晶粒尺寸与杂质成分对石灰石煅烧特性的影响

郑伟成，毛 瑞，王 飞，张 涛
（江苏省（沙钢）钢铁研究院，江苏 张家港 215625）

摘要： 选择适宜煅烧的石灰石原料并制定合理的煅烧参数是生产高品质石灰的必要途径。本文采用不同地区的石灰石在实验室开展煅烧试验，以分解率和活性度为指标，探究不同石灰石的煅烧特性差异。结果表明：晶体结构对石灰石煅烧性能具有重要影响，细晶粒结构因晶界密度高、传质路径短而更易分解，煅烧性能明显优于粗晶粒及鳞片状层叠结构；原料中的 Mg、Fe 等杂质成分在一定条件下可促进分解，而 Si、Al 元素在高温下易形成低熔相覆盖表面，抑制反应，但是通常石灰石中杂质含量较低，整体影响不大。石灰石在分解率为 95%～100% 时基本能够达到较高的活性度，高活性石灰具有有效钙含量高、CaO 晶粒细小、体积密度低的特征，继续煅烧将导致晶粒过度生长与过烧，致使活性度下降并增加能耗。综合而言，石灰石的适宜煅烧温度为 900～1 200 ℃。不同来源石灰石因成岩环境等差异导致其微观结构和杂质组成不同，煅烧性能表现各异，因此在工业生产前有必要开展煅烧性能预分析，以针对性地制定优化参数。本文研究成果可为石灰生产原料的选择及煅烧参数的制定提供参考。

关键词： 石灰石；石灰；煅烧参数；晶粒；活性度
中图分类号： TQ114.4 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000－8764（2025）06－0110－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2025.06.102

Effect of grain size and impurity composition on calcination characteristics of limestone

ZHENG Weicheng, MAO Rui, WANG Fei, ZHANG Tao
(Institute of Research of Iron & Steel, Shagang, Jiangsu Province, Zhangjiagang 215625, Jiangsu, China)

Abstract: Selecting limestone raw materials suitable for calcination and establishing appropriate calcination parameters are necessary approaches for producing high-quality lime. In this study, limestones from different regions were subjected to laboratory calcination experiments, with decomposition rate and activity degree as evaluation indicators, to investigate the differences in calcination characteristics among various limestones. The results show that crystal structure significantly influences the calcination performance of limestone. Fine-grained structures, characterized by high grain boundary density and short mass transfer paths, decompose more easily and exhibit superior calcination performance compared to coarse-grained or flaky layered structures. Impurity components such as Mg and Fe can promote decomposition under certain conditions, whereas Si and Al elements tend to form low-melting phases that cover the surface at high temperatures, inhibiting the reaction. However, impurity content in limestone is generally low, so the overall impact is not significant. Limestones with a decomposition rate of 95%～100% typically achieve a relatively high activity degree. High-activity lime is characterized by high effective calcium content, fine CaO grains, and low bulk density. Continuous calcination will lead to excessive growth and over-burning of the grain, reducing activity and increasing energy consumption. In summary, the suitable calcination temperature for limestone ranges from 900 ℃ to 1 200 ℃. Due to differences in diagenetic environments, the microstructure and impurity composition of limestones from different sources

收稿日期： 2025－03－20；**修回日期：** 2025－07－15
基金项目： 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金资助项目（BE2023851）
作者简介： 郑伟成（1997—），男，工程师，从事钢铁冶金节能环保方面的研究工作。
通信作者： 毛 瑞（1988—），男，正高级工程师，从事钢铁冶金节能环保方面的研究和管理工作。

中国知网 https://www.cnki.net

vary，resulting in distinct calcination performances. Therefore，it is necessary to conduct pre-analysis of calcination performance before industrial production to develop targeted optimization parameters. The findings of this study can provide valuable references for the selection of raw materials and the determination of calcination parameters in lime production.

Key words: limestone; lime; calcination parameters; crystal grain; activity degree

在国家“双碳”战略目标背景下，钢铁行业作为碳排放的重点领域，其辅助原料的生产也面临严峻的减排压力。据统计，2022 年我国钢铁行业石灰的产量约为 11 470 万吨，其中 7 520 万吨用于烧结工序，3 950 万吨用于炼钢工序[1]。在烧结工序中，石灰主要作为低熔点熔剂，起到调整烧结矿碱度、促进液相生成与矿物相优化的作用[2]。吨烧结矿消耗石灰粉约为 40 ~ 100 kg[3]。在炼钢工序中，石灰主要作为造渣剂，起到脱硫、脱磷的作用[4]。吨钢消耗石灰块约 30 ~ 70 kg[5]。石灰活性作为衡量其性能的重要指标，在炼钢工序会直接影响化渣速度，进而影响熔渣黏度等冶炼效果以及耐火材料寿命、生产效率和成本[6-7]。因此，提升石灰活性对优化钢铁冶炼流程具有重要意义。

