

# 锂云母焙烧过程的模拟计算及节能设计

杨晓武 袁爱武 李伟达 陈玉萍 汤洛

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 长沙 410019)

**[摘要]** 以某年产1万t电池级碳酸锂的锂云母提锂工程设计为案例,采用METCAL软件对锂云母硫酸盐法回转窑焙烧过程进行物料衡算和热量衡算,分析其中的主要能耗点,并将模拟计算结果与同类项目实际运行数据进行对比。结果显示,模拟计算结果与现场数据基本吻合,焙烧系统热量损失主要为干燥窑排气热量损失和回转窑散热损失,这两者在总热量中的占比达到了48.3%,应重点关注。进行节能设计时,应加强设备保温绝热、熟料余热利用和窑尾烟气余热利用,以降低锂云母提锂生产能耗和成本。

**[关键词]** 锂云母;硫酸盐法焙烧;METCAL;回转窑;篦冷机;节能

**[中图分类号]** TF826<sup>+</sup>.3

**[文献标志码]** B

**[文章编号]** 2097-2423(2024)05-0039-05

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.05.006

## 0 前言

近年来,随着新能源汽车和储能行业的蓬勃发展,锂资源的需求日益增加。目前,可供开采的锂资源主要分为盐湖卤水型和矿石型。据统计,盐湖卤水型锂矿约占69.5%,矿石型锂矿约占23.5%<sup>[1]</sup>。虽然盐湖卤水中锂资源更加丰富,提取成本也更低,但是由于国际形势、政策法规、气象环境、地理位置、环保要求、提锂技术等诸多因素影响,国内外盐湖卤水锂资源的开发依然受到较大制约,产能难以在短期内快速提高。现阶段,还需要通过矿石提锂来保障对锂资源的新增需求。

矿石锂主要赋存于花岗伟晶岩矿床,其存在形式包括锂辉石、锂云母、透锂长石和磷锂铝石等,其中又以锂辉石、锂云母为主。从全球范围来看,虽然锂辉石是最重要且储量最大的矿石锂资源,也是目前商业化矿石提锂的主要来源,但是国内矿石锂资源以锂云母为主,其储量丰富,易于开采,锂云母提

锂已成为中国锂资源产能的重要增长来源。因此,加强对锂云母矿的开发,降低锂云母提锂综合成本,对于保障锂资源的安全,乃至国家新能源产业的安全具有重大意义。

从锂云母精矿中提取锂的方法主要有硫酸法、石灰石烧结法、硫酸盐焙烧法、压煮法和氯化焙烧法<sup>[2-3]</sup>。其中,硫酸盐焙烧法较为成熟可靠,其将锂云母与硫酸盐混合后在高温下焙烧,焙烧熟料经水或稀酸浸出后实现锂的溶出,目前几乎所有的大规模生产均采用硫酸盐焙烧法。硫酸盐焙烧法工艺操作简单,锂回收率相对较高,但提锂过程需要对锂云母进行高温焙烧,能耗较高。国内锂云母精矿中锂的品位普遍相对较低,特别是江西和湖南等地存在大量低品位锂矿,精矿中Li<sub>2</sub>O含量仅为1.4%~2.5%。根据生产实践,目前每生产1t碳酸锂需要消耗5.5~9.5t标煤,其中焙烧工序天然气耗能占到总能耗的60%左右,其燃料成本占碳酸锂加工成本的20%~30%。因此,加强对锂云母硫酸盐法焙烧过程的研究,找出其主要的耗能点,进行节能设计,对于降低锂云母生产能耗和成本尤为重要。

## 1 工艺介绍

硫酸盐焙烧法焙烧工序的主要流程:来自选矿厂的锂云母精矿含水率一般为15%~20%,经干燥后与硫酸钾钠盐、硫酸钙、碳酸钙等物质混合,进入窑炉焙烧,焙烧温度一般为950~1050℃,熟料烧

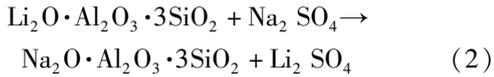
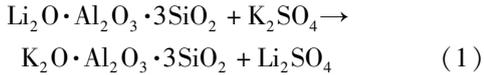
**[收稿日期]** 2024-05-22

