球团

# 红土镍矿成球行为及氧化固结机理

张庆禹，田宏宇，储满生，唐 珏，李 峰
（东北大学 a. 低碳钢铁前沿技术教育部工程研究中心；b. 冶金学院；c. 辽宁省低碳钢铁前沿技术工程研究中心，辽宁 沈阳 110819）

**摘要**：造块工艺作为红土镍矿入电炉前重要的预处理流程，是降低电炉能耗、提高有价组元回收和降低环境负荷的有效手段。本文主要采用造球试验、预热—焙烧试验、热分析、热力学相图计算以及 XRD、SEM-EDS 等表征手段，系统研究了典型红土镍矿的成球行为和氧化固结机理，以获得强度适宜的红土镍矿氧化球团。结果表明，红土镍矿氧化球团主要物相为 $Fe_2O_3$、$CaMgSi_2O_6$、[(Mg,Fe)O·$Fe_2O_3$]和 $Mg_2SiO_4$，其中 $Fe_2O_3$、[(Mg,Fe)O·$Fe_2O_3$]、($Mg_2SiO_4$)起骨架作用，$CaMgSi_2O_6$作为黏结相，进而提高球团的固结特性。此外，提高焙烧温度和优化碱度对球团黏结相生成有显著的促进作用。在碱度为 0.15、预热温度为 950 ℃(持续 15 min)及焙烧温度为 1 300 ℃(持续 15 min)的条件下，可得到抗压强度为 1 983 N/P 的红土镍矿氧化球团，满足后续工艺要求。

**关键词**：红土镍矿；球团；成球行为；固结机理
**中图分类号**：TF046.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)03－0058－09
**doi**：10.13403/j.sjqt.2026.03.047

# Pelletization behavior and oxidation consolidation mechanism of laterite nickel ore

ZHANG Qingyu, TIAN Hongyu, CHU Mansheng, TANG Jue, LI Feng
(Northeastern University a. Engineering Research Center of Ministry of Education for Low-carbon Steel Frontier Technology; b. School of Metallurgy; c. Liaoning Province Low-Carbon Steel Frontier Technology Engineering Research Center, Shenyang 110819, Liaoning, China)

**Abstract**: The agglomeration process, as an important pretreatment step before laterite nickel ore is fed into the electric furnace, represents an effective means to reduce energy consumption in the electric furnace, enhance the recovery of valuable components, and reduce environmental burden. Pelletizing tests, preheating-roasting tests, thermal analysis, thermodynamic phase map calculations, as well as XRD, SEM-EDS characterization methods are mainly adopted, the pelletization behavior and oxidation-consolidation mechanisms of typical laterite nickel ores are systematically studied, aiming to obtain oxidation pellets of laterite nickel ore with appropriate strength. The results show that the main phases of oxidized pellets in the laterite nickel ore are $Fe_2O_3$, $CaMgSi_2O_6$, [(Mg, Fe)O·$Fe_2O_3$], and $Mg_2SiO_4$, among which $Fe_2O_3$, [(Mg, Fe)O·$Fe_2O_3$], ($Mg_2SiO_4$) act as the framework, while $CaMgSi_2O_6$ acts as the binder phase, thereby enhancing the consolidation properties of the pellets. In addition, increasing the roasting temperature and optimizing the basicity have a significant positive effect on the formation of the agglutinating phase in pellets. Under conditions of alkalinity of 0.15, preheating temperature of 950 ℃ (for 15 min), and calcination temperature of 1 300 ℃ (for 15 min),

**收稿日期**：2025－10－08；**修回日期**：2025－12－01
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(52404341)；中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202313)；中央高校基本科研业务专项资金(N25ZJL001)；中央高校基本科研业务专项资金(N26LPY026)
**作者简介**：张庆禹(2001—)，男，硕士研究生，从事低碳炼铁、资源综合利用方面的研究。
**通信作者**：田宏宇(1991—)，男，副教授，从事低碳炼铁、资源综合利用方面的研究。

laterite nickel ore oxide pellets with compressive strength of 1 983 N/p can be obtained, meeting the requirements of subsequent processes.

**Key words**: laterite nickel ore; pelletizing; pelletization behavior; consolidation mechanism

镍作为一种战略性元素广泛应用于各行各业，且其在不锈钢行业的占比已超过 70%，达到 300 万 t 金属镍[1]。目前，镍年产量的 60% 依赖于高品位硫化镍矿石(镍质量分数为 1.5%~4%)，随着硫化镍矿的不断开采和逐渐枯竭，现已无法满足快速增长的全球镍需求，促使镍源逐渐转向储量丰富的低品位红土镍矿(平均镍质量分数为 1.4%)[2-3]。我国红土镍矿资源量少且品位较低，在不锈钢工业迅猛发展的环境下，红土镍矿资源无法满足市场需求，对外依存度超过 90%，且其中主要为中低品位矿石(镍质量分数 <1.6%)[4-5]。为保证我国镍资源安全和不锈钢工业稳定可持续发展，高效利用中低品位红土镍矿势在必行[6-7]。

