doi：10. 14186/j. cnki. 1671-6620. 2025. 147

盐湖高纯镁砂制备镁碳砖在钢包上的应用

周玉军[1]，李长存[1]，唐大才[1]，曹瑞琦[2,3]，马北越[2,3]
（1. 青海西部镁业有限公司，青海 德令哈 817000；2. 东北大学 冶金学院，沈阳 110819；
3. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室，沈阳 100819）

摘　要：为探究储量巨大的盐湖高纯镁砂替代菱镁电熔镁砂应用于镁碳砖中的可行性，对盐湖卤水制备的盐湖高纯镁砂开展显微结构与物相分析.同时，分别以盐湖高纯镁砂和菱镁电熔镁砂为原料，添加酚醛树脂和石墨，制备出两种钢包渣线镁碳砖.依据国家标准测试并对比两种镁碳砖试样的体积密度、显气孔率、常温耐压强度、高温抗折强度、物相组成和显微结构，同时开展精炼钢包渣线工业对照实验.结果表明：盐湖高纯镁砂结构致密，物相为方镁石相，氧化镁含量高，杂质少；盐湖高纯镁砂制备的镁碳砖的理化指标均优于菱镁电熔镁砂制备的镁碳砖.在钢包应用中，盐湖镁砂制备的镁碳砖可以良好替代菱镁电熔镁砂制备的镁碳砖.

关键词：盐湖高纯镁砂；电熔镁砂；镁碳砖；侵蚀速率
中图分类号：TF 341；TQ 175　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-6620(2026)05-0510-06

Application of magnesia-carbon bricks prepared from high-purity magnesia from salt lakes in ladles

Zhou Yujun[1], Li Changcun[1], Tang Dacai[1], Cao Ruiqi[2,3], Ma Beiyue[2,3]
(1. Qinghai Western Magnesium Industry Co., Ltd., Delingha 817000, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: To investigate the feasibility of applying high-purity salt-lake magnesia with abundant reserves as a substitute for fused magnesite derived from magnesite in MgO-C bricks, the microstructure and phase assemblage of high-purity salt-lake magnesia prepared from salt-lake brine were analyzed. Meanwhile, two types of MgO-C bricks for steel ladle slag line were fabricated using high-purity salt-lake magnesia and fused magnesite from magnesite as raw materials respectively, with phenolic resin and graphite added as additives. According to national standards, the two brick samples were tested and compared in terms of bulk density, apparent porosity, cold compressive strength, hot modulus of rupture, phase assemblage and microstructure. Industrial comparative trials were further carried out on the slag-line working layer of ladles. The results show that high-purity salt-lake magnesia possesses a dense microstructure, with periclase as its dominant phase, featuring high magnesia content and low impurity levels. The MgO-C bricks prepared from high-purity salt-lake magnesia exhibited superior physicochemical properties compared with the brick produced from magnesite-based fused magnesia. Under steel ladle service conditions, the brick made from salt-lake magnesia could satisfactorily replace the counterpart fabricated from fused magnesite derived from magnesite.

Key words: high-purity brine magnesia; fused magnesia; magnesia-carbon bricks; corrosion rate

高纯镁砂是重要的耐高温材料，因其具备良好的高温抗折强度、抗渣和抗高温熔体侵蚀性能，常被用作镁碳砖的生产，被广泛应用于炼钢炉炉衬和钢包渣线耐火材料中[1]. 高纯镁砂的来源与种类对镁碳砖的性能起着决定性作用.不同来源的镁砂，在化学组成、物理特性及制备工艺等方面存在显著差异，这些差异最终反映在镁碳砖的耐高温性能、抗渣侵蚀能力、热震稳定性等关键性能

收稿日期：2025-07-02.
基金项目：先进耐火材料国家重点实验室开放基金项目（SKLAR202405）.
作者简介：周玉军（1990—），男，工程师，E-mail：15297013431@163.com.
通讯作者：马北越（1978—），男，博士，教授，E-mail：maceramic@126.com.
引文格式：周玉军，李长存，唐大才，等. 盐湖高纯镁砂制备镁碳砖在钢包上的应用［J］. 材料与冶金学报，2026，25（5）：510-515.（Zhou Yujun，Li Changcun，Tang Dacai，et al. Application of magnesia-carbon bricks prepared from high-purity magnesia from salt lakes in ladles［J］. Journal of Materials and Metallurgy，2026，25（5）：510-515.）

