磁赤混合铁精矿球团富氧预热焙烧试验

刘 曙[1]，汤启宙[1]，刘洵瑞[2]，路漫漫[2]，张汉泉[2]
(1. 武钢资源集团程潮矿业有限公司，湖北 鄂州，436000；2. 武汉工程大学 资源与安全工程学院，湖北 武汉，430070)

摘要： 磁赤混合铁精矿因磁性较弱、成球性能欠佳，传统空气气氛预热焙烧工艺常面临球团强度不足、能耗偏高的问题，富氧焙烧技术为解决这一难题提供了新路径。本文以磁赤混合铁精矿为原料，开展不同氧气体积分数下球团预热焙烧工艺试验，通过系统调整焙烧温度、氧气体积分数及焙烧时间等关键参数，结合抗压强度测试、亚铁含量检测及显微结构分析，全面评估富氧氛围对球团性能的影响规律。结果表明：在 40% 富氧条件下，预热温度仅需 800 ℃，预热球抗压强度即可达 600 N/P，较空气气氛实现 100 ℃的温度降幅；当焙烧球抗压强度达到 3 300 N/P 时，40% 富氧条件比空气气氛焙烧温度降低 50 ℃，同时球团 FeO 质量分数降至 3% 以下，较空气气氛降低 40% 以上。采用富氧预热焙烧工艺可通过强化氧化反应进程，有效降低球团热工消耗，减少焙烧过程中 SO_2、NO_x 等污染物排放，既契合钢铁行业绿色低碳发展需求，也可为难处理铁矿资源高效利用提供技术支撑。

关键词： 富氧焙烧；球团矿；抗压强度；氧气体积分数；节能减排
中图分类号： TF046.6 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000－8764(2025)06－0067－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2025.06.097

Experimental study on oxygen-enriched preheating and roasting mixed magnetite-hematite iron ore pellets

LIU Shu[1], TANG Qizhou[1], LIU Xunrui[2], LU Manman[2], ZHANG Hanquan[2]
(1. Chengchao Mining Co., Ltd., WISCO Resources Group, Ezhou 436000, Hubei, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Due to weak magnetism and poor pelletization performance of the mixed magnetite-hematite iron concentrate, the traditional air atmosphere preheating-roasting process often leads to insufficient pellet strength and high energy consumption. Oxygen-enriched roasting technology offers a new approach to this problem. In this study, the mixed magnetite-hematite iron concentrate was used as the raw materials to conduct a preheating-roasting process test on preheating and roasting pellets under varying oxygen volume fractions. By systematically adjusting key parameters such as roasting temperature, oxygen volume fraction, and roasting duration, and combining compressive strength tests, ferrous iron content detection and microstructure analysis, the effect law of oxygen-enriched atmospheres on pellet properties were comprehensively evaluated. The results show that under 40% oxygen-enriched conditions, a preheating temperature of only 800 ℃ is required to achieve a preheated pellet compressive strength of 600 N/P, representing a 100 ℃ reduction compared to air atmosphere. When the roasted pellet compressive strength reaches 3 300 N/P, the 40% oxygen-enriched condition reduces the roasting temperature by 50 ℃ compared to air atmosphere, while simultaneously decreasing the FeO mass fraction of pellets to below 3%, which reduces over 40% compared to air atmosphere. Through enhancing the oxidation reaction, the oxygen-enriched preheating-roasting process effectively reduces thermal energy consumption of

收稿日期： 2025－03－28；**修回日期：** 2025－05－11
基金项目： 湖北省重点研发计划资助项目(2023DJC202)
作者简介： 刘 曙(1965—)，男，正高级工程师，从事铁矿选矿、球团工艺及尾矿综合利用方面的研究工作。
通信作者： 张汉泉(1971—)，男，教授，从事矿物加工、造块理论与工艺方面的研究。

中国知网 https://www.cnki.net

pellet, and reduces pollutant emissions (e.g., SO_2, NO_x) during roasting. This process not only aligns with the green and low-carbon development goals of the iron and steel industry but also provides technical support for the efficient utilization of refractory iron ore resources.

Key words: oxygen-enriched roasting; iron ore pellets; compressive strength; oxygen volume fraction; energy conservation and emission reduction

钢铁行业碳排放占全国总碳排放量的15%~20%，其中球团生产环节碳排放占比达炼铁系统的8%~12%[1]。随着国家“双碳”战略目标的执行和发展，钢铁行业作为能源消耗和碳排放大户，还需通过工艺升级实现绿色低碳转型。相较于烧结矿，球团矿不仅冶金性能更优，还能减少30%以上的固体燃料消耗及SO_2排放，这一优势使其成为高炉炉料结构优化的核心方向。此外，球团矿具有粒度均一、冶金性能优良、还原性能好等优点，其大范围应用有助于改善高炉的冶炼效率、能源消耗及生产成本[2]。