红土镍矿根据成矿和矿物特点主要分为腐殖土型、过渡型和褐铁矿型[8]。其中，腐殖土型红土镍矿一般位于矿床最下部，其镁和镍含量相较于其他两种类型更高，铁含量相对更低，镍主要以吸附态或类质同象形态存在于镁或铁硅酸盐中，宜采用火法冶炼工艺处理[9-10]。而且对于不锈钢的生产，红土镍矿火法工艺直接生产镍铁有效缓解了镍、铁先分离后合金化带来的能源浪费，缩短了工艺流程[11-12]。然而，腐殖土型红土镍矿因其铁含量低、镍品位较低、烧损较高且多呈细粒状，在直接火法冶炼过程中常存在透气性差、还原效率低、电耗高和有价组元回收率低等问题[13]。因此，红土镍矿在入电炉之前，通常需要通过造块工艺来改善红土镍矿粒度组成、机械强度与还原反应性能[14]。目前应用较为广泛的造快方法主要包括球团法、烧结法和压块法[15-19]。球团法以其能耗低、粒度均匀、环境友好、产品性能较好、便于运输等特点，成为红土镍矿造块的有效途径，其质量也直接影响后续预还原和电炉熔分流程[20]。韩振等[21]采用扩散偶法系统考察了氧化焙烧过程中红土镍矿、铬铁矿与磁铁矿之间的界面反应，明确了微观结构、物相与元素迁移的演变路径，从而进一步揭示了异质矿物共存条件下的固结机制，然而红土镍矿更多以“黏结剂/添加料”身份参与铁矿球团体系，关于以单一红土镍矿为原料制备氧化球团的系统研究仍较少。基于此，本研究旨在构建一个涵盖“热力学可行性—动力学路径—参数窗口—固结机理”的闭环研究框架。研究将综合运用相图计算与试验验证手段，深入探讨腐殖土型红土镍矿的成球行为，重点揭示二元碱度、预热及焙烧参数对球团物相转变与微观形貌演变的影响规律。在此基础上，阐明球团黏结相的定向调控途径及氧化固结强化机制，从而给出可复用的工艺区间与机制证据。本研究成果将制备出满足后续冶炼要求的优质炉料，为低品位红土镍矿的低碳预处理及高效利用提供坚实的理论依据与定量化指导。

## 1　试验原料与方法

### 1.1　试验原料

研究所用红土镍矿的化学成分分析和 XRD 结果分别如表 1 和图 1 所示。由表 1 可知，红土镍矿的 Ni 和 Fe 质量分数分别为 1.52% 和 22.07%，铁镍比为 14.52，还含有 2.07% 的 $Cr_2O_3$。此外，$SiO_2$、MgO 质量分数较高，分别为 30.3% 和 20.95%，烧损为 10.97%，因此，此红土镍矿属于腐殖土型。此外，由图 1 可知，红土镍矿主要物相为利蛇纹石[$(Mg,Fe,Ni)_3Si_2O_5(OH)_4$]和针铁矿[FeO(OH)]，次要物相为铬铁尖晶石$(Fe,Mg)(Cr,Fe)_2O_4$等。

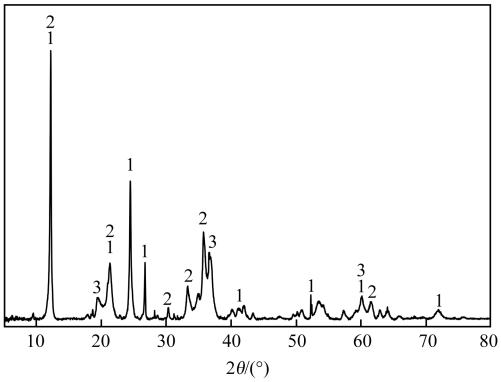
原料预处理后的红土镍矿的粒度组成如图 2

**表 1　红土镍矿主要化学成分及烧损(质量分数)**

**Table 1　Main chemical composition and losses on ignition of raw materials**　　%

| TFe | Ni | $Cr_2O_3$ | CaO | MgO | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | P | S | $R$ | 烧损 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 22.02 | 1.52 | 2.07 | 0.2 | 20.95 | 2.22 | 30.3 | 0.01 | 0.144 | 0.006 | 10.97 |

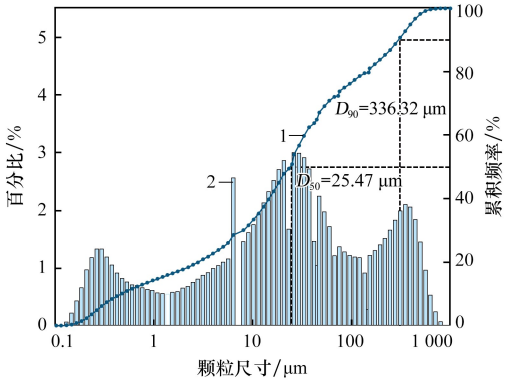
注：$R$ 为二元自然碱度。




1—利蛇纹石[$(Mg,Fe,Ni)_3Si_2O_5(OH)_4$];
2—斜绿泥石[$(Mg,Fe)(Cr,Fe)_{10}(OH)_8$];
3—针铁矿[$FeO(OH)$]。

**图 1 红土镍矿 XRD 图谱**

**Fig. 1 XRD pattern of laterite nickel ore**




1—粒子数；2—累积频率。

**图 2 红土镍矿粒度组成**

**Fig. 2 Particle size distribution of lateritic nickel ore**

所示。由图 2 可知，红土镍矿的粒度曲线呈多峰分布，累计体积分布达到 50%、90% 时对应粒径 $D_{50}$、$D_{90}$ 分别为 25.47 μm 和 336.3 μm，粒度分布范围较广，整体偏细，满足造球要求。

红土镍矿微观形貌和能谱分析结果分别如图 3 和表 2 所示。由图 3 和表 2 可知，红土镍矿物相种类多，矿物间嵌布关系复杂的特性，主要物相为利蛇纹石和针铁矿，且为主要的赋镍矿物，次

