

胡振中, 庄亚明, 蔡天意, 等. 单颗粒煤岩冲击破碎能耗与粒度分布特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 230-234. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1179
Hu Zhenzhong, Zhuang Yaming, Cai Tianyi, et al. Experimental study on energy consumption and particle size distribution of single particle coal under impact crushing[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 230-234. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1179

单颗粒煤岩冲击破碎能耗与粒度分布特性试验研究

胡振中^{1,2}, 庄亚明^{1,2}, 蔡天意^{1,2}, 陈晓平^{1,2}

(1. 东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为研究原煤进入流化床锅炉前破碎的能量转化规律, 在落锤冲击试验台上对淮北无烟煤和淮北烟煤进行单颗粒冲击破碎试验。分析了破碎能耗与原煤以及破碎产物粒度分布的关系, 以及破碎产物的粒度分布特性。研究表明: 随着破碎程度的加深, 两种煤比冲击破碎能耗呈指数增大; 煤岩颗粒的易碎性随着煤岩初始粒径的增大呈现先增大后减小的趋势; 当破碎产物 t_{10} 值相同时, 存在一个最佳的初始原煤粒径, 此时的比冲击能耗最小; 同等条件下淮北烟煤较淮北无烟煤更容易破碎成细小颗粒; 单颗粒冲击破碎产物的粒度分布符合 t_n 曲线族规律, 冲击功增大对破碎产物中等粗细颗粒的含量影响较为显著, 对微小颗粒含量的影响不大。

关键词: 煤; 冲击破碎; 单颗粒; 能耗; 粒度分布

中图分类号: TD231.1 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2015)S1-0230-05

Experimental study on energy consumption and particle size distribution of single particle coal under impact crushing

HU Zhen-zhong^{1,2}, ZHUANG Ya-ming^{1,2}, CAI Tian-yi^{1,2}, CHEN Xiao-ping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to investigate the energy consumption of coal particles under crushing before being fed into fluidized bed, a drop weight apparatus was employed to crush Huaibei anthracite and Huaibei bitumite. The relationship between energy consumption and size distribution of original coal particles and crushing products were discussed. The results show that the specific impact energy increases as the degree of crushing becomes deeper. The friability of coal is firstly strengthened and then weakened as the increase of original coal particle size. There is an optimum size of original coal particle at which the specific impact energy reaches minimum when the t_{10} of product is the same. Huaibei bitumite is easier to be crushed into finer particles than Huaibei anthracite in the same conditions. Sahoo's t_n curves can describe the particle size distribution of shattered materials well. The impact strength has a significant influence on the content of coarse particles of shattered materials, however little influence on the content of fine particles.

Key words: coal; impact crushing; single particle; energy; particle size distribution

原煤在进入 CFB 锅炉燃烧之前要进行破碎, 破碎是一个复杂的能量转换过程, 调查表明电厂用电中

约有 10% 被破碎机等设备所消耗。破碎能耗不仅取决于煤岩的种类, 还与煤岩颗粒大小等因素有关。破

收稿日期: 2014-09-08 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAA02B01)

作者简介: 胡振中(1988—), 男, 安徽绩溪人, 硕士研究生。E-mail: njtzhzz@126.com。通讯作者: 陈晓平(1967—), 男, 江苏南通人, 教授, 博士生导师。Tel: 025-83793453, E-mail: xpchen@seu.edu.cn