石灰的生产是通过将石灰石原料(主要成分为 $CaCO_3$)高温煅烧分解生成高钙石灰(主要成分为 CaO)并释放出 CO_2[8-9]。石灰石的煅烧分解是一个复杂的气 - 固反应，也是一个高能耗、高碳排放过程。生产 1 t 石灰约产生 1.2 t CO_2，其中约 60% 来自 $CaCO_3$ 分解、40% 来自生产能耗[10-11]。石灰石本质上是一种沉积岩，通常源于无机和有机碳酸盐颗粒(如贝壳、藻类、珊瑚和各种微生物等)在海底的逐渐积累和胶结[12]。石灰石特性与其地质起源和沉积环境密切相关，不同起源和生长环境使石灰石的矿物组成、晶体形态、杂质含量及结构密实度往往存在差异，这些因素直接影响其煅烧行为与石灰产物性能[13]。然而，并非所有石灰石都适用于生产高品质冶金石灰[14]。

为获得高活性、高品质冶金石灰，选择适合煅烧的优质石灰石原料并制定合理的煅烧工艺是必要途径。而目前对石灰石质量的评估标准及关键指标，化学成分、微观结构(如晶粒尺寸)与石灰煅烧性能及活性度之间的关联机制，以及不同温度、时间等煅烧制度对最终产品质量的影响规律仍有待深入研究。鉴于此，本文选取三个不同地区的石灰石原料，在实验室中开展煅烧试验，以石灰石分解率和活性度为指标，探究不同石灰石原料在不同煅烧温度和时间下的煅烧性能和活性度的差异，并从微观角度(如 SEM、XRD 等分析手段)分析差异原因，以期为优质石灰石原料的选择及煅烧参数的制定提供参考。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验选取三个不同地区的石灰石，其主要化学成分、烧损和物相组成分别如表 1 和图 1 所示。由表 1、图 1 可以看出，该石灰石的主要组成为 $CaCO_3$，同时含有 Mg、Si、Fe、Al、P 和 S 杂质；石灰石 1 的杂质含量最多，主要为 Mg 和 Si，石灰石 2 的杂质含量最少，石灰石 3 的杂质含量略高于石灰石 2，主要为 Si。

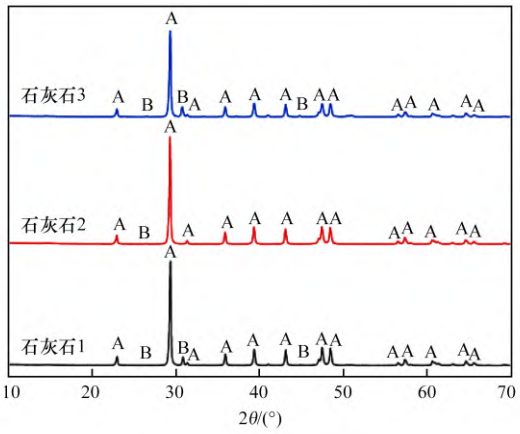
图 2 为三种石灰石的 SEM 微观结构，其中(a) ~ (c)为背散射图。由图 2 可以看出：石灰石 1 和 2 的晶粒呈多边形块状，界面清晰，平均尺寸约为 8 μm 和 5 μm；石灰石 3 则呈现鳞片状层叠结构，晶界密度显著低于前两者。这种差异可能主要源于成岩环境的不同，石灰石 1、2 为高能沉积环境下快速胶结形成，而石灰石 3 为静水环境中缓慢沉积为层状结构。

表 1　三种石灰石的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical composition and loss on ignition of three types of limestone　%

原料名称	CaO	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	P	S	烧损
石灰石 1	51.62	2.11	1.05	0.22	0.32	0.002	0.016	43.62
石灰石 2	55.30	0.58	0.35	0.10	0.06	0.001	0.009	44.05
石灰石 3	54.52	0.39	1.25	0.19	0.28	0.004	0.042	43.30

中国知网　https://www.cnki.net



A—$CaCO_3$；B—SiO_2。

图 1 三种石灰石的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD spectra of three types of limestone