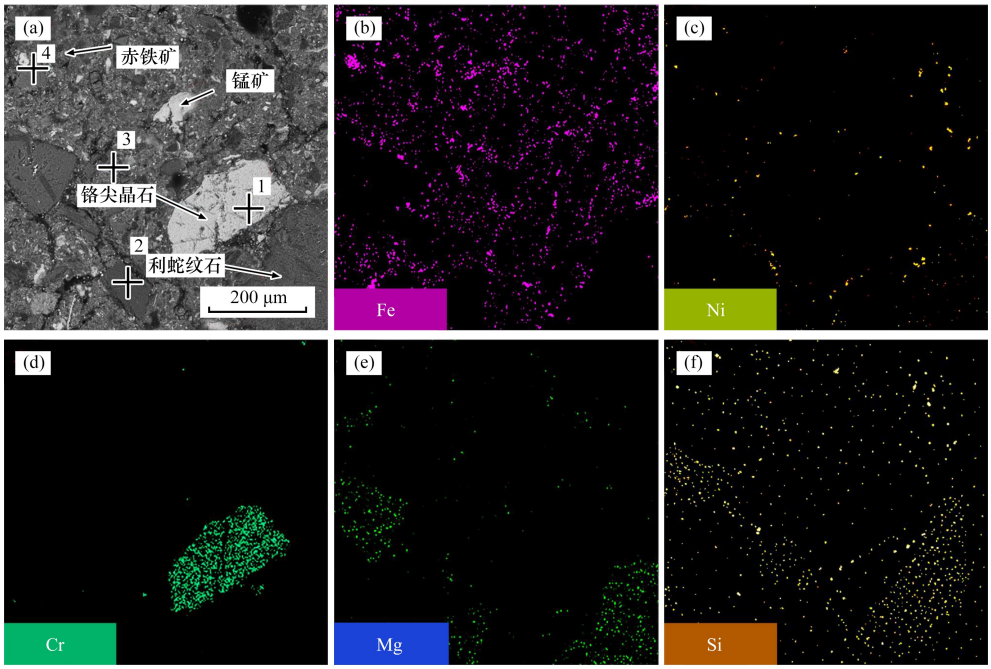



**图 3 红土镍矿 SEM-EDS 分析**

**Fig. 3 SEM-EDS analysis of laterite nickel ore**

**表 2 红土镍矿分析点位元素组成及其含量(质量分数)**

**Table 2 Main element composition and content at the analysis points of laterite nickel ore** %

| 分析点位 | O | Mg | Al | Si | Cr | Fe | Ni | 矿相 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20.91 | 9.61 | 11.87 | 3.39 | 34.47 | 18.31 | — | 铬铁尖晶石 |
| 2 | 54.22 | — | — | 44.53 | — | 1.25 | — | 石英石 |
| 3 | 47.63 | 23.82 | — | 23.35 | — | 3.54 | 0.64 | 利蛇纹石 |
| 4 | 49.35 | 5.85 | — | 7.45 | — | 36.28 | 1.07 | 针铁矿 |

要物相为铬铁矿等。

此外，基于红土镍矿自身的黏土型特性，本研究选择一种典型的钠基膨润土作为生球制备过程的辅助黏结剂；使用 CaO 分析纯试剂来调节红土镍矿球团的二元碱度。

### 1.2　试验方法

#### 1.2.1　红土镍矿氧化球团制备

红土镍矿氧化球团制备试验主要包括原料预处理、生球制备和预热焙烧。首先，将红土镍矿通过对辊破碎和高压辊磨细破至所需粒度并控制水分至 10% 以下，然后与生石灰和膨润土按照设定的比例放入行星球磨机中充分混合，利用圆盘造球机(圆盘直径为 1 000 mm，转速为 25 r/min，边高为 200 mm，倾角为 45°)制备生球，并检测其性能。将合格生球放入鼓风干燥箱，在 105 ℃的条件下烘干 5 h 至恒重。待马弗炉升温至目标温度后，将干球放置于马弗炉中进行预热和焙烧实验，期间通入充足的空气来维持氧化性气氛，当达到焙烧所需时间后将球团空冷至室温。冷球团做将进一步的性能分析。

#### 1.2.2　性能表征

生球抗压强度和落下强度采用单球压碎与 0.5 m 落下试验表征；干球和成品球抗压强度按照 GB/T 14201—2018 进行测试。

样品化学成分按相应国家标准采用化学滴定法测定；原料粒度组成采用 Bettersize 2600 激光粒度分析仪湿法检测；物相组成采用 X 射线衍射仪(XRD)分析；热性能及分解过程采用 TG-DTG-DSC 热分析测试；热力学相图利用 FactSage 8.0 软件 Phase Diagram 模块绘制；微观形貌及微区成分采用扫描电子显微镜 – 能谱仪(SEM-EDS)分析。二元碱度 $R = w(\mathrm{CaO})/w(\mathrm{SiO_2})$。

## 2　结果与讨论

### 2.1　热力学分析

红土镍矿 TG-DTG-DSC 图谱如图 4 所示。由图 4 可知，红土镍矿在阶段 I(105.41 ℃)轻微失重为 1.45%，对应吸附水的脱除，阶段 II(278.61 ℃) DSC 曲线出现强吸热峰失重为 4.63%，对应针铁矿羟基的脱除生成赤铁矿，阶段 III(624.70 ℃)明显失重，失重为 7.07%，对应蛇纹石分解生成镁橄榄石，生成无定型硅酸盐，阶段 IV(828.79 ℃)出现弱放热峰，失重为 0.46%，对应无定型硅酸盐重新结晶为晶型良好的硅酸盐矿物。