然而，国内铁矿资源呈现“贫、细、杂”特征，单一矿种球团原料的供应日趋紧张。磁赤混合铁精矿的规模化应用已成为行业必然趋势，但该类矿种的氧化固结难度也给传统工艺带来挑战。在球团生产过程中，为了使球团矿达到一定的机械强度和冶金性能，需要对其进行预热和焙烧处理[3-4]。常规的链箅机—回转窑—环冷机和带式焙烧机球团生产工艺都会使用热风循环工艺，以降低排烟口温度，最大化利用热能，降低能源消耗和污染物排放[5-6]。实际球团生产过程中，热空气中的氧气不断被球团氧化消耗，导致循环热风中氧气体积分数越来越低，不利于球团的氧化[7-8]。现有研究多聚焦于单一铁矿种球团的富氧工艺，而因磁赤混合矿氧化动力学差异较大，对富氧参数优化研究较为匮乏，部分生产线盲目补氧反而出现局部过烧或氧化不充分等问题。

程潮球团工段拥有一条120万吨/年的链箅机—回转窑—环冷机氧化球团生产线，其预热段热风主要来自回转窑内[9-10]，窑内热风主要为煤粉燃烧和环冷Ⅰ段热风。通过前期对该球团生产线的流程考察发现：其预热段温度为750~950 ℃，氧气体积分数为16%~18%；回转窑内温度为1 200~1 300 ℃，氧气体积分数为18%~20%。其原料结构为75%的磁铁精矿+25%的赤铁精矿。在进行氧化固结时，70%以上的球团氧化发生在预热阶段，20%左右的球团氧化发生在回转窑内[11]。因此要想达到理想的氧化程度和固结强度，需要给球团生产过程提供充足的氧气[12-14]。通过富氧预热和焙烧工艺，可以提高整个热工系统热风中的含氧量，加速热球团矿中磁铁矿的氧化反应，提升放热效果[15]，降低预热和焙烧温度，缩短预热和焙烧时间，从而降低能源消耗、减少废气排放[16-19]。因此，本文针对该生产线的原料结构，在量化富氧条件下，研究磁赤混合铁精矿球团预热和焙烧工艺指标，通过查明不同预热和焙烧条件下的球团强度，揭示氧气体积分数对球团预热和焙烧过程的影响规律，从而为该类生产线采用富氧生产工艺提供技术支撑和理论指导。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用铁精矿来自程潮球团厂提供的自产铁精矿、外购铁精矿，两种原料的主要化学成分如表1所示。由表1可知，自产铁精矿的Fe品位为65.66%，FeO的质量分数为26.84%，为典型的高品位磁铁矿，但是其中有害元素Al_2O_3质量分数达到1.44%；外购铁精矿的Fe品位较低，为61.76%，FeO质量分数为2.39%，表明其主要成分为赤铁矿，Al_2O_3质量分数为0.96%，此外，外购矿中SiO_2质量分数也较高，达到了6.31%。

进一步研究两种造球原料中铁组分的主要物相，得到具体分析结果如表2所示。由表2可以看出，自产铁精矿的铁物相主要为磁性铁之铁，其占有率为全铁的95.51%，该分析结果与化学成分相符；外购铁精矿的铁分布较为分散，其中赤褐铁之铁占有率为全铁的48.74%、磁性铁之铁占有率为全铁的26.65%、难溶硅酸盐铁之铁占有率为全铁的24.27%。

为了查明两种铁精矿的成球性能，首先对自

中国知网 https://www.cnki.net

表 1　含铁原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of the iron-containing raw materials　%

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O
自产铁精矿	65.66	26.84	3.83	1.44	1.86	2.13	0.17
外购铁精矿	61.76	2.39	6.31	0.96	0.98	0.66	0.13

表 2　铁精矿的铁物相分析结果(质量分数)

Table 2　Iron phase analysis results of iron concentrate　%

原料名称	项目	磁性铁之铁	碳酸铁之铁	赤褐铁之铁	硫化铁之铁	难溶硅酸铁之铁	全铁
自产铁精矿	质量分数	62.71	0.28	2.46	0.14	0.07	65.66
	占有率	95.51	0.43	3.75	0.21	0.10	100.00
外购铁精矿	质量分数	16.46	0.14	30.10	0.07	14.99	61.76
	占有率	26.65	0.23	48.74	0.11	24.27	100.00

产铁精矿和外购矿进行粒度筛析，分别取样 100 g，用 0.15(100 目)、0.106(150 目)、0.074(200 目)、0.045(325 目)、0.038(400 目) mm 筛子进行水筛。具体筛析结果如表 3 所示。由表 3 可看出，自产铁精矿粒度相较外购铁精矿整体较细，<0.074 mm粒级质量分数达到 80.50%，而外购铁精矿该粒级质量分数为 74.33%。从球团生产的角度看，铁精矿需要有合适的粒度分布，一般而言，<0.074 mm 粒级占比需超过 80%。这时，生球中颗粒排列紧密，形成的毛细管直径小，毛细力强，有助于提高生球强度；另一方面，如果铁精矿粒度过小，对磨矿和选别来说会产生负面影响，且会造成生球内部过于紧密降低生球的爆裂温度，恶化链算机和回转窑气氛。目前，球团生产采用 75% 自产铁精矿 +25% 外购铁精矿的模式，原料细度基本可以满足造球要求。

