

文章编号: 1000-582X(2011)09-054-07

## 铁矿粉湿容量的概念及其在制粒过程中的应用

吕学伟, 白晨光, 邱贵宝, 黄小波, 雷 磊, 黄 润

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘 要:**适宜的配水量对改善铁矿粉的制粒效果起重要作用。为建立一种简单易行、准确合理的方法,提出了铁矿粉湿容量的概念,即单位质量的矿物在自然堆积的状态下所能保持的最大含水量,并开发出相关测试设备。利用该方法对来自某实际生产过程中的 5 组混合料进行了测试,得到了每组混合料的湿容量。在实验室规模的设备上进行了 5 组混合料在不同配水量条件下的制粒实验,并对其透气性进行了检测,得到了每组原料的最佳配水量。对比每组混合料的湿容量和最佳配水量发现:两个参数之间具有很强的正相关性,湿容量大的混合料需要配加更多的水后料层才能达到最佳的制粒效果。还对料层的透气性和粒度分布关系做了讨论。实验发现随着加水量的增多,颗粒制粒后的粒度逐渐增大,料层的透气性先增大后减小。

**关键词:**铁矿粉; 湿容量; 制粒; 透气性

**中图分类号:** TF 046.4

**文献标志码:** A

### The conception of moisture capacity for iron ore and its application to granulation

LV Xue-wei, BAI Chen-guang, QIU Gui-bao, HUANG Xiao-bo, LEI Lei, HUANG Run

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** The optimal water content added into the iron ore mixtures is of vital importance for improving granulation. A novel conception about moisture capacity of the iron ore, which means the maximum water content holding in the iron ore particles of unit mass, is proposed to develop a simple and accurate method. The related equipment and measuring procedure are also given. Five mixtures are selected for moisture capacity measuring, and the granulation experiments with the laboratory scale equipment are also carried out for the five mixtures with various water levels, and the permeability of the granules are also measured to get the optimal water content for each mixture. Comparing the optimal water content with the moisture capacity finds that the two parameters have a good positive relation, meaning that more water is necessary for the mixture with high moisture capacity to get a good permeability index. The relationship between the permeability index and particle size distribution is also discussed. It is found that the size of the granules increases with the increase of water content and the permeability of the burden first increases and then decreases with the increase of water content.

**Key words:** iron ore fine; moisture capacity; granulation; permeability

**收稿日期:** 2011-04-07

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613503)

**作者简介:** 吕学伟(1982-), 重庆大学副教授, 博士, 主要从事冶金新工艺等的研究。(Tel)023-65112631; (E-mail) lvxuewei@163.com。

铁矿粉烧结前混合料制粒过程的目的是得到成分均匀并具有一定粒度的小球。铁矿粉、熔剂和燃料在跟随圆筒混料机翻转的过程中,在水的作用下,粒径小于 0.2 mm 的粒子会黏附在粒径大于 0.7 mm 的颗粒上面<sup>[1]</sup>。习惯上将这些粒径不同的粒子分别称之为黏附粒子和形核粒子。因此,除了原料的固有粒度组成对混料后的粒度分布有影响外,适宜的配水量也是决定最终混匀料颗粒尺寸的重要因素。通过调整配水量实现控制颗粒的粒度分布,进而改善烧结料层的透气性,是一种行之有效的办法。然而,目前大多数钢铁企业对混料过程中适宜的配水量并没有系统的研究和准确的控制,基本的做法还是根据长期的生产经验把混合料的含水量控制在一个大概的范围内,有经验的工作人员经常通过手捏法判断水分的多少<sup>[2-4]</sup>。显然,这种方法缺乏准确性和合理性。近年来,随着能源危机、气候变化等问题的突出,钢铁企业希望能够在改善烧结制粒效果的同时尽量降低混合料的配水量,以达到降低能耗的目的。相关改善混合料制粒效果的研究也呈上升趋势<sup>[5-12]</sup>。