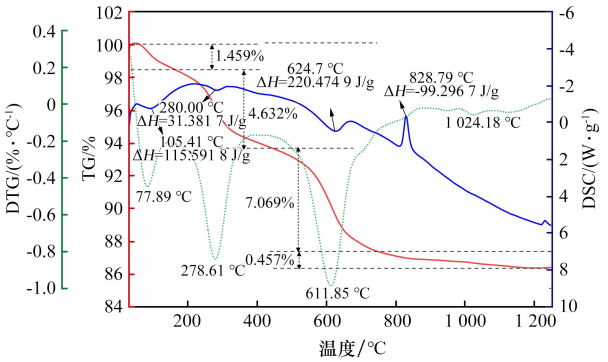



**图 4　红土镍矿 TG-DTG-DSC 分析**

**Fig. 4　TG-DTG-DSC analysis of laterite nickel ore**

基于红土镍矿球团化学成分所绘制的四元相图(CaO-MgO-$SiO_2$-4.14% $Al_2O_3$)如图 5 所示。由图 5 可知，随着氧化焙烧体系中 $w(\mathrm{CaO})/w(\mathrm{SiO_2})$ 的提高，优先产生钙镁橄榄石、透辉石等低熔点物相，此温度区域还存在硅酸钙、镁橄榄石与部分铝硅酸盐相的共熔反应，进一步降低微区熔点。随着 $w(\mathrm{CaO})/w(\mathrm{SiO_2})$ 的继续提高，会产生硅酸二钙、硅酸三钙等高熔点物相，从而使球团的液相线温度呈现出先降低后升高的趋势。因此，通

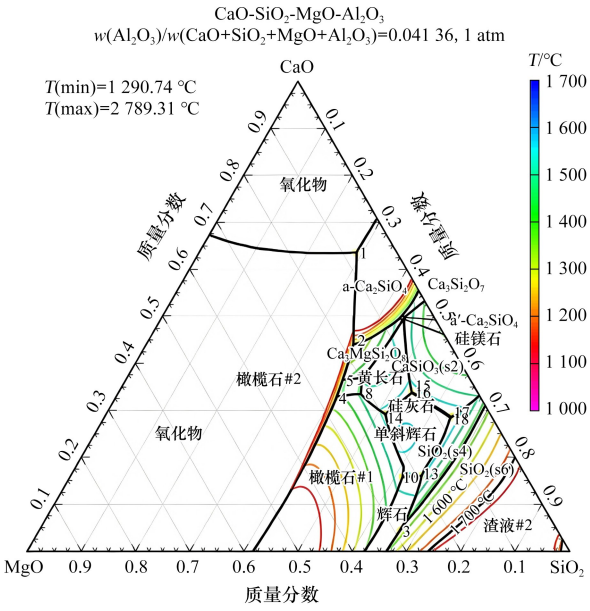



**图 5　CaO-MgO-$SiO_2$-4.14%$Al_2O_3$ 四元相图**

**Fig. 5　CaO-MgO-$SiO_2$-4.14%$Al_2O_3$ quaternary phase diagram**

过二元碱度的合理调控，可以促进低熔点物相的生成，从而降低球团的焙烧温度，改善氧化球团的固结特性。

## 2.2 红土镍矿球团性能优化

### 2.2.1 生球和干球性能优化

造球参数对红土镍矿生球和干球强度的影响如表 6 所示。由图 6(a)可知，在固定造球时间为 20 min、自然碱度条件下，由于红土镍矿良好的亲水性和持水能力，明显高于普通铁矿适宜的造球水分 7.5%~9% 范围。随着生球水分由 12% 增加至 22%，生球和干球的抗压强度总体呈现上升趋势。然而，当生球水分进一步超过 22% 时，生球抗压强度开始下降。这说明适量的水分能够提高颗粒间毛细管内的毛细水含量，从而增强毛细力，促进成球并提高生球强度。但当水分超过毛细管的持水极限时，多余的部分转化为重力水，削弱了颗粒间的作用力，恶化成球过程，导致生球强度下降。

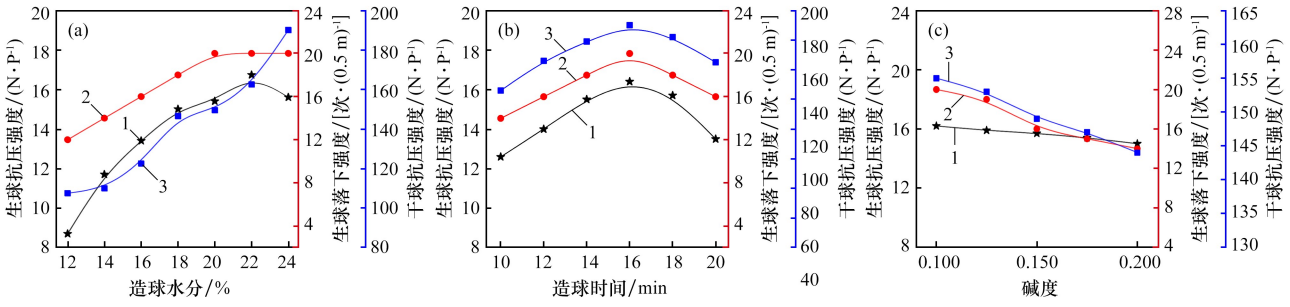
由图 6(b)可知，在固定造球水分为 22% 和自然碱度条件下，随着造球时间由 10 min 延长至 20 min，生球与干球的抗压强度均显著提高。这主要归因于适度的延长造球时间能够促进矿物颗粒间的重新排列与紧密结合，使球团的孔隙率逐渐降低，改善了毛细管的管径和分布特性，优化毛细管内毛细水含量和提高毛细黏结力，从而使生球强度增加。然而，当造球时间过长时，生球结构过于致密，在干燥过程中水蒸气排出受阻，易在内部产生应力集中，不利于维持球团高温强度。因此，适宜的造球时间为 16 min，可得到生球和干球抗压强度为 16.0~16.5 N/P 和 185~190 N/P。

由图 6(c)可知，在固定造球水分为 22%、造球时间为 16 min 条件下，随着二元碱度由自然碱度提高至 0.20，生球和干球的抗压强度均呈现一定程度的下降。这主要与生石灰粉和水发生消化反应，容易影响生球内毛细水的分布状态和颗粒间毛细水的良性发展，从而使生球和干球强度略有降低。综合来看，二元碱度在 0.10~0.20 的范围内，所得生球与干球的性能仍能满足后续工艺要求。因此，二元碱度的优化选择需结合后续氧化焙烧过程的具体需求进行进一步调优。