为了进一步考查两种铁精矿的成球性能，参照《水泥比表面积测定方法勃氏法》(GB/T 8074—2008) 采用 FBT-9 型自动比表面积仪测定铁精矿的比表面积。具体结果如表 4 所示。由表 4 可知，自产铁精矿的平均比表面积为 1 047.4 cm^2/g、成球性指数为 0.392，为中等成球性；外购铁精矿的平均比表面积为 1 039.5 cm^2/g、成球性指数为 0.288，均低于自产铁精矿，为弱成球性。后续造球时，应注意外购铁精矿使用配比。其用量不宜过多，防止生球质量恶化。

除了铁精矿外，膨润土也是造球必不可少的原料。球团生产用膨润土的物理性能如表 5 所示，其主要化学成分和粒度组成如表 6 所示。由表 5、6 可知：膨润土中蒙脱石质量分数较高，达到 82.42%，属于优质膨润土；吸蓝量为 123.6 mmol/(100 g)，15 min 吸水率为 511.48%，pH 值为 10.27。该膨润土为印度土，主要由硅氧四面体和铝氧八面体构成，SiO_2、Al_2O_3 质量分数分别为 47.71%、16.13%，杂质成分 Fe_2O_3 的质量分数为 9.91%，其他杂质成分包括钙镁钾钠等。对于造球用膨润土的粒度，一般要求 <0.074 mm 粒级占比为 90% 以上，以大于 95% 为优。球团生产所用膨润土的 <0.074 mm 粒级占比为 89.66%，仍有一定的提升空间，勉强达到造球要求。

1.2　试验方法

1.2.1　生球制备

采用高压辊磨增大试验原料的比表面积，提高其成球性，然后按实际工业生产原料结构进行配矿，设定自产磁铁精矿与外购赤铁精矿配比为 75∶25；使用圆盘造球机将混匀铁精矿制成球团，

表 3　两种铁精矿粒度筛析结果(质量分数)

Table 3　Particle size screening results of 2 kinds iron concentrate　%

原料名称	>0.154 mm	(0.1,0.154] mm	(0.074,0.1] mm	(0.044,0.074] mm	(0.038,0.044] mm	≤0.038 mm
自产铁精矿	0.42	5.10	13.98	24.21	11.34	44.95
外购铁精矿	5.75	9.01	10.91	21.64	8.92	43.77

中国知网　https://www.cnki.net

表4 进厂铁精矿比表面积测定结果及成球性

Table 4 Specific surface area test results and balling property of iron concentrate

原料名称	检测批次	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	成球性指数	成球性
自产铁精矿	1	1 086.1	0.403	—
	2	960.7	0.382	—
	3	1 095.3	0.392	—
	平均值	1 047.4	0.392	中等成球性
外购铁精矿	1	1 087.3	0.296	—
	2	935.5	0.259	—
	3	1 095.6	0.309	—
	平均值	1 039.5	0.288	弱成球性

表5 膨润土物理性能

Table 5 Physical properties of bentonite

蒙脱石质量分数/%	吸蓝量/[mmol·(100 g)$^{-1}$]	2 h吸水率/%	15 min吸水率/%	膨胀容/(mL·g^{-1})	pH值	水分/%
82.42	123.6	618.92	511.48	13.0	10.27	11.47

表6 膨润土的主要化学成分与粒度组成(质量分数)

Table 6 Main chemical composition and particle size composition of bentonite %

Fe_2O_3	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	Na_2O	粒度组成		
							>0.074 mm	(0.038,0.074] mm	≤0.038 mm
9.91	1.69	2.98	16.13	47.71	0.26	3.98	10.34	59.66	30.00

筛选出直径为8~16 mm的合格生球，随后将生球进行干燥以备预热、焙烧使用。

1.2.2 富氧预热焙烧试验

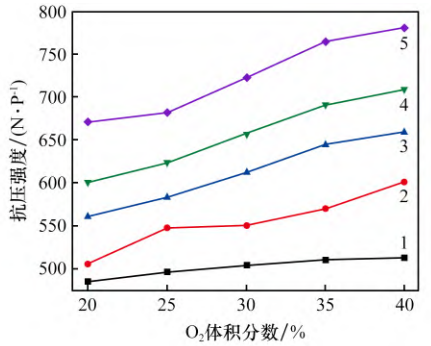
富氧预热焙烧试验采用气氛马弗炉进行。将200 g干球置于氧化铝坩埚中，并送入马弗炉。根据试验要求，设定马弗炉的温度及焙烧时间，通入氮气作为保护气体。在达到预热及焙烧温度后，转而通入氧气以进行氧化反应[15]。氧化完成后，停止氧气供给，继续通入氮气保护，采用随炉冷却方式进行冷却。对最终的预热球和焙烧球进行亚铁含量分析及抗压强度测试。