1.2 试验方法

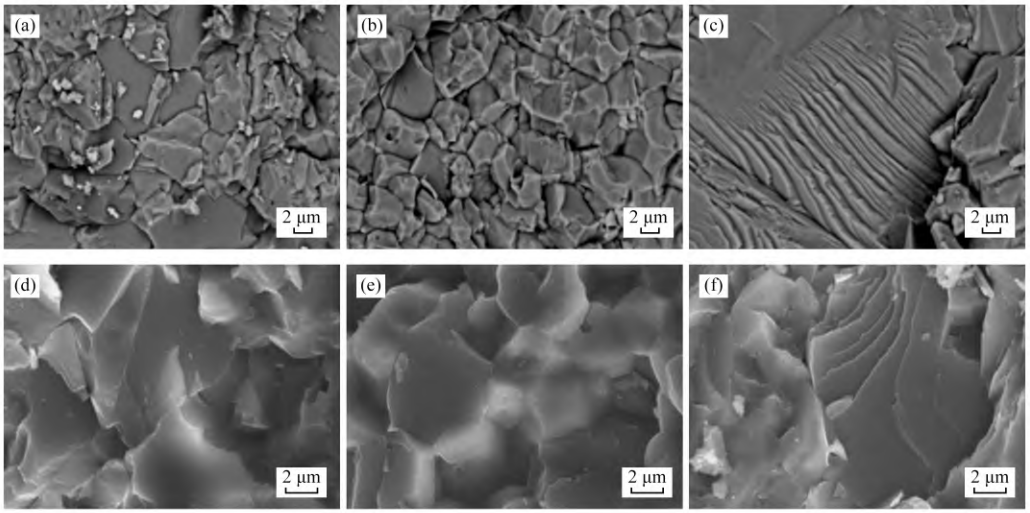
将石灰石水洗干净后置于 105 ℃下烘干，去除表面杂质的影响，再破碎筛选出 10 ~ 15 mm 的样品，每次选取一定量的样品放入坩埚内，再将坩埚置于马弗炉中煅烧；采用不同的温度 - 时间组合开展高温煅烧试验，试验结束后将样品放入干燥皿中冷却至室温，最后测试每组样品的烧损、分解率和活性度。为了与回转窑工艺相结合，试验首先将石灰石在 800 ℃预热 0.5 h，再升至相应的温度煅烧相应的时间，设置试验温度为 900、1 000、1 100、1 200 ℃。为了更好地分析试验结果，在每个温度下分别先开展一次基准试验，找到该石灰石基本完全分解的时间区间，在此基础上再选取部分时间段开展试验。

石灰石分解率为该样品煅烧后的烧失量与样品最大烧失量的比例。最大烧失量的测试方法参考《建材用石灰石、生石灰和熟石灰化学分析方法》(GB/T 5762—2024) 执行，活性度的测试方法参考《冶金石灰物理检验方法》(YB/T 105—2014) 执行，石灰体积密度的测试方法参考《致密定形耐火制品体积密度、显气孔率和真气孔率试验方法》(GB/T 2997—2015) 执行。

2 结果与讨论

2.1 最大烧失率

三种石灰石的 TG 曲线和烧失率如图 3 所示。由图 3 可见，与表 1 中煅烧所得的烧损结果相同，三种石灰石原料的最大烧失率从大到小依次为石灰石 2(44.05%) > 石灰石 1(43.62%) > 石灰石 3(43.3%)，且值均大于 43%。由于石灰石样品已经干燥，此时的烧损主要为 $CaCO_3$、$MgCO_3$ 高温煅烧释放出的 CO_2。因此，烧失率理论上应与原料中 $CaCO_3$、$MgCO_3$ 的总量呈正比例关系。然而结合表 1 可知，石灰石 3 中 $CaCO_3$、$MgCO_3$ 的质量分数之和大于石灰石 1，烧失率却相比略小，这说明石灰石 3 中存在难以分解的碳酸盐。结合图 2 推测，这可能是因为其结构基本呈鳞片层状堆积，晶粒较大，晶界少，结构致密，不易分解。



(a)、(d) 石灰石 1；(b)、(e) 石灰石 2；(c)、(f) 石灰石 3

图 2 三种石灰石的 SEM 微观结构

Fig. 2 The microstructure of three types of limestone under SEM

中国知网 https://www.cnki.net

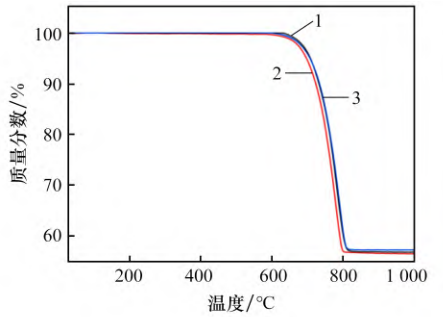
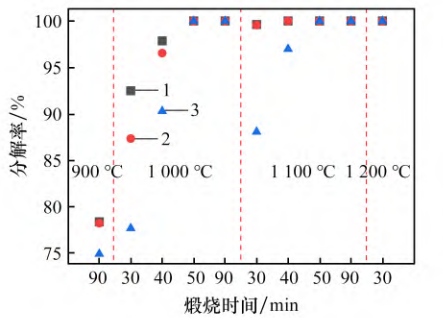