分析水在原料颗粒之间的分布可以发现混料过程中所配加的水分可以分为两部分,一部分是分布在颗粒表面的水,另一部分是进入到颗粒空隙中的水。颗粒间这两部分水的含量受颗粒的原始粒度组成、表面形貌、水和颗粒的接触角、颗粒表面孔隙率及孔尺寸等因素综合决定。岩土学中,根据水和颗粒间的作用机理,将颗粒中的水分分为毛细水和分子水,并提出了容水度和持水度的概念,形成了一套测量方法<sup>[13]</sup>。与岩土学中常用的测量方法不同的是:1)混合料制粒过程是吸水过程;2)混合料吸水是在固定的时间单元内完成的。因此,在借鉴岩土学概念的基础上,笔者提出了铁矿粉湿容量的概念<sup>[14-15]</sup>,开发了测量湿容量的设备,并通过实验室的制粒实验验证了该方法的可靠性。

## 1 湿容量概念及测量

湿容量是一定质量的物料在一定温度和压力下所能吸收的最大水量与干燥物料量的比值,其数学表达式为:

$$m_c = (M_w/M_i) \times 100\%, \quad (1)$$

式中: $m_c$ ,  $M_w$  和  $M_i$  分别为矿物的湿容量、矿物的最大吸水量和矿物的质量,单位为 g。当矿物和水接触时,水会在毛细力作用下进入矿物颗粒之间甚至矿物空隙内。图 1 为测量矿物湿容量设备的示意图。

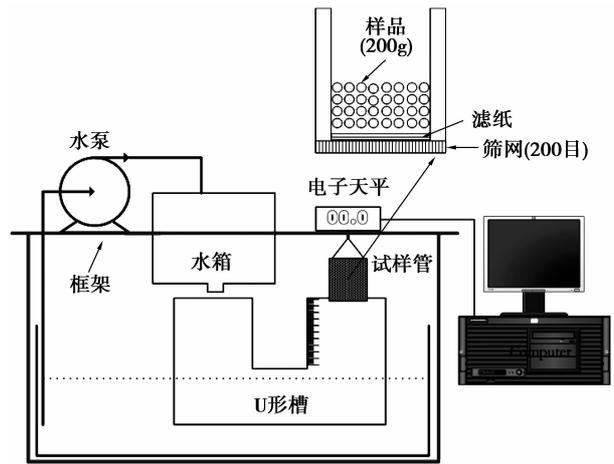


图 1 湿容量的测量设备示意图

测量前首先将矿物在马沸炉中干燥 2 h,温度为 120 °C。每隔 10 min 将矿物混匀再铺平,保证原矿去除所有水分并避免发生结块现象。测量步骤如下:

- 1) 称样:称量 200 g 的待测铁矿粉。
- 2) 准备试样管:用一张滤纸平铺在圆筒的底部,把圆筒泡入水中 1 mm 左右,让滤纸吸水完全饱和。
- 3) 把称量好的 200 g 矿粉装入圆筒内,使其自然堆积,切勿挤压;装好后挂在电子天平上称量,记录总重量后,将天平清零。
- 4) 把圆筒侵入到水下  $h$ ,使试样管所收浮力与界面张力平衡,天平重新回到 0。
- 5) 随着时间变化,记录天平示数。
- 6) 当天平数据稳定时(连续两次测量误差不超过 0.1 g),天平最后的示数即为所测矿物的最大吸水量,记为  $M_w$ 。

上述测试中, $h$  为圆筒浸入水中的深度。该深度的选择对于准确测量矿物的湿容量有很大的影响。 $h$  值过大,浮力的增加将会使测量值偏小; $h$  值过小,浮力的减少将会使测量值偏大。以下将从理论上推导合理的  $h$  值。假设:试样管的直径为  $D$ (m),水和试样管的接触角为  $\theta$ ,水的表面张力和密度为  $\sigma$ (N/m)和  $\rho$ (kg/m<sup>3</sup>),如图 2 所示。

