专家论坛

高比例铁精矿烧结高配比活性生石灰作用机理与工艺优化

周明顺[1,2],李志斌[3],佟琳[4],孟昕阳[5],孟超惠[6],冯清裁[6],姜喆[1,2]
(1.海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室,辽宁 鞍山 114009;
2.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009;3.鞍钢股份有限公司烧结厂,辽宁 鞍山 114001;
4.鞍钢集团矿业有限公司东鞍山烧结厂,辽宁 鞍山 114041;5.鞍钢集团北京研究院有限公司,
北京 102200;6.鞍钢股份有限公司制造管理部,辽宁 鞍山 114021)

摘要: 高比例铁精矿烧结常面临透气性差、制粒性差及液相生成不足等问题。研究表明,提高活性生石灰的配比能显著强化该烧结过程。系统研究了上述问题,并从理论与实践两方面,阐明了高配比活性生石灰改善烧结性能的作用机理。活性生石灰凭借其高比表面积与强反应活性,可快速消化放热,从而有效抑制过湿层效应、提升混合料温度、优化制粒结构;同时,它能在较低温度下促进铁酸钙及复合铁酸盐等关键液相矿物的生成,进而提高烧结矿的机械强度。结合鞍钢本部的烧结生产实践,进一步提出了应用高配比活性生石灰的工艺优化路径。研究结果可为高比例铁精矿的稳定高效烧结提供理论依据与技术指导,对推动钢铁行业的节能降耗与绿色冶金工艺升级具有重要意义。

关键词: 铁矿石烧结;高比例铁精矿;活性生石灰;作用机理;工艺优化
中图分类号: TF046 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)01-0001-11
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.01.001

Mechanism and Process Optimization of High-proportion Active Quicklime in High-proportion Iron Ore Concentrate Sintering

ZHOU Mingshun[1,2], LI Zhibin[3], TONG Lin[4], MENG Xinyang[5],
MENG Chaohui[6], Feng Qingcai[6], JIANG Zhe[1,2]
(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. Sintering Plant of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China; 4. Donganshan Sintering Plant of Ansteel Group Mining Co., Ltd., Anshan 114041, Liaoning, China; 5. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China; 6. Department of Manufacture Management of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China)

Abstract: The sintering of high-proportion iron ore concentrate is often plagued by such as poor permeability, inadequate granulation and insufficient liquid phase formation. The result showed that increasing the proportion of active quicklime could significantly enhance the sintering process. The problems mentioned above were systematically investigated and the mechanism by which a high-proportion of active quicklime improved sintering performance was explained in both theory and practice. Due to its high specific surface area and strong reactivity, active quicklime could quickly hydrate and release heat, thereby effectively suppressing the over-wet layer effect, increasing the

周明顺,博士,教授级高级工程师,鞍山钢铁首席专家,主要从事烧结球团与高炉炉料结构研发工作。E-mail:zms4652@163.com

mixture temperature, and optimizing the granulation structure. Simultaneously, it could promote the formation of key liquid phase minerals such as calcium ferrite and composite ferrites at lower temperatures, consequently improving the mechanical strength of the sinter. Based on sintering production practices at Ansteel's main plant, a process optimization path for applying a high-proportion of active quicklime was further proposed. The research results can provide a theoretical basis and technical guidance for stable and efficient sintering under high-proportion iron ore concentrate conditions, which is of great significance for advacing energy conservation, consumption reduction, and the upgrade of green metallurgical processes in the steel industry.

Key words: iron ore sintering; high-proportion iron ore concentrate; active quicklime; mechanism; process optimization

随着钢铁产业的不断发展，优质铁矿石资源正在枯竭，经贫矿细磨分选后得到的品位高、杂质少、粒度细的铁精矿逐渐成为烧结原料[1]。铁精矿具有粒度细、比表面积大、脉石含量低的特点，这虽在化学组成上有利于提高烧结矿铁品位，却在工艺层面带来了透气性下降[2]、液相不足[3]、成球性能差[4]等问题。特别是在高比例铁精矿条件下，混合料的透气性会显著恶化，料层气-固传质过程受阻、燃烧带推进速度减缓、料层温度分布不均等现象显著，导致烧结速度慢、燃料消耗高、烧结矿强度不均等问题，成为制约高效、低耗烧结生产的关键技术瓶颈。因此，如何在保持烧结矿冶金性能的同时，实现高比例铁精矿的稳定烧结，已成为钢铁企业技术攻关的一个关键问题[5-7]。

为改善高比例铁精矿烧结过程中透气性差、制粒性差和液相生成不足等问题，业界提出了多种强化途径，包括优化粒度结构[8]、外裹制粒[9]、预干燥强化[10-11]等。其中，高配比活性生石灰被认是一种兼具化学与物理强化作用的系统性解决方案。与传统石灰石或普通生石灰不同，活性生石灰具有晶粒细小、孔隙率高、比表面积大、反应活性强等特征，其在烧结混合料中的消化放热效应不仅能有效抑制过湿层形成[12-13]，还能显著提高混合料温度和成球质量[14]。同时，高活性生石灰与Fe_2O_3、SiO_2等组分间的反应速率更快，有助于在较低温度下生成黏结性更强的铁酸钙及复合铁酸盐等液相矿物[15]，从而改善烧结矿的结构致密性。然而，活性生石灰比例的提高也带来了一系列新的挑战：其强烈的消化反应对混合时间、水分控制及热平衡要求更高，若控制不当，容易造成局部结块、料层温差增大、制粒过度或不均匀等问题。因此，实现高配比活性生石灰的高效利用，必须依托于系统性的原料、工艺与设备优化。

本文系统分析高比例铁精矿烧结中存在的主要问题及其机理，重点阐述高配比活性生石灰在改善烧结透气性、强化制粒、促进矿相形成等方面的作用机制，并结合鞍钢本部烧结工艺现状，提出提高活性生石灰配比的具体工艺优化措施，以期为高比例铁精矿烧结的工艺升级与节能降耗提供理论依据与技术参考。

1 理论基础与作用机理

1.1 高比例铁精矿烧结存在的问题及原理

1.1.1 透气性变差

高比例精矿会改变烧结料层的透气性。铁精矿颗粒粒度普遍较细，粒度分布-200目(< 0.074 mm)的比例通常超过80%，甚至很多在95%以上[8,16]。细颗粒导致其在混合料中的比表面积增大，孔隙率显著降低。研究表明，烧结料层的透气性指数与混合料中粒度组成和颗粒结构密切相关，相同制粒水分情况下，随着铁精矿比例的增加，气体流速显著下降，烧结料层透气性明显变差[2]。烧结过程中，料层初始水分高，下行热气流在料层下部冷凝，形成严重的过湿带，导致物料充水塌陷，垂直烧结速度减慢，透气性下降[7]。