**[作者简介]** 杨晓武(1987—),男,湖南常德人,高级工程师,硕士,长期从事烟气制酸、烟气脱硫脱硝、锂资源提取、钒资源提取等方向的工程咨询及设计工作。

**[引用格式]** 杨晓武,袁爱武,李伟达,等. 锂云母焙烧过程的模拟计算及节能设计[J]. 绿色矿冶,2024,40(5):39-44.

YANG Xiaowu, YUAN Aiwu, LI Weida, et al. Simulation and energy-saving design of lepidolite roasting process[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(5): 39-44.

成时间 1 h, 焙烧熟料经浆化后进行水浸或酸浸。焙烧过程发生的主要反应<sup>[4-5]</sup>如下。



工业上用于硫酸盐法焙烧的窑炉设备主要为回转窑和隧道窑, 也有极少数企业采用辊道窑。回转窑具有生产效率高、操作简单灵活、适应性强的优点, 但其维护成本相对较高; 隧道窑维护成本低, 焙

烧效果好, 产品质量稳定, 但其操作相对复杂, 需要制砖及碎磨, 此外隧道窑为半开放式, 其漏入空气量较大, 烟气含氧量较高, 烟气处理要求高, 环保压力大。因此, 越来越多企业选择采用回转窑焙烧。

本文以某年产 1 万 t 电池级碳酸锂的锂云母提锂工程设计为例, 采用软件模拟的方式, 对锂云母硫酸盐法回转窑焙烧过程进行物料和热量平衡计算, 并根据计算结果分析主要能耗点, 进而采取针对性节能设计。

锂云母精矿含水率 15%, 其干基成分见表 1。

表 1 锂云母干基成分

组成	Li <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO
质量占比/%	2.400	47.750	18.500	12.400	0.008	0.059	0.256	0.260
组成	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	其他	合计
质量占比/%	9.010	1.120	1.040	0.210	0.670	5.020	1.297	100.000

锂云母湿精矿经回转窑窑尾烟气干燥到含水率为 1%, 然后与硫酸钾钠盐、硫酸钙、碳酸钙进行混料。综合参考各相关实验数据<sup>[5-7]</sup>, 确定混料过程中各物料干基比例为锂云母: 硫酸钾钠盐: 硫酸钙: 碳酸钙 = 1: 0.35: 0.10: 0.05, 其中硫酸钾钠盐中 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 含量占 70%, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 含量占 30%。混合后的生料进入回转窑焙烧, 焙烧所需热量由天然气燃烧器供应, 回转窑窑尾烟气用于锂云母湿精矿的干燥。回转窑窑头熟料经篦冷机冷却后得到冷熟料, 熟料高温冷却段所产生的热空气直接返回到回转窑中, 熟料低温冷却段产生的热空气进余热锅炉产低压蒸汽。

## 2 模拟计算

### 2.1 METCAL 软件介绍

METCAL 软件是江西理工大学开发的具有自主知识产权的国产冶金工艺流程计算软件, 能够进行工艺全流程物料平衡、化学平衡、热平衡计算, 具有功能强大、过程直观、通用性强、操作简便灵活等特点。

METCAL 的计算流程包括: 建立计算模型, 输入参数和条件, 模型运行与结果输出。

### 2.2 建立计算模型

METCAL 采用直观的方框作为计算单元, 各计算单元之间的联系即为物流, 根据工艺流程, 建立计算模型如图 1 所示。

在实际设计中, 回转窑窑尾至干燥窑段一般会设置高温收尘及 SCR 脱硝设施, 同时为防止开车或

非正常运行工况下回转窑窑尾烟气温度过低, 影响 SCR 脱硝及对干燥窑内锂云母精矿的干燥效果, 还会在回转窑窑尾和干燥窑间配置热风炉, 此处为简单起见, 未将其列入模拟计算。

### 2.3 输入参数和条件

对于每个计算单元, 只需输入原料组成、产物组成, 并给与足够的工艺参数和约束条件, 便可进行计算。已知主要参数如下:

- 1) 锂云母湿精矿的成分及含水率(15%)。
- 2) 硫酸钾钠盐的成分及含水率(2%)。
- 3) 硫酸钙的成分及含水率(4%)。
- 4) 碳酸钙的成分及含水率(1%)。
- 5) 天然气的成分。

设定的主要约束条件如下:

- 1) 碳酸锂年产量 10 000 t, 锂云母精矿到碳酸锂过程中锂的总回收率按 75% 计算。
- 2) 锂云母精矿干燥后含水率为 1%。
- 3) 干燥窑漏风率 10%。
- 4) 混料过程锂云母: 硫酸钾钠盐: 硫酸钙: 碳酸钙 = 1.00: 0.35: 0.10: 0.05。
- 5) 回转窑焙烧熟料出料温度 900 ℃。
- 6) 回转窑窑尾烟气温度 400 ℃。
- 7) 回转窑 Li<sub>2</sub>O 反应率为 90%。
- 8) 回转窑可溶钠占生料总钠量为 60%。
- 9) 回转窑可溶钾占生料总钾量为 30%。
- 10) 回转窑碳酸钙分解率为 100%。
- 11) 回转窑硫酸钙分解率为 10%。

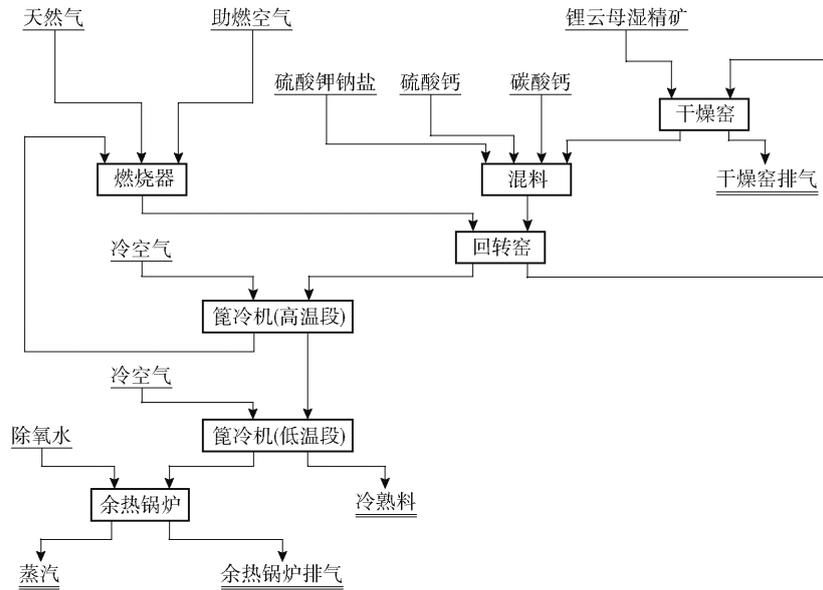
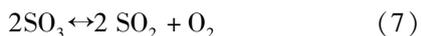
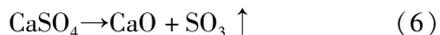
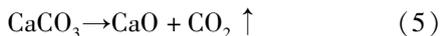
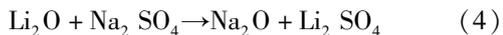
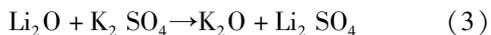


图1 METCAL 计算模型图

- 12) 回转窑散热面积  $1\ 413\ \text{m}^2$ , 给定壁温  $220\ ^\circ\text{C}$ 。
- 13) 筒冷机(高温段) 熟料冷却终温为  $400\ ^\circ\text{C}$ 。
- 14) 筒冷机(高温段) 热空气温度为  $500\ ^\circ\text{C}$ 。
- 15) 筒冷机(低温段) 熟料冷却终温为  $80\ ^\circ\text{C}$ 。
- 16) 筒冷机(低温段) 热空气温度为  $300\ ^\circ\text{C}$ 。
- 17) 余热锅炉给水为  $104\ ^\circ\text{C}$  除氧水。
- 18) 余热锅炉产生饱和蒸汽参数为  $0.4\ \text{MPa}$ 、 $143.6\ ^\circ\text{C}$ 。
- 19) 余热锅炉排气温度为  $150\ ^\circ\text{C}$ 。

