

引用格式:胡长松,张卫华,李贺,等. 钒钛磁铁矿带式焙烧机球团质量提升工艺研究及实践[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(2): 79-87.

HU Changsong, ZHANG Weihua, LI He, et al. Research and practice on quality improvement of vanadium-titanium magnetite pellet by travel grate process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(2): 79-87.

钒钛磁铁矿带式焙烧机球团质量提升工艺研究及实践

胡长松^{1,2}, 张卫华^{1,2}, 李贺^{1,2}, 韦伟^{1,2}

(1. 北京首钢国际工程技术有限公司, 北京 100043;

2. 北京市冶金三维仿真设计工程技术研究中心, 北京 100043)

[摘要] 攀钢西昌带式焙烧机生产线是国内第一条钒钛磁铁矿带式焙烧机球团生产线,投产后成品球平均抗压强度偏低,单个成品球团平均抗压强度 $\geq 1\ 950\text{ N}$ 。本文从原料结构、造球工序、带式焙烧机工艺操作等方面分析原因,采取的优化措施包括:控制原料中 TiO_2 质量分数 $\leq 12\%$ 、 V_2O_5 质量分数 $\leq 1\%$ 、 Al_2O_3 质量分数 $< 2.0\%$ 、 MgO 质量分数 $< 1.8\%$ 、精矿粒度 -200 目占比 $75\% \sim 80\%$ 、碱度应控制 0.6 倍左右,膨润土配比应适当降低至 $1.2\% \sim 1.4\%$ 、生球粒度 $10 \sim 12.5\text{ mm}$ 占比 $\geq 60\%$;重力除尘灰配比 $> 1.5\%$,或者烧结机头除尘灰配比 $> 1.5\%$;焙烧机工艺操作制度为鼓干段温度 $300 \sim 330\text{ }^\circ\text{C}$ 、抽干段温度 $370 \sim 390\text{ }^\circ\text{C}$ 、预热温度梯度 $500\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$ 、焙烧段温度 $1\ 230 \sim 1\ 240\text{ }^\circ\text{C}$ 、大烟罩内氧质量分数 $17.3\% \sim 18.0\%$ 。工艺优化后,单个球团平均抗压强度约 $2\ 348\text{ N}$,达到了考核指标;排放烟气中烟尘含量 2.54 mg/Nm^3 、 SO_2 含量 3.13 mg/Nm^3 、 NO_x 含量 41.42 mg/Nm^3 、基准氧含量 17.54% ,均满足国家排放标准。

[关键词] 钒钛磁铁矿; 球团; 带式焙烧机; 抗压强度; 原料; 配料; 操作制度

[中图分类号] TF046

[文献标志码] A

[文章编号] 1672-6103(2024)02-0079-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.02.010

0 引言

球团矿具有强度高、粒度均匀、含铁品位高、还原性好等特点,在高炉冶炼中可起到增产、节焦、改善炼铁技术经济指标和降低生铁成本的作用^[1]。钒钛磁铁矿焙烧对温度和时间不敏感,可控温度带窄,被业内公认为“呆矿”。目前,钒钛磁铁矿造块主要有烧结工艺和链-回-环工艺,但二者都存在诸多缺点。烧结工艺缺点:①工序能耗高;②污染大,环境治理成本高;③烟气中含有二噁英等有害物质,难以处理;④需要配加固体燃料,品位低。链-回-环工艺缺点:①链-回-环工艺主机为三台设备,运行成本、维护成本、人工成本、能耗成本、备品备件成

本等较高;②设备跨度大,风系统管道距离长,系统热量损失大,烟气显热利用率低;③回转窑结圈问题处理困难,设备作业率低;④原料适应性差,成品单一,只适用于生产酸性球团矿,生产自熔性、镁质、碱性、含钛球团矿效果不佳^[2]。

带式焙烧机将球团干燥、预热、焙烧、冷却过程集成在一台设备上完成,具有热效率高、可靠耐用性强、原料适应性强、废气粉尘少、成品率高,保温效果好、使用寿命长、热耗低、作业率高等诸多优点^[3-4]。

攀西球团生产线,采用带式焙烧机工艺,产能 300 万 t/a ,有效面积 432 m^2 ,有效长度 108 m ,台车宽度 4.0 m 、长度 1.5 m 、栏板高度 450 mm ,正常运行机速 2.35 m/min 。生产指标:月作业率 98.13% ,产量 $\geq 9\ 100\text{ t/d}$,成品球中 FeO 质量分数 $0.6\% \sim 1.5\%$ 、单个球团平均抗压强度 $\geq 1\ 950\text{ N}$,碱度为自然碱度。排放指标:排放烟气中烟尘含量 2.53 mg/Nm^3 、

[收稿日期] 2023-09-10 [修订日期] 2023-10-20

[录用日期] 2023-10-23 [出版日期] 2024-04-01

[第一作者] 胡长松(1983—),男,硕士,河南商丘人,高级工程师,主要从事烧结、球团工程设计工作。

SO₂含量 3.15 mg/Nm³、NO_x含量 42.42 mg/Nm³、基准氧含量 17.34%，均满足排放标准^[5]。成品球团矿抗压强度相对国内其他磁铁矿带式焙烧机球团生产线偏低。

本文从钒钛磁铁矿化学成分、物理性能、原料结构、造球工序、带式焙烧机工艺操作等方面分析原因，给出合理的解决方案、方法和措施，球团工艺优

化以后，单个球团平均抗压强度≥2 200 N。

1 原料特点

攀西球团生产线主要原料为太和精粉和白马精粉，为研究各种化学成分对成品球团矿抗压强度的影响，特选用普通磁铁矿作为基料进行对比，化学成分分析见表1，粒度组成见表2。

表1 钒钛磁铁和普矿精粉主要化学成分含量(干基,质量分数)