高比例铁精矿导致料层透气变化对烧结矿特性有重大影响[17]，料层透气性差时，燃烧带中的气体传递不畅，燃烧带推进速度减慢，局部料层出现欠烧和过烧的不均匀现象，进而影响烧结矿性能。周卫等[4]研究指出，随着铁精矿比例的增加，烧结矿转鼓强度明显下降，同时固体燃料消耗量也随之增加。贺淑珍等[18]对太钢自产铁精矿烧结性能

的研究表明，精粉率提高到72%时，烧结矿利用系数降低了8.6%，转鼓强度下降了3%。同时，铁精矿比例增加不仅限制了烧结机的生产能力，还可能增加下游高炉操作的不稳定性。有研究证明，随着铁精矿比例的提高，烧结倒运过程中小粒径级数量增多，不利于烧结矿的固结，烧结矿筛分指数增加，平均粒度下降，不利于改善高炉块状带的透气性[19]。

1.1.2 制粒效果恶化

制粒是烧结生产的核心环节之一，其主要依靠毛细力的紧密作用，毛细水迁移速率高则成球速率快，而毛细水迁移速率受到铁精矿表面性质影响较大。铁精矿颗粒表面光滑、结构致密[20]，这种表面特性表现出表观上的过度湿润与本质上的有效润湿性差并存的特点[21]，既难自身成球，也不易黏附在其他矿物颗粒上，显著恶化制粒效果。朱德庆等[22]在超细铁精矿成球性能的研究中指出，超细粒铁精矿比表面积高达2 254 cm^2/g，亲水性能较差，静态成球性指数仅为0.24，无法满足生产要求。朱旺等[23]的研究表明，随着精矿比例的提高，单核+黏附颗粒结构小球占比较低，单纯黏附颗粒黏结形成的无核小球和多核+黏附颗粒结构的小球占比提高，从而导致干燥过程中水分蒸发进而明显提高干燥脱粉率。

在高比例铁精矿的制粒过程中，为保证成球率通常需要较高的水分。然而，其适宜的水分窗口较窄，极易出现水分过高的情况，从而导致过湿带增厚，料层阻力增加，气流流通受阻，烧结速度明显下降。下层因热量不足，难以完成余热利用和干燥过程；上层则由于燃烧带熔融物的聚集，以及干燥预热带中球粒破裂的加剧，使料层阻力进一步上升，透气性继续恶化。因此过湿带将持续扩展，层内温度难以升至露点以上，最终可能引起烧结熄火，造成烧结过程停滞[3]。此外，铁精矿的矿物组成（主要为赤铁矿和少量磁铁矿）在制粒过程中与石灰石、返矿等颗粒的结合能力较差，球粒间结合力不足，使得在点火加热时，球粒容易塌陷或破碎，不仅降低了烧结矿成品率，还增加了返矿率，导致生产成本上升。

1.1.3 液相生成不足与矿相结构劣化

烧结过程中，黏结剂与熔剂在高温下反应生成烧结低熔点液相，液相在颗粒间润湿并促进固相间的黏结与晶相生长，形成烧结黏结相，黏结相对烧结矿的冶金性能具有重要影响。脉石材料是影响黏结相形成的重要因素[24]，铁精矿中的脉石成分较少，尤其是SiO_2、CaO等助熔组分不足，导致在烧结过程中液相生成量不足，烧结矿中不能形成稳定的骨架结构，强度下降。宋鹤锴等[25]的研究表明，随着混匀矿中赤铁精粉比例的增大，黏附粉偏析碱度降低，黏附粉液相流动性逐渐降低。液相不足会抑制黏结相（主要是铁酸钙、硅酸钙等）的生成，烧结矿内部结合力不足，增加粉化率。贺淑珍等[8]采用XRD检测发现，随着精矿比例的提高，磁铁矿衍射峰呈增强趋势，铁酸钙和赤铁矿的衍射峰呈减弱趋势，光学显微镜结果也表明，黏结相总量（铁酸钙+硅酸盐）含量随着精矿比例的增加而降低。肖志新等[26]的研究表明，粒级细小的精矿粉在烧结过程中对黏结液相的形成和行为具有重要影响，低致密度的粗粒级矿更有利于在大颗粒矿粉表面形成液相侵入层。

液相是铁矿粉烧结造块的基础，液态物质的性质和数量很大程度上决定烧结矿的固结强度高低以及烧结矿冶金性能的优劣[27]。复合铁酸钙（$CaO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$，简称SFCA）是高碱度铁矿石烧结过程中最主要的黏结相[28]，在矿相结构中起到黏结氧化铁和硅酸盐相的作用[24,29]。它主要有两种结构形态，一种是板片状或柱状，另一种呈针状。通常针状铁酸钙胶结形成的烧结矿往往具有更好的还原性和冷态强度[30-31]。同时，液相量是烧结矿转鼓强度的核心因素[32]，液相体系主要由碱度和SiO_2含量决定，碱度1.9~2.2、SiO_2含量5.2%~5.5%时，针状四元铝硅铁酸钙SFCA分布广，液相量多，转鼓强度高，冶金性能好。

1.2 高比例活性生石灰的作用机理

1.2.1 活性生石灰概念及其配比层次

生石灰是烧结生产的主要熔剂，生石灰组成中有游离氧化钙和结合氧化钙，游离氧化钙中又包括活性氧化钙和非活性氧化钙。在普通消解条件下，非活性氧化钙不能同水发生反应，而活性氧化钙能与水快速发生反应。游离的氧化钙总量中活性氧化钙的数量代表了生石灰的反应能力[33]。活性生石灰的特点是活性氧化钙含量高，相比普通的生石灰，活性生石灰具有晶粒细小、样品孔隙度高、体积密度小、比表面积大等优点[12]。

