

屯兰矿钻屑解吸指标敏感性研究

高旭^{1,2} 张浪^{1,2} 汪东^{1,2} 舒龙勇^{1,2}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院 北京 100013;

2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院) 北京 100013)

摘要: 为了建立和完善屯兰矿防治煤与瓦斯突出技术体系,确定屯兰矿钻屑解吸指标 K_1 和 Δh_2 的相对敏感性,基于高压定容吸附解吸试验和钻屑解吸指标模拟测定,研究发现屯兰矿各煤层煤样的瓦斯吸附平衡压力与瓦斯解吸量呈幂函数关系, K_1 和 Δh_2 呈线性关系;屯兰矿各煤层煤样第1 min的瓦斯解吸量比第4—5 min受吸附平衡压力的控制作用更明显;通过现场实测 K_1 和 Δh_2 指标,并结合最小均方差法分析认为屯兰矿各煤层 K_1 比 Δh_2 指标敏感。因此,屯兰矿各煤层进行突出危险性预测时,应选用钻屑解吸指标 K_1 作为主要指标(敏感指标),以 Δh_2 作为辅助指标。

关键词: 瓦斯吸附; 瓦斯解吸; 钻屑解吸指标; 敏感性

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2014)10-0041-04

Study on Desorption Index Sensitivity of Drilling Cuttings from Tunlan Mine

GAO Xu^{1,2} ZHANG Lang^{1,2} WANG Dong^{1,2} SHU Long-yong^{1,2}

(1. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. National Key Lab of Coal Resource High Efficient Mining and Clean Utilization(China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

Abstract: In order to establish and improve the coal and gas outburst prevention technical system of Tunlan Mine, relative sensitivities of drilling cuttings about gas desorption index K_1 and Δh_2 were determined. Based on high pressure set volume adsorption and desorption experiments and simulation measurement of the drilling cuttings desorption index, the study found that the gas adsorption balance pressure and gas desorption volume of each seam sample from Tunlan Mine was in a power function relationship, and K_1 and Δh_2 was in a liner relationship. The first minute gas desorption volume of each seam sample from Tunlan Mine was more obvious than the fourth and fifth minute by the control function of desorption balance pressure. With the site measured of K_1 and Δh_2 and combined with the minimum mean variance method analysis, the paper hold that the K_1 of each seam in Tunlan Mine was more sensitive than Δh_2 index. Therefore, when predicting the outburst danger was conducted for each seam in Tunlan Mine, the drilling cutting desorption index K_1 should be selected as the main index (sensitive index) and Δh_2 should be selected as an auxiliary index.

Key words: gas adsorption; gas desorption; desorption index of drilling cuttings; sensitivity

0 引言

煤与瓦斯突出是突出矿井采掘过程中经常发生的重大自然灾害,严重威胁煤矿安全生产,制约矿井的采掘速度,影响煤矿的经济效益。突出预测作为防治突出的重要环节,其可靠性和准确性直接关系采掘作业安全,同时也涉及到需要施工防突工程范围的大小,因此与矿井的经济效益有着直接的关系。

同一指标在不同的矿井的敏感程度是不同的,突出预测指标敏感性直接影响到突出预测的可靠性与准确性^[1-3]。屯兰矿设计生产能力400万t/a,主采2、4、8、9号煤层皆为突出煤层,煤层倾角 $2^\circ \sim 15^\circ$,一般 6° 左右。屯兰矿在实际采掘过程中,有过瓦斯涌出异常及动力现象。笔者根据屯兰矿的情况开展了实验室试验和现场跟踪试验,确定了钻屑解吸指标 K_1 和 Δh_2 在该矿的相对敏感性。

收稿日期: 2014-04-20; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.10.010

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05040-001); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB201206)

作者简介: 高旭(1979—),男,江苏沛县人,博士,工程师。Tel: 15810288079 E-mail: gaouxu987202@163.com

引用格式: 高旭,张浪,汪东,等. 屯兰矿钻屑解吸指标敏感性研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(10): 41-44, 116.

GAO Xu, ZHANG Lang, WANG Dong et al. Study on Desorption Index Sensitivity of Drilling Cuttings from Tunlan Mine[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 41-44, 116.

