

基于主成分分析的煤粉流动性实验研究

张 月, 乔晓磊, 刘海玉, 金 燕

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 本研究以不同粒径的煤粉为研究对象, 通过采用休止角测定仪和 Jenike 剪切实验装置对休止角、压缩率、粘聚力和内摩擦角等表征煤粉流动性的一些参数进行了测量。煤粉粒径与其流动性之间的关系采用主成分分析方法评价, 并与 Jenike 流动函数法进行比较。结果表明: 用 Jenike 流动函数法表征煤粉流动性时, 流动函数随着煤粉粒径的增大从 6.22 增大到 12.65, 流动性变好; 采用主成分分析的方法对煤粉的流动性进行表征时, 随着煤粉粒径的增大, 煤样的主成分得分从 1.83 降低到 -1.34, 煤粉的流动性增强, 该结果与 Jenike 流动函数法表征煤粉流动性的实验结果是一致的。

关 键 词: 主成分分析; Jenike 流动函数法; 休止角

中图分类号: TQ531

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.05.014

引 言

煤粉的流动性是煤粉储存、输送等单元操作的基础, 表征煤粉流动性的方法主要有休止角法、HR (豪斯纳比率) 法、Carr 流动性指数法、Jenike 流动函数法、分形维数法以及质量流率法等^[1~4]。其中最基本的方法是质量流率法, 即将待测煤粉通过漏斗流出, 同时测定煤粉全部流出所需要的时间。煤粉全部流出所需时间越短, 煤粉的流动性越好。在实践中, 即便使用流通口径很大的漏斗, 还是有一部分煤粉不能通过漏斗, 因此在实际生产中多改用测定煤粉的休止角来表征流动性, 休止角越小表示流动性越好。然而, 休止角的测定往往受人为因素的影响较大。因此, 有学者使用压缩度、粒度分形维数、均匀度、粘聚力和内摩擦角等方法测定煤粉的流动性^[5]。尽管如此, 这些方法过于注重单一因素, 仍然不能很好地表征煤粉的流动性。

PCA(主成分分析) 是利用降维的思想^[6], 在力保数据信息损失最小的原则下, 把多个指标转化为少数几个综合指标的一种对多变量数据进行最佳综合简化的多元统计方法。也就是说, 将原来的高维空间的问题转化为低维空间来处理, 问题会变得简单化, 通常将转化生成的综合指标称为“主成分”。主成分是原始数据的线性组合, 且主成分之间互不相干。这样, 只需考虑少数几个主成分研究复杂问题, 既不丢弃原始数据主要信息, 又容易抓住主要矛盾, 避开变量之间共线性的问题, 便于进一步分析, 提高分析效率^[7]。表征煤粉流动性的指标很多, 将多个表征指标进行 PCA 分析来评价煤粉的流动性的方法目前尚未见报道。基于上述分析, 本研究采用主成分分析方法对 8 种不同粒径煤粉的流动性进行评价, 并使用休止角、压缩率、内摩擦角和粘聚力等指标进行多元分析来表征煤粉的流动性。

1 实验方法

1.1 休止角的测量

休止角采用宁波海曙瑞柯仪器有限公司生产的 FT-104B 休止角测定仪来测量。将休止角测定仪的漏斗颈出口封闭并将煤样置于漏斗中, 打开漏斗颈使煤粉流动。实验过程中, 为了使煤粉顺利流动, 采用搅拌器进行搅拌。当煤粉锥体的高度不再增加时, 测量煤粉锥体斜面与平面的夹角即为休止角^[8]。对不同样品进行重复实验, 取其平均值, 即为实验获得的休止角。

1.2 压缩率的测量

浙江土木仪器制造有限公司生产的 ZJ-2 型等应变直剪仪示意图用来测量压缩率如图 1 所示。称

收稿日期: 2015-06-16; 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 山西省社会发展科技攻关项目(20130313001-1)