在铁矿石烧结生产中,生石灰配比是指生石灰占烧结综合料(包括铁料、熔剂和固体燃料)的比值,高配比生石灰并没有一个绝对统一的、固定的数值标准,因为它依赖于工厂的原料条件、工艺装备水平和操作理念。根据行业技术实践,生石灰配比可划分为3个配比层次:(1)常规配比:配比通常较低,一般在3%~5%,即传统模式,使用石灰石($CaCO_3$)作为主要熔剂,生石灰主要起辅助制粒和预热料球的作用,工艺改进效果有限;(2)中等偏高配比:5%~8%,这是一个常见的优化区间,国内许多烧结厂通过将生石灰配比提升至这个水平,能显著观察到透气性改善、燃料比下降和产量提升的效果;(3)高配比:≥8%,当生石灰配比达到8%以上时,通常可以被认为是高配比或大剂量配加,即高配比生石灰烧结。一些先进的烧结厂,尤其是在处理高比例细粒级铁精粉(如100%磁铁矿)时,生石灰配比甚至可以达到10%~12%的高配比模式,以生石灰作为主要甚至唯一的熔剂来源,达到彻底改善混合料透气性、实现厚料层低能耗烧结的目的。鞍钢股份有限公司烧结厂生石灰配比长期在4.5%~5.5%,尚有较大的提升空间,远未达到高配比(≥8%)活性生石灰烧结。

1.2.2 对抗过湿层效应

活性生石灰通过煅烧石灰石得到,具有多孔、比表面积大、反应活性强、与水反应速度极快并形成凝胶状$Ca(OH)_2$胶体的特点,胶体在烧结混合料中充当黏合剂,放热剧烈。铁精矿超大的比表面积和亲水性会导致烧结料层中的水分迁移并聚集在预热段,形成一个透气性极差的过湿层,这是制约烧结机速度和质量的关键瓶颈。而活性生石灰的消化反应:$CaO+H_2O\rightarrow Ca(OH)_2$+热量,会大量放热并消耗水分。在80 kg上料量中配入5%的生石灰,可使料温提高10 ℃左右[34]。因此配加高比例活性生石灰可以显著提高混合料温度(60~70 ℃以上),并提前消耗掉部分水分,从而极大地减薄甚至消除过湿层,从根本上改善料层下部透气性。李占国[12]研究发现,高活性生石灰烧结生产时,大水分配加使得透气性较差的过湿带厚度明显增加,其实验结果表明,混合料料温需满足62 ℃以上才能实现抑制过湿带的作用,同时,随着高活性石灰配比的增加,脱粉率改善使得混合料在干燥带的透气性能良好。贺淑珍等[9]通过生石灰外裹强化微细精矿粉烧结,实验结果表明,当生石灰外裹比例为19.5%时,垂直烧结速度和利用系数最佳。张展雷等[13]研究表明,在原料黏结性较差的情况下,增加生石灰和轻烧白云石配比能显著改善混合料的透气性,同时增大生石灰的活性度。周卫等[7]研究结果表明,生石灰消化形成的$Ca(OH)_2$胶体显著改善了铁精矿的透气性,在高比例铁精矿中增加生石灰配比将混合料透气性指数由35.1 m/min增至41.7 m/min,>3 mm粒径的质量分数由56.11%提高到76.41%。

1.2.3 优化制粒效果

虽然细粒铁精矿自身易于成球,但形成的母球强度低、脆性大,在皮带输送和点火时容易破碎、产生粉末,重新恶化透气性。而生石灰消化后形成的$Ca(OH)_2$胶体,其表面积达30×10^4 cm^2/g,比消化前增大接近100倍[34],具有优异的黏性,图1为$Ca(OH)_2$胶体颗粒结构示意图[35]。

$Ca(OH)_2$胶体表面的水化膜可以夺取矿石表

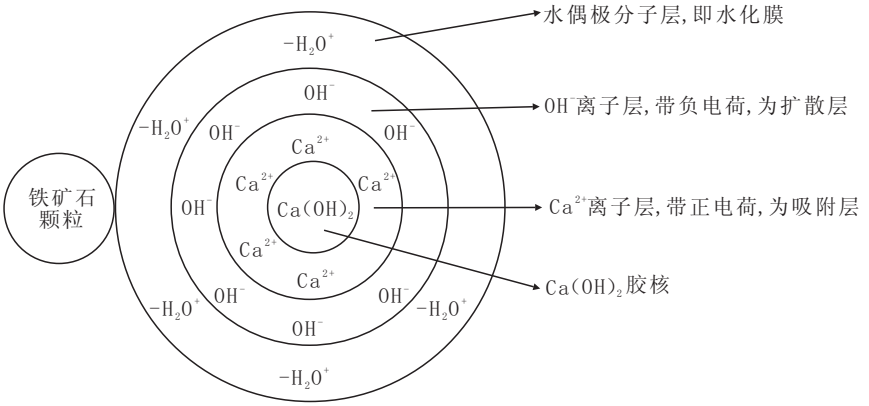


图1 $Ca(OH)_2$胶体颗粒结构示意图[35]

Fig. 1 Structure Diagram of $Ca(OH)_2$ Colloidal Particles[35]

面和颗粒间的水分，产生毛细力，在毛细力的作用下将矿石和其他物料黏结起来形成小球。另外，$Ca(OH)_2$胶体较大的比表面积且吸附大量的水分而不失去物料的疏散性，一定程度上提高了母球的机械强度和热稳定性，小球在后续工序中不易破碎，保持料层良好的透气性。

龚艺杰等[36]进行不同活性度生石灰烧结试验研究，结果表明，生灰石活性度越高，强化制粒效果越好，烧结时间变短，烧结速度与烧结利用系数相应提高。杨永斌等[14]通过烧结杯试验研究了不同活性度生石灰在烧结中的作用效果，结果表明，添加5%高活性度生石灰，烧结成品率为73.65%，转鼓强度为66.67%，燃烧速度为22.95 mm/min，利用系数为1.47 t/(m^2·h)，固体燃耗55.66 kg/t。

