

■ 煤炭洗选加工

煤泥低温干燥速率与煤泥团粒度关系的实验研究

付亮亮^{1,2}, 宋瑞领^{1,2}, 庞明瑾^{1,2}, 许文波^{1,2}, 王自祥^{1,2}, 蓝天^{1,2}

(1. 兖矿集团 洁净煤技术工程研究中心; 2. 兖矿科技有限公司, 山东 邹城 273500)

摘要: 利用实验室干燥装置, 对直径 5~20 mm 的煤泥团在 45~180 ℃ 条件下进行了恒温干燥试验, 获得了煤泥干燥速率随煤泥团粒度和干燥温度的变化关系; 随着煤泥团粒度减小, 煤泥干燥速率大幅增加, 大粒度煤泥团的干燥主要受其内部水分向颗粒表面扩散所控制, 小粒度煤泥团的干燥主要受其外部水分向周围空气的扩散所控制。

关键词: 煤泥团; 粒度; 干燥; 干燥速率; 干燥温度; 水分扩散

中图分类号: TQ531.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8397(2018)05-0005-05

1 概述

煤泥是煤炭洗选加工的副产品, 具有水分高、堆积不成形、遇水流失、风干后飞扬等特点^[1], 除用于配煤销售或坑口电厂直接燃烧外, 大部分煤泥采用堆积存放, 造成非常严重的资源浪费和环境问题。经过压滤的煤泥水分一般为 22%~30%, 热值较低, 但经过干燥, 热值可大大提高, 再通过配煤掺入其他产品或供给锅炉燃烧, 其经济效益非常可观。因此, 研发高效、清洁的煤泥干燥技术有着非常重要的社会、环保和经济价值。

目前, 常用的煤泥干燥技术主要有高温干燥、低温干燥和蒸汽干燥 3 种方式, 每种方式都有相对应的干燥工艺和设备^[2]。无论何种干燥技术, 都需要将煤泥中的水分去除, 而水分去除的过程十分复杂, 涉及的过程有分子扩散、毛细管流、努森流、吸水动力学流和表面扩散等。这些现象结合起来被 Fick 第二定律定义为有效扩散系数, 是反映水分变化机理的关键参数^[3]。显然, 煤泥干燥过程和行为与煤泥团的粒度关系密切, 而目前对此缺乏系统的研究。为了掌握煤泥干燥规律与煤泥团粒度的变化关系, 为建立煤泥干燥模型提供基础数据, 进而为

开发先进的煤泥低温快速干燥技术提供支持, 笔者通过试验, 研究了煤泥干燥速率随煤泥团粒度和干燥温度的变化关系。

2 实验方法

煤泥低温干燥实验选用兖矿集团鲍店煤矿选煤厂尾煤泥(煤质数据见表 1 和表 2), 采用力辰科技 DHS-10A 自动快速水分测定仪。实验时, 将煤泥制作成不同直径的圆球, 采用美国康塔仪器公司比表面积测试仪测定煤泥颗粒比表面积, 然后放入自动快速水分测定仪, 在设定干燥温度(45~180 ℃)下, 进行干燥实验。试验记录和分析煤泥颗粒实时质量与时间的变化数据。同时还测定空气相对湿度、温度、水分等数据, 最后对干燥数据进行分析。

表 1 兖矿集团鲍店选煤厂煤泥工业分析

全水	干基水分	挥发分	灰分	固定碳
$M_t/\%$	$M_{ad}/\%$	$V_d/\%$	$A_d/\%$	$FC_d/\%$
27.83	0.72	26.70	32.08	41.22

表 2 兖矿集团鲍店选煤厂煤泥元素分析

硫分	发热量	氮	碳	氢
$S_{t,d}/\%$	$Q_{net,ar}/MJ \cdot kg^{-1}$	$N_d/\%$	$C_d/\%$	$H_d/\%$
0.47	14.45	1.06	58.25	3.74

收稿日期: 2018-04-03 DOI: 10.16200/j.cnki.11-2627/td.2018.05.002

作者简介: 付亮亮(1985—), 男, 山东枣庄人, 2007 年毕业于山东科技大学矿物加工工程专业, 工程硕士, 兖矿科技有限公司煤炭清洁加工提质研究所所长, 工程师。

引用格式: 付亮亮, 宋瑞领, 庞明瑾, 等. 煤泥低温干燥速率与煤泥团粒度关系的实验研究 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2018(5): 5-9.