锂云母精矿中各组成物的矿相形式较为复杂, 模拟软件中未有完整的物性数据, 也未见有相关文献记录锂云母焙烧过程的完整反应机理及热数据。因此, 在回转窑单元计算时, 做简化处理, 仅考虑如下主要反应:



根据热力学计算, 上述反应均为吸热反应。焙烧过程发生的其他反应(如钾、钠置换铷、铯反应)主要为放热反应<sup>[8]</sup>, 焙烧温度  $950 \sim 1\ 050\ ^\circ\text{C}$  时, 除碳酸钙和少量硫酸钙分解外, 不考虑其他硫酸盐的热分解。简化处理后, 计算得到的反应热(吸热)可能较真实反应热偏大。

回转窑表面温度非均匀分布, 由于 METCAL 软件暂时无法实现温度线性拟合功能, 此处假定回转

窑表面温度为均值进行简化计算。筒冷机实现热物料与空气的换热, 涉及复杂的对流传热, 此处将模型简化为理想物质混合充分换热, 通过设定固相和气相产物温度, 实现热量的分配。

## 2.4 模拟计算结果及分析

待输入完成后, 检查各计算单元约束条件是否完整, 确认无误后进行模拟计算, 得到计算结果。METCAL 的计算结果主要包括物料平衡和热量平衡两部分, 这里以回转窑单元、干燥窑单元和筒冷机整体的计算结果为例, 计算结果见表 2 ~ 表 5。

需要再次指出的是, 回转窑为典型的气固两相逆流换热反应器, 精准的数值模拟应当对预热段、高温段、冷却段三部分进行气固两相的热交换模拟及化学反应模拟。本模拟计算中受限于 METCAL 软件的功能, 仅对回转窑系统整体热平衡进行模拟。

将模拟计算结果与某同类项目现场运行数据进行比较, 结果见表 6。需要指出的是, 该同类项目工艺流程与本模拟案例设计流程基本相同, 但其锂云母精矿成分及混料配比与模拟案例稍有差异。

由表 6 可知, 模拟的天然气消耗量少于同类项目现场运行数据, 主要原因可能是在模拟中为简单起见, 未充分考虑收尘器、烟道等设备管道的热损失; 此外, 在模拟过程中, 筒冷机熟料高温冷却段热空气较多进入回转窑, 也降低了天然气的消耗量, 同时增加了回转窑窑尾烟气量, 进而增加了干燥窑出口烟气量, 这与模拟干燥窑出口烟气量大于同类项

表 2 回转窑单元物料平衡计算结果

投入及产出	物料	总量	成分及占比/%									
投入	窑头烟气	74 842. 878 Nm <sup>3</sup> /h	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>						
			3. 475	11. 489	12. 476	72. 561						
	生料	46 805. 24 kg/h	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
			16. 333	7	6. 333	3. 067	0. 148	31. 927	1. 6	12. 333	8. 267	0. 005
			TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	其他
0. 039	0. 171	0. 173	6. 007	0. 747	0. 693	0. 14	0. 447	3. 347	1. 223			
夹带水	683. 843 kg/h	H <sub>2</sub> O	100									
产出	熟料	45 947. 877 kg/h	Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>
			5. 397	8. 387	5. 324	7. 301	32. 523	0. 163	12. 563	8. 421	0. 005	0. 04
			CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaF <sub>2</sub>	F	其他
	1. 574	0. 249	10. 579	1. 549	0. 706	0. 143	0. 455	0	3. 375	1. 245		
	窑尾烟气	76 124. 788 Nm <sup>3</sup> /h	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	F			
3. 863	12. 413	12. 297	71. 339	0. 063	0. 001	0. 024						

