煤炭加工与环保

型煤中空隙分布规律试验研究

王 越[1,2],白向飞[1,2],姜 英[1,2],王东升[1,2]
(1. 煤炭科学研究总院 北京煤化工研究分院,北京 100013;2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013)

摘 要: 为研究型煤制备工艺与性能之间的关系,以指导生产工艺优化,利用单偏光显微镜及数字图像处理技术对不同黏结剂添加量和成型压力下制备的型煤空隙总体特征,以及水平方向与垂直方向上空隙分布特征进行研究,深入分析了空隙直径、位置及定向程度等特征。研究结果表明: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;型煤水平方向与垂直方向上空隙率不同,水平方向上空隙直径较为集中;型煤空隙分布不均匀,定向程度差;型煤空隙从表面到内部有增大趋势。

关键词: 型煤;空隙分布;光学显微分析;体视学
中图分类号: TD91 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2014)10-0113-04

Experiment Study on Void Distribution Law of Briquette

WANG Yue[1,2],BAI Xiang-fei[1,2],JIANG Ying[1,2],WANG Dong-sheng[1,2]
(1. *Beijing Research Institute of Coal Chemistry*,*China Coal Research Institute*,*Beijing* 100013,*China*;
2. *National Key Lab of Coal Resource High Efficient Mining and Clean Utilization*,*Beijing* 100013,*China*)

Abstract: In order to study the relationship between briquette preparation technique and performances and guide the optimization of the production technique,a single polarized microscope and digital image processing technology were applied to two aspects study,which the total void features and the horizontal and vertical void distribution features of the briquette prepared with different quality binder and different pressure,and to the deep analysis on the void diameter,location,orientation degree and other features. The study results showed that the void rate of the briquette prepared with different quality binder and different pressure would be have big difference. The horizontal and vertical void rates of the briquette would be different and the horizontal void diameter would be concentrated. The void distribution of the briquette would be inhomogeneous and the orientation degree would be poor. The void of briquette from the surface to the internal would be in an increasing tendency.

Key words: briquette;void distribution;optical microscopy analysis;stereology

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

0 引 言

型煤中的空隙会对型煤强度产生不利影响,目前主要利用最小接触面积模型(Minimum Contact Area Model)和应力集中作用模型(Stress Concentration Effects Model)表征材料空隙结构参数与强度间的关系[1-2]。前者主要关注总空隙率对强度的影响,后者关注空隙结构,如空隙形状和方向对应力集中的影响。型煤中的空隙有煤颗粒及黏结剂本身的孔隙、颗粒间的空隙以及压制过程中产生的气孔等多种类型。型煤中的空隙及其分布规律是研究型煤制备工艺与性能关系的桥梁。目前对影响强度的空隙尺寸有较大争议[3-4],但均在IUPAC孔径分类中大孔(>50 nm)范围内[5]。大空隙的测量一般采用压汞法,利用外加压力与孔径的对应关系计算孔径分布[6]。但是压汞法是一种间接测量方法,并且会对型煤中的空隙造成不可逆的破坏。光学显微镜在大空隙尺寸范围内有较好的分辨能力,结合图像分

收稿日期: 2014-03-21;**责任编辑:** 赵 瑞 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2014.10.027
基金项目: "十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAA04B01);国家国际科技合作专项资助项目(2012DFR60360)
作者简介: 王 越(1987—),男,山东莱芜人,硕士。Tel:010-84262972,E-mail:wangyue8211@sina.com
引用格式: 王 越,白向飞,姜 英,等. 型煤中空隙分布规律试验研究[J]. 煤炭科学技术,2014,42(10):113-116.
WANG Yue,BAI Xiang-fei,JIANG Ying,*et al*. Experiment Study on Void Distribution Law of Briquette[J]. Coal Science and Technology,2014,42(10):113-116.