3 实验结果与分析讨论

3.1 煤泥干燥速率变化关系

煤泥团粒度为 12.5 mm 时,不同温度下煤泥水分与干燥时间的关系见图 1。由图 1 看出,随干燥时间的增加,煤泥水分不断变小,同时干燥温度越高,干燥速率越快。

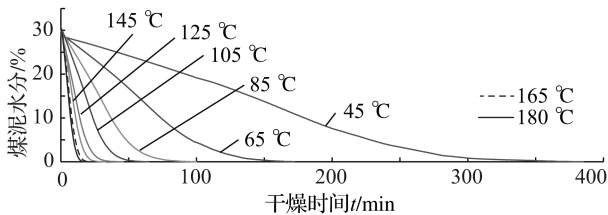


图 1 不同温度下煤泥水分与干燥时间的关系
(煤泥团粒度 12.5 mm)

在相同干燥温度条件下,不同粒度的煤泥团水分与干燥时间的关系见图 2。由图 2 看出,随煤泥团粒度减小,煤泥干燥速率增加显著。

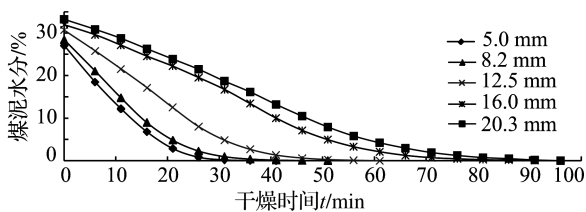


图 2 不同粒度煤泥团水分与干燥时间的关系
(干燥温度: 105 °C)

3.2 煤泥干燥速率的分析

为了定量分析煤泥干燥速率及其与干燥温度、煤泥团粒度的关系,进行如下定义:

干基含水率:湿煤泥中的水分质量与湿煤泥中的绝对干煤泥质量之比。

$$X = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X 为干基含水率,%; W 为煤泥质量, kg; W_0 为煤泥中的绝对干煤泥质量, kg。

干燥速率:单位质量的绝对干煤泥单位时间内脱除水分的质量, kg。

$$v = \frac{W - W_0}{W_0 \times t} = \frac{X}{t} \quad (2)$$

式中: v 为干燥速率, $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$; t 为干燥时间, h。

对式(2)求微分,得到煤泥干燥速率:

$$dv = \frac{dX}{dt} \quad (3)$$

对不同干燥温度,不同球团粒度的煤泥干燥数据进行整理,得到煤泥干燥速率随时间和含水量的变化关系,分别示于图 3~图 6。

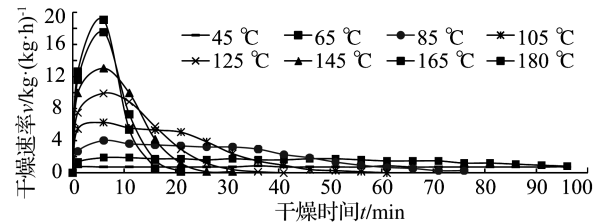


图 3 不同温度下煤泥干燥速率随时间的变化曲线

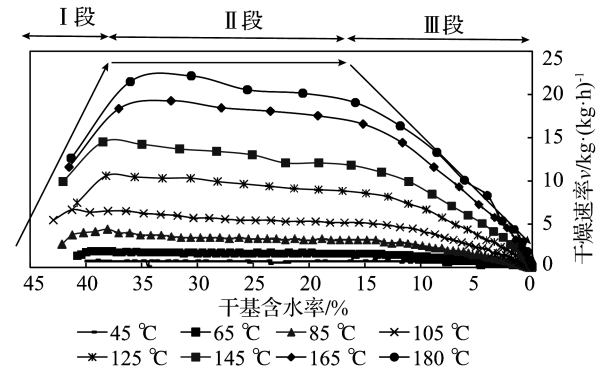


图 4 不同温度下煤泥干燥速率随干基含水率的变化曲线

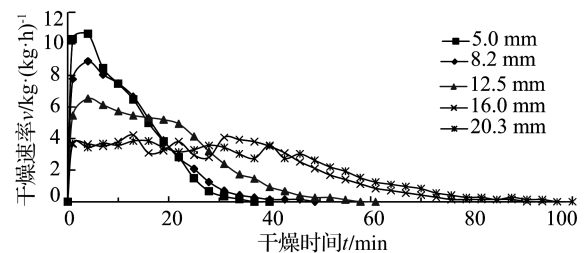


图 5 不同球团粒度下煤泥干燥速率随时间的变化曲线

图 3~图 6 表明,大球团颗粒煤泥(粒度大于 12.5 mm)的低温干燥过程,与以前的试验结果相似,可分为预热加速段、恒速段和降速段 3 个阶段,在图 4 中分别用 I, II 和 III 表示^[4]。在预热加速段,煤泥颗粒由其初始温度快速被加热,煤泥颗粒外部温度迅速达到煤泥湿球温度,煤泥表面水分快速蒸发。在恒速干燥阶段,热量逐渐由煤泥颗粒外部表面传向内部,形成一层温度恒定、水分恒定、干燥速率恒定的区域,水分由该

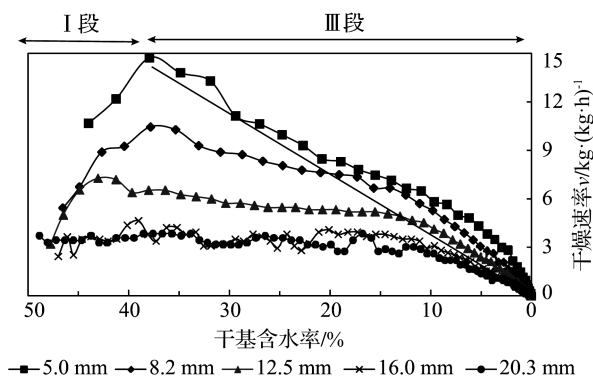


图6 不同球团粒度下煤泥干燥速率随干基含水率的变化曲线

区域逐渐向颗粒表面扩散移动,然后扩散到周围气流中,因此恒速段的煤泥干燥受煤泥颗粒内水分的传递速率所控制^[5]。随着干燥温度升高或煤泥团粒度减小,煤泥恒速干燥段时间和水分范围减小^[6]。受水分逐渐减小的影响,在恒速干燥段后,干燥速率慢速下降,形成慢速降速段。随着干燥程度进一步增大,煤泥表面逐渐形成一定厚度的干燥层,导致热量从外部向颗粒内部的传递以及水分从内部向外部的传递阻力同时增大,最后导致煤泥干燥速率明显缓慢,干燥过程进入快速降速阶段。图7为大颗粒煤泥干燥过程机理。