2 结果与讨论

2.1 温度对预热球抗压强度及亚铁含量的影响

在预热时间为15 min时，控制不同富氧气氛(O_2体积分数为20%、25%、30%、35%、40%，其余成分为N_2)、不同预热温度(750、800、850、900、950 ℃)，试验研究温度对预热球抗压强度的影响。结果如图1所示。由图1可知，在空气气氛(20% O_2体积分数)下时，随着预热温度的提高，预热球抗压强度呈上升的趋势，由485.4 N/P大幅提升至671.5 N/P。在现场生产过程中，一般要求预热球抗压强度大于600 N/P。实际球团生产过程中，为了使预热球达到合格强度，一般控制链箅机预热段温度为900~1 000 ℃。当预热气氛中氧气浓度提升后，在相同温度下，预热球的抗压强度呈上升的趋势。在950 ℃的预热温度下，40% O_2体积分数条件下预热球强度达到781.3 N/P，较空气气氛预热球提升16.35%。由图1可以看出，当预热气氛O_2体积分数达到30%时，850 ℃下预热球强度即可大于600 N/P，较空气气氛下降50 ℃。当预热气氛O_2体积分数提高至40%后，只需要800 ℃的预热温度即可使预热球强度提升至600 N/P以上。主要原因是，球团的预热氧化过程为未反应核收缩模型，外部的氧原子通过扩散反应进入球团内部完成Fe_3O_4的氧化，以提升预热球强度。当外界氧气体积分数提升时，反应物浓度加大，促进氧化反应平衡左移，在相同的反应温度下，加快了氧原子的扩散和Fe_3O_4的氧化反应进程。

中国知网 https://www.cnki.net

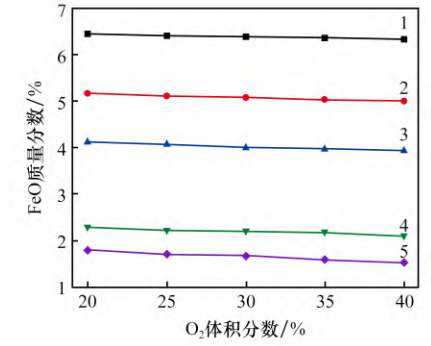


预热温度/℃：1—750；2—800；3—850；4—900；5—950。

图 1　不同预热温度及 O_2 体积分数下球团抗压强度

Fig. 1　Compressive strength of pellets under different preheating temperature and oxygen concentration

为了进一步查明不同预热气氛下预热球的氧化程度，本文还对不同预热条件下的预热球亚铁含量进行分析，具体结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，在不同氧气浓度条件下，预热球中亚铁含量都随着预热温度的升高而降低，主要是因为较高温度提升了氧原子的扩散速率进而促进了 Fe_3O_4 的氧化。另一方面，在同一预热温度下，提高氧气浓度对预热球中亚铁含量影响较小，均在 3% 以内。上述结果表明，预热温度对于预热球亚铁含量的影响更为显著，提高体系 O_2 体积分数，对预热球亚铁含量影响不大。主要原因是在预热过程中，15 min 对于球团而言是一个比较长的预热时间，在此时间段内，球团内部的 Fe_3O_4 大部分都会被氧化为 Fe_2O_3，所以提高 O_2 体积分数主要是改善了新生 Fe_2O_3 晶体的固结强度，从而提升预热球抗压强度。



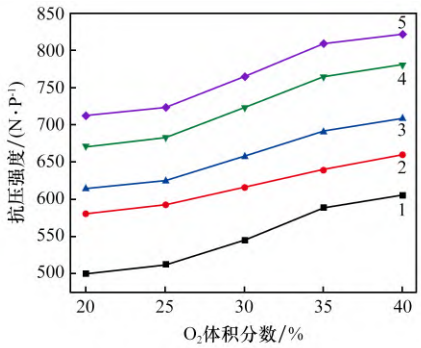
预热温度/℃：1—750；2—800；3—850；4—900；5—950。

图 2　不同预热温度及 O_2 体积分数下球团亚铁含量

Fig. 2　Ferrous content of pellets under different preheating temperature and oxygen concentration

2.2　时间对预热球抗压强度及亚铁含量的影响

在预热温度为 950 ℃ 时，控制不同富氧气氛（20%、25%、30%、35%、40% O_2 体积分数）、不同预热时间（7.5、10、12.5、15、17.5 min），试验研究时间对预热球抗压强度的影响。结果如图 3 所示。由图 3 可以看出，在 950 ℃ 的预热温度下，使用空气气氛预热时，预热时间需要 12.5 min，预热球强度才可以超过 600 N/P，当预热时间延长至 17.5 min 后，预热球强度可以增加至 712.4 N/P。当预热气氛 O_2 体积分数提升后，相同时间下预热球强度呈上升趋势，当 O_2 体积分数提升至 30% 后，只需要 10 min 预热时间，预热球强度即可达到 600 N/P，继续提升 O_2 体积分数至 40%，在 7.5 min 的预热时间下，预热球强度就已达到 600 N/P。上述结果表明，在相同的预热温度下，提高体系 O_2 体积分数可以有效缩短预热时间。主要原因是随着体系内 O_2 体积分数的提升，预热球氧化和固结反应平衡右移，缩短了反应时间。