图 3　三种石灰石的 TG 曲线

Fig. 3　The TG curves on ignition of three types of limestone

2.2　分解率

分解率能够反映出石灰石的分解速率。图 4 为三种石灰石在不同煅烧温度和时间下的分解率。由图 4 可以看出，900 ℃时石灰石的分解速率较慢，不适宜作为石灰石煅烧温度。试验条件下温度越高分解速率越快。三种石灰石的分解速率从大到小依次为石灰石 1 > 石灰石 2 > 石灰石 3。石灰石 3 的分解速率最慢，这可能主要与其晶体结构有关。石灰石 3 的晶粒呈鳞片层状分布，结构致密，晶界少，缺陷密度小，CaO 晶核不易生成，且晶核生成速度小于晶体成长的速度，导致其分解较慢。理论上来说，晶粒尺寸越小，其比表面积呈指数级增加，反应界面随之增大，晶界比例提高。晶界处原子排列无序，键能较低，成为分解反应的优先起始点。晶界比例增大，使得热导率提高，颗粒内部温度分布更均匀。小晶粒石灰石通常也伴随更高孔隙率，为 CO_2 逸出提供通道。因此，小晶粒的石灰石分解更快。但是石灰石1的晶粒大于石灰石2，分解速率也略大于



1—石灰石 1；2—石灰石 2；3—不石灰石 3。

图 4　三种石灰石在不同煅烧温度、时间下的分解率

Fig. 4　Decomposition rate of three types of limestone under different calcination temperature and time

石灰石 2，这可能是因为杂质成分会对分解速率造成影响。

杂质元素 Mg、Si、Fe、Al、P 和 S 等通过界面反应、孔隙结构改变及传质阻力显著影响着分解动力学，最终达到促进还是抑制的效果需要具体分析其平衡情况[15-16]。Mg、Fe 等晶格掺杂具有双向影响，可能通过提前分解($MgCO_3$)或改变晶体缺陷影响反应路径，具体为 Mg 在低含量下通过早期孔隙生成加速初始分解，但高含量下 MgO-CaO固溶体导致孔隙堵塞；Fe 在低含量时催化反应，过量则因液相烧结降低孔隙率[17]；Si、Al 杂质在煅烧温度 < 1 100 ℃时，与 Ca 反应生成硅酸盐、铝酸盐，提供一条低活化能分解路径，促进分解。但在温度≥1 100 ℃时生成低熔点硅铝酸盐致密层，覆盖在 $CaCO_3$ 表面，形成表面覆盖效应阻碍 CO_2 扩散并强化界面传质阻力，抑制分解，尤其是当 Si-Al-Fe 共存时低共熔物的形成会加剧颗粒烧结，此外，Si、Al 杂质还可能取代 Ca 离子通过电荷失衡和半径失配引发晶格畸变，提高分解活化能。

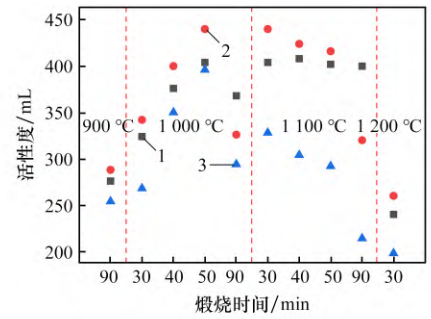
综合上述分析，石灰石 1 的分解速率大于石灰石 2，可能是因为石灰石 1 中 Mg、Si、Al 含量相对较高，在试验温度下对分解的促进效应更大，起到主导作用。P 杂质生成磷酸盐覆盖活性位点，S 杂质生成 SO_2，与 CaO 反应形成 $CaSO_4$，堵塞孔隙，分别通过表面熔融覆盖和气体释放干扰热力学平衡[18-20]。但 P、S 的含量通常较低，很难起到主导作用[21]。

2.3　活性度

活性度是冶金石灰最重要的性能之一。图 5 为三种石灰石在不同煅烧温度和时间下的活性度。综合来看，三种石灰石的活性性能从大到小依次为石灰石 2 > 石灰石 1 > 石灰石 3，尤其是石灰石 3 的性能与其余 2 种相差较大。这也说明在工业生产前有必要提前对不同石灰石原料的性能进行预试验分析，以针对性地制定相应的煅烧制度。若不加区分地对各种石灰石采取相同的煅烧制度，可能会造成石灰产品的过烧或生烧现象，影响产品质量，增大生产能耗。

石灰石2的杂质含量最少，$CaCO_3$ 含量最高，

中国知网　https://www.cnki.net



1—石灰石 1；2—石灰石 2；3—不石灰石 3。

图 5 三种石灰石在不同煅烧温度、时间下的活性度

Fig. 5 Activity of three types of limestone under different calcination temperature and time