1.2.4 促进液相生成与矿相形成

生石灰作为烧结主要的碱性氧化物来源，其活性与比例直接决定了烧结过程液相的数量、黏度和分布，从而影响铁酸钙、硅酸钙铁、复合铁酸盐等矿相的形成。高活性度生石灰比表面积大，晶格缺陷浓度高，能够与Fe_2O_3、SiO_2等组分实现分子级别的紧密混合，极大地缩短了物质扩散的距离并加快固相反应速率。在烧结过程中，CaO与Fe_2O_3反应生成铁酸一钙(CF)，其熔点约为1 216 ℃；CF与Fe_2O_3进一步形成的低共熔混合物熔点显著低于硅酸钙和硅酸铁等体系。这意味着高活性CaO的加入能够降低液相形成所需的温度[37]，使得在较低的烧结温度下即可获得充足且流动性良好的液相。形成的铁酸钙液相不仅数量增加，而且黏度降低、润湿性增强，有利于液相对未熔铁矿颗粒(如赤铁矿、磁铁矿)的包裹与连接。在没有CaO或CaO不足的情况下，FeO和SiO_2倾向于生成低熔点但机械性能差的铁橄榄石($2FeO·SiO_2$)，同时生成的硅酸钙(尤其是C_2S)在冷却时会发生晶型转变，导致体积膨胀和烧结矿粉化[38]。而在CaO充足的情况下，CaO优先与SiO_2反应[39]生成稳定的硅酸钙(如$CaO·SiO_2$, $2CaO·SiO_2$等)，从而抑制铁橄榄石的生成；同时，在铁酸钙液相充足的环境中，C_2S可以溶解在铁酸钙液相中或被其包裹[28]，避免晶型转变造成的不利影响。随后在冷却阶段，充足的铁酸钙液相促使针状或板条状铁酸钙大量析出，与其他矿物颗粒共同构成致密、均匀的网状结构[11]，显著提高了烧结矿的机械强度与高温性能。由此可见，高活性度生石灰通过加速固相反应、促进铁酸钙液相生成及优化矿相结构，系统性地强化了烧结过程的液相与矿相生成特征。大量研究[14-15,40]表明，使用高活性度生石灰后，铁酸钙矿物相为针状或枝晶状，以网状结构与赤铁矿和磁铁矿颗粒紧密交织，使其内部结构均质紧密。

综上，在高比例铁精矿烧结体系中，活性生石灰通过物理与化学作用的协同，成为优化烧结过程的关键。其核心作用机理可归结为以下两个方面：

(1) 物理改善机制。活性生石灰凭借其高比表面积所赋予的强吸湿性与胶凝性，在制粒过程中作为高效的物理黏结剂，显著提升了细粒铁精矿的成球性能与粒度分布，从而从根本上改善了烧结料层的透气性。

(2) 化学优化机制。作为高活性熔剂，其高反应活性显著降低了烧结液相生成的起始温度(如同化性温度测试所示)。更为重要的是，其较宽的同化反应区间保证了液相生成的平稳与持续，这在动力学上有利于促进以铁酸钙(SFCA)为主导的黏结相体系的发育与结晶。这种黏结相以其高强度和优异性著称。因此，活性生石灰的应用，实质上是从动力学(反应进程)和热力学(反应驱动)两个层面协同优化了烧结过程的能量利用与矿物转变路径，最终为获得高强度、高还原性及优良冶金性能的烧结矿奠定了微观结构基础。

2 生灰石活性度对铁精矿烧结特性的影响

2.1 原料成分分析及试验方法

本研究所用原料为铁精矿(工业实际生产所用混合矿)、石灰石及不同活性度生石灰，原料主要化学成分及烧损如表1所示。

由表1可见，原料主要成分包括TFe、FeO、SiO_2、CaO、MgO、Al_2O_3及其他微量元素，石灰石和生石灰的CaO含量差异明显。其中低活性度生石灰的活性度为186 mL，高活性生石灰的活性度为352 mL。针对不同活性度与形态的钙质原料配料对烧结性能的影响，本研究开展了以下试验与分析。

(1) 同化性温度测定

同化性温度是评价石灰石与铁矿在烧结过程中生成矿物黏结相能力的重要指标。本研究中同化性温度的测定参考行业标准YB/T 6256—2024

表1 原料主要化学成分(质量分数)及烧损

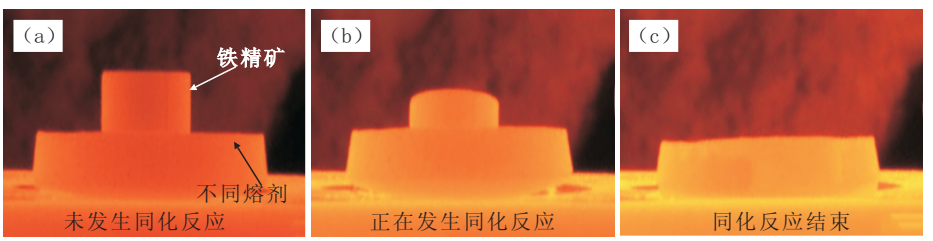
Table 1 Main Chemical Composition (Mass Fraction) of Raw Materials and Burning Loss %

原料	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	P_2O_5	LOI
铁精矿	64.09	14.63	5.18	0.53	0.45	1.12	0.033	0.100	0.83
石灰石	0.73	0.90	4.29	49.14	2.83	0.95	0.042	0.039	41.34
低活性度生石灰	0.27	<0.30	2.47	70.13	1.89	0.58	0.081	<0.010	24.40
高活性度生石灰	0.51	<0.30	2.35	81.72	3.06	0.73	0.016	<0.010	11.48

《铁矿石烧结基础特性的测定方法》[40]和GB/T 43877—2024《同化性温度测试方法》[41]，将行标中的CaO替换成实际工业生产中不同活性与形态的钙质原料配料。

本试验采用同化性温度测定法，以评估不同钙质原料的反应特性。具体方法为：将铁精矿与不同活性度及物相形态的钙质原料(如高/低活性度生石灰、石灰石及其混合料)制备成标准试样，置于高温显微镜或差热分析仪中程序升温。通过实时观测或热流监测，记录熔剂颗粒与铁氧化物开始发生明显液相反应(即同化反应)的开始温度(T_s)，以及反应趋于平衡或完成时的结束温度(T_e)，两者的差值即为同化性温度区间($\sigma_T = T_e - T_s$)。

起始温度(T_s)越低，表明该钙质原料的低温反应活性越强，能在烧结过程中更早地生成液相；而温度区间(σ_T)的宽窄则反映了同化反应的剧烈程度与持续特性。区间较宽通常意味着反应过程更为平缓，有助于形成分布均匀的黏结相。铁矿粉与不同钙质原料的同化反应过程示意图见图2所示。



(a) 1 251.0 ℃; (b) 1 293.2 ℃; (c) 1 312.1 ℃

图2 铁矿粉与不同钙质原料的同化反应过程示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Assimilation Reaction between Iron Ore Fines and Different Calcareous Materials

图2(a)展示了反应前的物理状态。铁氧化物颗粒(赤铁矿Fe_2O_3或磁铁矿Fe_3O_4)与细小的CaO颗粒紧密接触，这是发生同化化学反应的前提；图2(b)展示了随着温度升高，铁氧化物颗粒CaO与铁氧化物颗粒在接触界面发生固态扩散，开始形成最初的低熔点铁酸钙化合物，这个过程被称为同化，即两种不同的固体相互反应生成新相；图2(c)展示了当温度达到铁酸钙的共晶熔点时，在颗粒接触处会形成铁酸钙液相，该液相凭借良好的流动性，迅速包裹和润湿周围的铁氧化物颗粒。