表 3 回转窑单元热量平衡计算结果

投入及支出	热类型	物料	温度/℃	热量/MJ·h <sup>-1</sup>	占比/%	热量合计/MJ·h <sup>-1</sup>
收入	物理热	窑头烟气	1 100	119 965. 62	100	119 965. 62
		生料	25	0	0	
		夹带水	25	0	0	
支出	物理热	熟料	900	47 956. 24	39. 97	119 965. 62
		窑尾烟气	400	39 543. 12	32. 96	
	化学热	25	11 521. 29	9. 6		
	自然散热	220	20 944. 97	17. 46		

表 4 干燥窑单元热量平衡计算结果

投入及支出	热类型	物料	温度/℃	热量/MJ·h <sup>-1</sup>	占比/%	热量合计/MJ·h <sup>-1</sup>
收入	物理热	锂云母	25	0	0	37 348. 55
		夹带水	25	0	0	
		窑尾烟气	380	37 348. 55	100	
		漏风	25	0	0	
支出	物理热	锂云母	80	1419. 45	3. 8	37 348. 55
		夹带水	80	72. 59	0. 19	
	干燥窑排气	213	23 175. 89	62. 05		
	化学热	25	12 680. 62	33. 95		
自然散热			0	0		

表 5 篦冷机整体热量平衡计算结果

投入及支出	热类型	物料	温度/℃	热量/MJ·h <sup>-1</sup>	占比/%	热量合计/MJ·h <sup>-1</sup>
收入	物理热	高温熟料	900	47 956. 24	100	47 956. 24
		高温段冷空气	25	0	0	
		低温段冷空气	25	0	0	
支出	物理热	冷熟料	80	2 088. 37	4. 35	47 956. 24
		高温段热空气	500	29 914. 29	62. 38	
	低温段热空气	300	14 941. 19	31. 16		
	高温段自然散热	237	760. 73	1. 59		
	低温段自然散热	119	251. 66	0. 52		

表6 模拟计算结果与现场数据比较

序号	参数	模拟结果	现场运行数据
1	熟料量/ $t \cdot h^{-1}$	45.95	65.79
2	天然气消耗量/ $Nm^3 \cdot h^{-1}$	2 407.92	3 752.5
3	天然气消耗量/ $Nm^3 \cdot t^{-1}$	52.40	57.04
4	回转窑窑头烟气温度/ $^{\circ}C$	1 100	1 000 ~ 1 200
5	回转窑窑尾烟气流/ $Nm^3 \cdot h^{-1}$	76 124.79	未检测
6	回转窑窑尾烟气温度/ $^{\circ}C$	400	372
7	干燥窑出口烟气流/ $Nm^3 \cdot h^{-1}$	90 196.15	83 862
8	干燥窑出口烟气温度/ $^{\circ}C$	213	165
9	干燥窑出口烟气氧含量/%	12.06	13.28
10	余热锅炉蒸汽量/ $t \cdot h^{-1}$	3.4	2.8
11	余热锅炉空气量/ $Nm^3 \cdot h^{-1}$	40 741	82 506

目现场运行数据的结果一致。在现场运行数据中,篦冷机熟料低温段烟气流远大于模拟案例,但烟气温度降低,尾气带走热量增加,导致蒸汽产量反而变少。模拟计算结果与现场数据基本吻合,其差异可以合理解释,验证了模拟计算结果的正确性。

## 2.5 能耗分析

根据 METCAL 热量平衡计算结果,对整个焙烧过程的能耗进行分析,结果见表7。

从表7可知,整个焙烧系统的热量基本由天然气燃烧输入。热量输出上,余热锅炉蒸汽回收的热量仅为9.2%。回转窑热量损失占比最大,其次为

表7 能耗分析

热量输入	总热量/ $(MJ \cdot h^{-1})$	热量输出	总热量/ $(MJ \cdot h^{-1})$	占比/%
天然气燃烧热	91 373.00	余热锅炉蒸汽潜热	8 392.30	9.2
		干燥窑排烟气热量	23 175.89	25.4
		余热锅炉排烟气热量	6 714.18	7.3
		焙烧反应热	11 521.29	12.6
		回转窑热量损失	20 944.97	22.9
		湿精矿干燥汽化潜热	12 680.62	13.9
		其他热损失	7 943.75	8.7
总计	91 373.00	总计	91 373.00	100.0