品位最高，且晶粒细小易分解，煅烧性能优异，生产的石灰活性最高；石灰石 1 的晶粒略大于石灰石 2，杂质含量也相对较高，活性度略低于石灰石 2，也能够达到较高的水平(依据 YB/T 042—2014，石灰活性度≥360 mL 为特级石灰)；石灰石 3 的杂质含量小于石灰石 1，品位相对高，但是活性度低于石灰石 1，这说明除了化学成分以外，晶体结构对石灰石煅烧性能具有重要影响。石灰石 3 的晶粒呈鳞片层状分布，晶粒大，难分解，煅烧性能差，此类石灰石不适宜用于制备冶金石灰。因此，由于石灰石中杂质含量差距不太大，晶体结构对石灰石煅烧性能将产生较大的影响。石灰生产企业在选择原料时也应重点关注其晶体结构[22]。

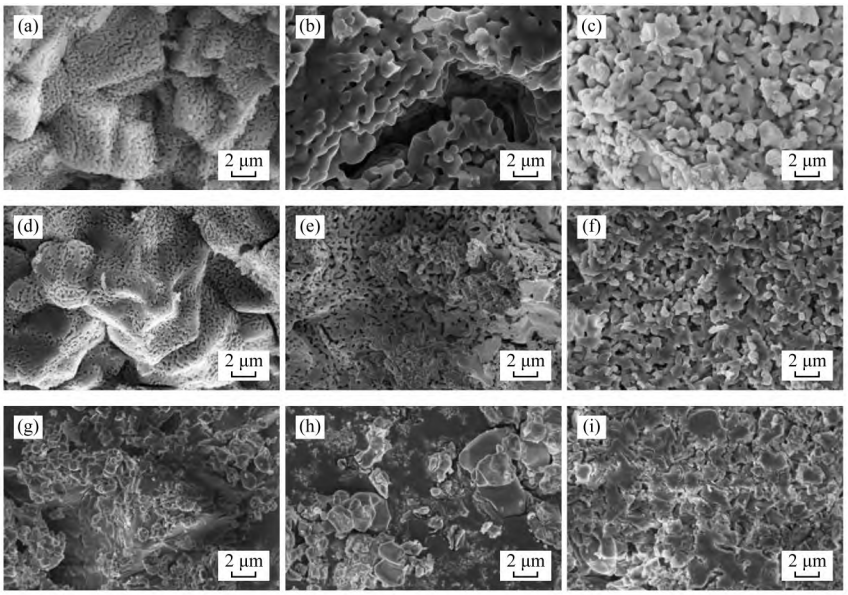
结合图 4 分析可知，900 ℃时石灰石分解速率较慢，生烧严重，活性度较低；1 200 ℃下石灰石分解迅速，但是活性较低。这是因为温度过高导致石灰外层容易过烧，石灰石煅烧适宜温度为 900～1 200 ℃。在相同温度下，石灰石 1 和石灰石 2 的活性度随着石灰石分解率的增大而增大，这是因为分解率越高石灰中有效钙的含量越高，活性度越高。在石灰石分解完全时停止煅烧基本能够达到最佳的活性度。数据表明，石灰石在分解率为 95%～100% 时能够获得较高的活性，分解完全后继续煅烧会导致石灰活性度呈下降趋势且增大生产能耗。石灰石 3 在 1 100 ℃、40 min 条件下煅烧，分解率为 96.97%，高于 1 100 ℃、30 min 煅烧下的 88.06%，但是活性度却由 328 mL 下降至 304 mL，这可能是因为其分解较慢导致外层大量过烧，活性度下降[23]。

这说明仅从分解率的角度分析，分解率越高，石灰中有效 CaO 的含量越高，活性度越高；但是，除了化学成分外，微观结构也会对石灰活性度产生重要影响，甚至仅从微观结构即可判断出是否为活性石灰[24]。三种石灰石在 1 000 ℃不同煅烧时间下的微观形貌以及分解率、活性度数据如图 6 所示，其体积密度如图 7 所示。由图 6、7 可以看出，高活性石灰具有 CaO 晶粒小、结构疏松、气孔率高和体积密度小等特征，这是因为此时高温煅烧的能量主要用于 $CaCO_3$ 分解释放出 CO_2，CO_2 从晶格内逸出使 $CaCO_3$ 晶体转化为 CaO 晶体，留下大量反应孔洞，新生成的 CaO 晶体处于介稳状态，没有更多的能量驱使晶体结构发育完全。因此，此时 CaO 晶粒细小，结构多呈小颗粒状较为疏松，体积密度小，比表面积大，活性较高。而活性低的石灰晶粒度大，结构更加致密，体积密度大，因为 $CaCO_3$ 分解生成的 CaO 继续煅烧获得驱动能量促使晶界能不断下降，晶粒不断生成、长大并融合，晶界逐渐减少形成大晶粒直至层状或团簇，石灰中孔洞减少，结构致密，反应活性下降[25-27]。尤其是石灰石 3，原料自身的晶体结构呈鳞片层状分布，难以分解形成细小的 CaO 颗粒和疏松结构，导致整体煅烧特性和活性度较差。