指标上.目前,生产镁砂的原料主要分为矿石和盐湖卤水两大类别,二者在诸多方面展现出截然不同的特点[2].采用烧结法处理白云石、菱镁矿等固体矿物原料,生产的 MgO 质量分数为 92%~96%的烧结镁砂杂质含量较高,SiO_2、CaO、Al_2O_3 等难以通过简单方式去除,晶粒尺寸较小;并且菱镁矿生产高纯镁砂的工艺对原料纯度有很高的依赖性[3].电熔法生产的电熔镁砂虽可排除部分杂质相,具有良好的高温性能,但能耗较大,分级拣选复杂,总体生产成本较高.作为主要原料的菱镁矿,其成分为 $MgCO_3$,理论上每生产 1 kg 的氧化镁,将排放 $CO_2$1.09 kg,如不有效回收 CO_2,会造成温室气体污染[4].此外,可供开采的高品位菱镁矿日益减少[5-6],尾矿的产生也会带来环境污染[7].

针对菱镁矿资源与环境方面的局限,盐湖蕴含的巨大镁资源展现出显著的开发潜力.盐湖产区水电资源充沛,生产可利用清洁能源,相较矿石的选矿-煅烧路线,制备工艺环境友好[8-10].在生产盐湖镁产品过程中,通常先对盐湖卤水进行除杂精制,去除其中的硼、锂、钙等杂质离子,以提高镁的纯度.随后,通过沉淀、过滤等工艺将镁离子转化为氢氧化镁沉淀,再经过高温煅烧使氢氧化镁分解为氧化镁[11].在煅烧过程中,精确控制温度、升温速率等工艺参数,能够有效调控氧化镁的晶体结构和粒度分布,从而获得性能优良的高纯镁砂产品.以化学法生产的盐湖卤水($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)为原料,可制得 MgO 质量分数在 96%~99%以上的高纯氧化镁.因此,研究镁砂原料对镁碳砖性能的影响有助于合理利用镁矿资源,提高耐火材料的性能.

本文以某公司利用盐湖水氯镁石生产的高纯烧结镁砂作为研究对象,分析其物相组成和晶体微观结构.同时,以此高纯烧结镁砂为主要原料制备镁碳砖,将其应用于在某特钢钢包渣线上,并与菱镁电熔镁砂制备的镁碳砖进行对比,考察使用中的形貌及残厚,探究替代菱镁电熔镁砂的可行性.

1　试验

1.1　原料与试样制备

试验分别采用盐湖 99%高纯镁砂、菱镁矿 98%电熔镁砂为原料,将高纯镁砂球破碎成 8~5、5~1、1~0 mm 等高纯烧结粒度砂,配入少量的酚醛树脂和石墨,混炼后将泥料在 1 200 t 压力机上打制成长为 210 mm 的镁碳砖,再经隧道窑200 ℃烘烤 36~48 h 后出窑.镁砂原料的化学成分如表 1 所列.

表 1　两种镁砂的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of two magnesia aggregates (mass fraction)　　%

原料	MgO	SiO_2	CaO	Na_2O	Al_2O_3	Fe_2O_3	B_2O_3
盐湖高纯镁砂	99.56	0.02	0.02	0.08	0.03	0	0.037
菱镁电熔镁砂	97.87	0.50	1.12	0.09	0.11	0.26	<0.001

1.2　试样检测

利用 X 射线衍射仪和扫描电子显微镜分别表征两种镁砂骨料的物相组成与显微结构.按照 GB/T 10325—2012 进行抽样检测,采用 GB/T 2997—2000 测试200 ℃热处理后试样的体积密度及显气孔率,采用 GB/T 5072—2008 测试 200 ℃热处理后试样的常温耐压强度,按照 GB/T 3002—2004 测试 1 400 ℃保温 0.5 h 后试样的高温抗折强度.