作者简介: 张 月(1989-), 女, 山西晋中人, 太原理工大学硕士研究生。

量 60 g 的煤粉置于直剪仪的剪切盒内 ,刮平煤粉的表面 ,盖上压实盖。将千分表置于尺寸已知切盒上 ,其探针与剪切盒盖接触 ,以测量剪切盒内的煤粉高度 ,并计算松密度 ρ_1 。然后在剪切盒上施加一定的压实力 ,利用千分表测量此压实力下煤粉的高度 ,计算振实密度 ρ_2 ,按照式 (1) 求解压缩率:

$$\text{压缩率} = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2 \quad (1)$$

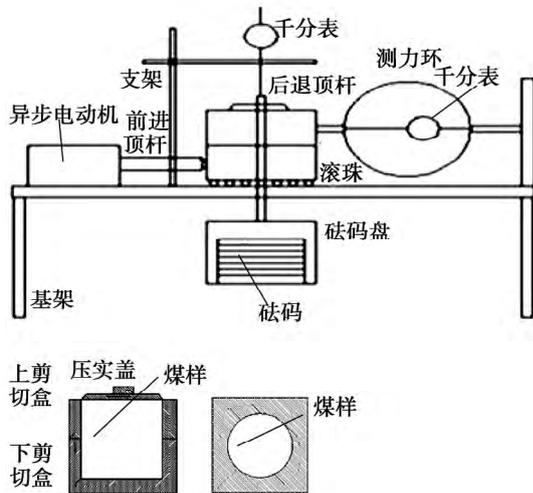


图 1 Jenike 剪切试验系统
Fig. 1 Jenike shear test system

1.3 粘聚力和内摩擦角的测量

同样取 60 g 煤样加至直剪仪的剪切盒中 ,在 130 kPa 压实力下预压实 ,通过水平千分表分别记录压实力为 100、80、50 和 30 kPa 下测力环的变形量 R 。对不同样品进行重复实验 ,按照式 (2) 计算剪切力:

$$\tau = R \cdot A \quad (2)$$

式中: A —测力环系数 , $A = 1.9608 \text{ kPa/mm}$; R —测力环的变形量 ,mm。

以剪切力为纵坐标 ,压实力为横坐标 ,绘制剪切力与压实力关系曲线 ,采用线性回归方法可以得到样品的屈服轨迹如图 2 所示。根据库仑公式 (3) 即可获得粘聚力和内摩擦角^[9]。

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (3)$$

式中: τ —剪切力 ,kPa; σ —压实力 ,kPa; φ —内摩擦角 ($^\circ$); c —粘聚力 ,kPa。

1.4 Jenike 流动函数

画一过预压实点 A 并且相切与屈服轨迹的圆

心在横轴上的莫尔圆 ,莫尔圆与横轴的交点 σ_1 为煤粉在此压实力下的最大固结力。再过原点画一个与屈服轨迹相切的莫尔圆 ,该莫尔圆与横轴的交点 f_c 为煤粉在此压实力下的无界屈服压力 ,如图 2 所示。最大固结力与无界屈服压力的比值为流动函数 FF ^[10] ,即 $FF = \sigma_1 / f_c$ 。

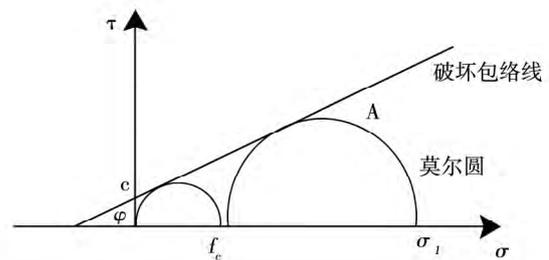


图 2 莫尔圆及屈服轨迹
Fig. 2 Mohr circle and yield trajectory

2 结果分析与讨论

2.1 煤粉流动性

以某电厂的煤样为研究对象 ,经过筛分将煤粉分为 8 个不同的粒径段 ,分别为 88 ~ 98 μm 、98 ~ 100 μm 、100 ~ 105 μm 、105 ~ 125 μm 、125 ~ 154 μm 、154 ~ 160 μm 、160 ~ 170 μm 和 170 ~ 180 μm ,并将各粒径段的样品定义成粒径为 88、98、100、105、125、154、160 和 170 μm 的样品。实验测得的不同粒径煤粉的休止角如图 3 所示。从图 3 中可以看出 ,不论粒径如何变化 ,煤粉的休止角均在 $40^\circ \sim 50^\circ$,表明煤粉之间粘聚性较强 ,并且随着煤粉颗粒粒径的增大 ,休止角减小 ,流动性增强。

