

文章编号: 0253-9993(2005)01-0063-04

突出危险煤破碎功理论与实验研究

蔡成功, 熊亚选

(河南理工大学 资源与材料工程系, 河南 焦作 454000)

摘 要: 系统分析了煤破碎的各种学说理论, 应用捣碎法测定了突出煤的破碎功, 理论验证了破碎功与各学说的符合程度, 得出了突出煤破碎比功与坚固性系数关系的数学模型. 实验研究结果表明, 煤的破碎符合新表面说, 破碎时所消耗的功主要消耗于煤产生新表面积, 与破碎后产生的新表面积成正比. 煤破碎比功与煤的坚固性系数符合线性规律, 是反映煤抵抗外力破碎难易程度的重要指标.

关键词: 煤与瓦斯突出; 破碎功; 表面积; 破碎比功; 坚固性系数

中图分类号: TD713 **文献标识码:** A

Theoretical and experimental study on crushing energy of outburst-proneness coal

CAI Cheng-gong, XIONG Ya-xuan

(Department of Resource and Material Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Based on the systematic analysis of coal crushing theories, crushing energy of outbursts-proneness coal was mensurated by using mashing technology. It was validated that the consistency degree of crushing energy with various crushing theories, and then a mathematics model calculating specific crushing energy and Protodyakonov coefficient of outbursts-proneness coal was built. The experimental results show that coal crushing theoretically accords with new surface theory, the coal crushing energy is main consumed to form new surface area, and crushing energy is a direct ratio function of the new forming surface area, the specific energy of coal crushing is good linear relationship with coal Protodyakonov coefficient, and the specific energy of coal crushing is an important index that coal is prone to be crushed standing against outside forces.

Key words: coal and gas outburst; crushing energy; surface area; specific crushing energy; Protodyakonov coefficient

煤与瓦斯突出是在应力、瓦斯和煤的力学性质综合作用下发生的一种复杂动力过程, 而煤与瓦斯突出的基本特征是抛出的煤高度破碎, 时常含有大量的手捻无粒感的煤粉, 煤体在煤岩中积聚的弹性潜能和瓦斯膨胀能作用下发生连续的破碎是煤与瓦斯突出得以发生和发展的必要条件. 前苏联学者实验测定结果表明, 随着破碎功的增大, 新形成的比表面积增大, 即使对同一种煤, 如破碎粒度很小, 亦将偏离 Rittinger 定律^[1]. 国内的研究者有将煤的破碎比功取为定值^[2], 也有的认为新增表面积、折算直径的倒数与破碎功呈幂函数关系比线性关系更符合实际^[3]. 目前, 在煤破碎功及破碎比功的认识上仍存在较多分歧, 需要做进一步研究探索. 本文给出了笔者对我国部分突出危险煤破碎功的测定结果, 探讨了突出煤破碎的一些规律.

收稿日期: 2004-06-21

作者简介: 蔡成功 (1961-), 男, 江苏镇江人, 硕士, 高级工程师. E-mail: caicg@hpu.edu.cn

1 破碎功相关学说

煤是脆性体,描述脆性体破碎时的破碎功与破碎后的粒度关系主要有以下 3 种学说,即 P. R. Rittinger 的新表面说, G Kick 的相似说和 F. C. Bond 提出的裂纹说^[4].

(1) 新表面说 新表面说认为物体破碎前后,有所区别的只是增加了新的表面积,而获得新表面积所需之能量与破碎比功成反比. 由于几何相似固体颗粒体积与其线性尺寸的立方成正比,而面积与线性尺寸的平方成正比,所以单位体积所具有的表面积与其几何尺寸成反比. 显微研究结果表明,突出煤颗粒主要是以球状颗粒为主^[5],单位体积球状颗粒的表面积 $S = 4 \left(\frac{d}{2} \right)^2 / \frac{4}{3} \left(\frac{d}{2} \right)^3 = 6 \frac{1}{d} = K \frac{1}{d}$,其中 d 为几何相似固体颗粒直径; K 为取决于颗粒形状的常数. 根据新表面说,煤岩破碎所消耗的功与破碎后所产生的新表面积成正比,则有 $a = K_R(1/d - 1/D)$,其中 a 为破碎单位体积(质量)煤岩所消耗的功,即破碎比功; K_R 为取决于材料性质和破碎方式的常数; D, d 分别为破碎前和破碎后煤岩的平均直径.