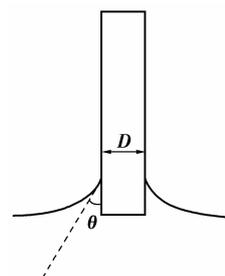


图 2 试样管与水接触示意图

当试样管与水接触时,试样管在竖直方向上所受力为水的表面张力的分力,即

$$F = \pi \cdot D \cdot \cos \theta \cdot \sigma, \quad (2)$$

当试样管深入到水下深度为  $h$  时,试样管所受到的浮力为:

$$f = \rho \cdot \pi \cdot g \cdot D^2 \cdot h/4. \quad (3)$$

由于水分散地分布在颗粒的表面上,与颗粒浸入水中有所不同,因此,认为矿物颗粒不受浮力。当界面张力和浮力平衡时,可以求得试样管的插入深度为:

$$h = \frac{4 \cdot \cos \theta \cdot \sigma}{\rho \cdot g \cdot D}, \quad (4)$$

已知水的  $\sigma$  为 72.75 mN/m、水和玻璃的接触角  $\theta$  为  $30^\circ$ 、 $\rho$  为  $10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $D$  为 3 cm 时计算可得平衡时试样管的浸入深度为 0.86 mm;当  $D$  为 10 cm 时, $h$  为 0.25 mm。

采用上述方法,对多种矿物的湿容量进行测量。测量完毕后,将储水罐中的水位下降,使得水面与试样管分离,从天平上读出矿物吸水后的总重。反复的实验证明,该实验装置测量准确度较高,误差不超过 1%。

## 2 实验方案

混料设备分别采用实验室规模的搅拌器和圆筒混料机来模拟实际烧结过程中的一混和二混。原料在搅拌器中的混匀时间是 4 min,圆筒混料机水平放置,混合时间为 3 min。原料混合过程结束后,将其装入烧结杯中,控制气体流量,测量抽风的负压。料层负压代表其透气性。本实验所研究的 5 种铁矿石取自某钢铁厂的生产现场。实验前首先对铁矿粉进行化学成分分析和粒度组成检测。为进一步研究铁矿石特性对湿容量的影响规律,采用 ASAP2020 对矿物比表面积及孔隙率进行测量。该设备的测量原理是低温下固体颗粒对液氮的吸附。

为模拟烧结厂真实的烧结混料过程,本研究中将 5 种矿石、返矿、焦炭、生石灰及白云石按照不同的比例进行搭配,控制碱度为 1.8,得到 5 组混合料。对这 5 组混合料分别进行不同配水量(5~9 个水平)的混合制粒实验。混合料的搭配情况如表 1 所示。

表 1 5 组混合料的搭配情况(质量分数)

混合料	A	B	C	D	E	返矿	燃料	石灰石	白云石
1	6.24	6.24	15.60	9.36	24.96	25.00	4.13	3.48	5.00
2	6.24	6.24	12.47	9.36	28.07	25.00	4.13	3.50	5.00
3	6.24	6.24	12.48	6.24	31.21	25.00	4.13	3.45	5.00
4	6.24	6.24	9.36	6.24	34.32	25.00	4.13	3.47	5.00
5	3.12	6.23	9.35	6.23	37.41	25.00	4.13	3.52	5.00

## 3 结果分析与讨论

5 种原料其化学组成和粒度分布如表 2 和表 3 所示。所测试的 5 种矿中,矿 A 和 B 是精矿,其余

都是粉矿。矿 D 和 E 烧损较大,铁品位较低。从矿种上分类,B 属于磁铁矿,其余都是赤铁矿。从杂质成分上看,D 和 E 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高,B 的  $\text{SiO}_2$  成分最高。

表 2 铁矿粉的化学成分(质量分数)