### 2.2.2 焙烧球性能优化

预热-焙烧参数对焙烧氧化球团强度的影响如图 7 所示。由图 7(a)可知，碱度的影响在固定预热温度为 900 ℃、预热时间为 15 min、焙烧温度为 1 300 ℃、焙烧时间为 15 min 条件下，随碱度由 0.10 提升至 0.20，焙烧球团抗压强度呈“先升后降”趋势。当由 0.10 增至 0.15 时，强度由约 1 058 N/P 提升至 1 835 N/P；继续升至 0.20，强度下降。原因在于碱度升高促进液相生成，适量液相有利于黏结增强，但过量液相导致球团形变与黏结聚团，降低强度。因此，综合确定最佳碱度为 0.15。

由图 7(b)可知，在碱度为 0.15、预热时间为 15 min、焙烧温度为 1 300 ℃、焙烧时间为 15 min 条件下，当预热温度由 850 ℃升至 1 050 ℃时，强度同样表现为“先升后降”，在 950 ℃达峰值(由 1 835 N/P 升至 1 983.3 N/P)。温度偏低(≤900 ℃)时，结晶水/吸附水难以完全逸出，后续焙烧中快速挥发易致缺陷，强度偏低；温度过高(≥1 050 ℃)，则可能产生过早液相与结构形

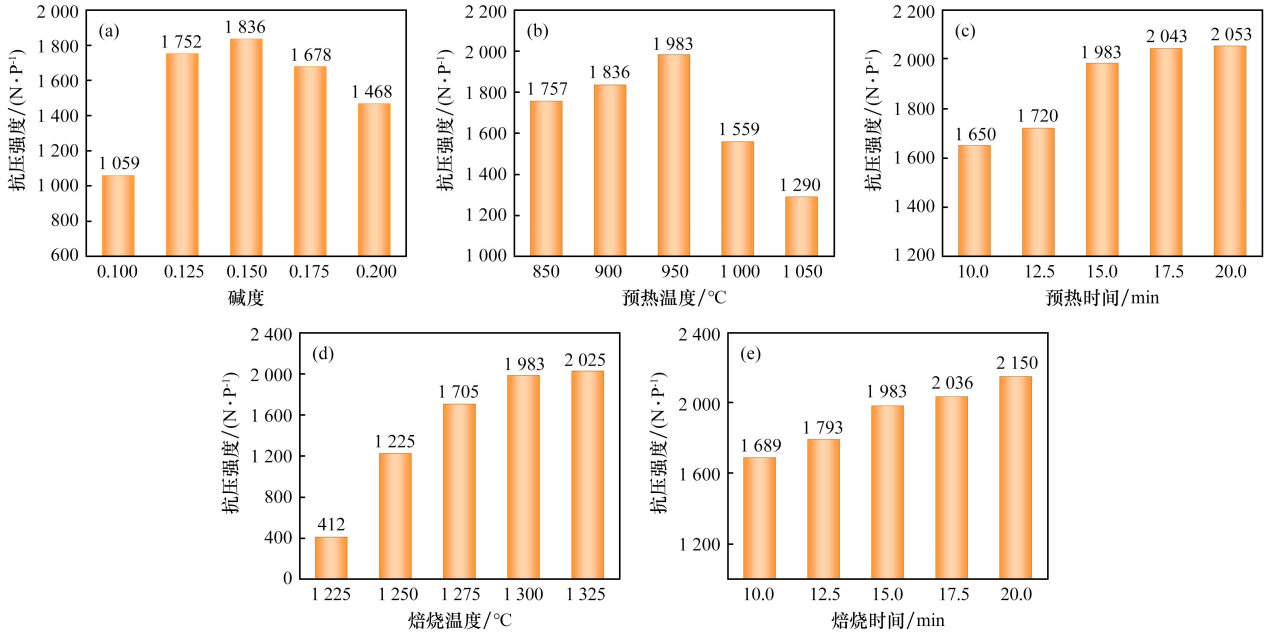



(a) 造球水分；(b) 造球时间；(c) 碱度

1—生球抗压强度；2—落下强度；3—干球抗压强度。

**图 6 造球参数对红土镍矿生球和干球强度的影响**

**Fig. 6 Effect of pelletizing parameters on the properties of nickel laterite green balls and dry balls**




（a）碱度；（b）预热温度；（c）预热时间；（d）焙烧温度；（e）焙烧时间

**图 7　预热－焙烧参数对氧化球团强度的影响**

**Fig. 7　Effect of preheating and roasting parameters on the strength of oxidized pellets**

变，抗压强度下降。因此，预热温度优选 950 ℃。

由图 7(c)可知，在碱度为 0.15、预热温度为 950 ℃、焙烧温度为 1 300 ℃、焙烧时间为 15 min 下，随预热时间延长，抗压强度先增后趋于稳定。当为 0.15，时间由 10 min 增至 17.5 min，抗压强度由约 1 650 N/P 升至 1 983 N/P；超过 15 min 增益有限，说明预热时间并非决定性参数，适度预热即可完成脱水与初始固相致密化。因此推荐预热时间为 15 min。

由图 7(d)可知，在碱度为 0.15、预热温度为 950 ℃、预热时间为 15 min、焙烧时间为 15 min 下，随焙烧温度升高，球团抗压强度总体增加；但在 1 225 ℃液相不足，强度仅约 412 N/P；至 1 325 ℃液相过多引起球团由球形向椭球形形变，强度反降。综合权衡，焙烧温度以 1 300 ℃为宜，强度约 1 983 N/P。

