

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2020.01.14

软锰矿的微波干燥特性

苏 晓¹ 杜金佳¹ 普 婧¹ 阮榕生¹ 段利平¹ 陈 策^{1, 2, 3}

(1. 云南民族大学 云南省高校绿色化学材料重点实验室, 昆明 650500;

2. 昆明理工大学 非常规冶金教育部重点实验室, 昆明 650093;

3. 中南大学 锰资源高效清洁利用湖南省重点实验室, 长沙 410083)

摘 要:以广西大新县软锰矿为研究对象,采用微波加热进行干燥,分别在不同的软锰矿初始含水率、软锰矿质量、微波功率条件下进行了软锰矿的微波干燥试验,研究工艺参数对软锰矿微波干燥速率等的影响规律,以此研发出微波干燥软锰矿新工艺,为微波干燥软锰矿的工业应用提供理论基础和试验数据。

关键词:软锰矿;微波加热;干燥特性;含水率;水分迁移

中图分类号:TF802.64 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-7854(2020)-01-0074-05

Microwave drying characteristics of pyrolusite

SU Xiao¹ DU Jin-jia¹ PU Jing¹ RUAN Rong-sheng¹ DUAN Li-ping¹ CHEN Guo^{1, 2, 3}

(1. Key Laboratory of Green-chemistry Materials in University of Yunnan Province, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China;

2. Key Laboratory of Unconventional Metallurgy of Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Efficient and Clean Utilization of Manganese Resources, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: As a new drying technology, microwave heating technology has been widely used in the field of mineral drying. In this paper, taking the pyrolusite in Daxin county, Guangxi province as the research object, microwave heating was used to dry the pyrolusite. The microwave drying experiments of pyrolusite were carried out under different conditions of initial moisture content, pyrolusite quality and microwave power, respectively. Effects of experimental factors on microwave drying rate of pyrolusite were investigated, and a new process of microwave drying for pyrolusite was developed, providing theoretical basis and experimental data for industrial application of microwave drying of pyrolusite.

Key words: pyrolusite; microwave heating; drying characteristics; the moisture content; moisture migration

锰及其化合物广泛用于国民经济的各个领域,其中钢铁工业消耗量最大,占 90%~95%。锰是炼铁或炼钢过程中的脱氧剂和脱硫剂,也可以用来制造合金^[1-2]。软锰矿的主要成分为二氧化锰,是一种常见的含锰矿物,但软锰矿水含量高,采用高

温焙烧工艺提取锰时需经过干燥预处理^[3]。传统的干燥方法通常采用外部加热,物料温度分布呈现外高内低,热量需经过物料表面吸收后才能通过热传导、热对流等传热方式逐渐传递至物料内部,从而使物料内部温度不断升高,然后物料内部的水分从物料内部转移到表面,实现干燥。整个过程中热量传递的方向与水分蒸发的方向相反,干燥速率较低^[4]。微波干燥技术无需任何热传导过程,热量可从物料内部产生,且物料内部和外部的水分同时被加热,干燥过程中表里温度较为均匀,物料温度呈外低内高分布,水分受热汽化后产生巨大的压差,

收稿日期:2019-07-05

基金项目:NSFC-云南联合基金资助项目(U1802255);国家科技支撑计划项目(2015BAB17B02);湖南省科技计划项目(2016TP1007)

第一作者:苏 晓,本科生。

通信作者:陈 策,教授;E-mail:guochen@kust.edu.cn

形成的推动力可使水分快速地由物料内部转移至空气中,温度梯度及传热方向与水蒸汽转移方向相同,所受阻阻力小,干燥速率快、效率高^[5-7]。如李新冬等^[8]采用微波干燥褐铁矿,发现与传统加热干燥相比,微波加热褐铁矿的脱水速率远远大于常规加热方式干燥的速率。PICKLES C A^[9]利用微波干燥含褐铁矿型红土矿时发现温度在 44~228 ℃ 内,微波干燥的速率比常规干燥的高出 2~3 倍。LI L Z 等^[10]利用微波加热辅助干燥褐煤研究时发现微波加热可以有效提高褐煤的脱水速率,在微波功率 231 W 条件下干燥 6 min,煤的热值提高 8.1%,硫含量降低 68.6%。本研究基于微波可加热的特性,采用微波技术干燥软锰矿,重点研究了软锰矿的初始含水率、样品质量及微波功率等对软锰矿干燥效果的影响。