碎能耗的大小直接影响到电厂的经济效益。

由于破碎机的破碎工况较难控制,且破碎结果具有很强的随机性,所以难以研究原煤颗粒破碎过程中各参数的变化规律。国内外众多学者对单颗粒冲击破碎的能量消耗做了一定的研究,以用于指导生产实践。澳大利亚昆士兰大学的 Napier^[1]教授在 20 世纪末提出的单颗粒冲击能耗模型,指出了单颗粒冲击破碎能耗与产物粒度模数 t_{10} 的关联规律; Whyte^[2]通过单摆冲击试验对 Napier 能耗模型进行验证,表明该能耗公式能很好地描述冲击能耗的大小;黎立云等^[3]对单颗粒砂岩静态加压和动态冲击能耗吸收进行了对比分析;李启月等^[4]利用 SHPB 装置对单颗粒砂卡岩冲击破碎能耗与入射能的关系进行了分析。截至目前,关于单颗粒煤岩在落锤冲击条件下的破碎能耗特性研究极少,也鲜见有对破碎产物的粒度分布特性进行分析。故本文在落锤冲击试验台上,对两种电厂常用煤进行破碎试验,利用断裂力学理论对煤岩单颗粒落锤冲击破碎的破碎能耗和产物粒度分布特性进行了深入研究^[5-7],以期得到有价值的规律和结论指导生产实践。

1 试验装置和试验方法

单颗粒冲击破碎试验在落锤冲击试验台上完成,如图 1 所示。

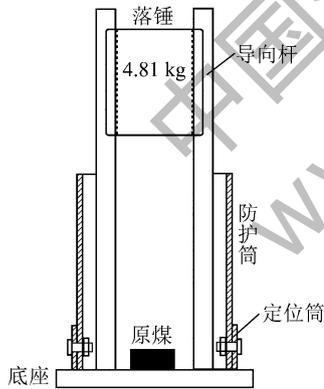


图 1 落锤冲击试验台

Fig. 1 Drop weight testing device

落锤质量为 4.81 kg,试验时在导向杆与落锤之间涂抹润滑油,减少摩擦能量损失。落锤以一定高度冲击底座上的原煤,破碎产物用标准筛进行筛分,计算出相应的粒度特征数。

2 结果与讨论

2.1 破碎产物 t_{10} 值与破碎能耗的关联规律

由于单颗粒冲击破碎产物粒度分布不均匀,存在个别较大颗粒,其粒径远大于其他颗粒,因此使用平

均粒径来衡量产物的粗细程度不太合理。为此,定义破碎产物 t_{10} 值为筛孔直径为煤岩初始粒径 1/10 时,产物的筛下质量分数^[8]。可以看出 t_{10} 越大,表明产物越细,破碎程度越深。

为研究破碎产物粒度特征数 t_{10} 与破碎能耗的关联规律,用打磨机将淮北无烟煤和淮北烟煤加工成边长为 20 mm 的立方体各 5 组,分别以 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m 的落锤高度进行冲击破碎,落锤质量为 4.81 kg。破碎产物用标准筛进行筛分,根据筛分结果计算出产物的 t_{10} 值和破碎能耗。试验结果如图 2 所示。

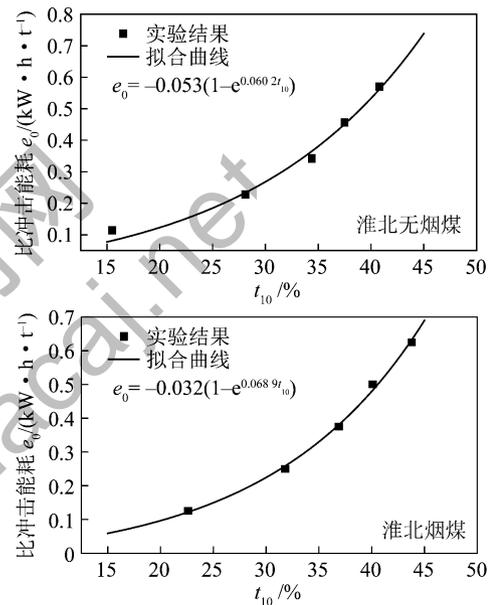


图 2 淮北无烟煤和烟煤比冲击能耗与产物 t_{10} 值的关系

Fig. 2 Relationship between specific crushing energy and t_{10} of Huaibei anthracite and bitumite