Table 1 The content of main chemical composition of V-Ti magnet and common concentrate (dry basis, mass fraction)

物料	TFe	FeO	TiO ₂	V ₂ O ₅	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	LOI(烧损)	P	S
太和精粉	55.56	33.06	11.47	0.643	4.03	1.16	2.79	3.35	1.07	0.02	0.41
白马精粉	56.39	32.12	10.40	0.710	3.86	1.35	2.88	3.67	1.24	0.01	0.40
平均	55.975	32.59	10.935	0.677	3.945	1.255	2.835	3.51	1.155	0.015	0.405
普矿精粉	68.00	18.00	—	—	2.00	0.30	1.30	0.50	-1.00	0.10	0.10

表2 钒钛磁铁精粉粒度组成(干基)

Table 2 Particle size composition of V-Ti magnet powder(dry basis)

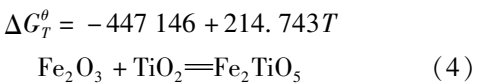
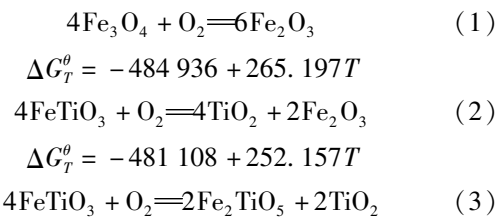
物料	粒度组成(质量分数)/%				比表面积/(cm ² ·g ⁻¹)
	+0.150 mm	0.150~0.074 mm	0.074~0.045 mm	-0.045 mm	
太和精粉	2.48	11.91	33.23	52.38	1 654
白马精粉	1.17	8.95	30.49	59.39	1 761
平均	1.83	10.43	31.86	55.89	1 707.50

从表1可以看出,原料中TiO₂、Al₂O₃、MgO和S质量分数较高,分别为10.935%、3.51%、2.835%、0.405%,均不利于球团矿的焙烧,致使球团矿氧化的时间较长。从表2看出,原料粒度较细、比表面积较高,很容易造成球团矿分层,外部氧化速度快,形成硬壳,导致内部氧化困难。

2 球团矿抗压强度影响因素分析

2.1 TiO₂和V₂O₅质量分数对球团氧化焙烧的影响

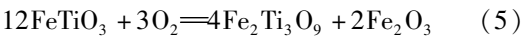
Ti在钒钛磁铁矿中存在的形式主要为钛磁铁矿FeTiO₃。FeTiO₃和Fe₃O₄在带式焙烧机氧化过程中发生的反应见式(1)~(4)。



$$\Delta G_T^\theta = 16\,981 - 18.707T$$

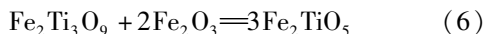
反应(1)~(3)在温度小于1 350℃时可自发进行,反应式(4)在温度>643℃时具备热力学条件,但还要考虑反应的动力学因素。通过热力学研究发现,钒钛磁铁矿开始氧化的温度为500℃,850℃时达到氧化峰值,940℃时氧化结束^[6]。

此外,随着系统温度升高,氧分压逐渐升高,有少量的Fe₂Ti₃O₉作为平行反应的产物出现,但是Fe₂Ti₃O₉是一种只存在于相对低温氧化过程中的中间产物。Fe₂Ti₃O₉对O₂起到重要的传输作用,可帮助O₂接近反应层并穿过反应层,在FeTiO₃→TiO₂+Fe₂O₃界面处发生的反应见(5)。

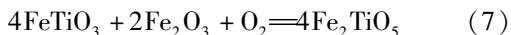


温度达到940℃时,TiO₂、Fe₂O₃和Fe₂Ti₃O₉的晶格发生解体,经过反应式(4)、(6)、(7)形成一种新

的钛酸铁晶相。随着温度的升高, 钛酸铁生成量增加, 成为稳定相, 阻止了 Fe_2O_3 的连晶, 致使球团矿抗压强度降低。因此, 钒钛磁铁矿的预热氧化温度不宜超过 $940\text{ }^\circ\text{C}$, $500\sim 940\text{ }^\circ\text{C}$ 为最佳预热温度段。



$$\Delta G_T^\theta = -309\,888 + 132.997T$$



$$\Delta G_T^\theta = -413\,184 + 177.997T$$

为进一步研究 TiO_2 、 V_2O_5 质量分数对成品球抗压强度的影响, 采用普矿精粉作为基料, 分别配加 TiO_2 试剂和 V_2O_5 试剂, 观察成品球抗压强度的变化趋势, 见图 1 和图 2。

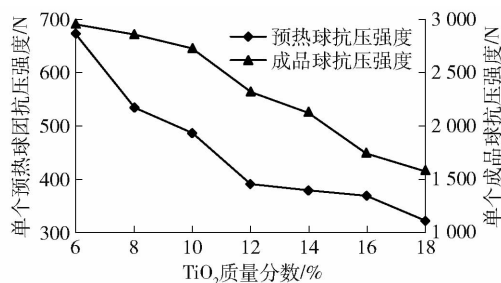


图 1 TiO_2 质量分数对成品球抗压强度的影响

Fig. 1 The effect of TiO_2 content on the compressive strength of the finished pellets