1 试验

1.1 试验原料

原料取自广西大新县软锰矿,干燥前用行星式球磨机进行破碎,筛取粒径为 80~250 μm 部分进行试验和分析。原料主要化学成分见表 1。

表 1 软锰矿的化学成分

Table 1 Chemical composition of pyrolusite /%

成分	Mn	Si	TFe	Tb	Al	Ca	K
含量	53.64	21.23	15.62	3.61	2.06	1.56	1.19

由表 1 可知,软锰矿中的锰含量为 53.64%,除锰以外,硅的含量为 21.23%,同时铁的含量较高,达到 15.62%。

1.2 试验方法

称取一定质量的软锰矿放入微波炉进行微波干燥,每隔 20 s 用电子天平称量一次加热后软锰矿的质量直至样品质量读数变化很小甚至不变,记录试验数据,探究软锰矿质量随时间的变化规律。每次进行 3 组平行试验,取平均值作为试验值。含水率按式 (1) 进行计算,干燥速率按式 (2) 进行计算。最后分析相关影响因素对软锰矿微波干燥过程的影响规律。

$$M_t = 1 - \frac{m_0 \times (1 - M_0)}{m_t} \quad (1)$$

式中, M_t — t 时刻软锰矿的含水率,%; M_0 —软锰矿初始含水率,%; m_0 —软锰矿初始质量 (含水分), g; m_t — t 时刻软锰矿的质量, g。

$$R = - \frac{M_{(t+\Delta t)} - M_t}{\Delta t} \quad (2)$$

式中, R —干燥速率, %/s; M_t —干燥过程中 t 时刻软锰矿含水率,%; $M_{(t+\Delta t)}$ —干燥过程中 ($t+\Delta t$) 时刻软锰矿含水率, %。

2 试验结果与讨论

2.1 物料初始含水率的影响

固定试验条件:软锰矿质量为 20 g、微波输出功率 400 W,研究初始含水率分别为 8%、12%、16% 时物料含水率和干燥速率随时间变化,结果如图 1 所示。

从图 1 (a) 可以看出,随微波加热时间的延长,软锰矿含水率的变化大致可以分为 3 个阶段:平缓期 (I)、加速期 (II) 和稳定期 (III)。在平缓区,物料从室温开始接受微波能量,物料开始预热,此时样品吸收的微波能量还不足以使物料中的大量水分蒸发,所以样品含水率呈缓慢下降趋势。物料经过平缓期的预热后,吸收了足够多的微波能量,内部温度已经远远超过了水的沸点,大量水分加速蒸发,样品含水率呈急剧下降趋势。随着物料内水分的大量蒸发,剩余水分不多,物料的质量变化开始变小并趋于平衡到达稳定区。从图 1 (b) 可以看出,干燥速率在平缓期 (I) 升高较为明显,在加速期 (II) 先逐渐增大到最大值,后又快速减小,在稳定期 (III) 缓慢减小到 0。软锰矿的干燥速率变化大致由升速段和降速段组成,整个干燥速率曲线呈先增后减趋势。这是因为随着干燥时间的延长,物料中的含水率不断下降,当下降到一定程度时,样品吸收的微波能量减少,故水分蒸发速度减缓,干燥速率减小。软锰矿的最大干燥速率随初始含水率的增加而增大,16% 初始含水率的软锰矿最大,干燥速率为 0.089 64 %/s。这是因为高含水率的软锰矿吸收的微波能量多,温度升高快,内部水分的汽化速度快,物料内部和表面形成的压差大,可使水分快速地由内向外扩散。