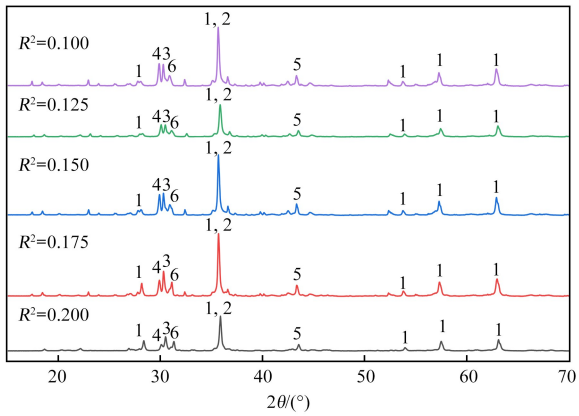
由图 7(e)可知，在碱度为 0.15、预热温度为 950 ℃、预热时间为 15 min、焙烧温度为 1 300 ℃条件下，随焙烧时间延长，强度小幅提升并趋于平稳。适当延长有利于固相扩散与反应完成，但超出 15 min 后提升有限。因此，推荐焙烧时间为 15 min。

综上所述，工艺推荐最佳处理参数：碱度为 0.15，预热温度为 950 ℃，预热时间为 15 min，焙烧温度为 1 300 ℃，焙烧时间为 15 min。此参数条件下，成品球团对应抗压强度约为 1 983 N/P。

## 2.3　红土镍矿球团固结机理

### 2.3.1　物相转变规律

红土镍矿球团氧化焙烧过程中物相转变与固结特性密切相关。不同碱度下球团的 XRD 分析结果如图 8 所示。




1—$Fe_2O_3$；2—$Fe_2NiO_4$；3—$CaMgSiO_4$；4—$CaMgSi_2O_6$；5—$(Mg,Fe)O\cdot Fe_2O_3$；6—$Mg_2SiO_4$。

**图 8　红土镍矿氧化焙烧过程物相转变**

**Fig. 8　Phase transformation during the oxidative roasting of laterite nickel ore**

由图 8 可知，红土镍矿氧化球团的主要物相

为赤铁矿($Fe_2O_3$)、透辉石($CaMgSi_2O_6$)、钙镁橄榄石($CaMgSiO_4$)、镁铁尖晶石[$(Mg,Fe)O\cdot Fe_2O_3$]和镁橄榄石($Mg_2SiO_4$)。随着二元碱度的增加，球团中透辉石、钙镁橄榄石衍射峰逐渐增强，镁橄榄石和顽火辉石等镁硅酸盐矿物的衍射峰降低。此外，在高温氧化焙烧条件下，红土镍矿中的 $Mg^{2+}$ 向 $Fe_2O_3$ 扩散势能增加，部分取代 $Fe_2O_3$ 中的 Fe 离子，生成了镁铁尖晶石[$(Mg,Fe)O\cdot Fe_2O_3$]。随着 CaO 的投入，其与 Si 和 Mg 等元素的氧化物反应生成钙镁橄榄石($CaMgSiO_4$)及其他硅酸盐相。

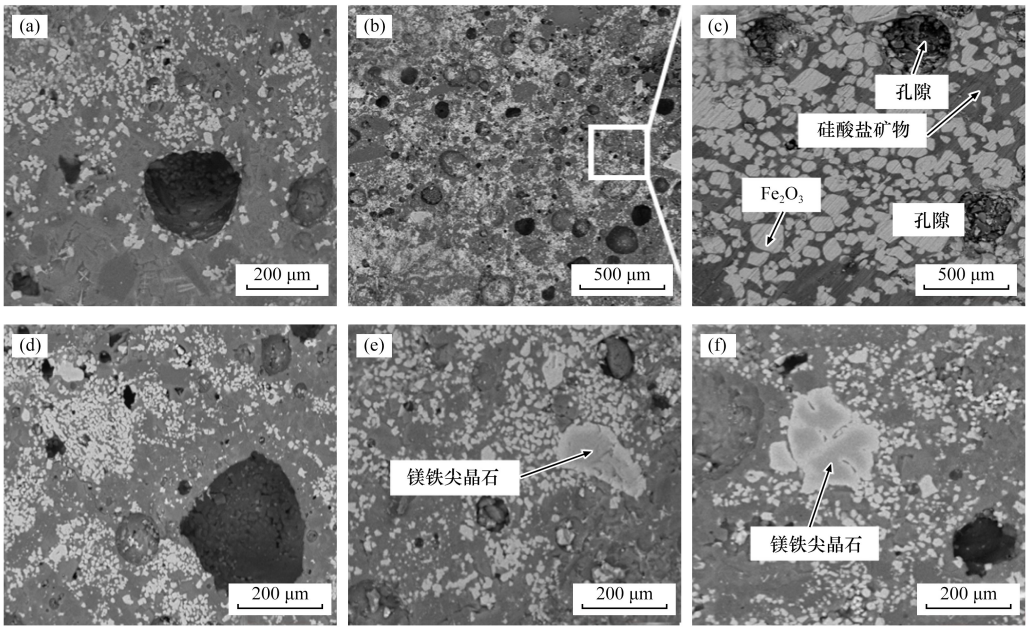
### 2.3.2 *微观形貌演变行为*

不同碱度下球团固结过程微区液相演变行为如图 9 所示。由图 9 可知：在低碱度下 MgO 等高熔点物相尚未析出，红土镍矿中针铁矿绝大部分氧化为赤铁矿，氧化铁颗粒在高碱度金属颗粒主要物相为镁铁尖晶石[$(Mg,Fe)O\cdot Fe_2O_3$]，大量 Mg 元素从红土镍矿向赤铁矿扩散，扩散形成镁铁尖晶石，镁铁尖晶石的形成阻碍了赤铁矿的氧化再结晶，不利于球团抗压强度的提高；红土镍矿液相组成主要是由于钙镁橄榄石、透辉石以及镁橄榄石组成，其中钙镁橄榄石含量最多，填充于镁橄榄石之间的缝隙中，而赤铁矿则存在于玻璃质中，由于红土镍矿中 $Fe_2O_3$ 含量较少，$Fe_2O_3$ 晶体难以有效联结长大，因此该部分固结强度差。