1 煤样瓦斯解吸量与钻屑解吸指标的关系

1.1 煤样瓦斯解吸量与 Δh_2 的关系

钻屑解吸指标 Δh_2 的测量方法是取 10 g 左右煤样, 观察第 4 min 和第 5 min 瓦斯解吸造成 U 形管内的水柱压力差值。尽管在数值上 Δh_2 指标只是一个水柱压力差值, 但 Δh_2 能反映 4 min 和第 5 min 瓦斯解吸量。理论上, 单位质量煤样第 4 min 和第 5 min 瓦斯解吸量 Q_{4-5} 和 Δh_2 的关系^[1] 见式 (1)。

$$Q_{4-5} = 0.008\ 21 \Delta h_2 / 10 \quad (1)$$

式中: 10 为玻璃瓶内煤样质量, g; 0.008 21 为 MD-2 瓦斯解吸仪结构常数。

1.2 煤样瓦斯解吸量与 K_1 的关系

钻屑解吸指标 K_1 的测量方法是取 5 g 左右煤样, 记录煤样在固定空间内解吸所产生压力增加值, 分析煤样解吸量随时间变化规律, 计算得到单位质量煤样第 1 min 瓦斯解吸造成固定空间的压力增加值, 其单位是 $\text{mL}/(\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})$ 。Barrer 认为吸附和解吸是可逆过程, 气体累计吸附和解吸量与时间的关系^[4-5] 符合式 (2)。

$$Q_t / Q_\infty = 2A \sqrt{Dt/\pi} / V \quad (2)$$

其中: Q_t 为到 t 时刻的解吸瓦斯量, mL/g ; Q_∞ 为经 $t \rightarrow \infty$ 时解吸瓦斯量, mL/g ; A 为试样外表面积, cm^2/g ; D 为扩散系数, cm^2/min ; V 为试样体积, mL/g 。令 $K_1 = 2AQ_\infty \sqrt{Dt/\pi} / V$, 式 (2) 可简化为

$$Q_t = K_1 \sqrt{t} \quad (3)$$

因此, 理论上 $t = 1$ 时, K_1 为单位质量煤样第 1 min 的瓦斯解吸量。

1.3 钻屑解吸指标之间的区别与联系

Δh_2 和 K_1 的区别: ① K_1 与煤样暴露后第 1 min

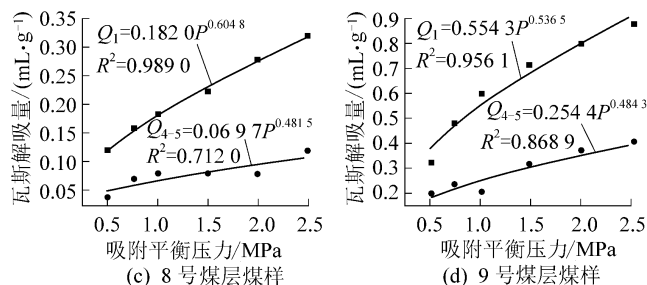
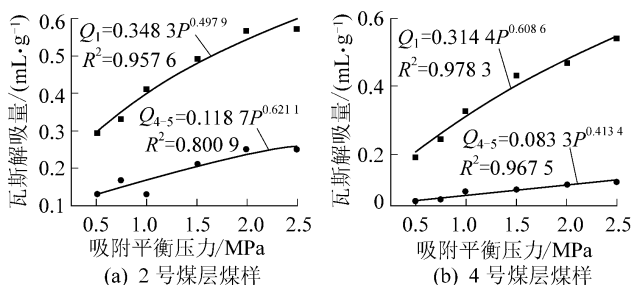


图 1 瓦斯解吸量随吸附平衡压力的变化关系

4) 屯兰矿各煤层煤样瓦斯解吸特性。①屯兰矿各煤层煤样第 1 min 比第 4—5 min 瓦斯解吸量大。各组煤样的 6 个吸附平衡压力下第 1 min 的解吸量占 30 min 解吸量的比例 20% ~ 70%; 而第 4—