3 石灰石的分解过程机理

综合前文分析，绘制石灰石的分解过程及机理如图 8 所示。石灰石的晶粒大小和形态主要受成岩环境控制。缓慢沉积条件下，石灰石易形成大晶粒或层状结构(如石灰石 3)，而快速胶结则倾向于生成细小晶粒(如石灰石 2)。晶粒越小，比表面积越大，晶界密度越高，为 CO_2 逸出提供更多通道，同时晶界处原子排列无序，活化能较低，显著加速了分解反应。此外，大晶粒/层状结构因传质阻力大，易导致外层过烧，进一步抑制分解效率。具体来说，以三种石灰石为例，石灰石 1 和石灰石 2 的分解过程相似，石灰石外层的 $CaCO_3$ 晶粒获得能量，其表面先发生分解反应逸出 CO_2，生成多个细小的 CaO 晶粒，并留下众多孔隙，$CaCO_3$ 晶粒越小越容易分解；继续煅烧，分解

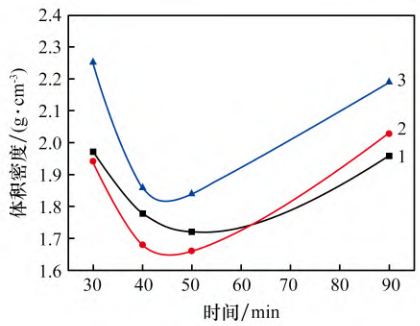
中国知网 https://www.cnki.net



石灰石 1 的煅烧时间/min(分解率/%、活性度/mL)：(a) 30(92.48、324)；(b) 50(100、404)；(c) 90(100、368)。
石灰石 2 的煅烧时间/min(分解率/%、活性度/mL)：(d) 30(87.33、342)；(e) 50(100、440)；(f) 90(100、326)。
石灰石 3 的煅烧时间/min(分解率/%、活性度/mL)：(g) 30(77.68、268)；(h) 50(100、396)；(i) 90(100、294)

图 6　三种石灰石在 1 000 ℃、不同煅烧时间下的 SEM 微观结构

Fig. 6　SEM microstructures of three types of limestone under 1 000 ℃ and different calcination temperature



1—石灰石 1；2—石灰石 2；3—石灰石 3。

图 7　三种石灰石 1 000 ℃不同煅烧时间下的体积密度

Fig. 7　Bulk density of three types of limestone at 1 000 ℃ under different calcination time

反应逐渐向内部扩散，细小的 CaO 晶粒越来越多，同时 CaO 晶粒获得能量不断长大，晶粒之间孔隙率降低，石灰石外层先分解生成的 CaO 晶粒也会逐渐发生过烧团聚现象；持续煅烧，CaO 晶粒继续长大，趋向于大颗粒团聚，外层过烧层也会逐渐扩展，使得整体孔隙率降低、密实度增大，因此石灰石晶粒也不宜太小，否则 CaO 颗粒过早烧结，孔隙闭合，降低比表面积和活性。而石灰石 3 由于晶体结构呈鳞片层状，$CaCO_3$ 难以分解形成 CaO，石灰结构仍然主要呈片状，且极易发生过烧现象。因此，在实际生产中，选用小晶粒易分解的石灰石原料，控制分解率为 95%～100%，不仅能够获得优异的活性品质，还能够降低过烧现象，降低生产能耗。此外，还需要考虑杂质成分的影响。杂质的存在会导致石灰晶体结构排列不规则，其形核及生长秩序混乱，从化学成分和微观结构两个方面均会降低石灰活性。

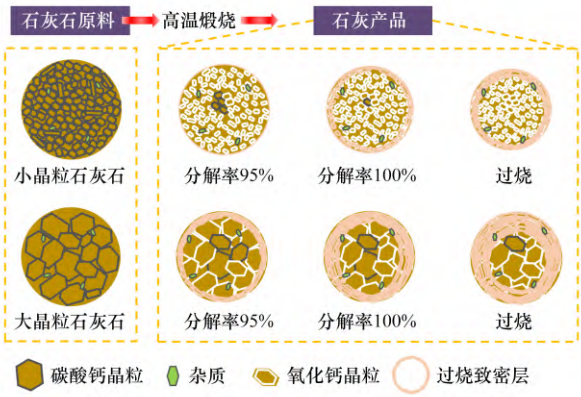


图 8　不同晶粒大小的石灰石分解过程示意

Fig. 8　Schematic diagrams of the decomposition processes of limestones with different crystal grain sizes