不同焙烧温度下球团固结过程液相演变机制如图 10 所示。由图 10 可知，当温度低于 1 225 ℃时，球团内 $Fe_2O_3$ 晶粒与脉石相反应性较差，可观察到连晶固结的 $Fe_2O_3$ 晶粒及未发生明显反应的石英，此时整体固结性能较低。当焙烧温度升至 1 250 ℃时，部分低熔点物相逐渐形成微区液相，液相不断流动、润湿赤铁矿、镁铁尖晶石及硅酸盐相，其中部分脉石相被溶解，随着微区液相的合理分布，固相颗粒逐渐被拉紧，球团孔隙率不断降低，固结性能也逐渐改善当焙烧温度在继续升高时，球团内孔隙结构变得圆滑，壁厚增加，固结性能提升，球团抗压强度增大。当温度升高至 1 300 ℃以上时，部分孔隙相互融合形成体积更大的贯穿孔，一些小孔隙结构融合变大，玻璃相无法充分填充球团内孔隙，固相间的连接桥结构被破坏，导致球团发生形变和黏结，固结性能恶化，球团强化下降。

## 3 结 论

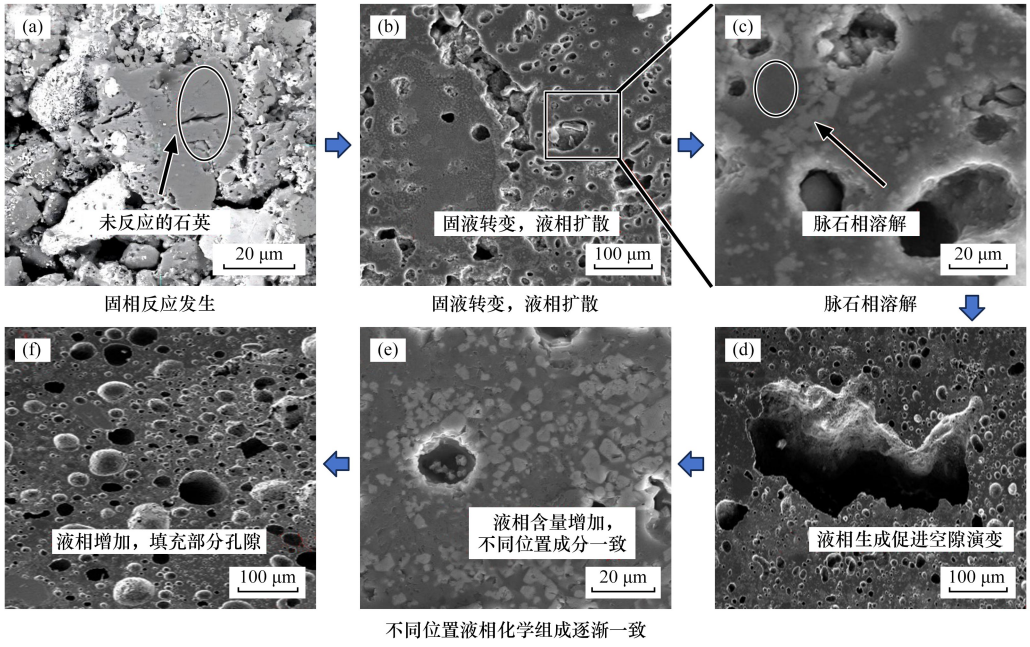
(1) 腐殖土型红土镍矿具有较好的亲水性和持水能力，适宜造球水分为 22% 左右，适宜造球时间为 16 min；在该条件下，生球抗压强度为




碱度：(a) 0.10；(b) 0.125；(c) 0.125 局部放大；(d) 0.15；(e) 0.175；(f) 0.20

**图 9 碱度对球团微观形貌的影响**

**Fig. 9 Effect of alkalinity on the microstructure of pellets**




焙烧温度/℃：(a) 1 225；(b) 1 250；(c) 1 250 局部放大；(d) 1 275；(e) 1 300；(f) 1 325

**图 10　焙烧温度对氧化球团微观形貌的影响**

**Fig. 10　Effect of roasting temperature on the microstructure of oxide pellets**

16.0 ~ 16.5 N/P，干球抗压强度为 185 ~ 190 N/P。

（2）红土镍矿氧化球团的适宜制备参数：$R$ 为 0.15、预热温度为 950 ℃、预热时间为 15 min、焙烧温度为 1 300 ℃、焙烧时间为 15 min。在该制度下，成品球团抗压强度约为 1 983 N/P，可满足后续入炉使用要求。

（3）红土镍矿氧化球团主要由 $Fe_2O_3$、$CaMgSiO_6$、$CaMgSiO_4$、$[(Mg,Fe)O\cdot Fe_2O_3]$ 和 $Mg_2SiO_4$ 组成，其固结方式以硅酸盐液相黏结为主、$Fe_2O_3$ 再结晶和镁铁尖晶石固相固结为辅；合理调控 $R$ 和焙烧温度可促进适量低熔点黏结相形成，强化球团固结。

## 参考文献：

[1] 田宏宇. 节镍奥氏体不锈钢母液短流程制备工艺与协同机制研究[D]. 长沙:中南大学,2022.
TIAN Hongyu. Research on preparation of nickel saving austenite stainless steel master alloy in a compact process and its synergistic mechanism[D]. Changsha: Central South University,2022.

[2] 余建文,郭壹泽,王家奇,等. 红土镍矿开发利用研究现状与前景展望[J]. 矿冶工程,2025,45(3):142 – 150.
YU Jianwen,GUO Yize,WANG Jiaqi,et al. Development status and prospects of lateritic nickel ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2025,45(3):142 – 150.