矿种	Loss	TFe	FeO	$\text{SiO}_2$	CaO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	MgO	P	S
A	0.46	66.70	0.90	3.01	0.20	0.61	0.21	0.048	0.035
B	0.64	64.40	20.70	5.36	0.50	1.81	0.43	0.086	0.208
C	0.49	66.20	0.51	3.32	0.10	0.91	0.07	0.059	0.023
D	1.32	63.60	0.38	4.54	0.10	2.32	0.14	0.052	0.023
E	2.76	63.00	0.77	3.81	0.20	2.22	0.07	0.070	0.046

表3 铁矿粉的粒度组成(质量分数)

矿种	>10 mm	8~10 mm	5~8 mm	3~5 mm	1~3 mm	0.7~1 mm	0.2~0.7 mm	<0.2 mm
A	3.75	0.14	1.09	2.13	3.10	1.19	6.57	82.04
B	0.13	0	0.47	0.98	1.61	0.48	3.11	93.22
C	6.92	2.10	18.98	14.43	10.88	4.69	6.43	35.58
D	6.23	2.74	14.58	14.40	18.14	8.59	15.21	20.11
E	0.46	0.51	10.40	14.15	23.23	10.49	20.08	20.70

图3所示为矿物的等温吸附线。在低温(-196℃)下,颗粒表面将会吸附液氮。实验时,通过改变体系的相对压力,实现矿物对液氮的吸附和脱附。根据吸附线的变化规律来看,铁矿粉的液氮吸附属于第3种类型<sup>[16]</sup>,即在低压区吸附量较少,高压区吸附量较多。一般来说,吸附线和脱附线总会出现分离,脱附线总会出现于吸附线的上方,分离的部分称为吸附滞后环。因此,温度条件下,根据液氮的吸附量和相应的吸附模型可以计算出颗粒的比表面积,其计算结果如表4所示。根据吸附理论,第3种类型的吸附线发生的是多分子层吸附。因此,根据BET模型得到的结果应该比Langmuir模型更准确。5种矿物的比表面积差别很大,矿E最大,为27.85 m<sup>2</sup>/g;矿B最小,仅为2.55 m<sup>2</sup>/g。其他矿物比表面积从大到小的排列顺序为矿A、D和C。图4

所示为矿物表面孔隙的分布规律,矿E在小孔径区域(10~100Å)内具有更多孔隙;在大孔径(>100Å)区域,矿D和矿E的孔隙分布规律类似。虽然矿A在大孔径区域孔隙的体积(V)相对矿D较少,但是在极小的孔径区域(<30Å),矿A中孔的体积较大。这使得矿A拥有更大的比表面积。这与表4中孔隙的孔径特征相吻合。从矿物比表面积的构成来看,孔隙对矿A比表面积的贡献最大,其次是矿C,矿B的孔隙率最小。