内摩擦角是休止角的内在表现 ,其值越大 ,表明粉体粘性作用越强 ,并且内摩擦角与休止角差值越大 ,流动性越差^[11-12]。实验测得的不同粒径煤粉的内摩擦角如图 3 所示。从图 3 可以看出 ,8 种煤样的内摩擦角随着粒径的增大而减小 ,并且内摩擦角随着粒径的增大变化较缓慢 ,尤其当粒径大于 105 μm 时 ,内摩擦角变化很小 ,而休止角随粒径的增大变化幅度较大。因此 ,内摩擦角和休止角的差值基

本上随着煤粉粒径的增大不断减小,即随着煤粉粒径的增大,煤粉的流动性增强。

压缩率体现了煤粉的压缩特性,也反映了其流动特性。表 1 为实验中测得的煤粉的压缩率随粒径的变化趋势。从表 1 中可以看出,随着粒径的增大,煤粉的压缩率初期显著减小,后减小缓慢,由 15.62% 减小为 8.23% ,煤粉流动性提高。

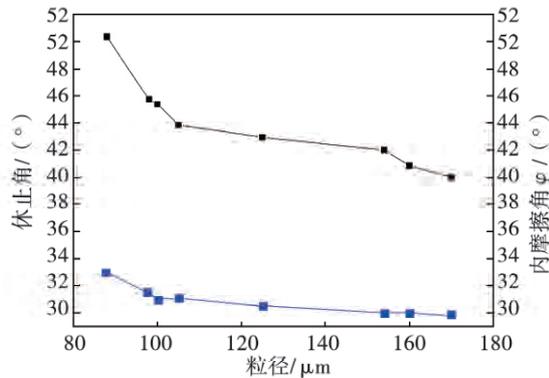


图 3 不同煤粉的休止角和内摩擦角测试结果

Fig. 3 Measurement results of the repose angle and internal friction angle of various kinds of pulverized coal

表 1 不同煤粉的压缩率测试结果

Tab. 1 Measurement results of the compression rate of different kinds of pulverized coal

样品	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号
压缩率/%	15.62	14.72	12.02	10.78	10.28	9.98	9.34	8.23

从粘聚力分析,煤粉颗粒粒径越大,颗粒的比表面积越小,颗粒之间的相互作用力越小,煤粉颗粒的粘聚力越小,并且煤粉颗粒本身的自重增大,因而附着与自重的比值减小,故越粗的颗粒越不容易团聚,导致流动性较强。图 4 为 8 种不同粒径的煤粉与其粘聚力的关系。从图 4 可以看出,8 种煤样的粘聚力随着粒径的增大呈现减小的趋势,即煤粉越细,煤粉之间的团聚作用越强,流动性越差,该结论与文献 [13] 中的结论一致。

Jenike 流动函数 FF 为最大固结力与无界屈服压力的比值,即 $FF = \sigma_1 / f_c$ 。各个煤样的流动函数

计算结果见表 2。从表 2 中可以看出,随着粒径的增大,8 种煤样的流动函数从 6.22 增加到 12.65,煤粉的流动性不断增强。按照文献 [14] 中利用 Jenike 流动函数表征粉体的流动性的结果表明,这 8 种煤样都易流动,这与利用休止角等方法表征煤粉流动性的测试结果不符,其原因可能与提高了剪切实验的预压实力和煤粉的粘聚特性有关。王川红等对煤粉的研究也得到了相似的结果 [15]。