析可以对型煤中的空隙直观呈现并进行统计分析。因而笔者利用光学显微分析技术及数字图像处理技术研究型煤中空隙率及其分布特征，以期对型煤质量控制及生产工艺优化提供指导。

1　试　　验

1.1　图像处理的理论依据

光学显微分析技术和数字图像处理技术是从材料的二维截面获取测量值，定量描述三维结构参数。由于二维截面会丢失三维结构的部分信息，依据体视学原理选取型煤代表性截面。从理论分析和试验 2 个方面证实随机截面上的阵点法可实现测试效率和测试精度的平衡，是较优的测试方法[7]。点距的选择是阵点法测量的关键，为保证每个测试点都是相互独立并且空隙不被漏检，点距的平方应约等于空隙的平均面积[8]。

1.2　型煤制备

试验用原料煤选用常村矿贫煤，原煤工业分析和元素分析见表 1，原煤经锤式破碎机破碎后的粒径为 >3、2 ~ 3、1.5 ~ 2.0、1.0 ~ 1.5、0.5 ~ 1.0、< 0.5 mm 时，其质量分数分别为 1.5%、12.4%、10.7%、0.8%、24.5%、50.1%。

表 1　原煤工业分析和元素分析　　%

工业分析				元素分析(干燥无灰基)				
M_{ad}	A_d	V_{daf}	FC_d	w(C)	w(H)	w(O)	w(N)	w(S)
1.48	19.97	14.85	68.14	90.37	4.12	3.53	1.53	0.45

原煤与膨润土黏结剂混合均匀，向混合物料中添加水分使成型水分达到 12%(质量分数，干基)。采用模具冲压成型，模具尺寸为 40 mm × 25 mm，每次添加的混合物料质量控制在(30 ± 0.2) g，以消除混合物料质量对型煤强度的影响[9]。压制设备选用 MJTY(MSY) -58T 手动液压成型机，制备的型煤放入 105 ℃的烘箱中干燥 3 h 后即产品型煤，共制备 2 个试验条件系列的型煤产品：①不同成型压力制备的型煤，控制黏结剂添加量为 5%，成型压力分别选取 8、10、12、16、20 MPa；②不同黏结剂添加量制备的型煤，控制成型压力为 12 MPa，黏结剂添加量分别为 3%、5%、7%、9%。

1.3　型煤光片制备

按照工业型煤样品采取方法[10]选取代表性型煤样品，参照煤岩分析样品制备方法[11]中煮胶法制备块煤光片法制备型煤光片。混合物料可认为是各向同性物质，压制过程使混合物料在垂直方向和水平方向上的性质有所不同。

按压制方向剖开型煤得到型煤纵切面，研究型煤垂直方向的空隙分布规律；按与压制方向垂直方向剖开型煤得到型煤横截面，研究型煤水平方向的空隙分布规律。

1.4　点距的确定及图像观测

利用 ZEISS AXIOSKOP 40 单偏光显微镜观察制备的型煤光片，显微镜的物镜为 10 倍，总放大倍数为 100 倍；利用 ProScan Ⅱ 自动载物台实现样品按照点距移动，通过 CoolSNAP 显微数码相机拍摄空隙图像，空隙参数由图像处理软件 Image Pro Plus 获得。图像处理的基本信息如下：图像分辨率 2 048 pix × 1 536 pix，像素点距 0.332 963 μm/pix，光片横截面(35 mm × 15 mm)分辨率为 105 116.78 pix × 45 050.05 pix，光片纵切面(18 mm × 17 mm)分辨率为 54 060.06 pix × 51 056.72 pix。

由初步试验可得型煤中空隙的平均面积 A 约为 0.70 mm^2，依据体视学原理，理论点距 d' 应为 0.84 mm，约为 2 522.8 pix($d' = \sqrt{A}$)。由于图像占据一定的面积，则实际点距为图像尺寸与理论点距之和，即横向点距为 4 570.8 pix，纵向点距为 4 058.8 pix。型煤横截面的阵点为 23 × 11 点，同理可得型煤纵切面的阵点为 12 × 13 点。分别对不同黏结剂添加量、成型压力制备型煤光片的横截面和纵切面的空隙率、空隙直径以及空隙分布做定量分析。