(2) 相似说 相似说认为同一种岩石(物理力学性质相同)破碎时不论其大小如何,其应力分布、破碎方式(机理)和破碎后的块度也是相似的. 也就是说,煤岩在外载荷作用下,达到强度极限开始破碎时其单位体积所具有的能量(a_0)和破碎后其破碎比(i_0)是一定的. 欲破碎到 i 的破碎比,需要重复破碎的次数为 n ,则有 $i_0^n = i$,在单位体积上所做之功为 $a = na_0$,变换得 $a = \lg i / \lg i_0 = K_K \lg(D/d) = K_K \lg \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$,其中 K_K 为取决于材料性质和破碎方式的常数.

(3) 裂纹说 裂纹说是美国 F. C. Bond 分析了许多实际破碎功与破碎后块度之间的关系,结果与新表面说和相似说均不甚符合,认为这是因为岩石中隐藏着各种裂纹的原故. 裂纹说的结论可以表示为 $a = K_B \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right)$,其中 K_B 为取决于材料性质和破碎方式的常数. 计算破碎比功时,破碎后的平均块度需要用煤样颗粒重量加权平均块度计算.

2 破碎功实验研究方法

根据颗粒形状,冲击破碎和压碎的机理最接近煤与瓦斯突出^[5],所以煤的破碎功测定方法采用冲击式捣碎法. 实验在落锤装置上进行(图 1). 落锤质量 $m = 2.4 \text{ kg}$,冲击高度 $h = 600 \text{ mm}$. 为避免基底材料发生弹性变形造成能量损失,捣臼放在坚硬的混凝土上进行. 落锤施加于煤样上的功按 $a = mghn$ 计算. 单位质量煤的破碎功 $A = mghn / G$,破碎后产生单位新表面积所消耗的功,即破碎比功 $W = mghn / GS$,其中 a 为煤的破碎功, J; A 为单位质量煤的破碎功, J/g; W 为破碎比功, J/(g·cm²); n 为落锤冲击次数; G 为实验煤样总质量, g.

测定煤样质量为 50 g,破碎前煤样块度为 1~2 mm. 为了计算破碎后煤样产生的新表面积和折算直径,将已破碎煤样用孔径为 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.1 mm 等规格的筛子进行粒度组分分析. 由于 0.1 mm 以下粒度的煤样对表面积计算结果影响较大,故采用沉降分析法进行粒度分析.

破碎后煤样产生的新表面积为

$$S = S_t - S_0 - \frac{6G}{\rho} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right),$$

式中, S_t 为破碎后煤样的总表面积, cm²; S_0 为破碎前煤样的总表面积, cm²; ρ 为煤样的密度, g/cm³.

3 实验结果分析

(1) 细粒度煤样的平均折算直径 在作沉降分析时,颗粒分散是关键,采用煮沸 60 min 后置于超声

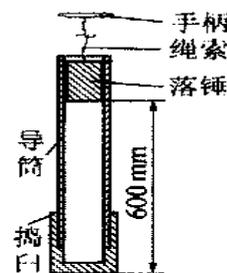


图 1 破碎功测定装置

Fig. 1 The device for measuring crushing energy

波水浴中分散 60 min 的方法。分析粒度为 0.1 mm 筛下品, 一直分析到 2 μm 。峰峰九龙口 2 煤典型颗粒粒度组成分析结果见表 1。表 2 为 7 个煤样冲击破碎后 0.1 mm 粒度以下煤样的沉降分析结果。由表 2 可知, 破碎后的平均折算直径介于 10.8 ~ 18.0 μm , 最大的是阳泉七尺煤, 为 18 μm , 最小的是小四平煤矿突出抛出煤, 为 10.80 μm , 平均直径 14.43 μm 。因此, 在计算 0.1 mm 以下煤样的表面积时, 如采用算术平均直径 (0.05 mm) 计算, 显然与实际结果相差甚远, 这也是造成实验结果产生偏差的主要原因。