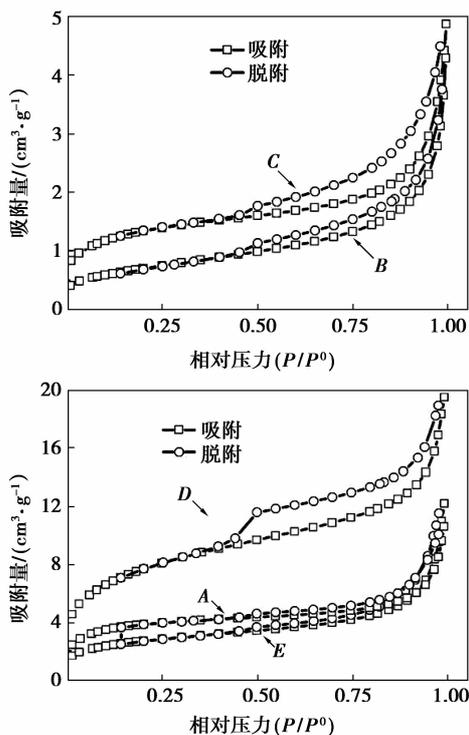


图3 铁矿石的等温吸附线

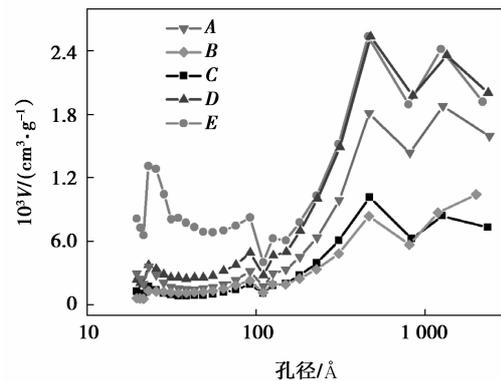


图4 孔容与孔尺寸分布

矿物湿容量的测试结果如图5所示。矿E的湿容量最大,矿C的湿容量最小。对比矿物的湿容量和矿物的比表面积发现,除矿B外,其他矿基本都遵守湿容量随矿物比表面积增大而增大的规律。对矿B进行重复试验,发现湿容量的测量和比表面的测量符合重现性,没有出现重大测量误差。而矿B的粒度分布也表明其应该具有较大的比表面积。而造成这一现象的原因尚不明确。

5组混合料的湿容量结果如图6所示。由图可知,第5组混合料的湿容量最大,第1,2组湿容量接近,第3,4组最小。第1组的吸水速率是最快的,不足20s就接近饱和;第3,4组最慢,约60s后接近饱和;第2,3组经过50s后接近饱和值。

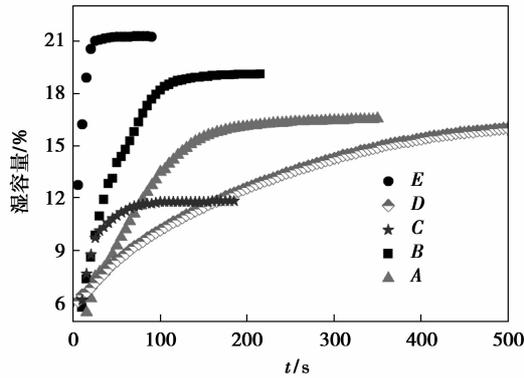


图 5 铁矿粉的湿容量

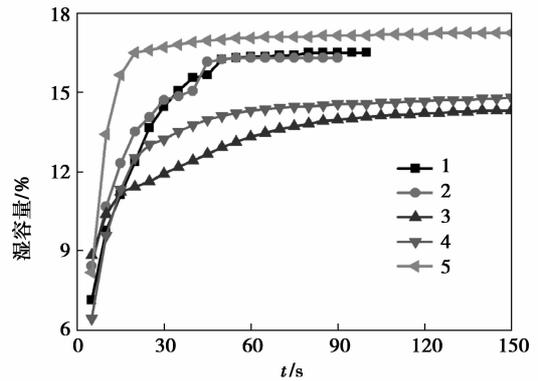


图 6 混合料的湿容量测试曲线

表 4 铁矿石的比表面及孔隙特征

比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	A	B	C	D	E
BET 模型	13.59	2.55	4.79	9.70	27.85
Langmuir 模型	18.50	3.58	6.61	13.41	38.34
小孢子区	5.35	0.07	1.19	1.81	4.74
外部区域	8.22	2.48	3.60	7.89	23.10
孔特征	A	B	C	D	E
孔体积/( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$2.3 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-4}$	$7.1 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-3}$
孔尺寸/ $\text{\AA}$	48.36	104.01	62.91	77.98	43.61

每组原料的配水量及其料层的负压关系如图 7 所示。对于每组实验,将其试验点按照二次曲线的形式进行数据拟合,得到的添加水量和料层透气性的关系如表 5 所示。表中对于最佳配水量的判断采用如下原则:当回归表达式的相关系数的平方超过 0.8 时,最佳配水量即为回归关系式的最小值;当回归关系的相关系数的平方小于 0.8 时,最佳配水量为该组实验点中负压最小时的配水量。分析发现只有第 2,4 组的数据拟合效果较好,相关系数的平方达到或超过 0.8;第 3 组的拟合效果最差。对于每