[3] 朱德庆,田宏宇,潘建,等. 低品位红土镍矿综合利用现状及进展[J]. 钢铁研究学报,2020,32(5):351 – 362.
ZHU Deqing, TIAN Hongyu, PAN Jian, et al. Comprehensive utilization status and progress of low-grade laterite nickel ore[J]. Journal of Iron and Steel Research,2020,32(5):351 – 362.

[4] 王晓平. 低品位红土镍矿不同利用工艺的反应机理及应用研究[D]. 北京:北京科技大学,2019.
WANG Xiaoping. Reaction mechanism and application of different utilization processes of low-grade laterite nickel ore[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2019.

[5] LIU P J, LIU Z G, CHU M S, et al. Multiobjective collaborative optimization of novel carbothermal reduction process of stainless steel dust and laterite nickel ore[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023,33(6):1919 – 1931.

[6] 孙金洋,郑晓洪,孙峙,等. 红土镍矿还原焙烧技术研究进展[J]. 化工进展,2026,45(4):2379 – 2391.
SUN Jinyang,ZHENG Xiaohong,SUN Zhi,et al. Progress on reduction roasting technology of laterite[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2026,45(4):2379 –

2391.

[7] TIAN H Y, CHU M S, PAN J, et al. Smelting characteristics of nickel-chromium-manganese bearing prereduced pellets for the preparation of nickel saving austenite stainless steel master alloys[J]. Powder Technology,2024,441:119862.

[8] HU Z C, WANG J L, XUE Z L, et al. The carbothermic reduction behaviour of saprolitic laterite nickel ore and the enhancement mechanisms of selective nickel reduction induced by CaO and $CaF_2$ incorporation[J]. Journal of Materials Research and Technology,2025,38:392 - 405.

[9] 朱德庆,曹文,杨聪聪,等. 红土镍矿球团制备特性及其强化 RKEF 工艺的可行性分析[J]. 钢铁,2025,60(6):26 - 35.
ZHU Deqing, CAO Wen, YANG Congcong, et al. Preparation characteristics of laterite nickel ore pellets and feasibility analysis of its use for enhancement of RKEF process[J]. Iron & Steel,2025,60(6):26 - 35.

[10] 郭正启,詹若宁,朱德庆,等. 铁矿粉球团烧结试验研究[J]. 烧结球团,2022,47(1):87 - 94.
GUO Zhengqi, ZHAN Ruoning, ZHU Deqing, et al. Experimental study on iron ore powder pelletizing sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1): 87 - 94.

[11] 刘雅婧. 碱度对球团固结行为及还原膨胀的影响机制[D]. 长沙:中南大学,2022.
LIU Yajing. Influence mechanism of basicity on consolidation behavior and reduction swelling mechanism of pellets[D]. Changsha:Central South University,2022.

[12] LI Z Z, LI Y F, DUAN Y S, et al. Study on the basic characteristics of iron ore powder with different particle sizes[J]. Minerals,2022,12(8):973.

[13] 黄菲,王鑫宇,闻昕宇,等. 低铁赤泥混熔体系中镁铁尖晶石生长的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2023,44(6):849 - 855.
HUANG Fei, WANG Xinyu, WEN Xinyu, et al. Research on magnesioferrite growth in the mixed melting system of low-iron red mud[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2023,44(6):849 - 855.

[14] 马黎明. 中高硅熔剂性球团液相生成及结晶机理研究[D]. 北京:北京科技大学,2025.
MA Liming. Study on the liquid phase formation and crystallization mechanism of medium-high silica fluxed pellets[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2025.

[15] 姜文政,谢路奔,项思敏,等. 复合黏结剂球团的制备与固结机制[J]. 烧结球团,2025,50(4):56 - 63.
JIANG Wenzheng, XIE Luben, XIANG Simin, et al. Preparation and consolidation mechanism of composite binder pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2025, 50(4):56 - 63.

[16] 韩涛,杨大兵,王炜,等. 不同粒度条件下铁矿球团性能及工艺条件优化[J]. 烧结球团,2025,50(3):78 - 86.
HAN Tao, YANG Dabing, WANG Wei, et al. Optimization of iron ore pellet performance and process conditions under different particle size conditions[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(3):78 - 86.

[17] 王英春,胡启晨. 熔剂性球团低温还原粉化问题解析[J]. 烧结球团,2024,49(4):70 - 76.
WANG Yingchun, HU Qichen. Analysis of low temperature reduction pulverization of fluxed pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(4):70 - 76.

[18] 汤正怡,刘国栋,钟林涛. 不锈钢酸洗污泥对氧化球团质量的影响[J]. 烧结球团,2024,49(3):89 - 96.
TANG Zhengyi, LIU Guodong, ZHONG Lintao. Influence of stainless steel pickling sludge on mass of oxidized pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(3): 89 - 96.

[19] 李振铠,高冰,贾彬,等. 粒度对熔剂性球团冶金性能及矿相结构的影响[J]. 烧结球团,2024,49(2):59 - 64.
LI Zhenkai, GAO Bing, JIA Bin, et al. Effect of particle size on metallurgical properties and mineral phase structure of fluxed pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2024,49(2):59 - 64.

[20] 李绍春,程福超,王兴锋,等. $Fe_2O_3$ 对高硅碱性球团固结性能的影响[J]. 烧结球团,2024,49(1):80 - 86.
LI Shaochun, CHENG Fuchao, WANG Xingfeng, et al. Influence of $Fe_2O_3$ on consolidation properties of high silica alkaline pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2024,49(1):80 - 86.

[21] 韩振. 含铬镍铁矿氧化球团的固结机理研究[D]. 贵阳:贵州大学,2024.
HAN Zhen. Study on the consolidation mechanism of chromium- and nickel-bearing iron ore oxidized pellets [D]. Guiyang:Guizhou University,2024.