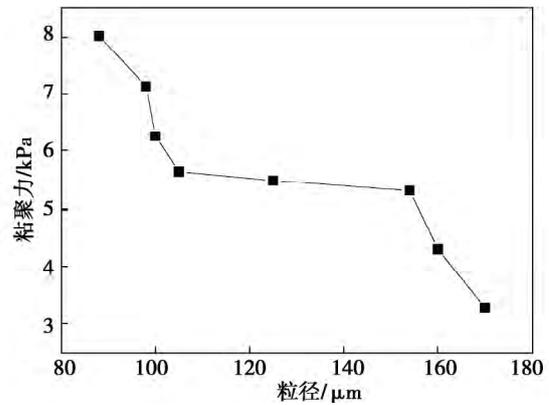


图 4 不同煤粉的粘聚力测试结果

Fig. 4 Measurement results of the cohesion force of different kinds of pulverized coal

表 2 不同煤样的流动函数

Tab. 2 Flow function of different coal samples

样品	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号
流动函数(FF)	6.22	6.71	7.67	8.64	8.80	9.06	11.06	12.65

2.2 主成分分析

主成分分析采用 SPSS16.0 软件进行多元计算,首先对 8 种煤样的休止角 X_1 、压缩率 X_2 、粘聚力 X_3 和内摩擦角 X_4 这 4 个指标进行标准化,由于这 4 个指标的单位不同,需对它们进行无量纲处理,即把各指标的原始数据的均值化零,方差化为 1,进而由计算原始数据的协方差矩阵转化为直接计算原始数据的相关系数矩阵来求主成分 [16]。通过软件分析求 8 种煤粉的休止角 X_1 、压缩率 X_2 、粘聚力 X_3 和内摩擦角 X_4 这 4 个指标之间的相关系数矩阵如表 3 所示。参照文献 [17] 的研究结果,表 4 为指标之间的相关系数与相关程度的关系。相关系数矩阵表明,休止角与压缩率、内摩擦角和粘聚力之间呈正相关,休止角越小,压缩率、内摩擦角和粘聚力越小,并

且休止角、压缩率和内摩擦角之间的相关系数都大于 0.9 ,即休止角、压缩率和内摩擦角之间高度相关性 ,而休止角、压缩率和内摩擦角与粘聚力的相关系数介于 0.5 ~0.8 之间呈现中度相关。因此 ,这 4 个指标之间可以进行主成分分析。

表 3 煤样的相关系数矩阵

Tab.3 Correlation matrix of coal samples

	休止角	压缩率	内摩擦角	粘聚力
休止角	1	0.946	0.987	0.677
压缩率	0.946	1	0.931	0.677
内摩擦角	0.987	0.931	1	0.610
粘聚力	0.677	0.677	0.610	1

表 4 相关系数与相关程度的关系

Tab.4 Relationship between the correlation coefficient and degree

$r \geq 0.8$	$0.5 \leq r < 0.8$	$0.3 \leq r < 0.5$	$r < 0.3$
高度相关	中度相关	低度相关	相关极弱

求解相关系数矩阵的特征值 ,特征值可以看成是表示主成分影响力度的指标 ,如果特征值大于 1 ,说明该主成分的影响力度比原变量的影响力度大 ,因此保留特征值大于 1 对应的主成分^[18]。然而在实际问题中 ,主成分个数提取的原则通常是根据累计贡献率进行选取的 ,第一主成分的贡献率为 $\lambda_1 / \sum \lambda_i$,这个值越大 ,表明第一主成分综合所有指标信息的能力越强 ,前 2 个主成分的累计贡献率为 $(\lambda_1 + \lambda_2) / \sum \lambda_i$,以此类推 ,前 k 个主成分的累计贡献率为 $(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k) / \sum \lambda_i$,如果当前 k 个主成分的贡献率达到了 85%^[18~20] ,表明取前 k 个主成分包含了全部测量指标所具有的大部分信息 ,这样既减少了指标的个数又便于对实际问题的分析和研究。因此 ,本研究结合了特征值和累计贡献率来选取主成分个数 ,从表 5 可以看出 ,1 号主成分的累计贡献率为 85.94% ,并且特征值为 3.438 ,故提取 1 号主成分就能很好的评价煤粉流动性。按照以上原则提取的 1 号主成分的因子载荷矩阵如表 6 所示 ,因子载荷矩阵的绝对值代表了主成分和原始变量的相关程度。从表 6 可知 ,休止角、压缩率、