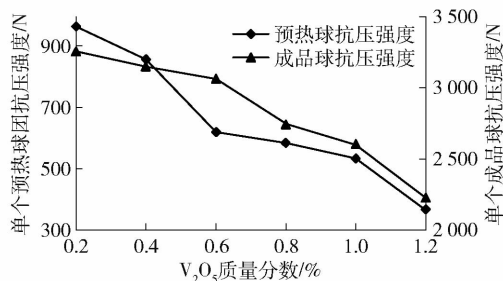


图 2 V_2O_5 质量分数对成品球抗压强度的影响

Fig. 2 The effect of mass fraction of V_2O_5 on compressive strength of finished pellets

图 1、图 2 表明, 随着 TiO_2 、 V_2O_5 质量分数的增加, 普矿精粉成品球团矿抗压强度成降低趋势, 原因是 Ti、V 等物质生成了高熔点矿物, 阻碍了晶粒间的连晶作用, 球团矿致密不利于磁铁矿晶粒的氧化^[7]。因此, 钒钛磁铁矿球团中 TiO_2 和 V_2O_5 的质量分数不宜过高^[8], 研究表明 TiO_2 质量分数 $\leq 12\%$ 、 V_2O_5 质量分数 $\leq 1\%$ 时, 单个成品球团矿抗压强度

均大于 $2\,000\text{ N}$ 。

2.2 Al_2O_3 质量分数对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响

为进一步研究 Al_2O_3 质量分数对成品球抗压强度的影响, 采用普矿精粉作为基料, 配加 Al_2O_3 试剂, 观察成品球抗压强度的变化趋势, 见图 3。

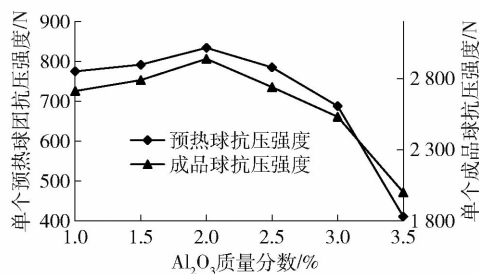


图 3 Al_2O_3 质量分数对成品球抗压强度的影响

Fig. 3 The effect of Al_2O_3 content on compressive strength of finished pellets

Al_2O_3 在钒钛磁铁矿中存在的形式为 $\text{AlO}\cdot\text{OH}-\text{FeO}\cdot\text{OH}$ 的固溶体, 图 3 表明, 当普矿精粉中 Al_2O_3 质量分数 $\leq 2.0\%$ 时, 球团氧化焙烧过程中, Al_2O_3 能促进铁酸钙的生成, 成品球抗压强度呈小幅上升趋势。当 Al_2O_3 质量分数 $> 2.0\%$ 时, Al_2O_3 和 Fe_2O_3 以结晶相固溶体存在, 导致 Fe_2O_3 单位晶胞的参数明显降低, 阻止了 Fe_2O_3 的生成, 成品球抗压强度下降; 当 Al_2O_3 质量分数 $> 3.5\%$ 时, 球团中开始出现玻璃质, 随着 Al_2O_3 质量分数的增加, 玻璃质增多, 球团矿脆性增大, 抗压强度大幅降低^[9]。

2.3 MgO 质量分数对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响

杨福^[10] 研究 MgO 质量分数对球团抗压强度的影响, 由 $\text{MgO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ 相图 (图 4) 可看出, 在焙烧温度和球团成分范围内, 可确定含镁熔剂性球团在相图中的“铁酸镁 + 氧化铁”区域, 此区域 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 可彼此代替, 分布均匀^[11]。

为进一步研究 MgO 质量分数对成品球抗压强度的影响, 采用普矿精粉作为基料, 配加 MgO 试剂, 观察成品球抗压强度的变化趋势, 见图 5。

图 5 表明, 普矿精粉中随着 MgO 质量分数的增加, 成品球抗压强度呈下降趋势。当 MgO 质量分数 $\leq 1.8\%$ 时, 球团矿焙烧起主导作用的是 Fe_3O_4 , Fe_3O_4 氧化再结晶晶粒互连成整体, 分布均匀, 连接紧密并镶嵌铁酸镁晶粒, 结构力较强, 形成互连晶,

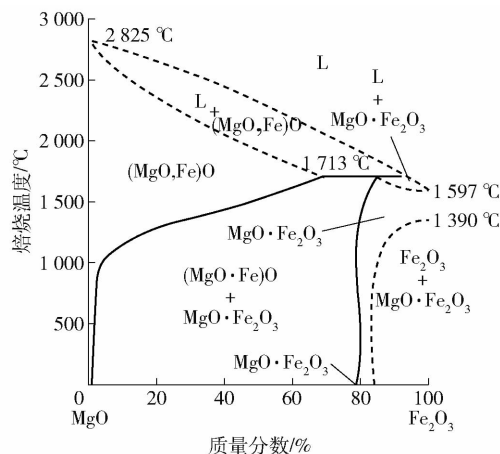
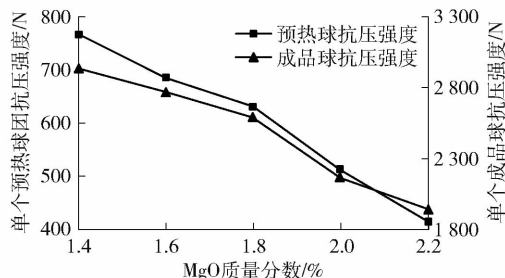
图4 MgO-Fe₂O₃相图Fig. 4 MgO-Fe₂O₃ phase diagram

图5 MgO 质量分数对成品球抗压强度的影响

Fig. 5 The effect of MgO mass fraction on compressive strength of finished pellets