干燥窑排气热量,两者热量合计达到了总热量的48.3%,节能设计时应予以重点关注。焙烧反应为吸热反应,吸收热量占总热量的12.6%。其他热损失主要为冷熟料带走热量和系统散热。

## 3 节能设计

### 3.1 加强设备的保温绝热

回转窑窑内温度高,窑体散热面积大,回转窑内热量以热辐射和对流的方式大量损耗。模拟案例计算结果也显示,回转窑热量损失非常大,是节能设计的重中之重。在模拟案例和同类现场实际案例中,其回转窑内衬均采用耐火砖砌筑,回转窑外表面温度高达 $220^{\circ}C$ 以上,热损耗极大。目前,新型的耐火浇筑料和隔热层已得到越来越广泛的运用,可将回转窑外表面温度降低到 $180^{\circ}C$ 以下,极大降低焙烧过程的能耗<sup>[9]</sup>。采用高荷软磷酸盐砖和浇注料组合形式对本案例重新模拟计算,可将回转窑表面温度降低到 $180^{\circ}C$ ,回转窑热量损失降低到15 562.47 MJ/h,热损降低25.7%,天然气消耗量至少减少8.7%。

此外,各种除尘器和烟道等设备和管道的散热也不容忽视。在对比的实际运行案例中,其天然气消耗量远大于模拟计算结果,这也说明加强各种除尘器和烟道等设备和管道保温绝热的重要性。

### 3.2 熟料的余热利用

模拟案例中回转窑排出的 $900^{\circ}C$ 熟料所携带热

量高达47 956.24 MJ/h,占天然气燃烧输入热量的52.4%。传统的回转窑设备后接冷却窑对焙烧熟料进行冷却,这部分热量直接损失,此外,还会消耗大量水,目前这种工艺已经基本被淘汰。

目前,主要有三种方式回收高温熟料中的热量,分别为固体余热锅炉、冷渣机和篦冷机。其中,固体余热锅炉和冷渣机可直接对熟料中的热量回收利用,产生蒸汽;篦冷机则以空气为中间介质对熟料进行冷却,使冷空气变为热空气,再以热空气直接回用和余热锅炉的形式对热量进行利用。显然,采用固体余热锅炉或冷渣机,热量回收效率更高,但是在实际使用中,高温熟料可能会对固体余热锅炉或冷渣机中的换热元件造成磨损损坏,熟料的板结更是可能造成设备堵塞。由于这些问题的存在,在锂云母熟料焙烧领域,固体余热锅炉或冷渣机仍少见使用。篦冷机被广泛运用在锂云母焙烧过程中,回转窑窑头高温熟料( $900^{\circ}C$ )经篦冷机冷却后得到冷熟料( $80^{\circ}C$ ),熟料高温冷却段所产生的热空气返回到回转窑中,熟料低温冷却段产生的热空气进余热锅炉生产低压蒸汽。回转窑窑头烟气总热量为119 965.62 MJ/h,其中篦冷机热空气所提供的热量28 592.62 MJ/h,占比23.83%;外加余热锅炉回收的热量8 392.30 MJ/h,篦冷机回收热量占熟料总热量的77.1%,节能效果显著。

需要注意的是,由于余热锅炉换热温差要求,其排气温度一般仍然有 $150^{\circ}C$ ,直接排掉会造成热量

损失。因此,余热锅炉排气经处理后可以部分用作天然气燃烧的助燃空气或用于产生热水,以达到进一步节能的目的。

### 3.3 窑尾烟气的余热利用

模拟案例中回转窑窑尾烟气温度达到 400 °C,其所携带热量为 39 543.12 MJ/h,占到天然气燃烧输入热量的 33.0%,加强这部分烟气的余热利用对于系统节能也至关重要。在工程实践中,一般采用回转窑窑尾烟气干燥锂云母湿精矿,其热量基本能满足锂云母湿精矿干燥需求,余热得到合理利用。降低回转窑窑尾烟气的温度,可以降低干燥窑排气温度,减少干燥窑排气热量,但也存在两个弊端:一是进干燥窑的烟气温度低,会影响干燥效果;二是干燥窑排出烟气温度低于烟气露点时,设备的腐蚀会加剧,案例中采用 Okkes 公式计算干燥窑排出烟气露点温度为 145.64 °C<sup>[10]</sup>,出于一定的安全量考虑,干燥窑排出烟气温度不宜低于 180 °C。