(2) 黏结相强度测试

黏结相强度是决定烧结矿转鼓强度与成品率的关键，它表征了熔剂与铁矿石形成的液相冷却后黏结物料的牢固程度。本研究中黏结相强度的测定同样参考行业标准YB/T 6256—2024《铁矿石烧结基础特性的测定方法》中黏结相强度测试方法[42]。将铁精矿粉与不同活性与形态的钙质原料配料按碱度2.0混合、压坯后，在1 280 ℃下焙烧，并利用万能试验机测定烧结体的抗压强度，该值即为黏结相强度。

2.2 不同活性度与形态的钙质原料配料对同化性温度的影响

为系统探究钙质原料的活性度与物相形态对烧结过程同化行为的影响机制，本研究选取了五种典型钙质原料体系进行对比试验，包括：高活性度生石灰、低活性度生石灰、石灰石，以及两种不

同活性度的生石灰与石灰石按1:1质量比组成的混合料。不同活性度与形态的钙质原料配料的同化性温度相关参数测定结果如表2所示。

表2 不同活性度与形态的钙质原料配料的同化性温度相关参数测定结果

Table 2 Test Results of Relative Parameters for Assimilation Temperature of Calcareous Materials Formulation with Different Activity Degrees and Morphologies

原料	开始同化温度 T_s/℃	结束同化温度 T_e/℃	反应区间 σ_T/℃
石灰石	1 286.0	1 301.0	15.0
低活性度生石灰	1 200.2	1 247.7	47.5
高活性度生石灰	1 185.5	1 256.8	71.3
低活性度生石灰+石灰石	1 190.4	1 237.5	47.1
高活性度生石灰+石灰石	1 219.6	1 246.7	27.1

（1）开始同化温度分析

试验样品的开始同化温度由低到高依次为：高活性度生石灰（1 185.5 ℃）<低活性度生石灰+石灰石（1 190.4 ℃）<低活性度生石灰（1 200.2 ℃）<高活性度生石灰+石灰石（1 219.6 ℃）<石灰石（1 286.0 ℃）。这一序列清晰地表明：生石灰的活性度是决定其初始反应能力的核心因素。

高活性度生石灰因较高的比表面积与晶格缺陷密度表现出优异的低温反应活性。值得注意的是，当高活性度生石灰与石灰石混合后，其开始同化温度显著高于高活性度生石灰，甚至高于低活性度生石灰。这主要归因于石灰石（$CaCO_3$）在高温下需先经历吸热分解反应（$CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$），此过程消耗热量，从而延迟体系达到有效同化反应所需的温度。

（2）同化性温度区间与动力学特征

同化性温度区间反映了反应的剧烈程度与持续特性。高活性度生石灰的反应区间最宽（71.3 ℃），表明其同化反应启动平缓，但持续时间长，表现出温和而持续的反应动力学特性。相比之下，石灰石的反应区间最窄（15.0 ℃），这与其分解后新生成的高活性、多缺陷的CaO迅速与铁氧化物发生剧烈反应有关，表现出启动难，但一旦启动则迅速完成的特点。高活性度生石灰与石灰石的混合料呈现出独特的协同效应：其反应区间（27.1 ℃）较纯高活性度生石灰大幅缩窄。这表明石灰石的加入改变了单一原料的反应路径，其分解吸热过程不仅提高了反应起始点，也使得后续由高活性CaO主导的同化反应更为集中和快速。

（3）机理探讨与实际应用启示

综合分析表明，不同钙质原料的配加实质上是对烧结过程中液相生成温度窗口与反应动力学的主动调控。

高活性度生石灰能够有效拓宽低温反应区间，有利于生成分布均匀的黏结相，理论上可改善烧结矿的显微结构均匀性。石灰石的引入则通过其分解反应，消耗热量、提高局部CO_2分压并生成高活性中间产物，能够集中反应热，有利于形成局部高液相区，但对整体热平衡和透气性构成挑战。混合使用提供了一种折衷方案。例如，高活性度生石灰+石灰石组合实现了较高的开始温度与较快的反应速度，这种特性适用于需要快速形成高强度液相、同时控制烧结带过宽的特定工艺条件。

因此，在实际烧结生产中，可根据铁矿粉的同化特性、烧结机抽风能力及目标烧结矿冶金性能要求，通过科学复配不同活性度与形态的钙质原料，实现对同化过程起始温度、反应速率和热平衡的精准调控，为优化烧结工艺提供重要的理论依据。

2.3 不同活性度与形态的钙质原料配料对黏结相强度的影响

为探明钙质原料的活性度与物相形态对最终烧结矿关键力学性能的作用机制，本研究对比分析了不同钙质原料体系及其工业生产配矿方案下所生成黏结相的强度，结果如图3所示。

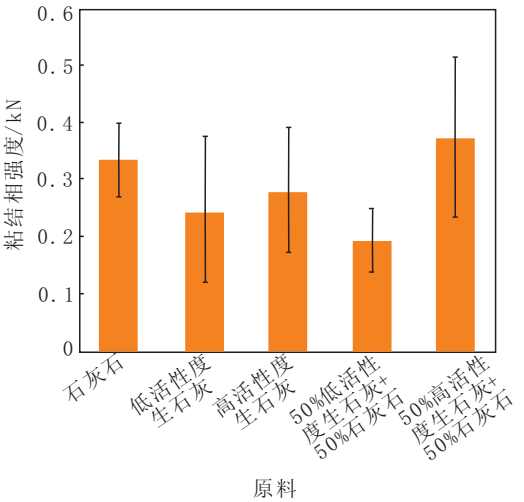


图3 不同活性度与形态的钙质原料配料对烧结黏结相强度的影响

Fig. 3 Influence of Calcareous Materials Formulation with Different Activity Degrees and Morphologies on Strength of Sinter Bonding Phase

分析图3数据可知,不同钙质原料制备的黏结相强度存在显著差异,从高到低依次为:50%高活性度生石灰+50%石灰石(0.374)>石灰石(0.335)>高活性度生石灰(0.282)>低活性度生石灰(0.248)>50%低活性度生石灰+50%石灰石(0.193)。这一排序表明,黏结相强度并非简单地与原料的初始化学活性度正相关,而是取决于其在烧结高温过程中形成的液相特性,该特性受原料的同化行为(起始温度、反应区间)所控制。