2　结果与讨论

2.1　物相组成

图 1 示出了两种镁砂骨料的 XRD 图谱.由图 1 可知,两种镁砂原料的主晶相均为方镁石(MgO),除方镁石衍射峰外未见其他相的衍射峰.对于高纯氧化镁及其相关制品而言,B 因其强烈的助熔作用,会极大地降低氧化镁及其产品的高温强度[12].在盐湖高纯镁砂的 XRD 图谱中未检测到含 B 的物相,且化学成分结果中 MgO 含量高,其他杂质元素含量少.

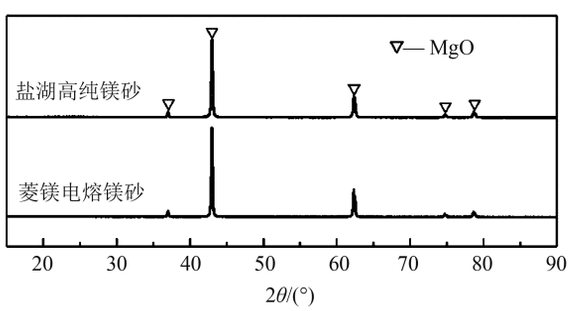


图 1　两种镁砂骨料的 XRD 图谱

Fig. 1　XRD patterns of two kinds of magnesia aggregates

由此可见,盐湖高纯镁砂未受到低熔物相的影响,拥有较好的高温性能.

2.2 显微结构

图2为盐湖高纯镁砂SEM照片及其晶粒尺寸分布直方图,图3为菱镁电熔镁砂SEM照片及其晶粒尺寸分布直方图.由图2(a)可知,试样中存在2~4 μm的近圆形气孔.方镁石的晶体尺寸取决于氧化镁来源和烧结工艺,随着烧结温度的升高,镁砂内部气孔从不规则形状转变为撕裂状,最后接近圆球形.当孔接近圆球形时,提高烧结温度已难以进一步消除氧化镁中的气孔[13],这表明盐湖高纯镁砂的煅烧温度在去除气孔方面已达到最高值.从图2(b)中可以看出,该盐湖高纯镁砂的粒径主要集中在0.3~2.4 μm.结合图2(a)(b)可得出结论:盐湖高纯镁砂最大粒径为2.29 μm,最小粒径为0.07 μm,平均粒径为1.06 μm;晶粒之间结合紧密,晶界发育良好,未有明显的晶间相存在.综合图3(a)(b)中可知,对照组菱镁电熔镁砂的最大粒径为217 μm,最小粒径为23 μm,平均粒径为116.71 μm.该镁砂晶粒结合相对紧密,但晶间相较明显,同时有气孔分布于晶间.

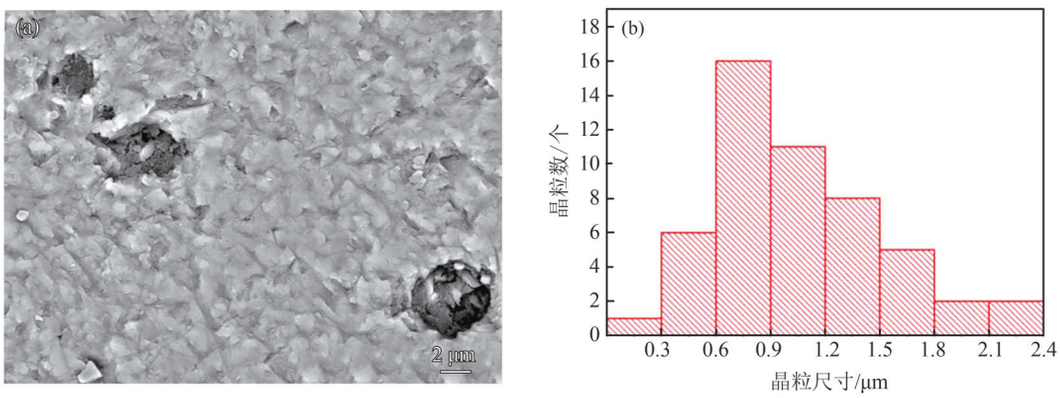


图2 盐湖高纯镁砂SEM照片及其晶粒尺寸分布直方图

Fig. 2 SEM image and histogram of grain size distribution of high-purity brine magnesia

(a)—盐湖高纯镁砂SEM照片;(b)—盐湖高纯镁砂晶粒尺寸分布直方图.