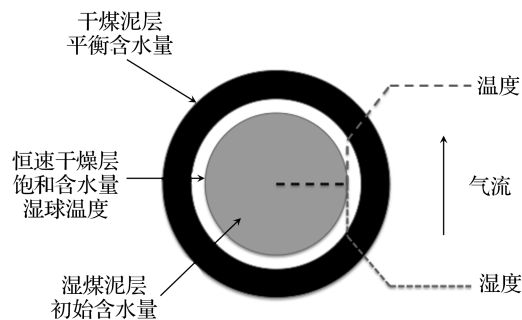


图7 大煤泥颗粒的干燥过程机理示意

对直径很小的煤泥球团(直径小于8.2 mm),煤泥低温干燥过程与大颗粒不同,在经过短暂快速预热加速段后,进入降速段,在图5和图6中可看出5.0 mm和8.2 mm煤泥干燥曲线没有恒速段。这是由于小颗粒煤泥的颗粒比表面积很大,煤泥在被快速加热时其内外部几乎同时达到湿球温度,水分传递距离短,阻力小,干燥速率快^[7]。与煤泥颗粒本身干燥速度相比,煤泥颗粒表面和周围气流的传递速度较慢,并且随着干燥时间延长,气流中湿度增加,煤泥颗粒表面和气流

流间的传递阻力增大,干燥速率逐渐降低。干燥过程为降速阶段。图8为小颗粒煤泥干燥过程机理。

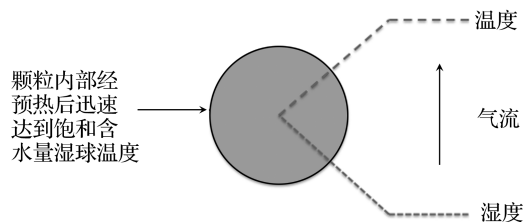


图8 小煤泥颗粒的干燥过程机理示意

煤泥的干燥速率与煤泥球力粒度有关^[8]。当球团尺寸较大时(16.0 mm和20.3 mm),干燥速率随煤泥球团变化较小,当煤泥球团尺寸减小(小于16.0 mm),煤泥最大干燥速率随之增大。煤泥最大干燥速率随煤泥团粒度的变化关系如图9所示。从图9看出,煤泥球团粒度大于16.0 mm时,煤泥干燥过程受煤泥内部热量和水分传递控制,干燥速率低;当煤泥球团粒度小于16.0 mm时,煤泥干燥过程受煤泥颗粒与周围环境的热量和水分传递控制,干燥速率快,随着球团粒度的逐渐减小,煤泥颗粒与环境的接触面积大幅增加,热量和水分传递速率大幅提高,因此干燥速率大幅升高^[10]。

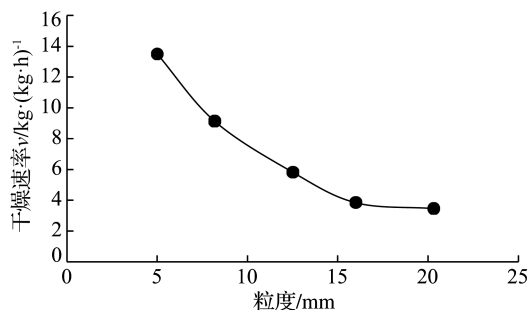


图9 煤泥平均最大干燥速率和煤泥球团粒度的关系

3.3 干燥煤泥产品水分所需时间与煤泥颗粒比表面积的关系

干燥煤泥用于配煤或燃烧时,一般其水分要求在5%~15%。根据以上试验结果,可以分析为达到干燥后煤泥水分为5%,10%和15%时不同煤泥球团所需的干燥时间。首先,将粒度换算成比表面积,其结果列于表3。

将不同粒度煤泥达到目标水分时所对应的干燥速率与比表面积关联,结果示于图10,而干燥

到特定目标水分时的干燥时间与比表面积示于表 4 和图 11。其中煤泥团粒度 0.25 mm，0.5 mm，1.0 mm 和 2.5 mm 的数据是根据图 10 和图 11 所示趋势外推预测得到的。

表 3 不同粒度比表面积对照表

煤泥粒度/mm	单球面积/cm ²	单球体积/cm ³	干球密度/g·cm ⁻³	干球重量/g	煤球数量/个	比表面积/cm ² ·g ⁻¹
5.0	0.79	0.07	1.22	13.44	168	9.81
8.2	2.10	0.29	1.22	14.70	42	6.00
12.5	4.91	1.02	1.22	15.01	12	3.92
16.0	8.04	2.14	1.22	14.61	6	3.07
20.3	12.94	4.38	1.22	14.78	3	2.42