粘聚力和内摩擦角在 1 号主成分上有较高的载荷 ,即载荷系数都大于 0.7 ,说明所提取的主成分很好的反映了这 4 个指标的信息。最后计算主成分得分 ,将因子载荷矩阵的系数 ,与标准化后的煤粉流动性指标数据相乘 ,从而就可以得出主成分得分 ,求解主成分得分的表达式为

$$F = 0.982ZX_1 + 0.966ZX_2 + 0.963ZX_3 + 0.782ZX_4$$

式中: ZX_1, ZX_2, ZX_3, ZX_4 均代表 SPSS 标准化后的数据。主成分得分的结果如表 7 所示。主成分得分与流动性的关系为负相关 ,主成分得分越低 ,表明煤粉的流动性越好。由主成分得分排名表明随着煤粉粒径的增大 ,8 种煤样的主成分得分从 1.83 减小到 -1.34 ,即煤粉颗粒粒径越大 ,主成分得分越低 ,流动性越好。

表 5 不同主成分下的特征值和方差贡献率

Tab.5 Variance contribution rate and characteristic values under various main components

主成分	初始特征值		
	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1 号	3.438	85.940	85.940
2 号	0.479	11.971	97.911
3 号	0.075	1.876	99.787
4 号	0.009	0.213	100.000

表 6 第一主成分的因子载荷矩阵

Tab.6 Factor load matrix of the first main component

休止角	压缩率	内摩擦角	粘聚力
0.982	0.966	0.963	0.782

2.3 主成分分析与 Jenike 流动函数法的比较

比较主成分分析法和 Jenike 流动函数法评价煤粉流动性的测试结果发现 ,这两种方法对于评价煤粉流动性的测试结果一致如表 7 所示。但是相对于 Jenike 流动函数法中评价煤粉流动性的流动函数只是最大固结力与无界屈服压力的比值 ,而主成分分析方法可根据实际情况选择参数 ,可以增加和减少参数 ,一旦参数适合 ,能够获取量化的数值 ,并建立合理的评分标准 ,对于评价煤粉流动性有相对客观的标准 ,方便了流动性计算。

表 7 主成分得分和流动函数结果

Tab. 7 Principal component scores and results obtained from the flow function

样品	流动函数/FF	主成分得分
1 号	6.22	1.83
2 号	6.71	0.80
3 号	7.67	0.27
4 号	8.64	0.05
5 号	8.80	-0.39
6 号	9.06	-0.46
7 号	11.06	-0.96
8 号	12.65	-1.34

3 结 论

(1) 煤粉属于粘性粉体,煤粉粒径从 88 μm 增加到 170 μm 时,休止角、压缩率、内摩擦角和粘聚力分别从 50.34°、15.62%、32.94°和 8.03 kPa 减小至 40.01°、8.23%、29.79°和 3.29 kPa,煤粉的流动性变好;

(2) 用 Jenike 流动函数法表征煤粉流动性时,流动函数随着煤粉粒径的增大从 6.22 增大到 12.65,流动性变好;

(3) 采用主成分分析的方法对煤粉的流动性进行测定与表征,随着煤粉粒径的增大,煤样的主成分得分从 1.83 降低到 -1.34,煤粉的流动性越好;

(4) 比较主成分分析法和 Jenike 流动函数法测定煤粉的流动性,这两种方法都表明煤粉颗粒的粒径越大,煤粉的流动性越好,但是相对于 Jenike 流动函数法,主成分分析方法在评价煤粉的流动性有一定的优势。在今后的实验中,仍然需要增加样品,选取合适的指标,不断证实该方法在煤粉流动性测试中的适用性。

参考文献:

[1] 奚新国,张耀金.粉体流动性能的测试研究[J].盐城工学院学报 2003,16(1):4-7.
XI Xin-guo,ZHANG Yao-jin. Study of the measurement of the flow performance of powder-formed body[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology 2003,16(1):4-7.

[2] 胡大为,胡小芳,林丽莹.粉体粒度分布分形维数与流动性及

硬脂酸镁改进流动性关系[J].中国粉体技术 2007,13(4):1-4.