(1)单一原料的强度表现与机理分析

高活性度生石灰虽具有最低的开始同化温度(1 185.5 ℃)和最宽的反应区间(71.3 ℃),能早期、平缓地生成液相,有利于形成均匀的显微结构,但其单独使用时的黏结相强度(0.282)并非最高。这可能是因为其过宽的反应区间导致液相生成过于分散,局部液相量相对不足。

石灰石的开始同化温度最高(1 286.0 ℃),反应区间最窄(15.0 ℃),但其单独使用时却获得了较高的黏结相强度(0.335)。这主要归因于石灰石($CaCO_3$)高温分解后,新生成了具有高微孔率、大比表面积和丰富晶格缺陷的CaO。这种新生CaO活性极高,能迅速与铁氧化物发生剧烈同化反应,在短时间内生成大量、集中的高黏度液相,从而形成致密高强的黏结网络。

低活性度生石灰因反应活性不足,同化启动晚且不充分,生成的液相量少且质量差,导致其黏结相强度在单一原料中数值最低(0.248)。

(2)混合原料的协同效应与机理探讨

试验结果揭示了不同钙质原料复配使用时存在的显著协同效应。

高活性度生石灰与石灰石的混合料表现出最优的强化效果,其黏结相强度(0.374)显著高于任一组分单独使用。结合2.2节的同化特性分析,该混合体系虽然起始反应温度升高至1 219.6 ℃,反应区间缩窄至27.1 ℃,但这可能创造了一个理想的反应动力学条件:石灰石的分解吸热为反应提供了缓冲,而高活性度生石灰与新生高活性CaO共同作用,促使同化反应在一个相对集中且能量充裕的温度区间内剧烈、充分地进行,从而生成数量充足、分布合理的优质黏结相。

低活性度生石灰与石灰石的混合料则未显示出协同增益,其强度(0.193)甚至低于单一低活性度生石灰。这表明,当生石灰本体活性不足时,石灰石分解产生的新生态CaO的积极效应无法被有效利用和整合,二者未能形成有效的反应耦合。

综上所述,黏结相的强度根本上由高温下形成的液相特性决定,而液相特性又受钙质原料的同化行为调控。通过复配不同活性度与形态的钙质原料(如高活性度生石灰与石灰石),可以优化同化反应的温度路径与动力学过程,是实现黏结相强度协同强化的有效途径。这为通过原料设计精准调控烧结矿冶金性能提供了重要的理论与实验依据。

3 高比例活性生石灰配比的工艺适配性优化

将活性生石灰配比提升至7%~8%或更高,对烧结全流程的精细化操作提出了系统性挑战。其应用效果不仅取决于生石灰本身的理化性质,更高度依赖于对来料稳定性、混匀制粒、混合料粒度与水分控制、料温、点火及抽风制度等关键工序的精确匹配与协同调控。本章将首先明确高配比应用下对活性生石灰原料本身的关键质量要求,为后续工艺优化奠定基础。

3.1 活性生石灰原料的关键质量指标

高配比条件下,生石灰原料的质量稳定性是决定工艺成败的首要前提,其核心控制指标包括存放时效、活性度及粒度组成。

(1)存放时间与活性衰减控制

活性生石灰(主要成分为CaO)是一种化学性质极为活泼的材料,极易与空气中的水分(H_2O)和二氧化碳(CO_2)发生反应,生成氢氧化钙($Ca(OH)_2$)和碳酸钙($CaCO_3$)。这些反应产物会形成致密的包裹层覆盖于生石灰颗粒表面,严重阻隔其与水的进一步接触,导致活性度显著下降,此过程称为“陈化”或“失效”。因此,为维持其高反应活性,烧结用生石灰必须遵循随产随用和先进先出的仓储管理原则,采取严格的防潮密封措施,并尽可能避免长期储存。建议厂内周转库存时间不宜超过48 h,以最大限度保持其新鲜度。

(2)活性度要求与量化标准

活性度是衡量生石灰水化反应速度快慢的核心指标,直接关系到其在有限混合时间内消化放热的强度与均匀性,对于改善烧结料层透气性、促进低温液相生成至关重要。理论上,纯氧化钙的

活性度最高值约为400 mL(以4N-HCl滴定法测定)。为实现高配比下的强化效果,必须采用新鲜、高活性度的生石灰,其活性度指标应严格控制在300 mL以上,并应将此作为采购准入与生产过程质量监控的核心标准。使用低活性度生石灰将无法提供足够的反应驱动力,导致配比增加但效果不彰,且易引发消化不均等问题。

(3)粒度组成的优化与管控

适宜的粒度是确保生石灰既能快速完全消化,又能均匀分散于混合料中的物理基础。其粒度组成应满足:(0~3) mm粒级占比>90%,其中理想的主体粒度区间应集中在(1~3) mm。

粒度过粗(如>5 mm)的危害:颗粒核心在标准混合周期内难以完全水化,残留的未消化核会在烧结矿中形成低强度的白点缺陷,并可能在料层中继续水化粉化,破坏烧结矿整体强度。

粒度过细(如<0.5 mm)的危害:易在输送和给料过程中产生严重扬尘,造成环境污染与原料损失;同时,过细的粉末比表面积激增,易在混合初期局部遇水形成高黏度的糊状团块,加剧混合机筒壁黏料与结圈倾向。

为保证入厂生石灰粒度达标,必须在生石灰仓下料口等关键节点增设振动筛分设备或可调式棒条阀,旨在有效筛除运输过程中产生的大块结坨物以及煅烧工艺不当产生的过烧(死烧)或欠烧料,从而稳定入混物料的粒度分布。

3.2 关键工艺优化措施

为系统解决高配比活性生石灰应用于高比例铁精矿烧结时面临的制粒与消化均一性难题,本研究提出并实施了以下四项核心工艺优化措施。

(1)原料下料顺序与预处理的优化

理论分析与生产实践表明,混合料的初始结构对其后续制粒效果具有决定性影响。理想的宽皮带上料顺序应为:首先铺布返矿与粗粒铁矿粉作为基础料层,随后添加活性生石灰,最后加入铁精矿与固体燃料。此顺序旨在使返矿与粗粒矿粉优先吸收水分,形成具有良好核体结构的湿润颗粒群,从而使后续加入的活性生石灰与铁精矿能有效附着于其表面,避免铁精矿直接包裹生石灰颗粒而阻碍其水化反应,导致活性失效。