由图 2 可以看出,比冲击能耗随 t_{10} 值的提高呈指数规律增大。拟合结果表明,当初始粒径为 20 mm 时,其能耗满足:

$$\begin{cases} e_0 = -0.053(1 - e^{-0.060 \cdot 2t_{10}}) & (\text{淮北无烟煤}) \\ e_0 = -0.032(1 - e^{-0.068 \cdot 9t_{10}}) & (\text{淮北烟煤}) \end{cases} \quad (1)$$

从试验数据可以看出,对于淮北无烟煤,破碎产物 t_{10} 值从 15% 变化为 30% 时,比冲击能耗增大 0.188 kW · h/t; 而从 30% 提高为 45% 时,比冲击能耗则增大 0.473 kW · h/t。对于淮北烟煤,产物 t_{10} 从 15% 提高到 30% 时,比冲击能耗增大 0.168 kW · h/t; 而从 30% 提高为 45% 时,比冲击能耗则增大 0.463 kW · h/t。这说明,无论对于淮北无烟煤还是淮北烟煤,随着破碎程度的加深,煤岩抵抗外力的能力逐渐加强,进一步破碎需要消耗更多的能量。对比淮北无烟煤和淮北烟煤的试验结果还可

以看出,在相同 t_{10} 值时,淮北无烟煤破碎所需的比冲击能耗高于淮北烟煤。

2.2 原煤粒径与破碎能耗的关联规律

研究表明,对于冲击破碎这样的动态载荷,初始粒径对颗粒强度等物理特性存在显著的影响,动态强度随粒径的增大而减小^[9-11]。这是因为煤岩是内部充满裂纹的不均匀固体,裂纹的随机分布决定了煤岩的局部宏观强度小于其名义强度。颗粒越大,内部裂纹越多,越有可能在某些薄弱处发生破坏^[12-13]。

为研究原煤粒径对比冲击能耗、颗粒易碎性的影响规律。用打磨机将淮北无烟煤和淮北烟煤加工成边长为 15、25、35、45、55 mm 的立方体各 5 个,分别以不同的落锤高度进行冲击破碎,使其比冲击能耗在相近的范围内。

图 3 为试验得到的淮北无烟煤和淮北烟煤 t_{10} 与 e_0 的关系,可以看出,Napier 能耗公式可以较好地描述落锤冲击破碎产物 t_{10} 值和比冲击能耗的关系,且曲线先快速增大后趋于平缓,这表明当破碎进行到一定程度后,进一步加大破碎能耗对破碎效果的影响不再明显。

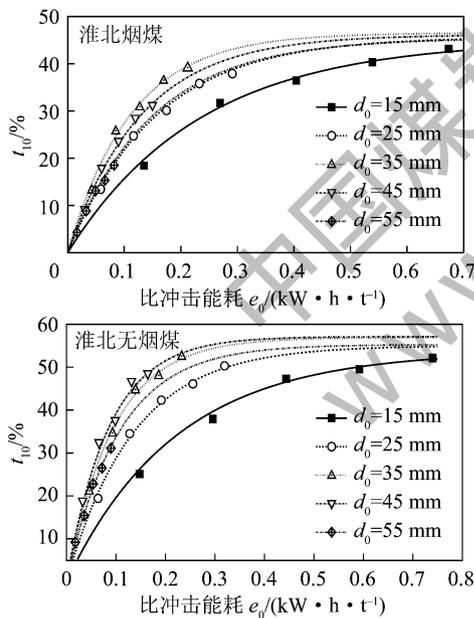


图 3 淮北无烟煤和烟煤破碎产物 t_{10} 值与比冲击能耗关系

Fig. 3 Relationship between t_{10} and specific crushing energy of Huaibei anthracite and bitumite

对于不同的初始粒径,Napier 能耗公式具有不同的拟合结果,见表 1。

利用表 1 中的拟合公式,根据文献取破碎程度为 30%,求出当 $t_{10} = 30\%$ 时不同初始粒径的比冲击能耗大小,得到比冲击能耗与初始粒径的关系如图 4 所示。

