、平整、风化度低,符合理想状态下里氏硬度计的工作场景,因而提出的准则与国标综合判别结果的误判率较低。而在煤块样品及原位测试中,新鲜采出的煤块表面较粗糙,同时井下煤壁还可能受风化、潮湿环境及煤的非均质性差异等因素影响,这些因素共同影响了里氏硬度计的工程应用效果。虽然经过 k 检验后初步排除了受风化影响数据,但 L_S (初始硬度)受到含水率、非均质性的影响,造成了

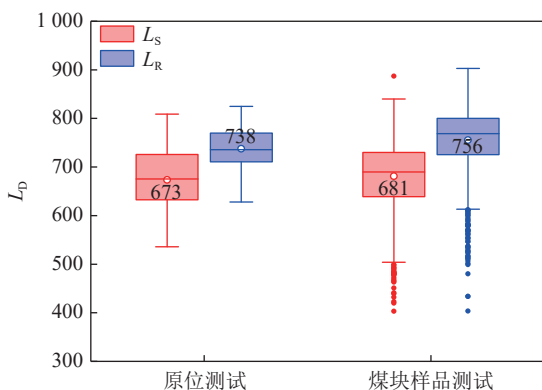


图 13 里氏硬度测试结果

Fig.13 Leeb hardness test results

相对较高的误判率;而 L_R (后续稳定硬度)往往受到这些因素的影响较小,误判率较低,从而确保了里氏硬度的判别效果。综上,建立的判别准则在工程应用中能对煤的冲击倾向性进行较准确判别,验证了判别准则的合理性。

6 结 论

1) 里氏硬度与煤的单轴抗压强度及弹性模量具有强关联性 (R^2 均大于 0.8),随着里氏硬度增加,煤样抵抗破坏及弹性变形能力增强;而与纵波波速无明显关联性 (R^2 均小于 0.5)。不同里氏硬度的煤样单轴压缩下的能量演化规律差异显著;随着里氏硬度的增加,煤样储能及释放特性增强。

2) 不同里氏硬度煤样的 K_{PE} 存在较大差异,FG 煤样的 K_{PE} 均值是 TLH 的 15 314 倍、SJZ 的 69 倍、HQB 的 1.1 倍,表明 K_{PE} 可以区别不同煤样发生冲击破坏的能力。同时 K_{PE} 与 GB/T 25217.2-2010 中 4 项指标均具有较好的相关性,表明其可用于煤冲击倾向性的评价中。

3) 结合里氏硬度与 K_{PE} 的拟合关系式及相关指标临界值,给出了基于便携式里氏硬度测试的煤冲击倾向性分级判别准则,该准则与国标综合判别及煤屑弹射质量比判别结果的误判率分别为 5%、10%,证明了分级准则的合理性;通过在 2 种工程应用场景下的测试,结果表明所建立的判别准则在 2 种工程应用场景均能对冲击倾向性进行较准确判别。

测定煤的冲击倾向性对评估冲击地压危险性十分重要。由于里氏硬度取决于样品的回弹速度,与待测样品的表面弹性十分相关。而冲击倾向性与弹性应变能累积能力具有相关性,因此里氏硬度在冲击倾向性测试中具有潜力。本文正是基于这点对实现煤冲击倾向性的快速判别方法进行了初步的探索,进行验证的工程场景较为有限,后续将针对该方法在不同地质条件、煤种和开采条件的矿井开展进一步研究,在工程实践中不断改进完善。

参考文献(References):

- [1] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [2] 赵毅鑫,姜耀东,田素鹏.冲击地压形成过程中能量耗散特征研究[J].煤炭学报,2010,35(12):1979-1983.
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, TIAN Supeng. Investigation on the characteristics of energy dissipation in the preparation process of coal