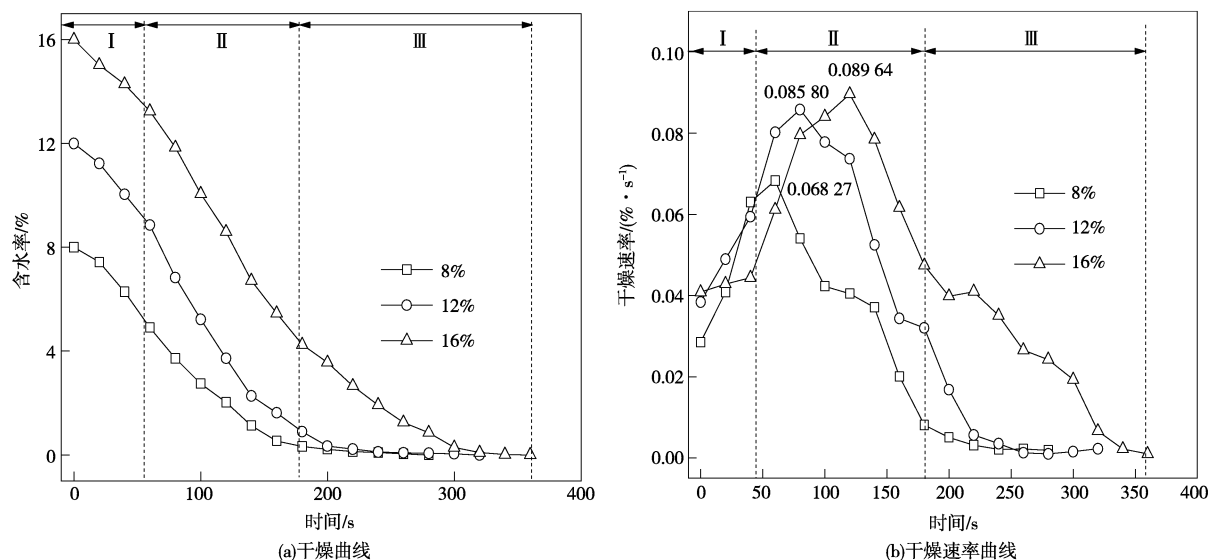


图 1 物料初始含水率不同时的含水率-时间曲线和干燥速率-时间曲线

Fig. 1 Curves of moisture content and time (a), drying rate-time (b) with different initial moisture content

2.2 物料初始质量的影响

固定试验条件：软锰矿初始含水率为 12%、微波输出功率 400 W，研究物料初始质量分别为

10、20、30 g 时，物料含水率和干燥速率随时间的变化，结果如图 2 所示。

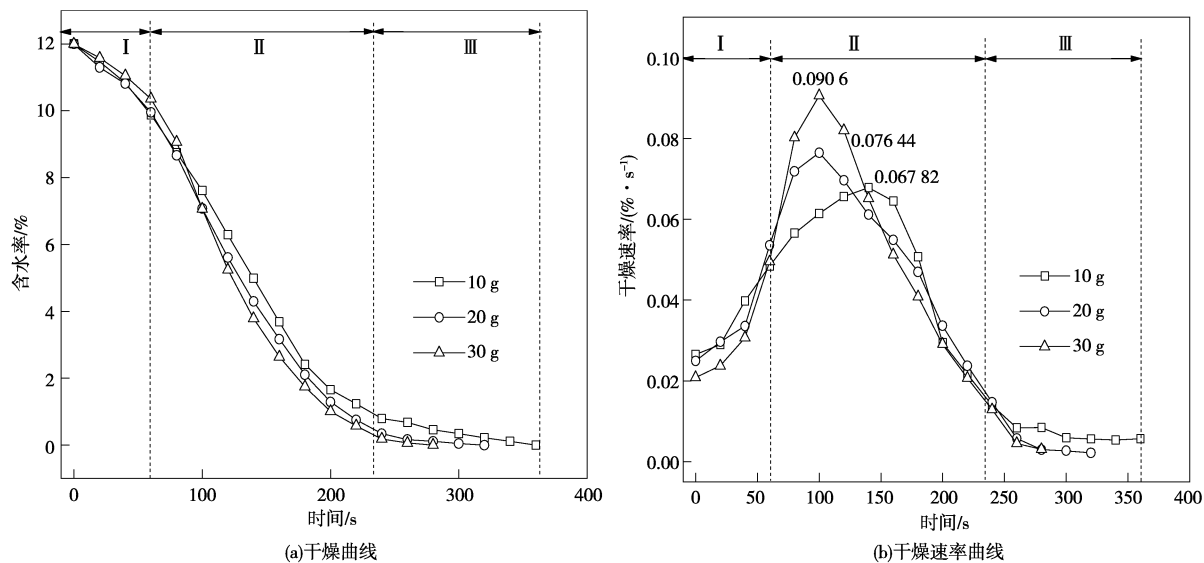


图 2 物料初始质量不同时的含水率-时间和干燥速率-时间曲线

Fig. 2 Curves of moisture content and time (a), drying rate and time (b) with different initial mass of materials