HU Da-wei,HU Xiao-fang,LIN Li-ying. Number of fractal dimensions of the distribution of the size of the powder-formed body and flowability and their relationship with magnesium stearate for improving the flowability[J]. China Powder-formed Body Technology 2007,13(4):1-4.

[3] 漆海峰,郭晓镭,陆海峰,等.煤粉的流动性测试及评价方法[J].化工学报 2012,63(2):432-440.

QI Hai-feng, GUO Xiao-lei, LU Hai-feng, et al. Measurement and methods for evaluating the flowability of pulverized coal[J]. Journal of Chemical Engineering 2012,63(2):432-440.

[4] Wang Wei,Zhang Jian-sheng,YueGuang-xi, etc. Experimental Study on the Angle of Repose of Pulverized coal[J]. Particology, 2010,8(8):482-485.

[5] 段百涛,吴成宝,胡小芳.水泥粉体粒度分形维数与其流动性的关系研究[J].中国粉体技术 2007,13(5):17-20.

DUAN Bai-tao,WU Cheng-bao,HU Xiao-fang. Number of fractal dimensions of the size of powder-formed body of cement and study of its relationship with its flowability[J]. China Powder-formed Body Technology 2007,13(5):17-20.

[6] 杜焰,赵立杰,熊耀坤,等.药用粉体流动性的多元分析方法表征[J].药学报 2012,47(9):1231-1236.

DU Yan,ZHAO Li-jie,XIONG Yao-kun, et al. Characterization of the methods for multi-variable analyzing the flowability of medicine-used powder-formed bodies[J]. Acta Pharmaceutica Sinica 2012,47(9):1231-1236.

[7] 刘炳胜,王雪青,李冰.基于主成分分析与 DEA-DA 组合的中国区域建筑产业竞争优势系统评价[J].土木工程学报,2011,44(2):143-150.

LIU Bing-sheng,WANG Xue-qing,LI Bing. Systematic evaluation of the competitive edge of the civil construction industry in the region of China based on the main component analysis and the DEA-DA combination[J]. Journal of Civil Engineering,2011,44(2):143-150.

[8] 刘蕊,赵旭光,赵三银,等.高精度粉体安息角测定仪的设计[J].中国粉体技术 2006,12(4):31-33.

LIU Rui,ZHAO Xu-guang,ZHAO San-yin, et al. Design of a high precision repose angle meter for powder-formed bodies[J]. China Powder-formed Body Technology 2006,12(4):31-33.

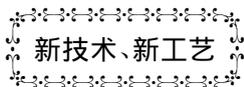
[9] 李姝琦.中药直接压片技术适宜性研究[D].上海:上海中医药大学,2010.

LI Shu-qi. Study of the adaptability of the direct tableting technology for traditional Chinese medicines[D]. Shanghai: Shanghai University of Traditional Chinese Medicine 2010.

[10] 廖荣福,邱生祥,潘仁湖. Jenike 型剪切测试仪在颗粒物料流动性测试中的应用[J]. 硫磷设计与粉体工程 2011,16(6):23-29.