故球团矿抗压强度较好,单个球团矿平均抗压强度 ≥ 2500 N。当MgO质量分数 $>1.8\%$ 时,球团矿焙烧起主导作用的是MgO,由于 Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 的半径相近,在氧化过程中 Mg^{2+} 进入磁铁矿晶格中并占据了铁离子扩散产生的空位,稳定了磁铁矿晶格,阻碍 Fe_3O_4 的氧化,致使球团内部 Fe_2O_3 微晶连接减弱,从而导致球团强度降低,单个球团矿平均抗压强度 <2200 N,且随着MgO质量分数的增加,球团矿抗压强度呈下降趋势。

2.4 精矿粒度和比表面积对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响

攀西球团生产线采用的钒钛磁铁矿粒度较细, -200 目($74\mu m$)以下占 87.75% ,辊压前比表面积为 $1707.50\text{ cm}^2/\text{g}$,辊压后比表面积为 $2150\sim 2400\text{ cm}^2/\text{g}$ 。由于某种原因,现场生产一直采用辊压后原料。辊压后原料粒度细,比表面积高,致使球团在氧化焙烧过程中,表面氧化速度快,形成氧化

外壳,内部氧化受限,形成未氧化的磁铁矿核。氧化反应发生在氧化外壳和未氧化磁铁矿核之间,并沿着球心方向向内部推进,且速度缓慢。一旦氧化时间不充分, Fe_3O_4 氧化不完全,存在未氧化的磁铁矿核, Fe_2O_3 再结晶差,初晶多、单独颗粒多、互连差,成品球团矿抗压强度较低。焙烧后成品球团矿显微镜结果见图6,现场焙烧后成品球团矿照片见图7。

图6电镜图片显示,焙烧后成品球团矿呈分层结构,外层含钛赤铁矿、铁板钛矿、高硅高镁脉石相,有少量硅酸盐液相;中心部位较多含钛磁铁矿相,其次是硅酸盐液相。

图7照片显示,成品球呈分层结构,外层氧化效果较好,结构致密,内部氧化效果较差,且出现了液相,液相冷却时收缩,产生了裂纹,致使球团矿抗压强度较低,单个球团平均抗压强度 <2000 N。

2.5 膨润土比对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响

攀西球团生产线造球工序采用的膨润土为周边外购膨润土,其物理、化学特性分别见表3、表4。

目前球团生产造球工序膨润土配比 1.7% ,单个生球落下次数平均 8.4 次,平均抗压强度 95 N,爆裂温度 >500 °C。

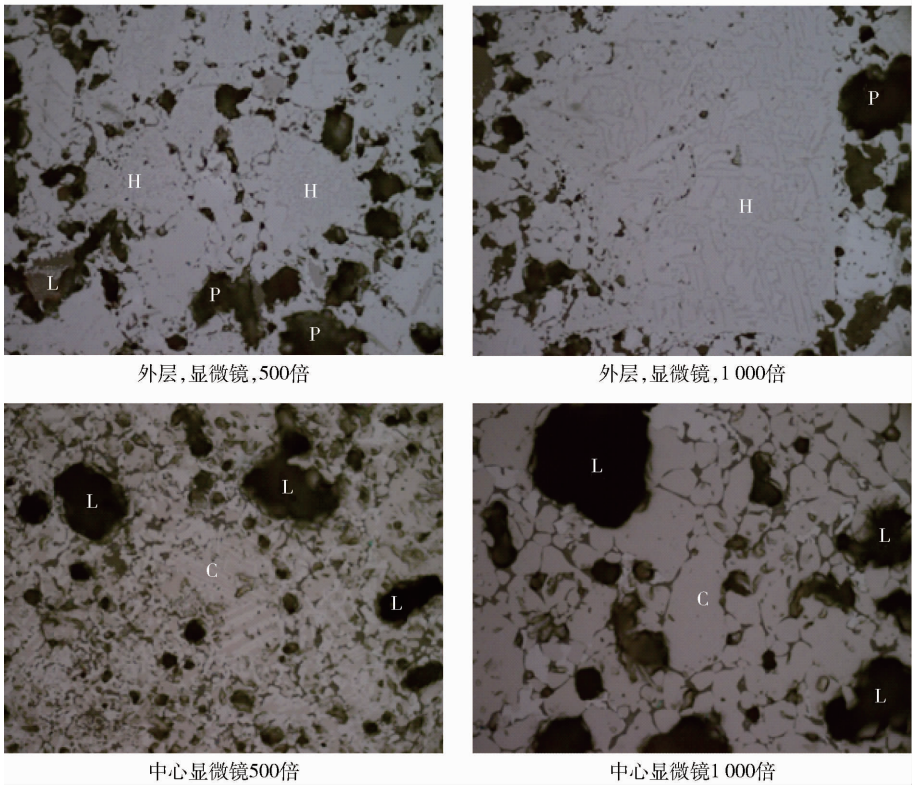
为进一步研究膨润土比对球团性能指标的影响,采用普矿精粉作为基料,配加不同比例膨润土,观察成品球抗压强度的变化趋势,见图8。

图8表明,普矿精粉中随着膨润土配比的增加,生球抗压强度和成品球抗压强度均呈下降趋势,生球落下强度呈上升趋势。当膨润土配比为 $1.2\%\sim 1.4\%$ 时,单个生球落下次数平均 ≥ 5.0 次,平均抗压强度 ≥ 150 N,单个成品球抗压强度 ≥ 2200 N。因此,生产现场原料中膨润土配比应控制在 $1.2\sim 1.4\%$,以满足带式焙烧机焙烧工序对生球的要求,提高成品球抗压强度。