预热时间/min：1—7.5；2—10；3—12.5；4—15；5—17.5。

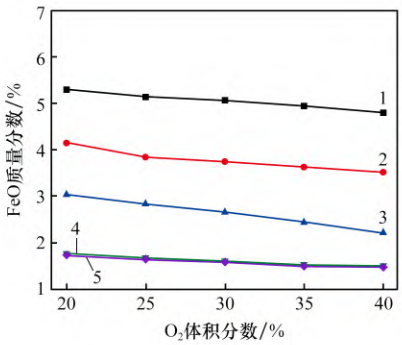
图 3　不同预热时间及 O_2 体积分数下球团抗压强度

Fig. 3　Compressive strength of pellets under different preheating time and oxygen concentration

随后，对不同预热时间下预热球亚铁含量进行分析。具体结果如图 4 所示。由图 4 可知，随着预热时间的延长，空气气氛下预热球 FeO 质量分数从 5.32% 下降至 1.77%。主要因为延长预热时间后，球团中的 Fe_3O_4 颗粒有更充分的时间与氧气反应，促进了氧扩散，使其向 Fe_2O_3 转化，从而降低 FeO 含量。在相同的预热时间下，提高体系 O_2 体积分数可以促进预热球的氧化，在 40% O_2 体

中国知网　https://www.cnki.net

积分数条件下，预热球 FeO 质量分数较空气气氛下降 10%～15%。此外，从图 4 还可以看出，在预热球 FeO 质量分数降低至 2% 以后，继续提高 O_2 体积分数或者延长时间对球团亚铁含量影响不大，说明此时，球团内部较为紧密，增加反应物浓度和延长反应时间，几乎不能促进反应平衡右移。



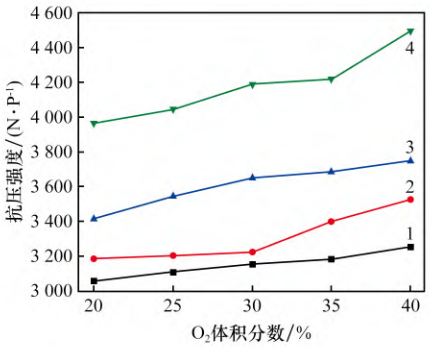
预热时间/min：1—7.5；2—10；3—12.5；4—15；5—17.5。

图 4 不同预热时间及 O_2 体积分数下球团亚铁含量

Fig. 4 Ferrous content of pellets under different preheating time and oxygen concentration

2.3 温度对成品球抗压强度及亚铁含量的影响

在链算机—回转窑—环冷机工艺中，链算机上预热球进入回转窑中进行焙烧固结，同时还需要进一步氧化。为探究焙烧工艺制度及 O_2 体积分数对成品球抗压强度和亚铁含量的影响规律，采用 950 ℃、15 min、空气气氛下的预热球进行焙烧试验。在焙烧时间为 15 min 时，控制不同焙烧温度(1 150、1 200、1 250、1 300 ℃)、不同焙烧气氛(20%、25%、30%、35%、40% O_2 体积分数，其余成分为 N_2)，试验研究温度对成品球抗压强度的影响。结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，随着焙烧温度的提高，成品球抗压强度显著提高，在 1 150 ℃空气气氛下，成品球抗压强度即可达到 3 059 N/P。一般工业上要求成品球抗压强度达到 3 000 N/P 即可。当焙烧温度提升至 1 300 ℃后，成品球抗压强度可以达到 3 965 N/P。上述结果还表明，体系 O_2 体积分数的提升对成品球抗压强度影响程度没有温度高，在相同焙烧温度下，当 O_2 体积分数提高至 40% 后，成品球抗压强度提升幅度为 6.44%～13.39%，高温下 O_2 体积分数对成品球抗压强度的提升幅度更大。主要原因：经过预热后，成品球内部开始变得致密，氧原子扩散速率减慢，此时反应的限制性环节为活化能，提升 O_2 体积分数对反应速率提升的帮助有限。

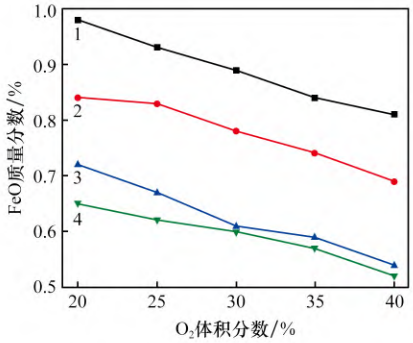


焙烧温度/℃：1—1 150；2—1 200；3—1 250；4—1 300。

图 5 不同焙烧温度及 O_2 体积分数下球团抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of pellets under different roasting temperature and oxygen concentration