内的解吸量相关, 而 Δh_2 与第 4—5 min 的解吸量相关; ② K_1 是用最小二乘法拟合 Barrer 式的相关参数计算得到, Δh_2 是直接读取水柱压差值。

两指标间的联系: 从上述煤样瓦斯解吸量与钻屑解吸指标 Δh_2 和 K_1 的相关关系可知, 二者属于同一类指标, 都能换算成一段时间内单位质量煤样的累计瓦斯解吸量。邵军^[6] 通过理论近似推算二者满足式 (4) 的线性关系。

$$K_1 = 0.016\ 5 \Delta h_2 \quad (4)$$

2 高压定容吸附解吸试验

1) 取样与制样。研究分别在屯兰矿 12412 工作面、12412 底抽巷、18208 工作面、19205 工作面 4 个地点取 2、4、8、9 号煤层煤样 4 份。每个煤样破碎筛分后制取粒径 1 ~ 3 mm 空干基煤样 6 份, 每份 50 g。煤样罐死体积用高压氮气校准。

2) 抽真空与吸附解吸。连接真空泵抽真空, 每个煤样抽真空时间不小于 2 h。吸附平衡压力分别控制在 0.50、0.74、1.00、1.50、2.00、2.50 MPa, 吸附时间不小于 24 h, 煤样罐所连接压力表的读数每 2 h 变化量小于压力表最小刻度 (0.05 MPa) 时认为煤样达到吸附平衡。

3) 数据记录与分析。判断吸附平衡后迅速拧开煤样罐阀门, 使高压游离瓦斯气体在不到 1 s 时间内放散, 至压力表读数为零, 立即拧紧阀门, 按下秒表记录第 1 min、第 4—5 min 及 30 min 内煤样的瓦斯解吸量, 计算第 1 min 及第 4—5 min 瓦斯解吸量占 30 min 解吸总量的比例, 将第 1 min 和第 4—5 min 煤样的瓦斯解吸量与吸附平衡压力 P 作幂函数曲线拟合, 如图 1 所示。

5 min 的解吸量占 30 min 解吸量的比例 6% ~ 22%。

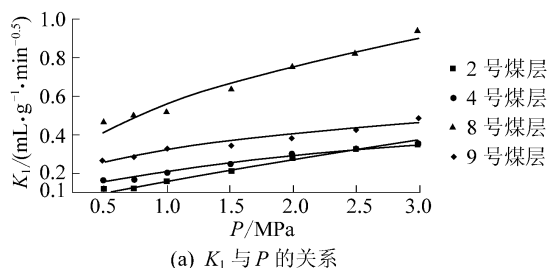
②随着吸附平衡压力增大, 第 1 min 瓦斯解吸量也显著增大, 而第 4—5 min 瓦斯解吸量增大不显著, 说明第 1 min 瓦斯解吸量受吸附平衡压力控制作用

更明显。③屯兰矿各煤层第 1 min 及第 4—5 min 的瓦斯解吸量与吸附平衡压力基本符合幂函数关系, 具有较高的拟合度。

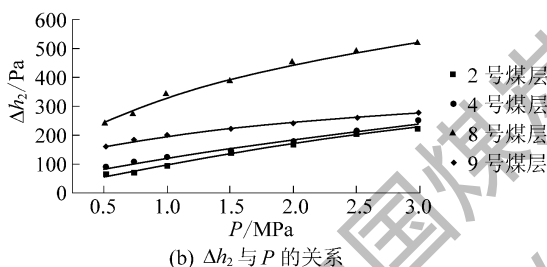
3 煤样钻屑解吸指标实验室模拟测定

3.1 实验室钻屑解吸指标值与压力的关系

文献 [7-8] 通过试验和理论分析提出 K_1 和 Δh_2 指标与吸附平衡压力 P 之间存在着幂函数关系。用屯兰矿 2、4、8、9 号煤层 4 组煤样分别开展煤样钻屑解吸指标实验室模拟测定试验, 记录各个煤样在不同吸附平衡压力 P 下的钻屑解吸指标 K_1 和 Δh_2 值, 对试验结果进行幂函数拟合, 如图 2 所示。