2.6 碱度对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响

攀西球团生产线生产球团的矿二元碱度为 0.09 倍,较普通磁铁矿二元碱度 $0.15\sim 0.30$ 倍偏低。美卓奥图泰新材料技术有限公司(以下简称“美卓奥图泰”)在工程设计前对所采用钒钛磁铁矿进行了球团焙烧试验,见图9。

图9数据表明,成品球团矿抗压强度随着碱度的增加先提高后降低,在碱度 $R=0.6$ 倍时达到峰值,单个球团平均抗压强度为 2200 N。



H - 赤铁矿; P - 脉石; L - 液相渣; C - 赤铁矿; P - 脉石

图 6 成品球团矿电镜分析

Fig. 6 Electron microscopic analysis of the finished pellets



图 7 成品球团矿实物照片

Fig. 7 The Photo of the finished pellet

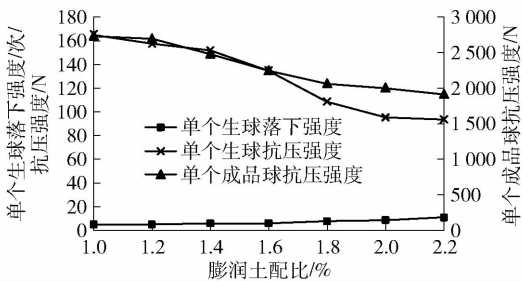


图 8 膨润土配比对球团性能指标的影响

Fig. 8 The effect of bentonite ratio on pelletizing performance

表 3 膨润土物理性能

Table 3 The properties of bentonite physical

性能参数	-200 目以下/%	吸蓝量/(g·(100 g) ⁻¹)	吸水率/%	膨胀容/(mL·g ⁻¹)	蒙脱石质量分数/%	胶质价/(mL·(15 g) ⁻¹)
数值	98.27	28	300	10	74.58	99

2.7 球团粒度分布对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响

美卓奥图泰试验结果表明,球团粒度10 ~ 12.5 mm

占比 62.13% 时,单个成品球平均抗压强度高达 2 163 N,而实际生产中,由于投产初期生产经验不足、造球机操作水平低等原因,所生产球团粒度

表 4 膨润土化学性能

Table 4 The properties of bentonite chemistry

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O	烧损
含量	62.26	15.16	1.06	2.48	9.75	8.46

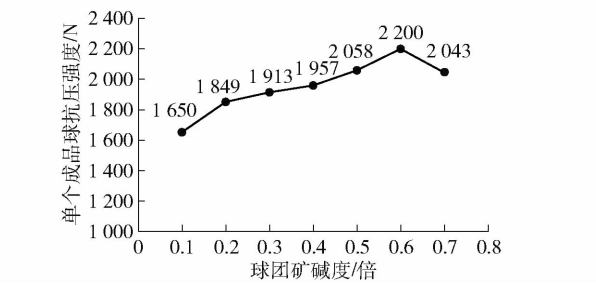


图 9 成品球团矿抗压强度随碱度的变化

Fig. 9 The compressive strength of finished pellet varies with alkalinity

12.5 ~ 16 mm 占比 60.45%, 单个成品球平均抗压强度只有 1 950 N, 见图 10。分析原因主要有以下两方面。

1) 球团粒度均匀性直接影响其在带式焙烧机台车上布料的透气性, 透气性好, 带式焙烧机系统气流顺畅, 温度分布均匀, 成品球抗压强度高。

2) 在带式焙烧机机速固定, 焙烧时间稳定的情况下, 球团粒度大小直接影响其焙烧质量。球团粒度偏大, 造成预热段氧化不完全, 球心形成磁铁矿核, 焙烧段 Fe_2O_3 再结晶差, 初晶多、单独颗粒多、互连差, 抗压强度较低; 球团粒度偏小, 造成焙烧段过烧, 球心出现玻璃质, 脆性增大, 抗压强度较低。

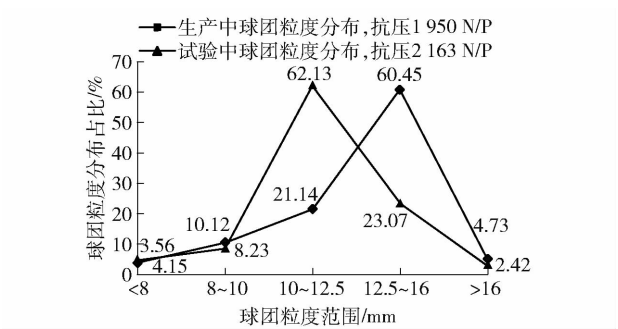


图 10 球团粒度分布与抗压强度的关系

Fig. 10 The relationship between pellet size distribution and compressive strength

2.8 高炉重力除尘灰配比对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响

攀西球团生产线采用厂内高炉生产产生的重力除尘灰作为配料, 研究其对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响。高炉重力除尘灰的化学成分见表 5。

表 5 高炉重力除尘灰的化学成分(干基, 质量分数)

Table 5 Chemical composition of blast furnace gravity dust (dry base, mass fraction)

成分	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	C
含量	27.85	6.12	2.14	4.12	6.23	0.45	3.78	3.24	21.54

表 5 表明, 高炉重力除尘灰中含 C 量为 21.54%, 配入球团后在焙烧过程中会产生大量气体溢出, 可提高球团矿本身的透气性, 增强预热氧化效果, 见图 11。