接下来，对不同焙烧温度下成品球亚铁含量进行分析。具体结果如图 6 所示。由图 6 可以看出，在 1 150～1 300 ℃的焙烧温度范围内，成品球的 FeO 质量分数都保持在 1% 以下，符合工业生产要求。此时，球团内部已经变得非常致密，氧原子扩散难度增大。因此，当焙烧温度从1 150 ℃提升至 1 300 ℃时，空气气氛下成品球 FeO 质量分数从 0.98% 下降至 0.65%。由于球团致密化程度增加，在提升体系 O_2 体积分数后，成品球的 FeO 质量分数同样下降不多，降幅维持在 17.35%～25%。最终在 40% O_2 体积分数、1 250 ℃的焙烧温度下，成品球 FeO 质量分数维持在 0.5% 左右。



焙烧温度/℃：1—1 150；2—1 200；3—1 250；4—1 300。

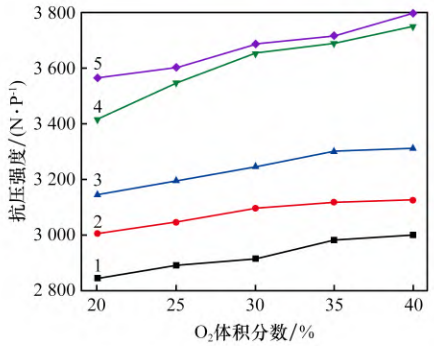
图 6 不同焙烧温度及 O_2 体积分数下球团亚铁含量

Fig. 6 Ferrous content of pellets under different roasting temperature and oxygen concentration

中国知网 https://www.cnki.net

2.4　焙烧时间对成品球的影响

本节主要探究在不同焙烧时间下，体系中 O_2 体积分数对成品抗压强度的影响规律。试验首先在 950 ℃空气气氛下将球团预热 15 min，随后固定焙烧温度为 1 250 ℃，分别控制焙烧时间为 7.5、10、12.5、15、17.5 min 以及焙烧气氛中 O_2 体积分数为 20%、25%、30%、35%、40%，研究不同条件下的成品球抗压强度。结果如图 7 所示。由图 7 可以看出，当焙烧时间从 7.5 min 提高至 17.5 min 后，在空气气氛下成品球抗压强度由 2 845 N/P 提高至 3 566 N/P，提升效果显著。在相同的焙烧时间下，当 O_2 体积分数提升至 40% 时，成品球抗压强度提升幅度在 6% 左右，幅度不大。在 40% O_2 体积分数的条件下，只需要 7.5 min，成品球抗压强度即可达到 3 000 N/P，相比空气气氛可以减少 2.5 min 的焙烧时间。

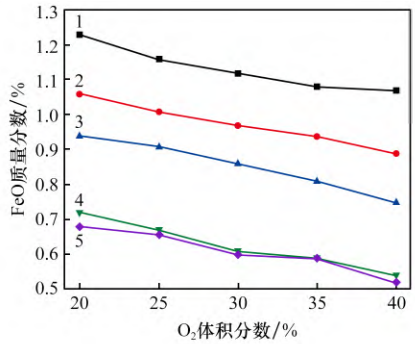


焙烧时间/min：1—7.5；2—10；3—12.5；4—15；5—17.5。

图 7　不同焙烧时间及 O_2 体积分数下球团抗压强度

Fig. 7　Compressive strength of pellets under different roasting time and oxygen concentration

下一步，对不同焙烧时间下成品球的亚铁含量进行分析。具体结果如图 8 所示。由图 8 可以看出，在空气气氛下，随着焙烧时间的延长，成品球 FeO 质量分数从 1.23% 下降至 0.68%。O_2 体积分数对于成品球亚铁含量的影响幅度不大。在常规的 15 min 焙烧时间内，随着体系 O_2 体积分数的提升，成品球 FeO 质量分数从 0.72% 下降至 0.54%。主要原因是在焙烧过程中，球团的致密化程度非常高，使氧原子难以扩散，阻碍了内部亚铁的氧化，进一步升高体系 O_2 体积分数对成品球氧化程度的提升有限。



焙烧时间/min：1—7.5；2—10；3—12.5；4—15；5—17.5。

图 8　不同焙烧时间及 O_2 体积分数下球团亚铁含量

Fig. 8　Ferrous content of pellets under different roasting time and oxygen concentration