从图 2 (a) 可以看出，样品质量不同时，软锰矿在微波干燥过程中依然经过平缓期预热，加速期脱水和稳定期干燥完全 3 个阶段。在同样的微波功率下，软锰矿完全干燥所用时间随样品质量的增加反而缩短，30 g 样品完全脱水需要时间为 280 s。从图 2 (b) 可以看出，干燥速率曲线仍由升速段和降速段组成，干燥速率先增后减。软锰矿的最大

干燥速率随样品质量的增加而增大，且在干燥速率曲线的升速段，样品质量越大，干燥速率增加的速度越快，达到最大干燥速率的时间越短。10、20、30 g 样品的最大干燥速率分别为 0.067 82、0.076 44、0.090 60 %/s，样品质量越大，含有的水分总量越多，所吸收的微波能量也越多，大量的微波能量转化为热能，加速物料内部水分的扩散，

因此干燥速率增大。此结果表明，微波加热干燥技术更适用于样品较多、质量较大物料的干燥，这与常规加热干燥技术有所不同。常规加热干燥往往是样品越少，水分扩散得越快，干燥效果更显著^[11]。在实际工业生产中，微波干燥技术因其独特的加热机制，对大规模的物料干燥表现出更大的优势。

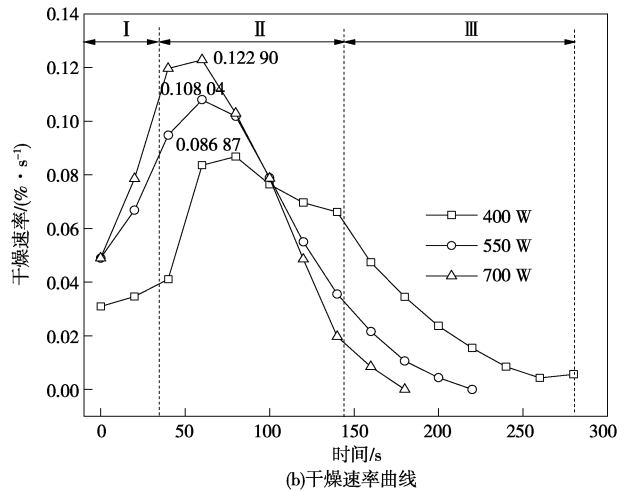
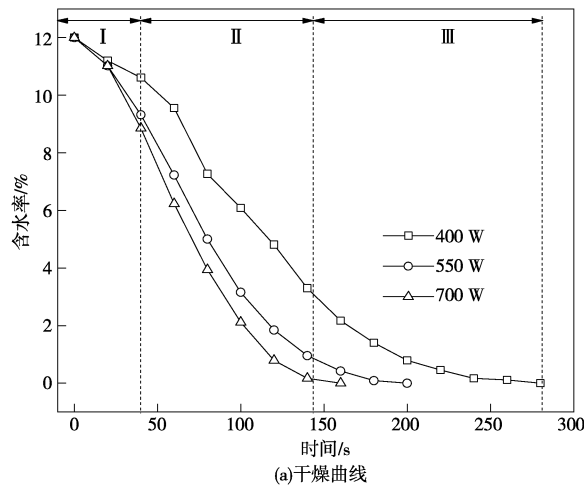


图 3 微波输出功率不同时的含水率-时间曲线和干燥速率-时间曲线

Fig. 3 Curves of moisture content and time (a), drying rate and time (b) with different microwave output power

从图 3 (a) 可以看出，微波功率不同时，软锰矿干燥所需时间随微波功率的增大而缩短，在微波功率 400 W 和 550 W 的条件下，20 g 样品完全干燥所需时间相应为 280 s、200 s，而在微波功率 700 W 时，同质量样品完全干燥所需时间仅为 160 s。在相同的干燥时间内 (100 s)，微波功率 700 W 时，样品含水率从 12% 下降到 2.11%，而微波功率 400 W，样品含水率从 12% 仅下降到 6.08%。这是因为微波功率越大，在相同时间内释放的微波能量越多，所以物料吸收的微波能量就越多，水分脱除的速度越快。从图 3 (b) 可以看出，软锰矿的最大干燥速率随微波功率的增大而增大，且在干燥速率曲线的升速段，微波功率越大，干燥速率增加的速度越快。微波功率 400 W 时，最大干燥速率为 0.086 87 %/s，所需时间为 80 s，而微波功率 700 W 时只需要 25 s 即可达到微波功率 400 W 条件下的最大干燥速率。以上结果说明，可通过加大微波功率来提高物料干燥速度，但这并不代表微波功率越高，对物料干燥越有利。试验过程中发现，过高的微波功率会引起软锰矿的烧结，因此需要根据实际样品量和含水率等指标，选择合适的微波加热功率，从而既能满足快速干燥的要求，又能保证