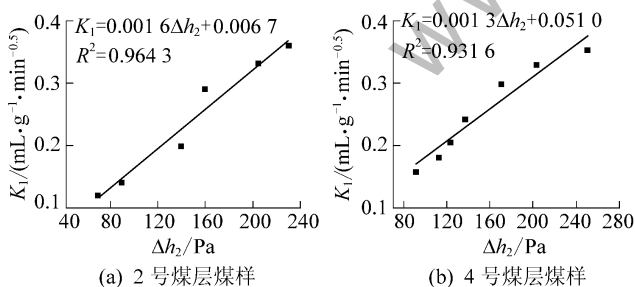
(a) K_1 与 P 的关系



(b) Δh_2 与 P 的关系

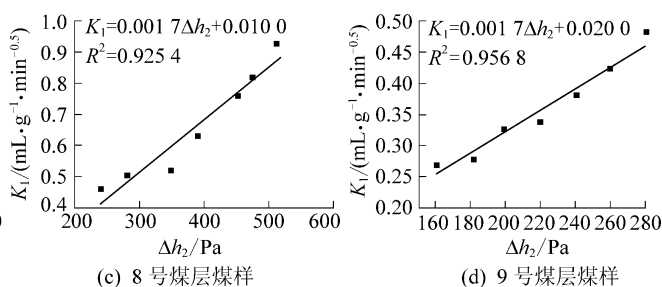
图 2 各煤样钻屑瓦斯解吸指标与吸附平衡压力关系

由表 1 可知, 屯兰矿 2、4、8、9 号煤层各煤样的



(a) 2 号煤层煤样

(b) 4 号煤层煤样



(c) 8 号煤层煤样

(d) 9 号煤层煤样

图 3 各煤样钻屑解吸指标关系

4 屯兰矿钻屑解吸指标的敏感性分析

通过实验室分析和现场考察, 对钻屑解吸指标 K_1 和 Δh_2 的敏感性进行分析。

4.1 实验室分析

通过定容高压吸附解吸试验, 在不同吸附平衡压力条件下, 实测第 1 min 瓦斯解吸量 Q'_1 和第 4—

钻屑解吸指标与吸附平衡压力按幂函数拟合的效果较好, 相关系数基本大于 0.93, 因此, 屯兰矿 2、4、8、9 号煤层钻屑解吸指标 K_1 和 Δh_2 与吸附平衡压力 P 存在着幂函数关系。

表 1 各煤样钻屑解吸指标与吸附平衡压力拟合

煤层编号	指标	幂函数拟合方程	R^2
2 号	Δh_2	$\Delta h_2 = 97.5699P^{0.7814}$	0.9804
	K_1	$K_1 = 0.1593P^{0.7637}$	0.9633
4 号	Δh_2	$\Delta h_2 = 120.8323P^{0.5998}$	0.9475
	K_1	$K_1 = 0.2084P^{0.4806}$	0.9828
8 号	Δh_2	$\Delta h_2 = 330.3868P^{0.3065}$	0.9876
	K_1	$K_1 = 0.5589P^{0.4332}$	0.9623
9 号	Δh_2	$\Delta h_2 = 197.0657P^{0.4193}$	0.9946
	K_1	$K_1 = 0.3173P^{0.3251}$	0.9280

3.2 钻屑解吸指标 K_1 与 Δh_2 关系分析

由图 2 可知, 各组煤样钻屑解吸指标 K_1 值和 Δh_2 均随着平衡压力的提高而增大, 且增大趋势具有较好的一致性; 通过对各组煤样的钻屑解吸指标 K_1 值和 Δh_2 进行线性拟合, 两指标之间具有较好的线性关系(表 2、图 3)。

表 2 煤样钻屑解吸指标关系拟合

煤层编号	线性拟合方程	R^2
2 号	$K_1 = 0.0016\Delta h_2 + 0.0067$	0.9643
4 号	$K_1 = 0.0013\Delta h_2 + 0.0510$	0.9316
8 号	$K_1 = 0.0017\Delta h_2 + 0.0100$	0.9254
9 号	$K_1 = 0.0017\Delta h_2 + 0.0020$	0.9568