4　结　论

(1) 石灰石原料中各杂质含量越低越好。石灰石中 Mg、Fe 等杂质具有一定的正面影响，而

中国知网　https://www.cnki.net

Si、Al、P和S杂质的负面影响相比更加突出；晶粒小的石灰石更容易分解，生产能耗更低，反之晶体呈鳞片层状及其他大晶粒的石灰石不易分解，外层易过烧，煅烧性能较差，不适宜生产石灰。企业在选择石灰石原料时需重点关注晶体结构而不应局限于化成分。

(2) 900 ℃时石灰石分解较慢，温度越高分解速率越快，但是1 200 ℃时温度过高导致石灰外层容易过烧，因此石灰石适宜煅烧温度区间为900～1 200 ℃；优质石灰石在分解率为95%～100%时基本能够达到较高的活性度，此时石灰晶粒细小，气孔率高，体积密度小，继续煅烧会导致石灰晶粒增大，结构致密，活性降低且增大生产能耗。

(3) 不同石灰石煅烧性能及活性度存在差异，在工业生产前有必要开展预试验，以针对性地制定煅烧参数，避免造成不同石灰的生烧或过烧现象，降低产品质量。

参考文献:

[1] 贾楠楠,李晓. 我国钢铁与冶金石灰生产形势与发展[J]. 耐火与石灰,2023,48(4):1－4.
JIA Nannan,LI Xiao. Situation and development of iron and steel and metallurgical lime production in China[J]. Refractories & Lime,2023,48(4):1－4.

[2] 张丽,吴胜利,张永忠,等. 烧结用生石灰性能评价方法研究[J]. 烧结球团,2015,40(3):7－11.
ZHANG Li,WU Shengli,ZHANG Yongzhong,et al. Study on the performance evaluation method of the quicklime used for sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2015,40(3):7－11.

[3] YAN Z M,LI Z S,SANJEEV M,et al. Value in use of lime in BOF steelmaking process[J]. Ironmaking & Steelmaking,2022,49(1):42－48.

[4] 李浩鸣,杨永昇,唐银华,等. 不同$w(SiO_2)$铁精矿高温烧结性能研究与优化配矿[J]. 烧结球团,2024,49(4):33－43.
LI Haoming,YANG Yongsheng,TANG Yinhua,et al. Study of high-temperature sintering properties and proportioning optimization of iron concentrates with different$w(SiO_2)$[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(4):33－43.

[5] KURKIN V M,TABAKOV M S,KASHKAROV E A,et al. Effect of lime on sintering[J]. Metallurgist,2007,51(7):420－424.

[6] 董凯,王春阳,朱荣,等. 转炉底吹O_2石灰粉技术的发展现状及展望[J]. 钢铁,2023,58(8):13－24.
DONG Kai,WANG Chunyang,ZHU Rong,et al. Development status and prospects of bottom-blown O_2-CaO technology in converter steelmaking process[J]. Iron and Steel,2023,58(8):13－24.

[7] 张梦旭,李建立,李山南,等. 活性石灰与$CaO-SiO_2-Fe_tO$熔渣间界面结构特性[J]. 钢铁,2023,58(3):53－60.
ZHANG Mengxu,LI Jianli,LI Shannan,et al. Characterization of interfacial structure between quicklime and $CaO-SiO_2-Fe_tO$ slag[J]. Iron and Steel,2023,58(3):53－60.

[8] DOWLING A,O'DWYER J,ADLEY C C. Lime in the limelight[J]. Journal of Cleaner Production,2015,92:13－22.

[9] 刘含笑,吴黎明,赵琳,等. 钢铁行业CO_2排放特征及治理技术分析[J]. 烧结球团,2022,47(1):38－47.
LIU Hanxiao,WU Liming,ZHAO Lin,et al. Analysis on CO_2 emission characteristics and treatment technologies in iron and steel industry[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):38－47.

[10] 董文亮,袁天祥,李海波,等. 炼钢厂废气中二氧化碳的资源化利用技术及工业实践[J]. 钢铁,2024,59(9):236－248.
DONG Wenliang,YUAN Tianxiang,LI Haibo,et al. Carbon dioxide utilization technology of exhaust gas and industrial application in steelmaking plant[J]. Iron and Steel,2024,59(9):236－248.

[11] MANOCHA S,PONCHON F. Management of lime in steel[J]. Metals,2018,8(9):686.

[12] 曲宝晖,丁春辉,宁生龙. 石灰石资源对钢铁冶金行业的影响[J]. 耐火与石灰,2022,47(4):37－41.
QU Baohui,DING Chunhui,NING Shenglong. Influence of limestone resources on iron and steel metallurgical industry[J]. Refractories & Lime,2022,47(4):37－41.