2　型煤中空隙分布规律

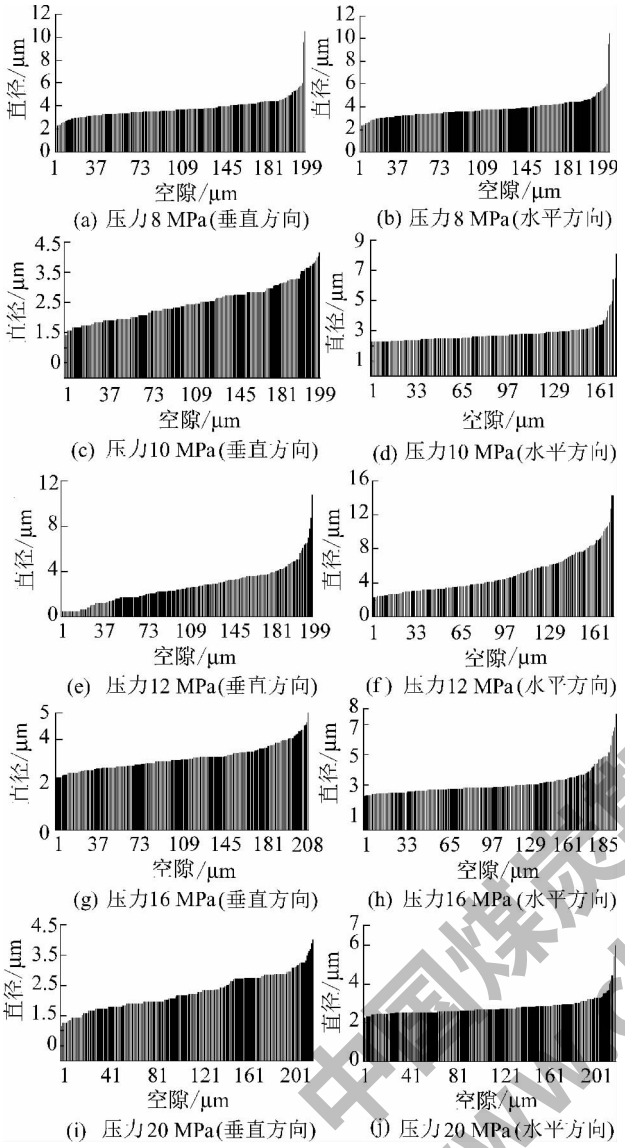
2.1　型煤空隙直径分布

型煤中的空隙不规则，假设空隙在截面上均为圆形，由每幅图像的空隙面积可得空隙的直径。对第 1.4 节中拍摄的每幅图像中空隙直径做统计分析，可获得不同成型压力及黏结剂添加量制备型煤中水平方向及垂直方向的空隙直径分布，如图 1 和图 2 所示(仅光学显微镜可分辨的空隙)。由图 1 和图 2 可知，不同成型压力下制备型煤中空隙直径变化比较平稳，而不同黏结剂添加量下制备型煤中空隙直径变化较陡峭；2 种条件下制备型煤水平方向上空隙直径变化较小。

2.2　型煤空隙分布总体特征

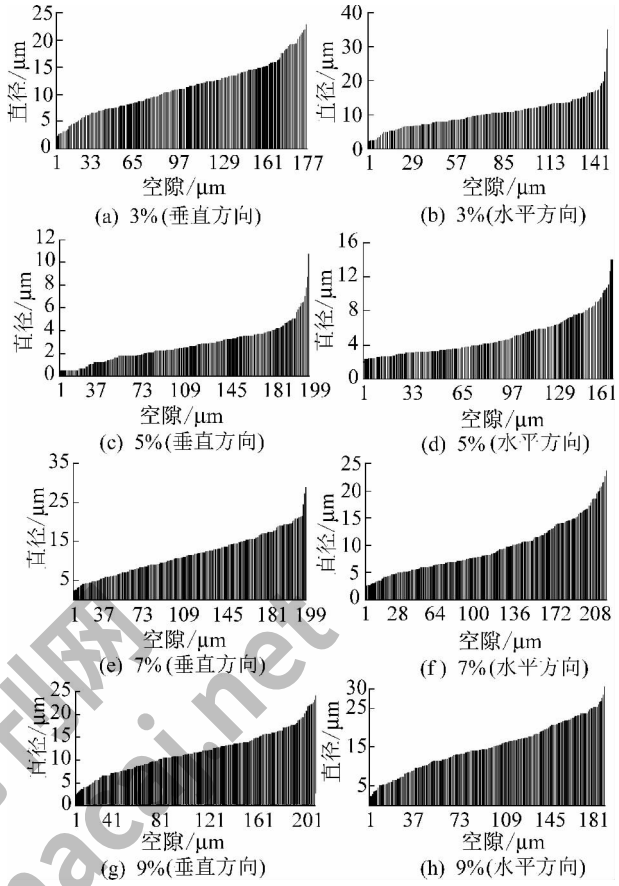
不同黏结剂添加量及成型压力制备型煤水平方向及垂直方向上的空隙率见表 2。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