5 min 的瓦斯解吸量 Q'_{4-5} 。试验用定制耐压煤样罐和高压瓦斯吸附气路。通过实验室模拟测定不同平衡压力下各煤样的 K_1 和 Δh_2 , 依据 K_1 和 Δh_2 值反算第 1 min 解吸量 Q_1 和第 4—5 min 解吸量 Q_{4-5} 。

针对各个煤层煤样试验所测 K_1 反算第 1 min 解吸量和吸附解吸试验第 1 min 解吸量进行线性拟合, 如图 4a 所示, 斜率接近于 1, $R^2 = 0.9256$ 。对

个煤层煤样试验所测指标 Δh_2 反算第4—5 min 解吸量和吸附解吸试验第4—5 min 解吸量进行线性拟合,如图4b所示,斜率接近于1, $R^2 = 0.9325$ 。说明高压定容吸附解吸试验和钻屑解吸指标实验室模拟测定的结果基本可靠,具备可比性。

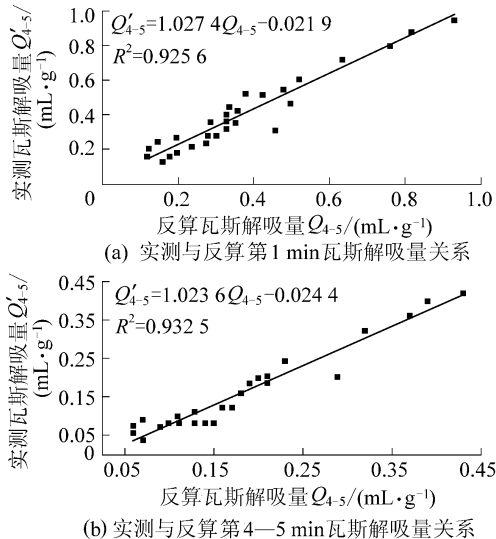


图4 实测与反算瓦斯解吸量的关系

对比 Q'_1 、 Q_1 可知,用 K_1 值反算第1 min 的瓦斯解吸量通常小于实验室吸附解吸试验第1 min 的解吸量,二者差别较小,在0~43.75%,平均差别为16.08%。对比 Q'_{4-5} 、 Q_{4-5} 可知,用 Δh_2 值反算第4—5 min 的瓦斯解吸量通常大于实验室吸附解吸试验所得的第4—5 min 解吸量,二者差别较大,平均差别在23.82%,且个别数值误差较大。说明屯兰矿各煤层煤样 K_1 的可靠性比 Δh_2 好。

4.2 现场考察

屯兰矿敏感指标现场考察选取了12412工作面、12412底抽巷、18208轨道巷、19205工作面掘进或回采过程中的进行工作面突出预测时测定的钻屑解吸指标 K_1 、 Δh_2 进行指标敏感性论证。指标敏感性研究具体计算步骤如下:

1) 指标的标准化。钻屑瓦斯解吸指标 K_1 、 Δh_2 有不同的单位,为了使比较对象处于相同的数学体系中进行同类级的比较需要做无量纲化处理,即通过数学变换消除指标单位及其数值数量级的影响。标准化可用下式进行处理。

$$y_j = |x_j - \bar{x}| / S \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其中: y_j 为预测指标标准化值; x_j 为预测指标实

际值; \bar{x} 为预测指标实际值的平均值; S 为预测指标实际值的标准差; n 为样本数量。经过式(6)计算,带有不同单位的突出预测指标 K_1 、 Δh_2 便都可以转换成在区间[0, 1]内变化的无量纲量。

2) 敏感指标筛选。敏感指标筛选方法有三率法^[9-10]、灰色关联法^[11-13]、方差极差法^[14-15]。笔者主要采用方差极差法。对于方差极差法,可用广义方差极小法、极大不相关法、相关系数法、最小均方差法、极小极大离差法等,进行敏感指标筛选,笔者采用最小均方差法进行指标敏感性分析。