[13] BABAILOV N A,POLYANSKII L I,LOGINOV Y N. Briquetting metallurgical lime screenings and parameters making it possible to improve process efficiency[J]. Metallurgist,2016,60(5):576－580.

[14] 李晨晓,李宏,周宝,等. 100 t转炉石灰石代替石灰造

中国知网 https://www.cnki.net

渣炼钢试验研究[J]. 中国冶金,2015,25(12):22－26;49.
LI Chenxiao, LI Hong, ZHOU Bao, et al. Experimental study on steelmaking using limestone instead of lime as the slagging material in 100 t converter[J]. China Metallurgy,2015,25(12):22－26;49.

[15] 田雨丰,李光强,肖永力,等. 残留 CO_2 对石灰在转炉初渣中溶解的影响[J]. 钢铁,2022,57(10):84－90.
TIAN Yufeng, LI Guangqiang, XIAO Yongli, et al. Effect of residual CO_2 on dissolution of lime in converter slag[J]. Iron and Steel,2022,57(10):84－90.

[16] 唐国成,黄细聪,路漫漫,等. 低质含镁原料制备碱性球团试验研究[J]. 矿冶工程,2024,44(4):217－222.
TANG Guocheng, HUANG Xicong, LU Manman, et al. Experimental study on preparation of alkaline pellets with low-quality magnesium-containing raw materials[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(4):217－222.

[17] USHAKOV S N, AVRAMENKO V A, BIGEEV V A, et al. Manufacture of low-sulfur pipe steel with ladle desulfurization of cast iron[J]. Metallurgist, 2018, 61(11):967－970.

[18] BHATTACHARYYA A, KUJUR M K, ROY S. Study on the influencing factors for calcined lime quality in a steel plant[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2024,77(1):157－166.

[19] 曹鹏飞,张倩,潘建,等. 带式焙烧机工艺高硅镁质熔剂性球团制备特性[J]. 烧结球团,2024,49(2):38－46.
CAO Pengfei, ZHANG Qian, PAN Jian, et al. Preparation characteristics of high silica magnesium-bearing fluxed pellets based on straight grate process[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(2):38－46.

[20] 陈光,侯嘉琪,包向军,等. 烧结烟气 SDA 半干法脱硫工艺喷粉试验研究[J]. 烧结球团,2023,48(4):103－109.
CHEN Guang, HOU Jiaqi, BAO Xiangjun, et al. Research on powder spraying test of sintering flue gas SDA semi-dry desulfurization process[J]. Sintering and Pelletizing, 2023,48(4):103－109.

[21] 武兵强,赵亚钊,万新宇,等. 烧结原料中配加含铁尘泥和石化碱渣实验研究[J]. 矿冶工程,2023,43(5):113－115.
WU Bingqiang, ZHAO Yazhao, WAN Xinyu, et al. Experimental study on sintering with addition of iron-containing dust and alkaline residue from petrochemical industry[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(5):113－115.

[22] 冯青舒,缪亚兵,陈文胜,等. 某冶金级萤石精矿提质降杂试验研究[J]. 矿冶工程,2024,44(3):73－76.
FENG Qingshu, MIAO Yabing, CHEN Wensheng, et al. Experimental study on improving quality and reducing impurities of metallurgical grade fluorite concentrate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(3):73－76.

[23] HAO H Q, ZHANG Y Z, HAO S J, et al. Preparation and metallurgical analysis of high activity burnt lime for steelmaking[J]. Journal of Iron and Steel Research, International,2016,23(9):884－890.

[24] 王理猷. 超高温快速煅烧石灰的特性及其在转炉渣中的溶解行为研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2020.
WANG Liyou. The characteristics of the lime calcined rapidly at super high temperaturautre and its dissolution behavior in converter slag[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2020.

[25] TONG S, LI C X, WANG S H, et al. Dissolution behaviour of lime in converter slag: Evolution of morphology and ions migration[J]. Metallurgical Research & Technology,2023,120(4):402.

[26] 李乃霞,韩飞,刘翠甜. 钙基脱硫灰在石灰石－石膏湿法脱硫系统中的应用[J]. 烧结球团,2024,49(1):113－118.
LI Naixia, HAN Fei, LIU Cuitian. Application of calcium-based desulfurization ash in limestone-gypsum wet desulfurization system[J]. Sintering and Pelletizing, 2024,49(1):113－118.

[27] 刘安,陈文汨,张艳军,等. 石灰活性度对铝土矿拜耳法溶出影响的机理[J]. 矿冶工程,2024,44(4):229－233.
LIU An, CHEN Wenmi, ZHANG Yanjun, et al. Influencing mechanism of lime activity for digestion of bauxite by bayer process[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(4):229－233.

中国知网　https://www.cnki.net