- LIAO Rong-fu ,QIU Sheng-xiang ,PAN Ren-hu. Applications of a Jenike-type shear testing device in testing the flowability of particle materials [J]. Sulphur Phosphorus Design & Powder-formed Body Engineering 2011 (6) : 23 - 29.
- [11] Lu Hai-feng ,Guo Xiao-lei ,Gong Xin ,et al. Study of the Flowability of Pulverized Coals [J]. Energy fuels ,2009 ,23: 5529 - 5535.
- [12] Adam M. Stoklosa ,Rebecca A. Lipasek ,Lynne S. Taylor ,et al. Effects of storage conditions ,formulation ,and particle size on moisture sorption and flowability of powders: A study of deliquescent ingredient blends [J]. Food Research International ,2012 ,49: 783 - 791.
- [13] 谢晓旭 ,沈湘林 ,汤雪美 ,等. 煤粉流动特性若干影响因素的研究[J]. 煤炭学报 2008 33(1) : 85 - 88.
XIE Xiao-xu ,SHEN Xiang-lin ,TANG Xue-mei ,et al. Study of several factors influencing the flow characteristics of pulverized coal [J]. Journal of Coal 2008 33(1) : 85 - 88.
- [14] Fitzpatrick J J ,Barringer S A ,Iqbal T. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike ' s hopper design methodology to the measured values [J]. Journal of Food Engineering , 2004 61(3) : 399 - 405.
- [15] Wang Chuan-hong ,Guo Xiao-lei ,Gong Xin ,et al. Effects of Particles Size and Moisture Content of ShenfuSoft Coal on its Fluidity Parameters [J]. Natural of East China University of Science and Technology 2008 34(3) : 377 - 382.
- [16] 贾明辉 ,华志强. 主成分分析数据处理方法探讨 [J]. 内蒙古民族大学学报 2008 23(4) : 379 - 381.
- JIA Ming-hui ,HUA Zhi-qiang. Exploratory study of the principal component analysis and data processing methods [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities ,2008 ,23(4) : 379 - 381.
- [17] 汪冬华. 多元统计分析与 SPSS 应用 [M]. 上海: 华东理工大学出版社 2010.
WANG Dong-hua. Multivariate statistical analysis and SPSS applications [M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press 2010.
- [18] Bro R ,Smilde AK. Principal component analysis [J]. Analytical methods 2014 6(9) : 2812 - 2831.
- [19] 苏步新 ,张建良 ,车晓梅 ,等. 基于主成分分析的高炉喷吹煤粉性能评价 [J]. 煤炭学报 2013 38(12) : 2234 - 2240.
SU Bu-xin ,ZHANG Jian-liang ,CHE Xiao-mei ,et al. Performance evaluation of pulverized coal sprayed and blowed into blast furnaces based on the principal component analysis [J]. Journal of Coal 2013 38(12) : 2234 - 2240.
- [20] Haware R V ,Tho I ,Bauer-Brandl A. Application of multivariate methods to compression behavior evaluation of directly compressible materials [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics 2009 72: 148 - 155.

(刘 瑶 编辑)



第一艘液氢运输船

据《Motor ship》2014 年 6 月刊报道 ,日本川崎重工已经制定计划 ,设计世界上第一艘运输液氢船舶。这项工作的开展主要起源于陆路运输所用燃料所产生的液氢市场。燃料电池可以使用几种气体工作 ,但是氢气效率最高。

液氢比液化天然气更易挥发 ,因此需要先进的储存系统。现在川崎重工已取得日本船级社许可 ,设计并制造适合安装在液氢运输船上的液氢储存系统。

液氢储存在容量 1 250 m³ 的压力容器。必须低温(-250 ℃) 运输液氢 ,因此储存容器将作成圆柱形并水平安装。

已经设计了两种类型的运输船。一种配备 2 个储存容器 ,另一种装有多多个球形罐船体更大。前者可达 2 500 m³ 运载量 ,并且船体为双层侧板和双层底 ,以便在船舶搁浅和碰撞的情况下危险最小。

(吉桂明 摘译)

come weakened. In the heat transfer process, the flow field will correspond to the temperature one. With an increase of Ra number, \overline{Nu} will assume an ascending tendency of the exponent. It has been verified that when the temperature difference between the ground temperature and the air flow temperature ranges from 10 °C to 30 °C, the simulation method in question can predict very well the influence of the thickness of coal bed on the law governing the heat-flow coupling heat transfer, therefore offering a scientific basis for an effective prevention of spontaneous combustion in coal beds, an analysis of any damage to rock masses in mechanics and a rational surface mining of coal mines etc. **Key words:** coal bed thickness, porous medium, coal rock mass, heat-flow coupling

水蒸气和二氧化碳对金属载氧体抗积碳特性的影响 = **Influence of Steam and Carbon Dioxide on the Carbon Deposition Characteristics of Metal Oxygen Carriers** [刊, 汉] HU Qiang, JIN Jing, XIONG Zhi-bo, WANG Yong-zhen (College of Energy Source and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(5). - 88 ~ 92