然而,受限于既有工厂设计中各原料矿槽与给料机序列的固定布局,大规模调整物理下料顺序在技术改造上存在困难。因此,本研究提出一种更为高效且可行的替代方案:将工艺重点从调整下料顺序转向确保生石灰的预消化。通过在生石灰给料点增设专用消化装置,使其在与主混合料接触前即完成充分的水化反应,可从根本上消除因生石灰颗粒在混合机内局部集中消化所引发的黏结、结圈等问题,并确保其化学活性得到充分利用。

(2)生石灰强化消化工艺

生石灰(CaO)在混合机内的非均相水化反应是导致设备结圈和烧结矿产生白点缺陷的根本原因。反应生成的黏性氢氧化钙($Ca(OH)_2$)糊状物易黏结于筒壁与衬板,长期积累形成厚度可达(400~500) mm的致密环形结圈,严重影响混合效率与设备正常运行。同时,未完全消化的生石灰核心残留于烧结矿中,形成低强度的白点,恶化烧结矿冶金性能。

为实现生石灰的高效、均匀消化,本研究构建了以专用消化器预消化+混合机内热力强化为核心的工艺体系如下:

① 增设专用消化器。在一次混合前的生石灰输送环节集成专用消化器,为其提供独立的反应空间与充足的滞留时间,确保一次混合前消化率大于90%。

② 热力环境强化。向一次混合机内通入低压蒸汽,将混合料温度稳定提升至70 ℃以上。高温环境显著加速生石灰的水化反应动力学进程,使其在一次混合阶段基本完成消化。水化释放的大量热量与蒸汽使物料孔隙率增加,结构变得松散。

经过上述预处理后,进入二次混合机的生石灰已转化为干燥、分散的$Ca(OH)_2$粉末,从剧烈的化学反应物转变为理想的制粒黏结剂,此时仅需补充少量水分即可进行精细制粒。

(3)分级加水与制粒过程精准控制

混合制粒过程中的水分添加策略是影响消化与制粒质量的关键参数。本研究确立了一次混合足量加水保障消化,二次混合雾化加水精细制粒的分级控制原则。

一次混合的核心任务是实现物料的预热、初步混匀及生石灰的彻底消化。采用水灰比自动控制系统,将总加水量的约80%集中于本工序。通过使用喷淋覆盖面积大、射流穿透力强的喷头,确

保水分与热量在料层中均匀分布,为生石灰的完全消化创造最优反应条件。总水分控制目标适当提高至(8.5±0.5)%,以满足高配比生石灰的化学结合水需求。

二次混合的核心任务是对预制的颗粒进行表面修整与粒度优化,实现精细制粒。补充剩余的约20%水分,并采用能产生细微雾化效果的喷头进行添加。此举可确保水滴均匀分布于颗粒表面,促进毛细力作用下的颗粒密实化,避免局部过湿或水滴撞击导致的颗粒粉碎,最终形成强度高、粒度组成均匀的烧结混合料母球。

(4)混合制度优化

为保证上述复杂的物理化学过程有足够时间完成,对混合制度进行优化。通过适当降低混合机转速,延长物料在机内的有效滞留时间,确保消化反应与混匀过程充分进行。工艺视角上,将生石灰的预消化工序与后续的混合、烧结视为一个有机整体。消化后的$Ca(OH)_2$浆体或粉末进入一混,能更高效地与铁料、燃料等组分均匀混匀并参与制粒,提升了整个配料系统的稳定性与均质性。

3.3 设备适应性保障与运行稳定性

高配比活性生石灰的应用对烧结预处理设备的运行稳定性提出了更高要求,需采取针对性措施。

(1)保障混合机本体运行效能。定期维护是基础,需重点检查并按时更换混合机内的扬料板(刮板),确保其结构完整、磨损在允许范围内,从而能够有效地将物料提升、抛散,实现以抛落为主的理想混合状态,而非低效的滑动状态。

(2)防治筒壁黏结与结圈。贯彻预防为主,防控结合的策略。预防的根本在于通过上述工艺优化确保生石灰消化均匀,消除黏性物质的产生源头。同时,需配备高效的在线清理装置(如空气炮、自动刮刀等),并建立定期检查制度,确保加水喷头无堵塞、喷水形状均匀,防止因加水不均引发的局部过湿和黏料。

(3)原料质量与过程参数的稳定控制。工艺优化的效果依赖于稳定的输入条件。活性生石灰的初始活性度、配加的准确性与稳定性、防潮储存管理(防止预水化失效)以及在混合料中的最终分布均匀性,是发挥其强化作用的关键前提参数,必须纳入全过程质量管理体系并进行严格监控。

实现高比例铁精矿条件下高配比活性生石灰的高效应用,是一项涵盖原料预处理、反应工程控制、设备工艺适配及运行管理的复杂系统工程。其核心在于通过工艺重构,将生石灰剧烈的在线消化过程转化为可控的离线预消化+在线强化过程,并围绕此核心对混合制粒的全流程参数进行精准调控,同时保障设备处于最佳运行状态,最终实现烧结过程稳定性与烧结矿质量的同步提升。

4 结语

高比例铁精矿烧结常面临透气性差、制粒效果弱及液相生成不足等关键瓶颈,制约了生产的稳定性与效率。研究表明,配加活性生石灰是解决上述问题的有效方案之一。其核心作用机理体现为物理与化学效用的协同。

不同钙质原料(如生石灰与石灰石)的活性度与物相形态对同化特性(起始温度、反应区间)具有决定性影响。研究证实,通过科学设计氧化钙源的种类与配比(例如将高活性度生石灰与石灰石复配),可基于其协同或抑制效应,实现对烧结过程中液相生成行为与动力学路径的精准调控,进而优化最终黏结相的强度与结构。

为充分发挥活性生石灰的功效,需严格控制其活性度、添加比例、存放时间(防潮)及在混合料中的分布均匀性等关键参数。结合鞍钢本部的生产实践,系统性的工艺优化措施应涵盖原料、工艺与设备多个维度。核心工艺为实施一混蒸汽预热强化消化+集中大量加水,并辅以源头质量控制、混合制度优化及设备稳定运行保障,从而构建高比例铁精矿条件下稳定、高效烧结的完整技术方案。

参考文献

[1] ROY S K, NAYAK D, RATH S S. A review on the enrichment of iron values of low-grade iron ore resources using reduction roasting-magnetic separation [J]. Powder Technology, 2020, 367:796-808.

[2] 周明顺,王义栋,赵东明,等. 高配比磁铁精矿烧结技术的研究进展[J]. 钢铁,2020,55(5):1-9.