减少回转窑窑尾烟气量同样有利于系统的节能,在不能提高回转窑窑头烟气温度的前提下,应尽量减少回转窑窑尾到干燥窑排气之间空气的漏入,以防止热损失。

## 4 结论

以某年产 1 万 t 电池级碳酸锂的锂云母提锂工程设计为案例,采用 METCAL 软件对锂云母硫酸盐法回转窑焙烧过程进行物料平衡和热量平衡计算,得到天然气耗量为 52.40 Nm<sup>3</sup>/t 熟料,利用篦冷机回收熟料余热可产蒸汽 3.4 t/h,将模拟计算结果与

某同类项目现场运行数据进行比较,结果显示两者基本吻合,验证了模拟计算结果的正确性。焙烧系统热量损失主要为干燥窑排气热量损失和回转窑散热损失,节能设计时应予以重点关注。在节能设计中,加强设备保温绝热、熟料余热利用和窑尾烟气余热利用非常重要。

### [参考文献]

- [1] KESLER S E, GRUBER P W, MEDINA P A, et al. Global lithium resources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48: 55–69.
- [2] 张秀峰,谭秀民,刘维燥,等. 矿石提锂技术现状与研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(5): 17–23.
- [3] 何飞,高利坤,饶兵,等. 从锂云母中提锂及综合利用的研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2022(5): 82–89.
- [4] 舒启溢,胡炜华,邱祖民. 用硫酸盐法从锂云母中浸取锂[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2011, 33(4): 325–327.
- [5] 郭春平,周健,文小强,等. 锂云母硫酸盐法提锂研究[J]. *无机盐工业*, 2014, 46(3): 41–44.
- [6] 康敏,赵笑益,曹欢,等. 锂云母矿硫酸盐焙烧-水浸提锂工艺及机理[J]. *矿产综合利用*, 2023(6): 146–153.
- [7] 汪剑岭,王继民,朱建春,等. 硫酸盐法从锂云母制取碳酸锂的研究[J]. *新疆有色金属*, 1996(1): 85–89.
- [8] 雷祖伟,钟宏,王帅,等. 含铷、铯锂云母矿的复合盐焙烧-浸出性能及机理[J]. *矿产综合利用*, 2019(3): 152–156.
- [9] 刘世贵,赵淑彩,郝进秀. 新型干法回转窑耐火材料选用[J]. *中国水泥*, 2021, (11): 111–112, 119.
- [10] 李鹏飞,佟会玲. 烟气酸露点计算方法比较和分析[J]. *锅炉技术*, 2009, 40(6): 5–8, 20.

## Simulation and Energy-saving Design of Lepidolite Roasting Process

YANG Xiaowu, YUAN Aiwu, LI Weida, CHEN Yuping, TANG Luo  
(CINF Engineering Co., Ltd., Changsha 410019, China)

**Abstract:** Taking the design of lithium extraction project from lepidolite with an annual output of 10 000 tons of battery-grade lithium carbonate as an example, the material balance and heat balance of the roasting process of lepidolite sulfate rotary kiln were calculated by METCAL software, and the main energy consumption was analyzed. The simulation results were compared with the actual operation data of a similar project. The results show that the simulation results are basically consistent with the actual data. The heat loss of the roasting system is mainly the exhaust heat loss of the drying kiln and the heat loss of the rotary kiln, which account for 48.3% of the total heat and should be paid attention to. In the energy-saving design, equipment insulation, clinker waste heat utilization and kiln tail gas waste heat utilization should be strengthened to reduce the energy consumption and cost of production.

**Key words:** lepidolite; sulfate roasting; METCAL; rotary kiln; grate cooler; energy-saving