表 1 沉降分析颗粒粒度组成

Table 1 Particle granularity compositions of settlement analysis

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
样品质量/g	0.444 5	0.452 2	2.826 0	1.206 0	0.666 0	0.174 0	0.306 0	0.198 0	0.132 0	0.126 0	0.114 0	0.126 0
最大粒度/ μm	100	83.313 4	62.453 0	41.699 1	20.848 1	10.423 3	8.341 9	6.254 2	5.211 8	4.169 4	3.127 1	2.084 7
平均粒度/ μm	91.101 8	71.472 7	50.619 5	30.370 2	15.152 9	9.110 7	7.123 1	5.635 2	4.607 2	3.582 6	2.561 5	1.024 6

表 2 0.1 mm 以下煤样的折算直径

Table 2 Convert diameter of coal particles below 0.1 mm

序号	煤样名称	折算直径/ μm	序号	煤样名称	折算直径/ μm
1	北票三宝 - 240 东三石门 9 槽	17.0	6	北票冠山 - 460 东一道 5A 层	14.4
2	阳泉七尺煤	18.0	7	芦岭 8 煤	13.4
3	通化韦塘三井 1 层	14.8	8	抚顺小四平煤矿突出抛出煤	10.8
4	峰峰九龙口 2 煤	14.4	平均		14.43
5	荣巩 - 5811 二分层	12.6			

(2) 煤破碎功与各学说的符合程度 表 3 为 7 个突出危险煤样的破碎功与各学说符合程度的分析结果, 典型曲线如图 2 所示。表 3 中 r 为相关系数; σ^2 为残差平方和。图 2 表明, 破碎功 A 与 $1/d$ 基本在一直线上, A 与 $1/\sqrt{d}$ 稍差, 与 $\lg(1/d)$ 呈曲线变化。表 2 中几乎每一个煤样都有着相同的规律, 即在 3 种学说中, 新表面说的 r 最高, 为 0.999 1 ~ 0.993 7, 平均为 0.996 4, 而 σ^2 为 15.09 ~ 288.86, 平均为 122.45, 是 3 种学说中最小的; 裂纹说相关系数为 0.997 8 ~ 0.990 8, 平均为 0.993 3, 相关程度较新表面说稍差, 而 σ^2 为 64.68 ~ 4 267.41, 平均为 777.09, 远大于新表面说残差平方和; 相似说 r 为 0.990 6 ~ 0.969 3, 平均为 0.975 7, 相关程度最差, 而 σ^2 为 318.51 ~ 3871.80, 平均为 1 078.45, 在 3 种学说中残差平方和最大。因此, 可以认为新表面说较相似说、裂纹说更适合于描述煤的破碎, 即煤的破碎符合新表面说, 破碎时所消耗的功与破碎后新表面积成正比, 与煤样的平均粒径成反比。

表 3 煤破碎功与各学说符合程度

Table 3 Consistency degree between coal crushing energy and various crushing theories

序号	煤样名称	$A = K/d + b$		$A = K \lg \frac{1}{d} + b$		$A = K \frac{1}{\sqrt{d}} + b$	
		r	σ^2	r	σ^2	r	σ^2
1	北票台吉 10 槽软分层	0.996 7	97.05	0.977 7	640.64	0.992 8	207.79
2	北票三宝 9 槽	0.993 8	180.79	0.969 3	878.21	0.990 8	264.96
3	通化韦塘三井 6 层	0.999 1	15.09	0.978 7	349.33	0.996 1	64.68
4	通化韦塘三井 1 层	0.996 7	54.19	0.980 6	318.51	0.993 3	110.34
5	通化韦塘三井 4 层	0.996 8	94.09	0.969 7	865.00	0.991 1	256.00
6	焦作九里山矿大煤	0.998 2	288.86	0.980 6	3 871.80	0.997 8	4 267.41
7	抚顺小四平煤矿突出煤	0.993 7	127.05	0.973 1	625.63	0.991 5	268.46
平均		0.996 4	122.45	0.975 7	1 078.45	0.993 3	777.09