- bumps[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 1979–1983.
- [3] 张俊文, 邓雪杰, 郑通达. 充填开采防治坚硬顶板型冲击地压综述研究[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(2): 103–121.
ZHANG Junwen, DENG Xuejie, ZHENG Tongda. A review on hard roof rock burst prevention and control by backfill technology[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(2): 103–121.
- [4] 齐庆新, 彭永伟, 李宏艳, 等. 煤岩冲击倾向性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S1): 2736–2742.
QI Qingxin, PENG Yongwei, LI Hongyan, et al. Study of bursting liability of coal and rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S1): 2736–2742.
- [5] 齐庆新, 刘天泉. 冲击地压的煤岩层结构破坏与摩擦滑动机理初探[C]/第四届全国岩石动力学学术会议论文集. 成都, 1994: 231–235.
- [6] 姜福兴, 张翔, 朱斯陶. 煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 203–213.
JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 203–213.
- [7] 许献磊, 马正, 陈令洲. 煤矿地质灾害隐患透明化探测技术进展与思考[J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 56–69.
XU Xianlei, MA Zheng, CHEN Lingzhou. Progress and thinking of transparent detection technology for hidden geological hazards in coal mines[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 56–69.
- [8] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 25217.2—2010 冲击地压测定、监测与防治方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [9] 鞠文君, 卢志国, 高富强, 等. 煤岩冲击倾向性研究进展及综合定量评价指标探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(9): 1839–1856.
JU Wenjun, LU Zhiguo, GAO Fuqiang, et al. Research progress and comprehensive quantitative evaluation index of coal rock bursting liability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(9): 1839–1856.
- [10] 郝宪杰, 袁亮, 郭延定, 等. 考虑峰后能量非稳态释放的硬煤脆性度指标[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(11): 2641–2649.
HAO Xianjie, YUAN Liang, GUO Yanding, et al. A new brittleness index for hard coal considering unsteady energy release at post-peak stage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2641–2649.
- [11] 赵阳, 侯煜坤, 唐铁吾. 基于能量传递效率的煤冲击倾向性评价指标[J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(1): 22–31.
ZHAO Yang, HOU Yukun, TANG Tiewu. Evaluation index of bursting liability of coal based on energy transfer efficiency[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(1): 22–31.
- [12] 宫凤强, 赵英杰, 王云亮, 等. 煤的冲击倾向性研究进展及冲击地压“人-煤-环”三要素机理[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(5): 1974–2010.
GONG Fengqiang, ZHAO Yingjie, WANG Yunliang, et al. Research progress of coal bursting liability indices and coal burst “Human-Coal-Environment” three elements mechanism[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 1974–2010.
- [13] GONG F Q, WANG Y L, WANG Z G, et al. A new criterion of coal burst proneness based on the residual elastic energy index[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(4): 553–563.
- [14] 张绪言, 冯国瑞, 康立勋, 等. 用剩余能量释放速度判定煤岩冲击倾向性[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(9): 1165–1168.
ZHANG Xuyan, FENG Guorui, KANG Lixun, et al. Method to determine burst tendency of coal rock by residual energy emission speed[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(9): 1165–1168.
- [15] 卢志国, 鞠文君, 高富强, 等. 基于非线性储能与释放特征的煤冲击倾向性指标[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(8): 1559–1569.
LU Zhiguo, JU Wenjun, GAO Fuqiang, et al. Bursting liability index of coal based on nonlinear storage and release characteristics of elastic energy[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(8): 1559–1569.
- [16] 潘一山, 耿琳, 李忠华. 煤层冲击倾向性与危险性评价指标研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(12): 1975–1978.
PAN Yishan, GENG Lin, LI Zhonghua. Research on evaluation indices for impact tendency and danger of coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 1975–1978.
- [17] 代树红, 王晓晨, 潘一山, 等. 模量指数评价煤的冲击倾向性的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(6): 1726–1731.
DAI Shuhong, WANG Xiaochen, PAN Yishan, et al. Experimental study on the evaluation of coal burst tendency utilizing modulus index[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1726–1731.
- [18] 余伟健, 吴根水, 刘海, 等. 薄煤层开采软弱煤岩体巷道变形特征与稳定控制[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(10): 2668–2678.
YU Weijian, WU Genshui, LIU Hai, et al. Deformation characteristics and stability control of soft coal-rock mining roadway in thin coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(10): 2668–2678.
- [19] KOSSOVICH E L, BORODICH F M, EPSHTEIN S A, et al. Mechanical, structural and scaling properties of coals: Depth-sensing indentation studies[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(3): 195.
- [20] ROSTAMSOWLAT I, EVANS B, SAROUT J, et al. Determination of internal friction angle of rocks using scratch test with a blunt PDC cutter[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(12): 7859–7880.
- [21] BILGIN N, COPUR H, BALCI C. Use of Schmidt hammer with special reference to strength reduction factor related to cleat presence in a coal mine[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 84: 25–33.
- [22] 雷顺, 杨景贺, 司林坡, 等. 破碎煤体钻孔触探法原位强度测试与分析[J]. *煤矿开采*, 2017(5): 13–16.
LEI Shun, YANG Jinghe, SI Linpo, et al. Analysis and drilling *in situ* penetration strength measurement of broken coal[J]. *Coal Mining Technology*, 2017(5): 13–16.
- [23] 赵毅鑫, 谢镛灏, 高艺瑞. 煤冲击倾向性的针贯入法测定[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 1932–1942.
ZHAO Yixin, XIE Ronghuan, GAO Yirui. Coal bursting tendency evaluation by needle penetration test[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1932–1942.
- [24] 张村, 马健起, 兰世勇, 等. 基于针入强度的不同含水率煤样强度弱化特征与微观机制[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(S1): 40–49.
ZHANG Cun, MA Jianqi, LAN Shiyong, et al. Strength weakening characteristics and microscopic mechanism of coal samples with different water contents based on penetration strength[J]. *Coal Science*