表 1 Napier 能耗公式拟合结果

Table 1 Fitting results of Napier energy equation

$d_0 /$ mm	淮北无烟煤	淮北烟煤
15	$t_{10} = 45.06 [1 - \exp(-4.27e_0)]$	$t_{10} = 53.77 [1 - \exp(-4.52e_0)]$
25	$t_{10} = 45.69 [1 - \exp(-6.46e_0)]$	$t_{10} = 55.01 [1 - \exp(-7.38e_0)]$
35	$t_{10} = 46.52 [1 - \exp(-8.91e_0)]$	$t_{10} = 56.93 [1 - \exp(-10.46e_0)]$
45	$t_{10} = 46.13 [1 - \exp(-7.71e_0)]$	$t_{10} = 57.12 [1 - \exp(-11.56e_0)]$
55	$t_{10} = 45.41 [1 - \exp(-6.78e_0)]$	$t_{10} = 55.26 [1 - \exp(-9.38e_0)]$

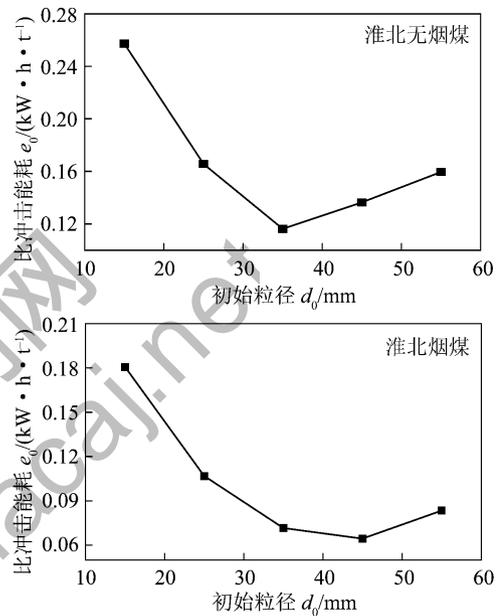


图 4 $t_{10} = 30\%$ 时淮北无烟煤和烟煤比冲击能耗与初始粒径的关系

Fig. 4 Relationship between specific crushing energy and initial particle size of Huaibei anthracite and bitumite as $t_{10} = 30\%$

由图 4 可以看出,对于淮北无烟煤,当初始粒径由 15 mm 增大到 35 mm 时,比冲击能耗由 0.257 kW·h/t 减小到 0.116 kW·h/t;继续增大初始粒径,比冲击能耗开始变大,当粒径增大到 55 mm 时,比冲击能耗为 0.159 kW·h/t。

对于淮北烟煤,变化规律类似,其最小比冲击能耗对应的初始粒径在 45 mm 左右,临界粒径的不同时因为煤种的不同造成的。这说明随着初始粒径的增大,由于煤岩的强度存在尺寸效应,相同 t_{10} 值对应的比冲击能耗呈现一个先减小后增大的过程。对于相同煤种,存在一个最佳初始粒径,在相同的 t_{10} 值时,此时的比冲击能耗最小。

这是因为煤岩是内部充斥着裂纹的不均匀固体,其易碎性与颗粒内部的裂纹密度 ρ_c 成正比。

$$\rho_c = \frac{n}{V} \quad (2)$$

式中 n 为颗粒内部裂纹数量; V 为颗粒体积。

当颗粒较小时, 裂纹数量随粒径的增长速率大于体积的增大速率, 裂纹密度增大, 易碎性提高, 破碎能耗降低; 而当颗粒较大时, 裂纹数量随粒径的增长速率小于体积的增大速率, 导致裂纹密度下降, 故而易碎性下降, 破碎能耗增大。