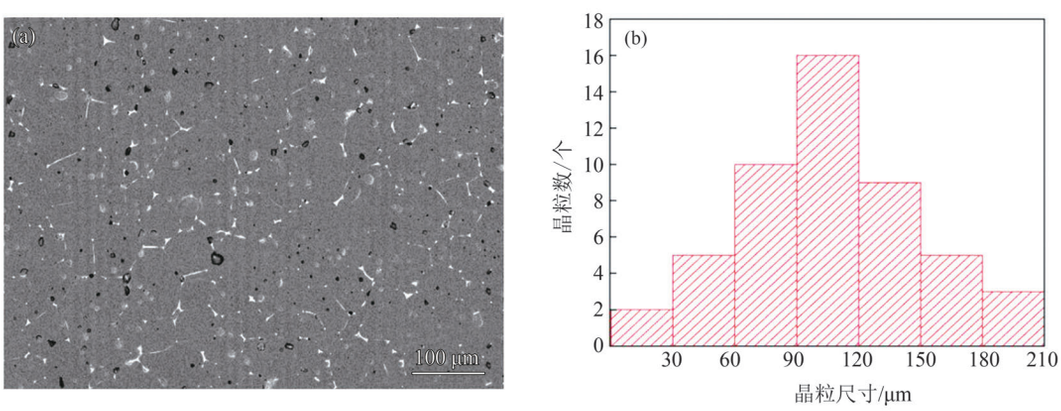


图3 菱镁电熔镁砂SEM照片及其晶粒尺寸分布直方图

Fig. 3 SEM image and histogram of grain size distribution of magnesite-based fused magnesia

(a)—菱镁电熔镁砂SEM照片;(b)—菱镁电熔镁砂晶粒尺寸分布直方图.

图4和图5示出了两种镁砂的EDS能谱分析结果.可以看出,盐湖高纯镁砂展现出较高的致密度,晶粒较小.从微观结构角度分析,高密度氧化镁的形成必然伴随孔隙率的降低,即要求材料内部的孔隙数量更少、尺寸更小.反观菱镁电熔镁砂,其晶粒尺寸较大,且内部存在明显的大尺寸气孔,同时晶界轮廓清晰可辨.结合EDS分析可知:菱镁电熔镁砂的杂质主要存在晶界中,大多数方镁石晶体被硅酸盐包围;试样中观察到一些方镁石-方镁石直接键合,边界多为钝角,并显示出孤立的硅酸盐相.而盐湖镁砂中的方镁石相分布均匀有序,在整个观测范围内未发现明显的晶间相聚集区域.值得注意的是,材料中的晶界往往是外界侵蚀介质优先作用的薄弱部位,晶界处的相组成与分布状态直接影响着材料的抗侵蚀性能.由此表明,在以盐湖水氯镁石为原料制备氧化镁过程中,析出的高活性物相

[即氢氧化镁，$Mg(OH)_2$]是氧化镁致密化的关键因素，能为盐湖镁砂形成致密度高、结构均匀的微观组织提供重要保障.

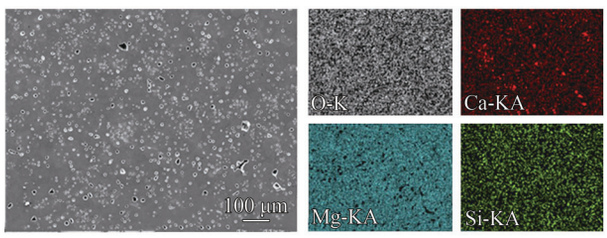


图 4　盐湖高纯镁砂 SEM 照片和 EDS 图谱

Fig. 4　SEM images and EDS patterns of high-purity brine magnesia aggregates

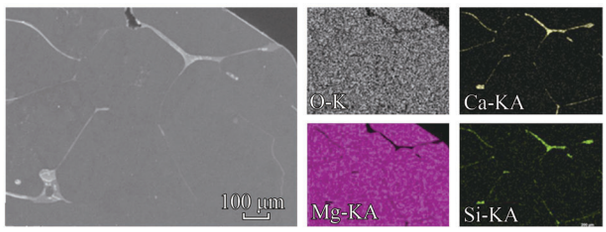


图 5　菱镁电熔镁砂 SEM 照片和 EDS 图谱

Fig. 5　SEM images and EDS patterns of magnesite-based fused magnesia aggregates

2.3　常规性能

表 2 中列出了两种镁砂所制备镁碳砖的性能对比结果.