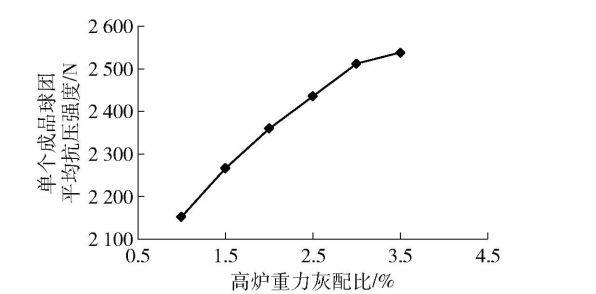


图 11 高炉重力灰配比对球团质量的影响

Fig. 11 Effect of gravity ash ratio on pellet quality

图 11 表明, 随着高炉重力灰配比的增加, 球团矿抗压强度逐渐提高, 但增幅逐渐减小, 当配比为 1.5% 时, 球团矿单个平均抗压强度达 2 270 N; 当配比为 3.5% 时, 球团矿单个平均抗压强度达 2 530 N。分析原因: 高炉重力灰增加, 球团焙烧过程中大量气体溢出, 透气性增加, 有利于球团内部预热氧化左右, 但是高炉重力灰品位较低, 配比增加过程中, 球团矿品位逐渐降低, Fe_2O_3 含量减少, 连晶固结作用逐渐减弱, 因此球团矿抗压强度增幅逐渐减小。

2.9 烧结机头除尘灰配比对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响

攀西球团生产线采用厂内烧结生产产生的机头除尘灰作为配料, 研究其对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响。烧结机头除尘灰的化学成分见表 6。

表 6 烧结机头除尘灰的化学成分(干基,质量分数)

固废名称	TFe	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	S
一电场尘灰	43.85	9.12	4.51	4.12	4.35	7.89	0.68	1.31
二电场尘灰	25.24	6.83	4.26	3.98	4.01	5.64	0.54	1.32
三电场尘灰	13.46	6.44	4.11	4.02	4.14	4.78	0.48	1.28
平均值	27.52	7.46	4.29	4.04	4.17	6.10	0.57	1.30

表 6 表明,烧结机头除尘灰成分复杂,TFe 品位低,S 含量高,对钒钛磁铁矿烧结产生不利影响,造成烧结矿质量差。但烧结机头除尘灰 CaO 含量较高,根据美卓奥图泰做的碱度对钒钛磁铁矿氧化焙烧的影响研究,球团原料配加烧结机头除尘灰理论对球团矿氧化焙烧是有利的,见图 12。

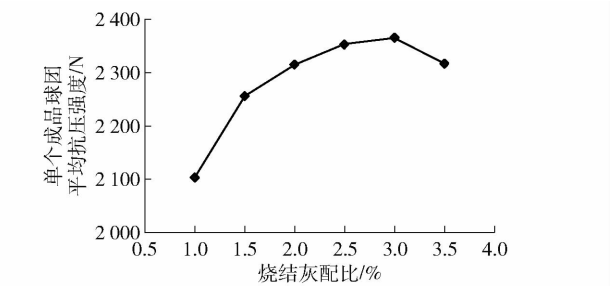


图 12 烧结机头除尘灰对球团质量的影响
Fig. 12 Effect of dust removal from sinter head on pellet quality

图 12 表明,随着烧结机头灰配比的增加,球团矿质量先提高后降低,当配比大于 1.5% 时,单个成品球团矿平均抗压强度达 2 250 N,此时球团碱度为 0.24 倍;当机头灰配比达到 3.0% 时,单个成品球团矿平均抗压强度达到峰值 > 2 350 N,此时碱度为 0.62 倍。

2. 10 带式焙烧机工艺制度对钒钛磁铁矿球团氧化焙烧的影响

国内诸多专家和学者研究发现,钒钛磁铁矿球团在焙烧过程中,对预热温度梯度、预热时间、焙烧温度、焙烧时间要求严格,可控温度带较窄,操作困难,被公认为“呆矿”。该攀西球团生产线是国内第一条钒钛矿球团带式焙烧机生产线,没有经验可循,只能依靠现场生产团队摸索验证。现场技术人员和生产团队对带式焙烧机七大工艺段的生产参数分步研究、调整、验证,总结得出较为合理的带式焙烧机工艺操作参数,见图 13。

1)控制鼓干段温度①在 300 ~ 330 ℃ 之间,抽干段温度②在 370 ~ 390 ℃ 之间,使生球干燥尽快完成,在抽干段中部结束,球团预热氧化提前开始,延长预热段。

2)预热温度③梯度 500 ℃ → 1 200 ℃,过渡到焙烧段,尽量延长 850 ~ 940 ℃ 长度,使得球团内部氧化完全,FeO 质量分数 ≤ 1.5%。

3)焙烧段温度④控制在 1 230 ~ 1 240 ℃ 之间,保证 Fe₂O₃ 再结晶温度和时间,强化焙烧效果。

4)时刻关注⑤大烟罩内系统氧质量分数,一般控制在 17.3% ~ 18.0% 之间,即满足了烟气排放氧质量分数 ≤ 18.0% 的要求,又保证了球团中 Fe₃O₄ 氧化所需要的氧气氛围。

目前,带式焙烧机此种操作参数经过一段时间的验证,为所有尝试过的操作参数中最优的,保证了带式焙烧机成品球团矿产量 ≥ 9 100 t/d,单个成品球团抗压强度 ≥ 2 200 N,FeO 质量分数 0.6% ~ 1.5%。若要进一步改善成品球团矿性能,提高成品球团矿抗压强度值,以满足更大规模高炉使用要求,还需要进一步从原料结构、造球工序、带式焙烧机操作工艺制度等方面优化。