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

其中: s_i 为第 i 个指标的样本均方差; y_{ij} 为矩阵

$[y_{ij}]_{m \times n}$ 中的元素; \bar{y}_i 为第 i 个指标的样本平均值; m 为指标数量。令 $s_k = \min\{s_i\}$, s_k 值越大则其对应的指标越敏感,反之则不敏感。共收集4个采样地点37个循环现场测定数据, K_1 、 Δh_2 两个指标计算得到 s_k 分别为0.55和0.24。

综上所述:井下实测钻屑解吸指标 K_1 和 Δh_2 , K_1 的敏感性较好, Δh_2 敏感性较差。

5 结 论

屯兰矿各煤层煤样第1 min内及第4—5 min内的解吸量与吸附平衡压力具有的幂函数关系。钻屑解吸指标 Δh_2 和 K_1 间有着较好的线性关系。屯兰矿各煤层煤样第1 min比第4—5 min 瓦斯解吸量受吸附平衡压力控制作用更明显。屯兰矿各煤层进行突出危险性预测时,应选用钻屑解吸指标 K_1 作为主要指标(敏感指标),以 Δh_2 作为辅助指标。

参考文献:

- [1] 邵 军. 钻屑瓦斯解吸指标的确定及应用[J]. 中州煤炭, 1991(3): 21-25.
- [2] 张雷林, 秦波涛, 陶文枝, 等. 新集二矿突出预测敏感性指标及其临界值确定[J]. 煤矿安全, 2012, 43(11): 163-167.
- [3] 刘华锋. 高突煤层突出预测敏感指标临界值及可靠性分析[J]. 煤矿安全, 2014, 45(1): 129-131.
- [4] Barrer R M. Diffusion in solid[M]. Britain: Cambridge University Press, 1951.
- [5] 刘彦伟. 煤粒瓦斯放散规律机理与动力学模型研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- [6] 邵 军. 关于钻屑瓦斯解吸指标的探讨[J]. 煤矿安全, 1991, 22(3): 34-39.

(下转第116页)

制备的型煤空隙分布不同,空隙分布极不均匀;型煤水平方向和垂直方向空隙的定向程度均较差,对型煤强度劣化的影响较小。空隙分布具有一定的规律

性:型煤表面附近较为致密,无大的空隙;型煤内部空隙率较大,并且空隙波动较大;大的空隙通常出现在型煤中心附近。

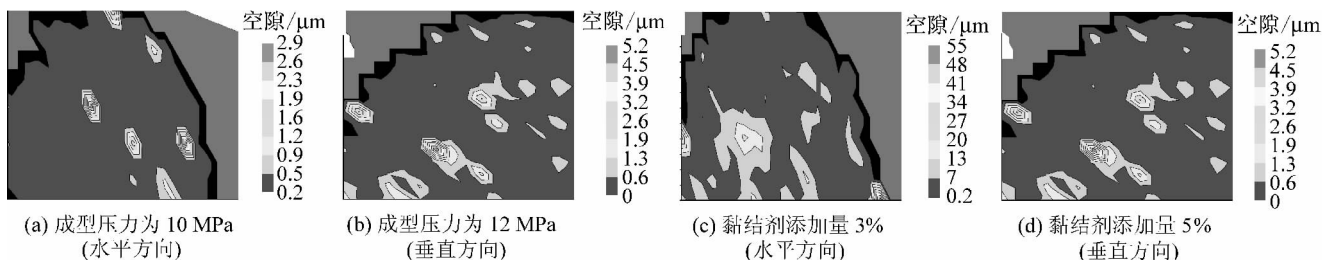


图 3 典型型煤中空隙分布等值线

3 结 论

1) 不同黏结剂添加量及成型压力制备的型煤中空隙率差别较大;型煤垂直方向与水平方向上空隙率不同,垂直方向的空隙率比水平方向的小。

2) 相比于不同黏结剂添加量下制备的型煤,不同成型压力下制备型煤中空隙直径较集中,而 2 种条件下制备型煤水平方向上空隙直径变化较小。

3) 型煤中的空隙分布不均匀,水平方向和垂直方向上的定向程度均较差,型煤中的空隙从表面到内部有增大的趋势。

4) 通过研究型煤制备工艺与性能之间的关系,可实现对型煤的质量控制,并优化型煤生产工艺。

参考文献:

- [1] Rice R. Comparison of Stress Concentration Versus Minimum Solid Area Based Mechanical Property - Porosity Relations [J]. J Mater Sci, 1993(28): 2187 - 2190.
- [2] Nyongesa F, Aduda B. Fracture Strength of Porous Ceramics: Stress Concentration Vs minimum Solid Area Models [J]. Afr J Sci Technol, 2004(5): 19 - 27.
- [3] Mehta Kumar P, Monteiro Paulo J. Concrete: Microstructure, Properties and Materials [M]. 3th. New York: McGraw - Hill Professional, 2005: 21 - 47.
- [4] Patrick J, Stacey A. The Strength of Industrial Cokes: Further Studies of the Influence of Coke Breeze in a Coal Charge on Tensile Strength of Coke [J]. Fuel, 1975, 54(4): 256 - 264.
- [5] Sing K S W, Everett D H, Haul R A W et al. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems - with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity [J]. Pure and Applied Chemistry, 1985, 57(4): 603 - 619.
- [6] 陈 鹏. 中国煤炭性质、分类和利用 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2006: 163.
- [7] 彼里西阿 G E, 浦迪 S M. 体视学和定量金相学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980: 1 - 30.
- [8] 余永宁, 刘国权. 体视学组织定量分析的原理和应用 [M]. 北

京: 冶金工业出版社, 1989: 35 - 74.

- [9] RICHARDS S R. Physical Testing of Fuel Briquettes [J]. Fuel Processing Technology, 1990(25): 89 - 100.
- [10] MT/T 915—2002 工业型煤样品采取方法 [S].
- [11] GB/T 16773—2008 煤岩分析样品制备方法 [S].
- [12] 徐振刚, 刘随芹. 型煤技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 193.
- [13] 王 越, 白向飞, 王东升, 等. 型煤冷态强度影响因素的光学显微分析 [J]. 煤炭转化, 2013, 36(2): 79 - 82.
- [14] Patrick J, Walker A. Macroporosity in Cokes: its Significance, Measurement and Control [J]. Carbon, 1989, 27: 117 - 123.
- [15] Kim S Y, Sasaki Y. Simulation of Crack Formation in an Anisotropic Coke Using Discrete Element Method [J]. Fuel, 2013(106): 357 - 364.
- [16] 奥西波夫. 粘土类土和岩石的强度与变形性能的本质 [M]. 李生林, 译. 北京: 地质出版社, 1985: 17 - 19.

(上接第 44 页)

- [7] 王魁军, 程五一, 梁永祥. 预测敏感指标及临界值的确定 [J]. 煤炭科学技术, 1996, 24(11): 44 - 47.
- [8] 胡千庭, 文光才, 徐三民. 工作面突出预测敏感指标及临界值确定方法的研究 [J]. 煤炭工程师, 1998(50): 8 - 10.
- [9] 孙东玲. 煤与瓦斯突出预测指标临界值的选取对预测准确率的影响 [J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 71 - 75.
- [10] 仇海生. 工作面防突措施效果检验指标的敏感性分析 [J]. 煤矿安全, 2012, 43(1): 83 - 85.
- [11] 李国祯, 李希建, 董 杰. 发耳煤矿煤与瓦斯突出预测指标敏感性探讨 [J]. 工业安全与环保, 2011, 37(5): 33 - 35, 47.
- [12] 曹桂林, 王明达. 潘一矿煤钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 值的突出敏感性及其临界值 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30(5): 685 - 688.
- [13] 曹桂林, 仇海生, 王志权. 潘一矿煤钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 值的突出敏感性及其临界值 [J]. 煤矿安全, 1996, 37(5): 10 - 12.
- [14] 孙东玲. 确定瓦斯突出敏感指标及合理临界值 [J]. 煤, 1996, 5(6): 24 - 28.
- [15] 翟清伟, 程远平, 王 亮, 等. 祁南煤矿 72# 煤层钻屑瓦斯解吸指标敏感性分析 [J]. 中国煤炭, 2012, 38(1): 88 - 91.