组原料来说,加水量和料层负压的关系都一致。随着加水量提高,料层的负压减小,透气性提高;当加水量进一步增加超过某一值后,透气性恶化,此时原料明显过湿,呈现“稀泥”状。为了进一步研究粒度变化对于料层透气性的影响,实验过程中对混合料制粒后的粒度分布进行了分析,测试结果如图 8 所示。对湿料的粒度分布检测仍然采用分样筛法。尽管湿料的强度有限,但是在取样时控制好均匀性,筛分时控制好震动强度,测量的结果还是基本上反映了实际的粒度分布。

表 5 料层负压和原料配水量的关系

实验组	1	2	3	4	5	
最佳配水量	9.00	8.90	8.80	8.85	9.10	
$R^2$	0.70	0.80	0.45	0.82	0.73	
$y=B_1x^2+B_2x+C$	$B_1$	-2 905	-1 820	-1 229	-2 006	-1 864
$y(\text{H}_2\text{O})/\text{mm}$	$B_2$	155	103	62	112	104
$x(\text{水添加量})/\%$	$C$	13 900	8 484	6 568	9 475	8 851

分析 5 组原料透气性和粒度组成的关系发现:随着加水量的增加混合料中大颗粒( $>10 \text{ mm}$ )的原

料比例越来越多,小颗粒( $<1 \text{ mm}$ )的原料比例越来越少,中间粒度的颗粒( $1 \sim 10 \text{ mm}$ )的比例先增加再

减少。分析5组原料达到负压最小时的粒度组成可以看出,除第2组特征稍有不同外,当原料中大于10 mm的颗粒部分为50%,5~8 mm颗粒为30%,8~10 mm颗粒为10%,其余颗粒占10%时,料层的透气性最好。

将每组混合料的湿容量和最佳配水量的测试结果作于图9中。可知二者之间具有很强的正相关性。说明湿容量大的混合料在制粒过程中为了得到好的透气性应该需要配加较多的水。对于该实验系统来说,原料混合的最佳配水量就可以通过该关系来预测。