[3] 贺淑珍. 高比例精矿粉对烧结的影响分析//[C]第九届中国钢铁年会论文集,北京:中国金属学会,2025:293-298.

[4] 周卫,朱德庆,杨聪聪,等. 高配比磁铁精粉制粒和烧结性能优化[J]. 烧结球团,2024,49(1):56-64,112.

[5] 周明顺,田勇,侯恩俭,等. "双碳"背景下矿冶协同优化必要性研究与展望[J]. 鞍钢技术,2025(6):1-8.

[6] 周明顺,邓强,孟超惠,等.烧结矿适宜碱度与高炉炉料结构匹配性研究[J].鞍钢技术,2025(4):16-25,44.
[7] 周明顺,李忠武,赵东明,等.鞍钢低碳清洁高效高炉炉料结构发展战略研究[J].鞍钢技术,2021(4):1-9.
[8] 贺淑珍,冯焕林,甘晓靳,等.微细精矿比例对烧结的影响及强化技术[J].钢铁研究学报,2016,28(9):10-16.
[9] 贺淑珍,冯焕林,史永林,等.熔剂外裹强化微细精矿粉烧结技术[J].钢铁研究学报,2018,30(8):610-617.
[10] 朱德庆,黎子曦,王梁,等.预干燥强化高比例铁精矿烧结新技术[J].钢铁,2025,60(9):25-33,156.
[11] 师本敬.预压成型强化细粒镜铁矿粉烧结工艺与机理研究[D].长沙:中南大学,2015
[12] 李占国.全活性石灰强化烧结技术基础及其应用研究[D].北京:北京科技大学,2023.
[13] 张展雷,吕娟珍.提高烧结料层透气性的实践[J].烧结球团,2004(4):52-54.
[14] 杨永斌,钟强,李骞,等.高活性生石灰在烧结中的应用及机理分析[J].矿冶工程,2015,35(1):88-91,96.
[15] 袁晓丽,唐斐斐,李凡,等.生石灰活性度对烧结性能的影响[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2012,14(4):107-109,132.
[16] 刘庆华,李美雨.配加精矿对烧结工艺及烧结产品影响的研究[J].矿业工程,2025,23(1):49-54.
[17] M·希尔嘉多,I·皮利托马德利,一丁.料层透气性对烧结矿特性的影响[J].烧结球团,1977(2):55-60.
[18] 贺淑珍,冯焕林.高比例精矿粉对烧结的影响分析及强化措施探讨[J].中国冶金,2014,24(7):27-31.
[19] 李旺.铁精矿粉配比对唐钢烧结过程的影响[D].唐山:华北理工大学,2021.
[20] 沈文俊,李军,冯红云.加拿大镜铁精矿烧结试验研究[J].武钢技术,2015,53(2):6-9.
[21] 黄小波.铁矿粉制粒过程颗粒粒级演变规律与工艺优化[D].重庆:重庆大学,2016.
[22] 朱德庆,徐梦杰,潘建,等.改善超细铁精矿成球性能的实验研究[J].钢铁研究学报,2017,29(9):704-710.
[23] 朱旺,周建洋,杜鲲鹏,等.高配比精矿对制粒效果及烧结过程的影响与作用机理[J].烧结球团,2025,50(3):38-46.
[24] 沈峰满,安海玮,姜鑫,等.烧结工艺中复合铁酸钙黏结相的研究进展[J].钢铁,2024,59(2):1-12.
[25] 宋鹤锴,吴胜利,阙志刚,等.赤铁精粉配比对烧结矿强度的影响[J].钢铁,2019,54(1):8-13.
[26] 肖志新,李红,余珊珊,等.精矿粉对烧结矿液相行为和结构的影响[J].武钢技术,2017,55(4):1-5,23.
[27] 吴胜利,裴元东,陈辉,等.铁矿粉烧结液相流动性评价[J].北京科技大学学报,2008(10):1095-1100.
[28] NICOL S, CHEN J, POWNCEBY M I, et al. A review of the chemistry, structure and formation conditions of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) phases[J]. ISIJ International, 2018,58(12):2157-2172.
[29] 孟凡俭,孙长余,李廷乐,等.烧结矿中复合铁酸钙形成影响因素[J].钢铁,2018,53(7):16-23.
[30] 范晓慧,孟君,陈许玲,等.铁矿烧结中铁酸钙形成的影响因素[J].中南大学学报(自然科学版),2008,39(6):1125-1131.
[31] 牛乐乐,刘征建,张建良,等.铁矿粉矿物组成对烧结矿冶金性能的影响[J].钢铁,2019,54(9):27-32,38.
[32] 吉伟,冯二莲.烧结矿转鼓强度和冶金性能研究[J].河北冶金,2024(5):14-23,34.
[33] 袁晓丽,唐斐斐,李凡,等.生石灰活性度对烧结性能的影响[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2012,14(4):107-109,132.
[34] 梁迪超.生石灰对烧结生产的强化作用与存在问题[J].鞍钢技术,1995(4):5-7,13.
[35] 蒋大军.钒钛磁铁精矿的矿物特性与造块强化技术[J].钢铁,2010,45(1):24-27,42.
[36] 龚艺杰,柳浩.配加不同活性度石灰烧结试验研究[J].钢铁研究,2015,43(6):1-4.
[37] 亢庆锋,张建良,刘征建,等.烧结熔剂活性度及高温液相行为研究[J].钢铁研究,2017,45(4):8-12.
[38] GAO L, LIU P, ZHAN W, et al. New understanding on formation mechanism of CaFe2PO4 in Fe2O3-Fe3O4-CaO-SiO2 system during sintering process: Phase transformation and morphologies evolution[J]. Advanced Powder Technology, 2022, 33(10): 1-11.
[39] DU Y, WEI X, GUO X M. Competitive formation behavior of calcium silicate and calcium ferrite in sintering of iron ore fines[J]. Steel Research International, 2024, 95(7): 2400086.
[40] 任玉明,李长武.钙质熔剂类型对铁矿石烧结高温基础性能的影响研究[J].天津冶金,2022(4):5-8.
[41] 全国铁矿石与直接还原铁标准化技术委员会. GB/T 43877—2024 铁矿石同化性能测定方法[S].北京:中国标准出版社,2024.
[42] 全国铁矿石与直接还原铁标准化技术委员会. YB/T 6256—2024 铁矿石烧结基础特性的测定方法[S].北京:中国标准出版社,2024.

(编辑 许营)
修回日期:2026-01-12