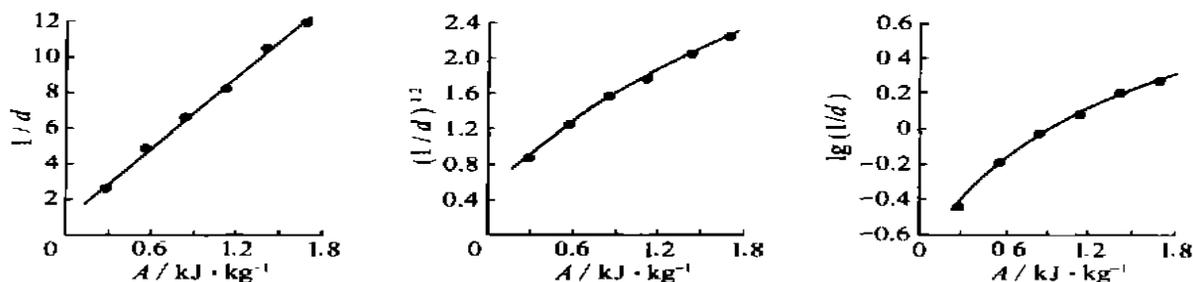


图2 破碎功与破碎后颗粒平均粒径的关系

Fig. 2 Relationship between crushing energy and average particle diameter after crushed

(3) 突出煤破碎比功与坚固性系数的关系 破碎比功指煤破碎后产生单位新表面积所消耗的功. 表4给出了北票台吉10槽软分层等7个突出危险煤样的破碎比功测定结果. 由表4可看出, 北票台吉10槽软分层煤破碎比功最大, 为 $2.88 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$, 焦作九里山矿大煤破碎比功最小, 为 $1.07 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$, 平均为 $1.99 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$. 显然, 破碎比功与煤的坚固性系数有着重要关系(图3), 随着坚固性系数 f 的增加, 煤的破碎比功也增大; 反之, 破碎比功减小. 因此, 破碎比功是反映煤抵抗外力破碎的重要指标. 根据破碎比功的物理意义, 回归时强制逼近到零点, 则两者的线性关系为 $W = 9.18 \times 10^{-3} f$.

表4 突出煤破碎比功和坚固性系数关系
Table 4 Relationship between specific crushing energy and coal Protodyakonov coefficient

序号	煤样名称	坚固性系数 f	破碎比功 $W \times 10^{-3} / \text{J cm}^{-2}$	标准差 $\times 10^{-3}$
1	北票台吉10槽软分层	0.300	2.88	0.271 2
2	北票三宝9槽煤	0.240	2.24	0.188 6
3	通化韦塘三井6层	0.225	2.02	0.052 5
4	通化韦塘三井1层	0.179	1.55	0.061 2
5	通化韦塘三井4层	0.206	1.62	0.109 1
6	焦作九里山矿大煤	0.119	1.07	0.764 3
7	抚顺小四平煤矿突出煤	0.250	2.56	0.084 1

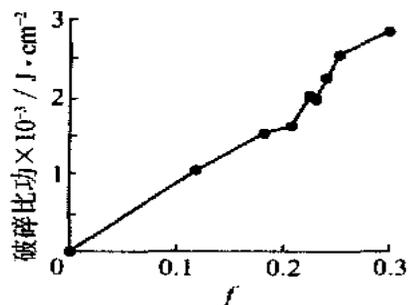


图3 破碎比功与煤坚固性系数的关系

Fig. 3 Relationship between specific crushing energy and coal Protodyakonov coefficient

4 结 论

煤的破碎符合黎金格的新表面说, 破碎时所消耗的功主要消耗于产生新表面积, 与破碎后产生的新表面积成正比, 与破碎后煤样的平均粒径成反比. 突出煤破碎比功与煤的坚固性系数 f 成正比, 符合 $W = 9.18 \times 10^{-3} f$, 反映出煤抵抗外力破碎的难易程度——坚固性程度, 是煤抵抗外力破碎的重要指标.

参考文献:

- [1] 宋士钊. 煤与瓦斯突出 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1964. 127~136.
- [2] 朱连山. 通过能量计算探讨煤与瓦斯突出机理 [J]. 煤矿安全技术, 1982, 30 (3): 1~8.
- [3] 文光才. 煤的冲击破碎 [J]. 煤炭工程师, 1995, 102 (5): 8~11.
- [4] 徐小荷, 余 静. 岩石破碎学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. 41~56.
- [5] A A. 突出时煤的破碎功 [A]. 煤、岩和瓦斯突出国外资料汇编 [C]. 重庆: 科技文献出版社重庆分社, 1980. 55~59.