In the light of the problem that carbon deposited on the surface of a metal oxygen carrier in a chemical chain combustion process will affect its activity, with the help of a small-scale test rig, studied were the carbon deposition characteristics of two kinds of metal oxygen carrier (Ni and Fe based) prepared at various reaction temperatures (650 °C, 750 °C, 850 °C and 950 °C) in different reaction atmospheres (CH₄ and CO + H₂) by using the mechanical mixing method and probed was the inhibition action of steam or carbon dioxide added on the carbon deposition process of metal oxygen carriers during their reduction reactions. It has been found that in both reaction atmospheres, the carbon deposition phenomena to various extents will occur to the metal oxygen carriers, however, in the CO + H₂ atmosphere, the amount of carbon deposited is relatively small and an addition of steam or carbon dioxide can obviously inhibit the carbon deposited on the surface of the metal oxygen carriers and in the CO atmosphere, an addition of steam can totally remove the carbon deposited on the surface of metal oxygen carriers. The XRD (X-ray diffraction) analytic results further show that an addition of steam or carbon dioxide can effectively inhibit the production of carbon deposited on the surface of metal oxygen carriers and the inhibition effectiveness of steam is superior to that of carbon dioxide. **Key words:** chemical chain combustion, metal oxygen carrier, carbon deposition characteristics, steam

基于主成分分析的煤粉流动性实验研究 = **Experimental Study of the Flowability of Pulverized Coal Based on an Analysis of the Principal Components** [刊, 汉] ZHANG Yue, QIAO Xiao-lei, LIU Hai-yu, JIN Yan (Col-

lege of Electrical and Power Engineering ,Taiyuan University of Science and Technology ,Taiyuan ,China ,Post Code: 030024) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(5) . -93 ~98

With pulverized coal in various particle diameters serving as the object of study ,such parameters as the repose angle ,compression rate ,adhesion force and inner friction angle etc. to represent the flowability of pulverized coal were measured by using a repose angel metering device and a Jenike shear test device. The relationship between the particle diameter of pulverized coal and its flowability was evaluated by employing the principal component analytic method and compared with that obtained by adopting the Jenike flow function method. It has been found that when the Jenike flow function method is used to represent the flowability of pulverized coal ,the value calculated by using the flow function will increase from 6.22 to 12.65 with an increase of the particle diameter of pulverized coal ,thus the flowability will become better. When the principal component analytic method is used to represent the flowability of pulverized coal ,the score obtained by using the principal components of the coal sample will decrease from 1.83 to -1.34 ,therefore ,the flowability of pulverized coal will improve. These results are identical to the test ones when Jenike flow function method is used to represent the flowability of pulverized coal. **Key words:** pulverized coal , principal component analysis ,Jenike flow function method ,repose angle

hyd 型低压除尘喷嘴雾化特性的实验研究 = **Experimental Study of the Atomization Characteristics of a HYD Type Low Pressure Dust-removal Nozzle** [刊 ,汉] WU Chang-fu ,OUYANG Qi-ming ,CHEN Zu-yun , CHEN Liang (College of Resource and Environment Engineering ,Jiangxi University of Science and Technology , Ganzhou ,China ,Post Code: 341000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(5) . -99 ~105

To harness the fine and microscopic dust ,designed was a test platform for simulating wet type dust removal systems and with fresh water serving as the atomization medium ,studied were the atomization characteristics of a HYD type low pressure fine atomization dust removal nozzle when the diameter of the aperture was 0.4 mm ,0.5 mm and 0.8 mm at various atomization pressures ,including the flow rate ,atomization angle and particle diameter atomized etc. The volumetric method was used to measure the flow characteristics of the nozzle and on the basis of an analysis by using the software Matlab and ScopePhoto ,the atomization angle ,atomization particle diameter and its distribution were obtained when the diameter of the aperture of the nozzle was 0.4 mm ,0.5 mm and 0.8 mm respectively. The curves showing the relationship between the atomization characteristics and the pressure were plotted and by employing the software Matlab ,the curves were fitted to obtain an atomization pressure and flow rate ,atomization angle