2.3 破碎产物的粒度分布特性

Sahoo^[14-15] 提出, 若用 t_n 表示当筛孔大小为初始颗粒粒径 $1/n$ 时, 筛板的筛下质量分数, 则 t_n 为一系列满足一定规律的曲线族, 若已知 t_n 的数值, 则可以很方便的得到产物的质量累积分布曲线。

为研究单颗粒煤岩冲击破碎产物的粒度分布特性, 用打磨机将淮北无烟煤和淮北烟煤加工成边长为 30 mm 的立方体各 5 组, 分别以 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m 的落锤高度进行冲击破碎, 破碎产物的 t_n 值见表 2。

表 2 不同冲击势能下淮北无烟煤和烟煤的 t_n 值

Table 2 t_n of Huaibei anthracite and bitumite at different impact energy

煤种	原煤粒径 d_0 /mm	冲击势能 E_0 /J	t_{50} /%	t_{25} /%	t_{10} /%	t_5 /%	t_4 /%
无烟煤	30	4.71	5.1	7.3	11.3	24.7	30.8
	30	9.43	6.1	9.1	16.6	30.6	38.6
	30	14.14	7.2	11.1	21.2	36.3	46.4
	30	18.86	8.4	12.9	26.8	42.4	54.3
	30	23.57	8.8	13.6	30.3	46.1	58.6
烟煤	30	4.71	7.2	12.7	21.5	46.3	62.1
	30	9.43	8.9	16.5	27.6	53.2	71.3
	30	14.14	11.1	20.4	33.4	59.9	80.5
	30	18.86	12.7	24.1	40.3	67.6	91.1
	30	23.57	13.4	26.5	43.1	71.5	95.1

图 5 为破碎产物的 $t_n - t_{10}$ 关系, 可以看出, 随着 t_{10} 的增大, t_n 呈线性规律变化。满足公式:

$$t_n = k_n t_{10} + c_n \quad (3)$$

则产物中第 i 个粒级的颗粒含量可以表示为

$$F_i = t_{n_i} - t_{n_{i+1}} = (k_{n_i} - k_{n_{i+1}}) t_{10} + (t_{n_i} - c_{n_{i+1}}) \quad (4)$$

若 $t_{n_{i+1}}$ 保持不变, 即 $k_{n_{i+1}}$ 恒定, 则 k_{n_i} 越大, 产物中第 i 个粒级颗粒的含量随冲击势能的变化越快。因此 t_n 曲线斜率的大小可以用来表征产物中相应粒级的颗粒含量随冲击势能提高而增大的速度。

从图 5 看出, t_5 和 t_4 的斜率要明显大于 t_{50} 和 t_{25} 的斜率, 这表明, 对于颗粒的单个冲击破碎, 随着冲击功的增大, 产物中粒径在 $1/50d_0 \sim 1/25d_0$ 范围内的细颗粒含量变化不大, 只是稍有增加; 含量增长较快的为

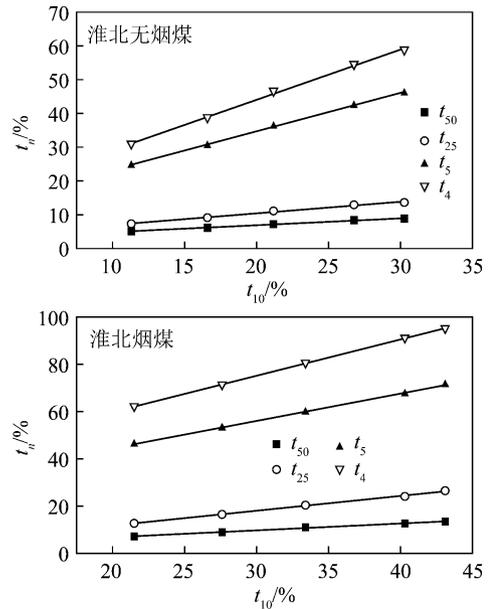


图 5 淮北无烟煤和烟煤破碎产物 t_n 和 t_{10} 的关系

Fig. 5 Relationship between t_n and initial t_{10} of Huaibei anthracite and bitumite