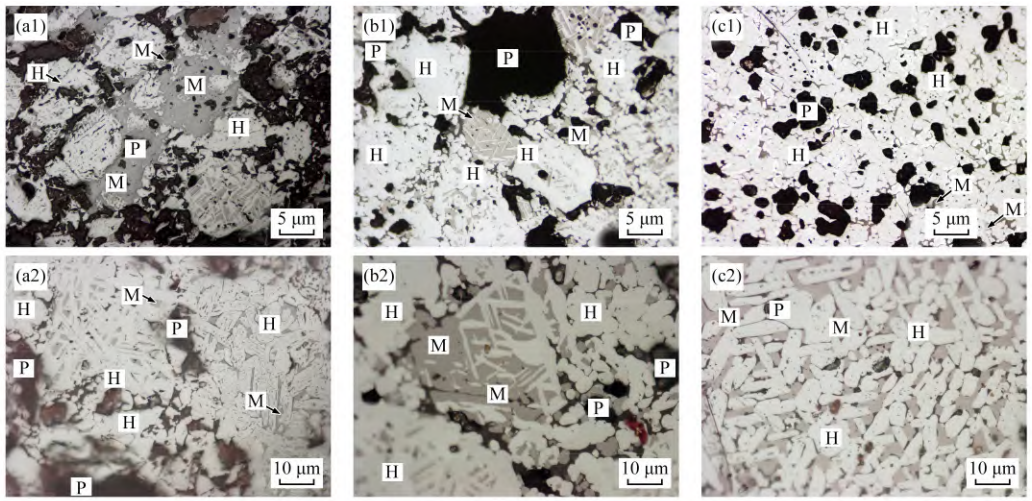
3　预热球的矿相结构

从前文研究结果来看，球团的氧化主要发生在预热阶段，提高体系氧气体积分数对预热球强度的提升更为明显。为进一步查明在不同 O_2 体积分数条件下球团内部的氧化和固结情况，本节分别对 20% O_2 体积分数(空气气氛)、30% O_2 体积分数和 40% O_2 体积分数，预热温度为 900 ℃、预热时间为 15 min 下预热球的矿相结构进行分析。结果如图 9 所示。由图 9 可看出：随着预热过程体系 O_2 体积分数的增加，球团矿中赤铁矿矿相占比逐渐加大，表明 O_2 体积分数增加有利于磁铁矿的氧化，这与前文的亚铁含量变化规律相符；此外，随着 O_2 体积分数的增加，预热球内部不仅赤铁矿矿相面积增大，而且整体结构变得更加致密，有利于球团内部颗粒之间的固结，大大提高了预热球的机械强度。由上述矿相分析可以得出，提高预热过程 O_2 体积分数，可以促进球团内部磁铁矿颗粒的氧化，使其再结晶成赤铁矿时球团内部颗粒结构变得更加致密，促进预热球强度的提升。

4　结　论

(1) 通过增加预热体系氧气浓度，可以有效提高预热球的抗压强度和氧化程度。在 900 ℃的预热温度下，将 O_2 体积分数提升至 40%，预热球强度从 601.5 N/P 提升至 708.9 N/P。在 40% O_2 体积分数的条件下，仅需 800 ℃预热 15 min 或者 950 ℃预热 7.5 min 即可将预热球强度提高至

中国知网　https://www.cnki.net



O_2体积分数/%：(a1)、(a2) 20；(b1)、(b2) 30；(c1)、(c2) 40

H—赤铁矿；M—磁铁矿；P—孔洞。

图 9 预热球矿相结构

Fig. 9 The mineral phase structure of preheating pellet

600 N/P以上，相比空气气氛下降低预热温度100 ℃、减少预热时间 7.5 min，有效降低了工序能耗。

(2) 提高体系氧气浓度可提高成品球抗压强度，幅度为 6.44%～13.39%，但其提升效果不如预热球。主要原因是在高温焙烧阶段，球团内部致密化程度加深，导致氧原子扩散速率降低。因此，提高氧气浓度对反应进程帮助程度有限。结合具体数据可以看出，在焙烧阶段，在 40% O_2 体积分数的条件下，1 200 ℃焙烧 15 min 或者 1 250 ℃焙烧 12.5 min，成品球抗压强度即可超过 3 300 N/P，较空气气氛降低焙烧温度 50 ℃、焙烧时间 2.5 min，这也可在一定程度上降低工序能耗。

(3) 从预热球显微矿相可以看出，提高体系氧气浓度，可以促进球团内部磁铁矿颗粒的氧化，使再结晶生成的赤铁矿颗粒紧密排列，使预热球内部结构变得更加致密，从而强化预热球的机械强度。

参考文献:

[1] 王新东，金永龙. “双碳”背景下高炉使用高比例球团的展望[J]. 过程工程学报，2022，22(10)：1379－1389.
WANG Xindong，JIN Yonglong. Prospect on high ratio pellet utilized in blast furnace under the background of carbon peaking and carbon neutrality [J]. The Chinese Journal of Process Engineering，2022，22(10)：1379－1389.

[2] 刘征建，王家保，张建良，等. 高炉能耗现状及降耗技术展望[J]. 钢铁研究学报，2023，35(1)：1－10.
LIU Zhengjian，WANG Jiabao，ZHANG Jianliang，et al. Status of energy consumption and prospect of consumption reduction technology in blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research，2023，35(1)：1－10.

[3] QIAN L X，YANG T，LONG H M，et al. Recycling of waste V_2O_5-WO_3/TiO_2 catalysts in the iron ore sintering process via a preballing approach [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering，2021，9(48)：16373.

[4] ZHOU P，SHI P Y，SONG Y P，et al. Evaluation of burden descent model for burden distribution in blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research，International，2016，23(8)：765－771.

[5] 朱德庆，黄伟群，杨聪聪，等. 铁矿球团技术进展[J]. 烧结球团，2017，42(3)：42－49.
ZHU Deqing，HUANG Weiqun，YANG Congcong，et al. Technical progress in iron ore pelletization [J]. Sintering and Pelletizing，2017，42(3)：42－49.