表 4 不同粒度比表面积所需干燥时间及干燥速率

煤泥团 粒度/mm	比表面积/ cm ² ·g ⁻¹	水分 5% 用时/min	水分 10% 用时/min	水分 15% 用时/min	水分 5%干燥速率/ kg·(kg·h) ⁻¹	水分 10%干燥速率/ kg·(kg·h) ⁻¹	水分 15%干燥速率/ kg·(kg·h) ⁻¹
0.25	196.24	1.06	0.57	0.27	73.91	99.36	132.89
0.50	98.12	1.98	1.13	0.59	45.00	58.39	74.65
1.00	49.06	3.70	2.26	1.28	27.39	34.31	41.93
2.50	19.62	8.44	5.61	3.57	14.21	16.99	19.56
5.00	9.81	15.77	11.17	7.73	8.65	9.98	10.99
8.20	6.00	24.57	18.23	13.39	6.08	6.84	7.29
12.50	3.92	36.00	27.78	21.50	4.49	4.94	5.13
16.00	3.07	44.97	35.51	28.32	3.76	4.09	4.17
20.30	2.42	55.72	44.99	36.93	3.17	3.41	3.42

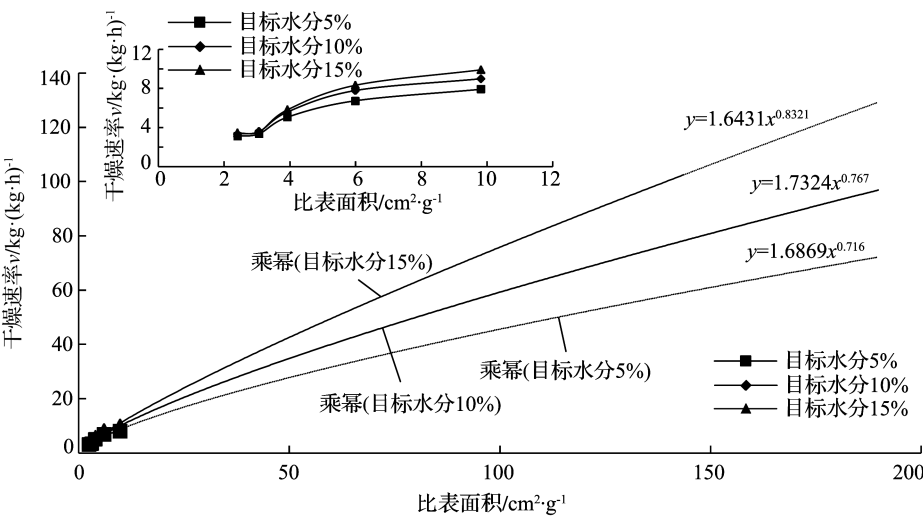


图 10 干燥速率与比表面积的关系

上述分析表明，当煤泥团粒度在 16 mm 以上时，达到干燥泥含水量 15%所需时间在 30 min 以上，这和目前国内煤泥常用的回转窑干燥技术^[9]的实验结果相吻合。从表 4 可以看出，当煤泥在以原始粒度形态(平均粒径 0.25 mm)达到含

水量 5%时干燥时间仅需 0.27 min，其干燥速率与传统转筒干燥技术相比快百倍以上。因此，目前的干燥技术还有很大的改进潜力，开发更加高效、快速的干燥技术和设备很有必要。