3 工艺调整后生产实践

根据以上研究结果,从原料结构、造球工序、带式焙烧机操作工艺制度等方面对攀西球团生产线进行工艺调整。调整后生产实践:运行机速 2.61 m/min,月作业率 97.26%,产量约 10 000 t/d (超产约 10%),成品球中 FeO 质量分数 0.6% ~ 1.3%、单个球团平均抗压强度约 2 348 N (> 考核指标 2 200 N),碱度 0.2 ~ 0.3 倍;排放指标:排放烟气中烟尘含量 2.54 mg/Nm³、SO₂ 含量 3.13 mg/Nm³、NO_x 含量 41.42 mg/Nm³、基准氧含量 17.54%,均满足排放标准。

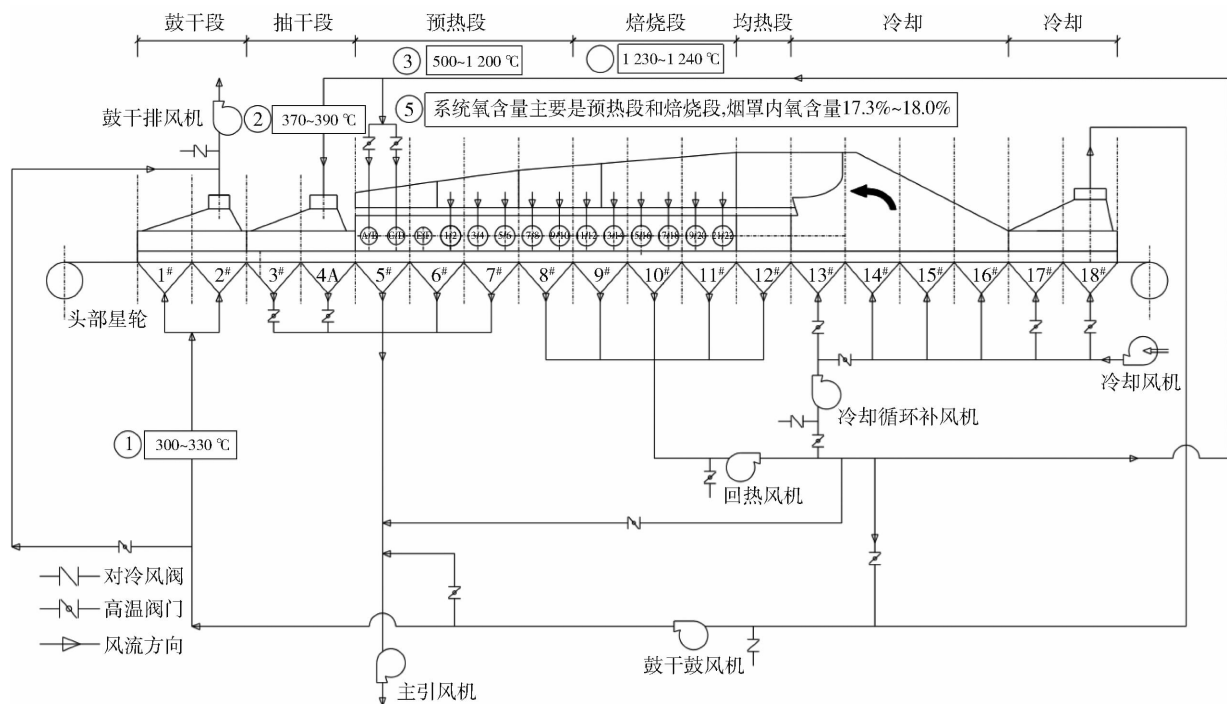


图 13 带式焙烧机工艺流程图

Fig. 13 Technological operation flow chart of Straight-Grate

4 结论

针对攀西球团生产线带式焙烧机单个成品球团平均抗压强度偏低的问题,本文从钒钛磁铁矿化学成分、物理性能、原料结构、造球工序、带式焙烧机工艺操作等方面进行试验分析,优化工艺,改进后的单个成品球团平均抗压强度 $> 2\,200\text{ N}$,可以达到考核要求。

1) 原料成分对成品球团平均抗压强度影响较大,需要控制 TiO_2 质量分数 $\leq 12\%$ 、 V_2O_5 质量分数 $\leq 1\%$ 、 Al_2O_3 质量分数 $< 2.0\%$ 、 MgO 质量分数 $< 1.8\%$;另外,精矿粒度 -200 目占比 $75\% \sim 80\%$,碱度应控制 0.6 倍左右,膨润土配比应适当降低至 $1.2\% \sim 1.4\%$,生球粒度 $10 \sim 12.5\text{ mm}$ 占比 $\geq 60\%$ 。

2) 配料对成品球团平均抗压强度有较大影响。重力除尘灰中的 C 可以在焙烧过程中提高球团矿本身的透气性,增强预热氧化效果,进而提高球团矿抗压强度,配比为 1.5% 时,球团矿单个平均抗压强度达 $2\,270\text{ N}$;机头除尘灰中的 CaO 可以增加焙烧物料的碱度,进而增加球团矿抗压强度,配比大于 1.5% 时,单个成品球团矿平均抗压强度达 $2\,250\text{ N}$ 。

3) 合理的带式焙烧机工艺操作制度为鼓干段

温度 $300 \sim 330\text{ }^\circ\text{C}$ 、抽干段温度 $370 \sim 390\text{ }^\circ\text{C}$ 、预热温度梯度 $500\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ 、焙烧段温度 $1\,230 \sim 1\,240\text{ }^\circ\text{C}$ 、大烟罩内氧质量分数 $17.3\% \sim 18.0\%$ 。

[参考文献]