(a) 压力8 MPa(垂直方向)　(b) 压力8 MPa(水平方向)
(c) 压力10 MPa(垂直方向)　(d) 压力10 MPa(水平方向)
(e) 压力12 MPa(垂直方向)　(f) 压力12 MPa(水平方向)
(g) 压力16 MPa(垂直方向)　(h) 压力16 MPa(水平方向)
(i) 压力20 MPa(垂直方向)　(j) 压力20 MPa(水平方向)

图 1　不同成型压力制备型煤中空隙直径分布



(a) 3%(垂直方向)　(b) 3%(水平方向)
(c) 5%(垂直方向)　(d) 5%(水平方向)
(e) 7%(垂直方向)　(f) 7%(水平方向)
(g) 9%(垂直方向)　(h) 9%(水平方向)

图 2　不同黏结剂添加量制备型煤中空隙直径分布

由表 2 可知，不同黏结剂添加量下制备的型煤空隙率较高，并且波动较大，从最低的 0.436% 到最高的 11.752%；不同成型压力下制备的型煤空隙率较低，空隙率基本在 1% 以下。型煤水平方向与垂直方向上的空隙率差距明显，在其他条件相同的情况下垂直方向的空隙率要比水平方向上的小。

表 2　型煤水平方向与垂直方向上的空隙率

项目	不同黏结剂添加量条件下空隙率/%				不同成型压力条件下空隙率/%				
	3%	5%	7%	9%	8 MPa	10 MPa	12 MPa	16 MPa	20 MPa
水平方向	5.768	1.362	4.948	11.752	0.680	0.387	1.362	0.457	0.354
垂直方向	6.458	0.436	7.352	7.205	0.305	0.290	0.436	0.464	0.243

空隙的产生主要受外加水分和原煤的粒度组成控制[12]。膨润土黏结剂具有吸湿性，不同添加量的黏结剂制备的型煤所需最佳水分不同，因而在相同外加水分条件下不同添加量的黏结剂制备型煤中空隙率较高，并且空隙波动大[13]。在原煤粒度组成、外加水分及黏结剂添加量一致的情况下，不同成型压力下制备的型煤中空隙率较低。但是由于压制作用，混合物料在垂直方向上更容易密实接触，因而垂直方向的空隙率比水平方向的小。

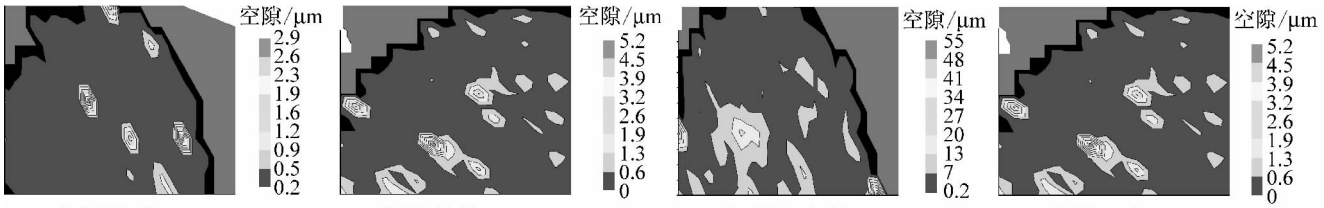
2.3　型煤空隙分布等值线

假设型煤为两相材料，空隙分布在原料混合物中，则空隙的大小、位置及定向程度影响型煤的强度。研究表明: 不同位置的空隙诱导裂隙的能力不同[14-15]，定向程度高的黏土在切变变形过程中的强度低[16]。

阵点坐标值与各阵点下空隙率联立可得，不同成型压力及不同黏结剂添加量下制备型煤的空隙率分布等值线如图 3 所示。由图 3 可知，不同条件下

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

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。



(a) 成型压力为 10 MPa (水平方向)　(b) 成型压力为 12 MPa (垂直方向)　(c) 黏结剂添加量 3% (水平方向)　(d) 黏结剂添加量 5% (垂直方向)

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，栾永祥. 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(S0): 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] 曹垚林，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] 曹垚林，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.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net