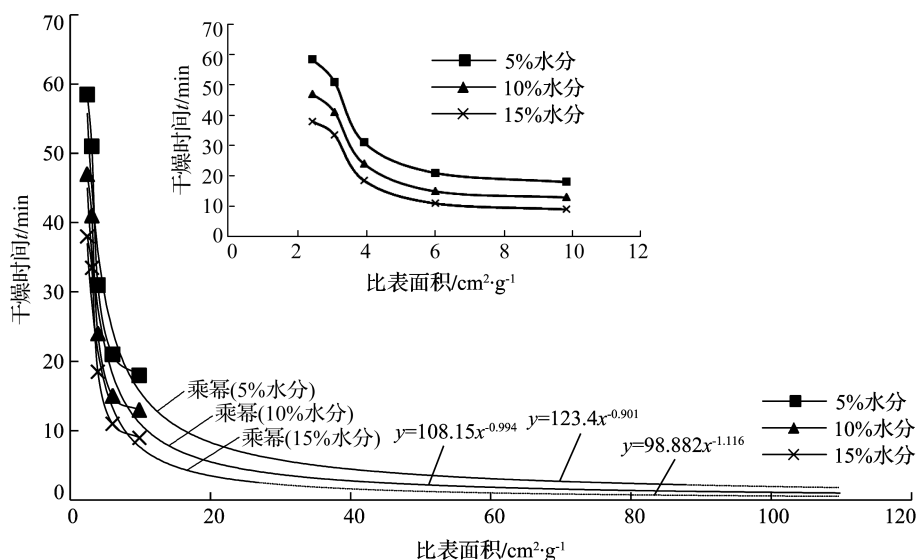


图 11 干燥达到目标水分所需时间与比表面积的关系

4 结 论

利用实验室干燥装置,在 45~180 ℃ 范围内实验研究了煤泥粒度对干燥速率的影响。结果表明:

(1)干燥速率随煤泥团粒度减小而增大。对较大直径煤泥团颗粒(大于约 12 mm),煤泥干燥历经加速、恒速和降速干燥阶段,说明大颗粒煤泥团的干燥主要受其内部水分向颗粒表面扩散所控制。对小直径煤泥团颗粒,煤泥干燥经过一个短暂的加速过程后即进入降速干燥阶段,说明小颗粒煤泥团的干燥主要受其外部水分向周围空气的扩散所控制。在温度和粒度一定时,降低空气相对湿度有利于提高煤泥干燥速率。

(2)干燥速率随颗粒表面积的增大而增大。根据得出的对应关系,可以利用该思路将煤泥干燥所需时间降低到 1 min 之内。目前,兖矿集团在该思路基础上已开发出新型低温干燥技术,已取得中试和工业示范成功。

(3)目前的煤泥干燥技术还有很大的改进潜力,开发更加高效、快速的干燥技术和设备很有必要。

在实验过程中,由于试验周期较长,原始煤

泥保存和试验用煤泥团制备过程较长,导致部分干燥实验煤泥初始水分有一定偏差,对结论可能会有一定影响。

参考文献

- [1] 于海. 燃用煤泥的循环流化床锅炉的设计与性能比较 [D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [2] 刘文昌, 刘保华, 亓愈. 煤泥干燥技术分析 [J]. 选煤技术, 2014(8): 93-96.
- [3] 张绪坤, 姚斌, 吴起, 等. 用傅里叶数与优化法分析污泥过热蒸汽干燥有效扩散系数 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 230-237.
- [4] 赵卫东, 刘建忠, 周俊虎, 等. 褐煤等温脱水热重分析 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 74-79.
- [5] 戴财胜, 颜艳东. 云南褐煤的脱水实验研究 [J]. 矿业工程研究, 2012, 27(1): 59-63.
- [6] 李俊, 张子勇, 毛红艳. 煤泥碎干工艺在铁法能源公司的应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2012(6): 42-44.
- [7] 李占勇. 日本干燥技术的最新进展 [J]. 干燥技术与设备, 2006, 4(1): 3-6.
- [8] 谢广元. 选煤厂产品脱水 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [9] 王宏耀, 吴静, 李晓光, 等. 蒸汽列管回转干燥技术用于煤泥干燥的研究 [J]. 中国煤炭, 41(11): 86-92.
- [10] 姚连升. 褐煤微波干燥及水分迁移特性试验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.