- and Technology, 2023, 51(S1): 40–49.
- [25] 管圣功, 钟杨, 曹润青, 等. 基于里氏硬度的岩石拉、压强度预测模型研究[J]. 金属矿山, 2023(6): 24–32.
GUAN Shenggong, ZHONG Yang, CAO Runqing, et al. Research on prediction model of uniaxial compressive and tensile strength of rock based on equotip hardness[J]. Metal Mine, 2023(6): 24–32.
- [26] TØGERSEN M K, KLEIV R A, ELLEFMO S, et al. Mineralogy and texture of the Storforsthei iron formation, and their effect on grindability[J]. Minerals Engineering, 2018, 125: 176–189.
- [27] GHANIZADEH A, CLARKSON C R, AQUINO S, et al. Petrophysical and geomechanical characteristics of Canadian tight oil and liquid-rich gas reservoirs: II. geomechanical property estimation[J]. Fuel, 2015, 153: 682–691.
- [28] ALDEEKY H, AL HATTAMLEH O, RABABAH S. Assessing the uniaxial compressive strength and tangent Young's modulus of basalt rock using the Leeb rebound hardness test[J]. Materiales de Construcción, 2020, 70(340): 230.
- [29] CORKUM A G, ASIRI Y, EL NAGGAR H, et al. The leeb hardness test for rock: An updated methodology and UCS correlation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(3): 665–675.
- [30] AOKI H, MATSUKURA Y. A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: An application of the equotip hardness tester to weathering studies[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(12): 1759–1769.
- [31] YILMAZ N G. The influence of testing procedures on uniaxial compressive strength prediction of carbonate rocks from equotip hardness tester (EHT) and proposal of a new testing methodology: Hybrid dynamic hardness (HDH)[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(1): 95–106.
- [32] SMART K J, FERRILL D A, MCKEIGHAN C A, et al. Estimating rock mechanical properties from microrebound measurements[J]. Engineering Geology, 2023, 312: 106954.
- [33] DESARNAUD J, KIRIYAMA K, BICER SIMSIR B, et al. A laboratory study of equotip surface hardness measurements on a range of sandstones: What influences the values and what do they mean?[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(7): 1419–1429.
- [34] ÇELİK S B, ÇOBANOĞLU İ, KORALAY T, et al. Investigation of the Leeb hardness test in rapid characterisation of rock cores with particular emphasis on the effect of length to diameter ratio[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2023, 37(7): 524–543.
- [35] LEEB D. Dynamic hardness testing of metallic materials[J]. NDT International, 1979, 12(6): 274–278.
- [36] AOKI H, MATSUKURA Y. Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2008, 67(1): 23–29.
- [37] ÇELİK S B, ÇOBANOĞLU İ. Investigation of the effect of saturated conditions and number of measurements on the Leeb hardness test and improved correlations to estimate basic rock properties[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(8): 4261–4278.
- [38] BENAVENTE D, FORT R, GOMEZ-HERAS M. Improving uniaxial compressive strength estimation of carbonate sedimentary rocks by combining minimally invasive and non-destructive techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 147: 104915.
- [39] GOMEZ-HERAS M, BENAVENTE D, PLA C, et al. Ultrasonic pulse velocity as a way of improving uniaxial compressive strength estimations from Leeb hardness measurements[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 119996.
- [40] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003–3010.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003–3010.
- [41] 滕腾, 高峰, 张志镇, 等. 含瓦斯原煤三轴压缩变形时的能量演化分析[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4): 663–669.
TENG Teng, GAO Feng, ZHANG Zhizhen, et al. Analysis of energy evolution on gas saturated raw coal under triaxial compression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(4): 663–669.
- [42] WANG J A, PARK H D. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 49–57.
- [43] 朱志洁, 李瑞琪, 汤国水, 等. 含裂隙煤体能量耗散特征与冲击倾向性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 32–44.
ZHU Zhijie, LI Ruiqi, TANG Guoshui, et al. Research on energy dissipation characteristics and coal burst tendency of fissured coal mass[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 32–44.
- [44] 宋振骥, 文志杰, 蒋宇静, 等. 采动力学与岩层控制关键理论及工程应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 16–35.
SONG Zhenqi, WEN Zhijie, JIANG Yujing, et al. Theory and application of mining mechanics and strata control[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 16–35.
- [45] 李红儒, 何满潮, 乔亚飞, 等. 层理煤的冲击破坏行为及其倾向性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(9): 2178–2188.
LI Hongru, HE Manchao, QIAO Yafei, et al. Burst behavior and its proneness evaluation of bedding coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(9): 2178–2188.
- [46] 宫凤强, 闫景一, 李夕兵. 基于线性储能规律和剩余弹性性能指数的岩爆倾向性判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 1993–2014.
GONG Fengqiang, YAN Jingyi, LI Xibing. A new criterion of rock burst proneness based on the linear energy storage law and the residual elastic energy index[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 1993–2014.
- [47] WILHELM K, VILES H, BURKE Ó. Low impact surface hardness testing (Equotip) on porous surfaces—advances in methodology with implications for rock weathering and stone deterioration research[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41(8): 1027–1038.