- [1] 周翔,郝学.我国球团工业发展现状及趋势分析[J].产业分析,2010(6):16.
ZHOU Xiang, HAO Xue. The present situation and trend analysis of the pellet industry development in our country [J]. Industry Analysis, 2010(6):16.
- [2] 余海钊,廖继勇,范晓慧.带式焙烧机球团技术的应用及研究进展[J].烧结球团,2020,45(4):47-54.
YU Haizhao, LIAO Jiyong, FAN Xiaohui. Application and research progress of pelletizing technology of belt roaster [J]. Sintering and Pelletizing, 2020,45(4):47-54.
- [3] 利敏,王纪英,李洋.我国带式焙烧机技术发展研究与实践[C]//第八届中国钢铁年会论文集,北京:中国金属学会,2011:1.
LI Min, WANG Jiyong, LI Xiang. Research and practice of technological development of belt roaster in our country [C] // Papers of the 8th Annual Conference of China Iron and Steel Co., BEI JING: China Metal Society, 2011:1.
- [4] 解海波.带式焙烧机设计要点与球团矿产质量关系[J].中国冶金,2015,25(8):28.
XIE Haibo. Design gist about pellet straight grate and relationship between thus and spheric agglomeration's output and quality [J]. China Metallurgy, 2015,25(8):28.

- [5] 胡长松, 田兰欢, 张道远, 等. 钒钛磁铁矿带式焙烧机工艺研究及工程设计[J]. 中国冶金, 2023, 33(11): 88–97.
HU Changsong, TIAN Lanxian, ZHANG Daoyuan, et al. Process research and engineering design of straight-grate for V-Ti magnetite ore[J]. China Metallurgy, 2023, 33(11): 88–97.
- [6] 陈许玲, 刘树, 甘敏, 等. 高钛球团焙烧行为及其强化技术[J]. 工程科学学报, 2016, 7(38): 920–929.
CHEN Xuling, LIU Shu, GAN Min, et al. Roasting behavior and enhancing technology of high-titanium pellets[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 7(38): 920–929.
- [7] XIAO Wei, LU Xiongqiang, ZOU Xingli, et al. Phase transitions, micro-morphology and its oxidation mechanism in oxidation of ilmenite (FeTiO_3) powder[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013(23): 2439–2445.
- [8] 张淑会, 严照照, 刘小杰, 等. 化学成分对球团矿抗压强度影响的研究现状[J]. 烧结球团, 2017, 12(42): 57–61.
ZHANG Shuhui, YAN Zhaozhao, LIU Xiaojie, et al. Research status of the effect of chemical composition on the compressive strength of pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 12(42): 57–61.
- [9] BHP. 三氧化二铝对澳矿烧结性能的影响[J]. 武钢技术, 1995, 12(33): 8–13.
BHP. Effect of aluminium oxide on sintering properties of Australian ore[J]. WISCO Technology, 1995, 12(33): 8–13.
- [10] 杨福. 碱度和 MgO 质量分数对球团抗压强度的影响[J]. 中国冶金, 2020, 6(30): 19–23.
YANG Fu. Effects of basicity and MgO mass fraction on compression strength of pellets[J]. China Metallurgy, 2020, 6(30): 19–23.
- [11] GAO Q J, SHEN F M, GUO W, et al. Effects of MgO containing additive on low-temperature metallurgical properties of oxidized pellet[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2013, 20(7): 25.

Research and practice on quality improvement of vanadium-titanium magnetite pellet by straight-grate process

HU Changsong^{1,2}, ZHANG Weihua^{1,2}, LI He^{1,2}, WEI Wei^{1,2}

(1. Beijing Shougang International Engineering Technology Co. Ltd., Beijing 100043, China;

2. Beijing Metallurgical 3-D Simulation Design Engineering Technology Research Center, Beijing 100043, China)

Abstract: Panzhihua iron and Steel Group's Xichang strip roaster production line is the first production line of vanadium-titanium ore strip roaster pellets in China, the average compressive strength of the finished pellets was lower than that of the original pellets, per pellet only $\geq 1\,950\text{ N}$. This paper analyzes the reasons from the aspects of raw material structure, pelletizing process, technological operation of belt roaster, etc., the optimization measures adopted include: controlling the mass fraction of $\text{TiO}_2 \leq 12\%$, $\text{V}_2\text{O}_5 \leq 1\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 2.0\%$, $\text{MgO} < 1.8\%$, and the concentrate particle size of 200 mesh 75% ~ 80%, the alkalinity should be controlled about 0.6 times, the proportion of bentonite should be reduced to 1.2% ~ 1.4%, the proportion of green ball particle size 10 ~ 12.5 mm $\geq 60\%$, the proportion of gravity dust $> 1.5\%$, or the proportion of Sintering Machine Head dust $> 1.5\%$, The operating regulations of the roaster is as follows: the temperature of the drum drying section is 300 ~ 330 $^{\circ}\text{C}$, the temperature of the drying section is 370 ~ 390 $^{\circ}\text{C}$, the preheating temperature gradient is 500 $\rightarrow$ 1 200 $^{\circ}\text{C}$, the temperature of the roaster section is 1 230 ~ 1 240 $^{\circ}\text{C}$, and the oxygen content in the hood is 17.3% ~ 18.0%. After optimization, the average compressive strength of single pellet was about 2 348 N, and the smoke dust content was 2.54 mg/ Nm^3 , SO_2 content was 3.13 mg/ Nm^3 , NO_x content was 41.42 mg/ Nm^3 , and the reference oxygen content was 17.54%, all meet national emission standards.

Key words: V-Ti magnetite; pellet; straight-grate; compressive-strength; raw materials; ingredients; operation regulations