粒径在 $1/25d_0 \sim 1/4d_0$ 之间的粗颗粒。对比淮北无烟煤和淮北烟煤的 t_n 曲线可以看出, 烟煤的产物中细颗粒的含量要高于无烟煤, 且随着冲击功的增大, 细颗粒含量的增幅也要大于无烟煤。

3 结 论

(1) 单颗粒冲击破碎比冲击能耗随产物 t_{10} 值的增大呈指数上升, 相同 t_{10} 值时, 淮北无烟煤的破碎能耗大于淮北烟煤。

(2) 对于单颗粒煤岩冲击破碎, 当产物 t_{10} 值相同时, 存在一个最佳初始粒径, 此时的比冲击破碎能耗最小。

(3) 单颗粒煤岩冲击破碎产物满足 t_n 曲线族分布, 随着破碎能耗的增大, 产物中粒径在 $1/50d_0 \sim 1/25d_0$ 范围内的细颗粒含量变化不大; 粒径在 $1/25d_0 \sim 1/4d_0$ 之间的粗颗粒含量增长较快。

参考文献:

[1] Napier-Munn T J, Napier-Munn T J. Mineral comminution circuits: Their operation and optimisation [M]. Brisbane: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.

[2] Whyte R. Measuring incremental damage in rock breakage by impact [D]. Brisbane: The University of Queensland, 2005.

[3] 黎立云, 徐志强, 谢和平, 等. 不同冲击速度下岩石破坏能量规律的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 36(12): 2007-2011.

Li Liyun, Xu Zhiqiang, Xie Heping, et al. Failure experimental study on energy laws of rock under differential dynamic impact velocities [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2007-2011.

- [4] 李启月, 顾春宏, 李夕兵, 等. 冲击加载下矽卡岩破碎能耗与块度关系的试验研究[J]. 矿冶工程, 2009, 29(4): 18-23.
Li Qiyue, Gu Chunhong, Li Xibing, et al. Experimental research on relationship between energy consumption and fragmentation size of skarn subjected to impact loading[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2009, 29(4): 18-23.
- [5] Austin L G. A commentary on the Kick, Bond and Rittinger laws of grinding[J]. Powder Technology, 1973, 7(6): 315-317.
- [6] Hukki R T. Proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick, and Bond[J]. Trans. AIME, 1961, 220: 403-408.
- [7] Holmes J A. A contribution to the study of comminution: A modified form of Kick's law[J]. Trans. Inst. Chem. Engrs. (London), 1957, 35: 125.
- [8] Awachie S E A. Development of crusher models using laboratory particle breakage data[D]. Brisbane: University of Queensland, 1984.
- [9] Krauthammer T, Elfahal M M, Lim J, et al. Size effect for high-strength concrete cylinders subjected to axial impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(9): 1001-1016.
- [10] Bond F C, Wang J T. A new theory of comminution[J]. Mining Engineering, 1950, 8: 871-878.
- [11] Brace W F, Bombolakis E G. A note on brittle crack growth in compression[J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(12): 3709-3713.
- [12] Elfahal M M, Krauthammer T, Ohno T, et al. Size effect for normal strength concrete cylinders subjected to axial impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(4): 461-481.
- [13] Morrell S. An alternative energy-size relationship to that proposed by Bond for the design and optimisation of grinding circuits[J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 74(1): 133-141.
- [14] Sahoo R K, Weedon D M, Roach D. Single-particle breakage tests of Gladstone Port Authority's coal by a twin pendulum apparatus[J]. Advanced Powder Technology, 2004, 15(2): 263-280.
- [15] Sahoo R K, Weedon D M, Roach D. Degradation model of Gladstone Port Authority's coal using a twin-pendulum apparatus[J]. Advanced Powder Technology, 2004, 15(4): 459-475.