[6] 蔡大为，范晓慧. 钢铁工业低碳炉料及绿色冶炼技术进展[J]. 烧结球团，2023，48(4)：1－7.
CAI Dawei，FAN Xiaohui. Progress of low-carbon charge and green smelting technology in iron and steel industry [J]. Sintering and Pelletizing，2023，48(4)：1－7.

[7] LI Z Y，KUANG S B，LIU S D，et al. Numerical investigation of burden distribution in ironmaking blast furnace [J]. Powder Technology，2019，353：385－397.

中国知网 https://www.cnki.net

[8] 张福明，徐文轩，程相锋，等. 高炉高比例球团矿冶炼关键工艺技术分析[J]. 钢铁，2024，59(3)：32－45.
ZHANG Fuming，XU Wenxuan，CHENG Xiangfeng，et al. Analysis on key process and technology of blast furnace ironmaking on high charging proportion of pellet ore[J]. Iron & Steel，2024，59(3)：32－45.

[9] LIANG R Q，YANG S，YAN F S，et al. Kinetics of oxidation reaction for magnetite pellets[J]. Journal of Iron and Steel Research(International)，2013，20(9)：16－20.

[10] 张林林，付刚华，郭宇峰，等. 碱度对熔剂性球团生球性能的影响[J]. 钢铁，2019，54(5)：14－18.
ZHANG Linlin，FU Ganghua，GUO Yufeng，et al. Effect of basicity on quality of green fluxed pellets[J]. Iron & Steel，2019，54(5)：14－18.

[11] 冉微，潘建，杨聪聪，等. 配加赤－褐铁矿对熔剂性磁铁矿球团氧化动力学和焙烧性能的影响[J]. 过程工程学报，2025，25(5)：510－521.
RAN Wei，PAN Jian，YANG Congcong，et al. Effect of addition of hematite and limonite iron ores on oxidation kinetics and roasting performance of fluxed magnetite pellets[J]. The Chinese Journal of Process Engineering，2025，25(5)：510－521.

[12] 张闯，周晓雷. 球团的焙烧特性与还原行为的研究[J]. 冶金工程，2020，7(2)：77－82.
ZHANG Chuang，ZHOU Xiaolei. Research on roasting characteristics and reduction behavior of pellets[J]. Metallurgical Engineering，2020，7(2)：77－82.

[13] 杨绍利，李宏，马兰，等. 微细粒级钛铁矿氧化球团制备试验研究[J]. 烧结球团，2019，44(6)：34－38.
YANG Shaoli，LI Hong，MA Lan，et al. Experimental study on preparation of fine-grained ilmenite oxidized pellets[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(6)：34－38.

[14] 朱廷钰，刘霄龙. 中国钢铁行业“超低排放”向“减污降碳”过渡的技术思考[J]. 过程工程学报，2022，22(10)：1360－1367.
ZHU Tingyu，LIU Xiaolong. Technical consideration on the transition from “ultra-low emissions” to “reduction of pollution and carbon emissions” in China’s iron and steel industry[J]. The Chinese Journal of Process Engineering，2022，22(10)：1360－1367.

[15] 李鹏，刘昌持，潘响明. 链箅机—回转窑球团烟气脱硫脱硝技术研究[J]. 皮革制作与环保科技，2022，3(12)：102－104.
LI Peng，LIU Changchi，PAN Xiangming. Study on desulfurization and denitrification technology of chain grate machine-rotary kiln pellet flue gas[J]. Leather Manufacture and Environmental Technology，2022，3(12)：102－104.

[16] 吴恩辉，李军，徐众，等. 添加钙盐对钒钛铁精矿氧化球团物相、强度及孔隙率的影响[J]. 烧结球团，2024，49(5)：39－46.
WU Enhui，LI Jun，XU Zhong，et al. Effect of calcium salt on phase，strength and porosity of oxidized pellets of vanadium-ilmenite concentrate[J]. Sintering and Pelletizing，2024，49(5)：39－46.

[17] 付金涛. 人工磁铁矿球团氧化动力学研究[D]. 武汉：武汉工程大学，2016.
FU Jintao. Research on oxidation kinetics of synthetic magnetite pellets[D]. Wuhan：Wuhan Institute of Technology，2016.

[18] 郑常乐，邵球军，张建良，等. 富氧率对钒钛磁铁矿球团还原行为的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2016，37(2)：198－202；212.
ZHENG Changle，SHAO Qiujun，ZHANG Jianliang，et al. Influence of oxygen enrichment rate on reduction behavior of titanomagnetite pellets[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science)，2016，37(2)：198－202；212.

[19] CHEN F，GUO Y，JIANG T，et al. Effects of high pressure roller grinding on size distribution of vanadium-titanium magnetite concentrate particles and improvement of green pellet strength[J]. Journal of Iron and Steel Research(International)，2017，24(3)：266－272.

中国知网　https://www.cnki.net