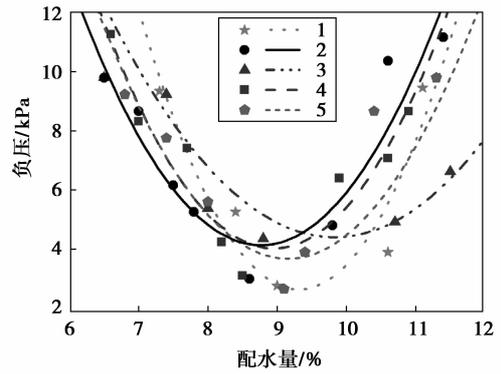


图7 配水量和原料抽风负压的关系

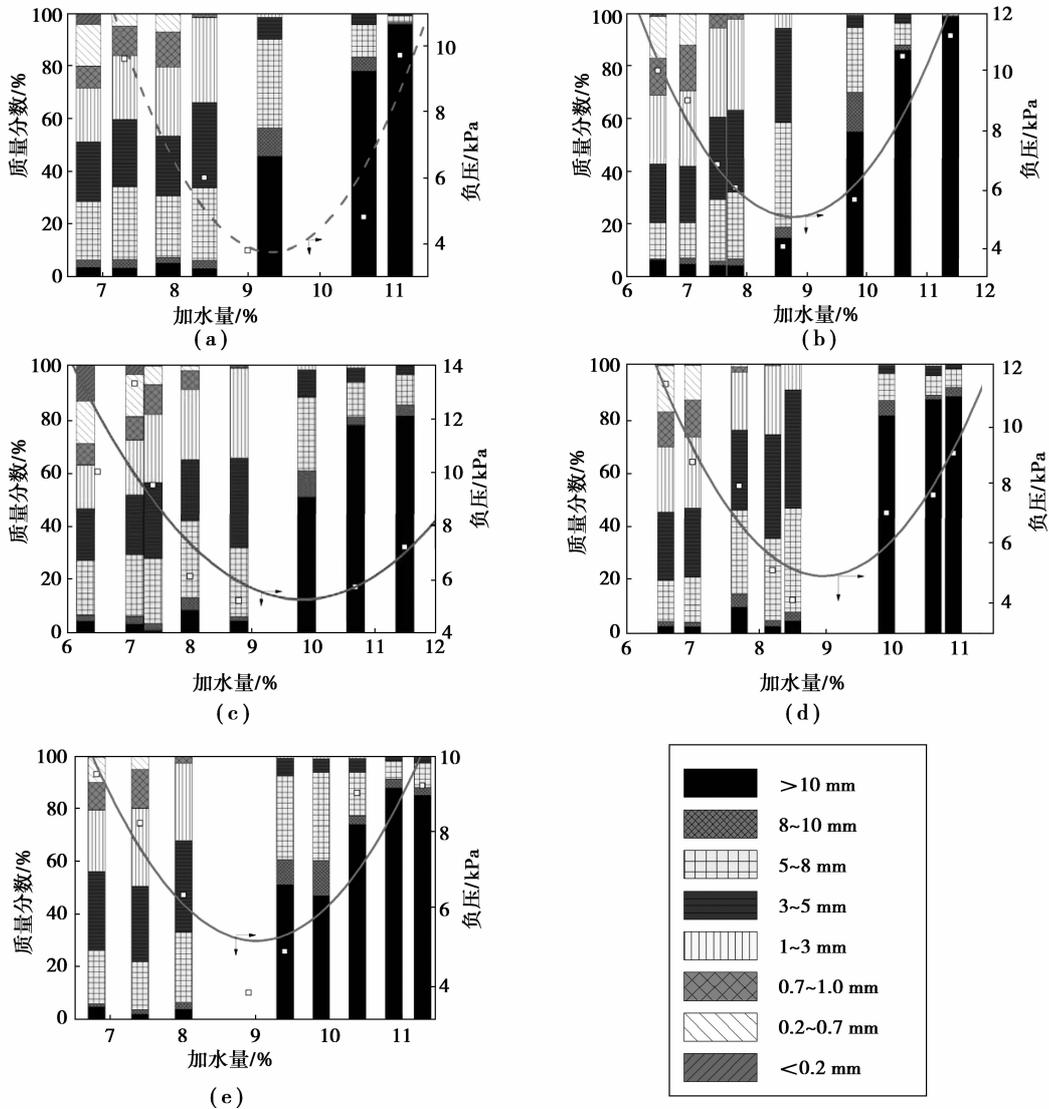


图8 粒度分布、透气性和加水量的关系

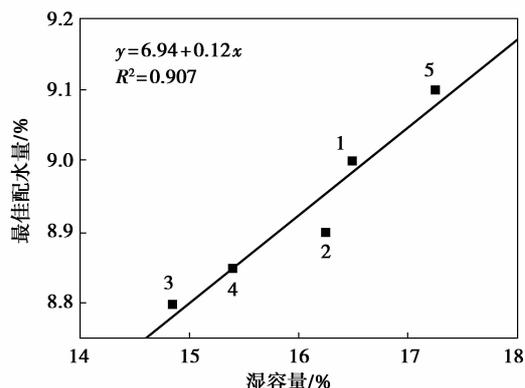


图9 湿容量和最佳配水量的关系

## 4 结论

笔者提出了一种表征铁矿粉最大含水能力的概念——湿容量,并设计出了测试设备,提出了测试步骤和方法。通过对5组混合料的实验室制粒实验发现:

1)湿容量( $x$ )和铁矿粉最佳配水量( $y$ )具有很好的线性关系。对于本研究所涉及的制粒系统和参数而言,其关系为 $y=6.94+0.12x$ 。说明湿容量越大,料层得到最佳透气性时所需要的最佳配水量也应该越大。该实验也说明湿容量能够准确地代表混合料的配水量,为烧结厂的制粒工序提供有用的指导作用。

2)分析料层的粒度分布和透气性的关系得出:当原料中大于10 mm的颗粒部分为50%,5~8 mm颗粒为30%,8~10 mm颗粒为10%,其余颗粒占为10%时,料层的透气性最好。

### 参考文献:

- [1] DAWSON P R. Recent developments in iron ore sintering. III. granulation and strand feeding [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1993, 20(2): 144-149.
- [2] 杜焱,何群,石军. 强化攀钢烧结混合料制粒的试验研究[J]. *烧结球团*, 1998, 23(1): 36-42.  
DU ZHI, HE QUN, SHI JUN. Laboratory test on enhancement of sinter granulation for Panzhihua I&S co. [J]. *Sintering and Pelletizing*, 1998, 23(1): 36-42.
- [3] 黎成家,文剑平. 烧结混合机最佳工艺参数选择的研究[J]. *烧结球团*, 1992, 17(4): 13-17.  
LI CHENG-JIA, WEN JIAN-PING. Verification of optimal technological parameters for sintering [J]. *Sintering and Pelletizing*, 1992, 17(4): 13-17.
- [4] 吴力华,陈雪峰. 攀钢烧结混合料制粒因素的研究与优化[J]. *烧结球团*, 2006, 31(1): 19-22.  
WU LI-HUA, CHENG XUE-FENG. Research and

optimization on factors influencing the mix granulating in Panzhihua sintering plant [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2006, 31(1): 19-22.

- [5] KHOSA J, MANUEL J. Predicting granulating behaviour of iron ores based on size distribution and composition [J]. *ISIJ International*, 2007, 47 (7): 965-972.
- [6] LITSTER J, ENNIS B. The science and engineering of granulation process [M]. Netherland: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [7] IVESON S M, HOLT S, BIGGS S. Advancing contact angle of iron ores as a function of their hematite and goethite content; implications for pelletising and sintering [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2004, 74(1/4): 1-4.
- [8] IVESON S M. Contact angle measurements of iron ore powders [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2000, 166(1/3): 203-214.
- [9] IVESON S M, RUTHERFORD K F, BIGGS S. Liquid penetration rate into submerged porous particles: theory, experimental validation and implications for iron ore granulation and sintering [J]. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section C*, 2001, 110: C113-C143.
- [10] MAEDA T, FUKUMOTO C, MATSUMURA T, et al. Effect of adding moisture and wettability on granulation of iron ore [J]. *ISIJ International*, 2005, 45(4): 477-484.
- [11] MATSUMURA T, MAKI T, AMANO S, et al. Effect of moisture absorption behavior on optimal granulation moisture value of sinter raw material [J]. *ISIJ International*, 2009, 49(5): 618-624.
- [12] SCHUBERT H, HERRMANN W, RUMPF H. Deformation behaviour of agglomerates under tensile stress [J]. *Powder technology*, 1975, 11 (2): 121-131.
- [13] KAPUR P C. Balling and granulation [J]. *Advance in Chemical Engineering*, 1978, 10: 55-123.
- [14] LV X W, BAI C G, QIU G B, et al. Moisture capacity: definition, measurement, and application in determining the optimal water content in granulating [J]. *ISIJ International*, 2010, 50(5): 695-701.
- [15] LV X W, BAI C G, ZHOU C Q, et al. Determination of moisture capacity of iron ore for sintering [C]// The 5<sup>th</sup> International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, October 19-23, 2009, Shanghai, China. Beijing: [s. n.], 2009: 235-238.
- [16] SEIICHI K, TATSUO I, IKU A. Adsorption science [M]. Tokyo: Maruzen Company Limited, 1991.

(编辑 王维朗)