2.3 微波输出功率的影响

固定试验条件：软锰矿质量为 20 g、初始含水率为 12%，研究微波输出功率分别为 400、550、700 W 时，物料含水率和干燥速率随时间变化，结果如图 3 所示。

干燥后软锰矿的质量。

3 结论

1) 微波干燥脱水过程可分为平缓期预热，加速期脱水、稳定期干燥完全 3 个阶段，干燥速率曲线由升速段和降速段组成。干燥速率在平缓期增大，在加速期先增至最大值后逐渐减小，在稳定期缓慢减小。

2) 软锰矿微波干燥所需时间随样品初始含水率的增加而增加，随样品质量、微波功率的增大而缩短，而软锰矿的最大干燥速率随样品初始含水率、样品质量、微波功率的增大而增大。软锰矿初始含水率为 12%，样品质量分别为 10、20、30 g，微波功率为 400 W 时，样品的最大干燥速率分别为 0.067 82、0.076 44、0.090 60 %/s。

3) 微波干燥效率高、能耗少、干燥速率快、干燥效果显著，但实际应用中为避免烧结现象发生，应根据样品初始质量、含水率指标选择合适的微波加热功率。

参考文献

[1] 刘贵扬. 电解锰阳极泥综合回收利用研究 [D]. 南宁:

- 广西大学, 2013.
- LIU G Y. Research on comprehensive recycling of manganese anode slime [D]. Nanning: Guangxi University, 2013.
- [2] 李康强, 李鑫培, 和飞, 等. 低品位软锰矿还原技术的研究进展[J]. 矿冶, 2019, 28 (3): 64-70.
- LI K Q, LI X P, HE F, et al. Review of reduction technology of low grade pyrolusite [J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28 (3): 64-70.
- [3] 张志华, 薛生晖, 黎红兵, 等. 广西某低品位软锰矿还原焙烧—酸浸工艺研究[J]. 中国锰业, 2012, 30 (2): 19-22.
- ZHANG Z H, XUE S H, LI H B, et al. Study on reduction roasting-acid leaching with Guangxi pyrolusite ore [J]. China's Manganese Industry, 2012, 30 (2): 19-22.
- [4] 廖雪峰, 刘钱钱, 陈晋, 等. 微波加热在干燥过程中的研究现状[J]. 矿产综合利用, 2016 (4): 1-5.
- LIAO X F, LIU Q Q, CHEN J, et al. Research status of microwave heating in drying [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016 (4): 1-5.
- [5] 祝圣远, 王国恒. 微波干燥原理及其应用[J]. 工业炉, 2003 (3): 42-45.
- ZHU S Y, WANG G H. Principle and application of microwave drying [J]. Industrial Furnace, 2003 (3): 42-45.
- [6] 冯康露, 陈晋, 陈莫, 等. 微波加热应用于冶金工艺的研究进展[J]. 矿冶, 2018, 27 (4): 63-67.
- FENG K L, CHEN J, CHEN G, et al. Application and research progress of microwave heating technology in typical metallurgical process [J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27 (4): 63-67.
- [7] 郑孝英, 冯康露, 陈晋, 等. 多钒酸铵的微波干燥特性研究[J]. 矿冶, 2018, 27 (3): 51-55.
- ZHENG X Y, FENG K L, CHEN J, et al. Drying behavior of ammonium poly vanadate under microwave heating [J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27 (3): 51-55.
- [8] 李新冬, 赵玲. 微波技术应用于褐铁矿干燥脱水的试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2006 (6): 9-10.
- LI X D, ZHAO L. Microwave technology was applied to the experimental study of drying and dehydrating limonite [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2006 (6): 9-10.
- [9] PICKLES C A. Microwave drying of nickeliferous limonitic laterite ores [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2005, 44 (3): 397-408.
- [10] LI L Z, JIANG X W, QIN X M, et al. Experimental study and energy analysis on microwave-assisted lignite drying [J]. Drying Technology, 2019, 37 (8): 962-975.
- [11] FENG K L, CHEN G, CHEN J C, et al. Experimental investigation on drying characteristic of titanium slag using microwave heating [J]. Drying Technology, 2018, 36 (13): 1525-1530.