表 2　两种镁砂所制备镁碳砖的性能

Table 2　Properties of magnesia-carbon bricks prepared by different kinds of magnesia aggregates

类型	w(MgO)/%	w(C)/%	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	显气孔率/%	体积密度/(g·cm^{-3})
盐湖镁碳砖	78.42	14.31	10.45	40.4	3.0	3.36
菱镁镁碳砖	76.45	14.68	9.87	40.1	2.8	3.41

从表 2 中可以看出：与菱镁电熔镁碳砖相比，盐湖高纯镁碳砖的氧化镁含量增加，含碳量相近；在物理性能方面，盐湖镁碳砖高温抗折强度提高了 5.88%，常温抗压强度有一定增加，显气孔率提高了 7.14%，体积密度差别不大.由此可见，研制的盐湖镁碳砖的理化指标稍稍优于菱镁镁碳砖.

2.4　镁碳砖在钢包上的应用

将制得的镁碳砖用于某特钢炼轧厂的钢包精炼，并将使用后的样品进行对比分析.该钢厂主要生产螺纹钢和普钢，主要钢种为 10、20、35、45、20Cr、40Cr、HRB400、XGZJ06 等.其中，HRB400E、40Cr、20 钢产量最大.HRB400E、40Cr、20 钢的主要冶炼方式为转炉—精炼(LF)—连铸.将盐湖镁碳砖分别应用于转炉钢包 15#、2#，并跟踪记录侵蚀情况.钢包 15#、2#砌筑记录过程如表 3 所列.

表 3　钢包 15#、2#砌筑过程记录表

Table 3　Steel ladle 15#, 2# masonry process record sheet

钢包	砌筑部位	砌筑层数/层	砌筑数量/块	烘烤时长/h
15#	渣线层	6	840	24
2#	渣线层	6	840	24

图 6 示出了钢包 15#下线后，镁碳砖渣线部位的形貌照片.可以看出：冶炼 HRB400E 钢种时，在使用初期，并无明显变化；至第 10 炉次，砖体表面开始有薄片碳层剥落；至第 21 炉次，已无碳层脱落，表面平整，表明盐湖镁碳砖具有非常好的抗氧化性；进行至第 30 炉次，钢种更换为 40Cr，发生侵蚀现象，逐渐开始形成侵蚀层；至第 41 炉次，侵蚀层明显；至第 53 炉次，侵蚀层进一步加深，侵蚀范围扩大.

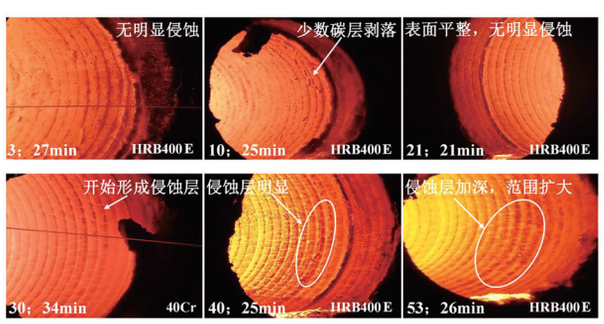


图 6　钢包 15#不同炉次在各冶炼时间下的渣线部位照片

Fig. 6　Images of 15# ladle slag line at different furnace times in each smelting time

钢包 15#上线的盐湖镁碳砖在使用 53 炉次后下线，对剩余残砖进行检测，结果如图 7(a)(b)所示；将其与同期下线的菱镁镁碳砖残砖进行对比，结果如图 7(c)(d)所示.对盐湖镁碳残砖进行测量发现，靠近钢包包沿处剩余厚度为 73 mm，靠近耳轴侧剩余厚度为 30 mm.菱镁镁碳砖残砖对应位置测得靠近钢包包沿处剩余厚度为 78 mm，靠近耳轴侧剩余厚度为 35 mm.依据侵蚀速率公式 $v = \Delta y/n$（Δy 为连续两点间损毁指数差值的绝对值，n 为冶炼炉数）计算可得[14-15]，钢

包15#使用的盐湖镁碳砖最厚处侵蚀速率为2.5 mm/炉,最薄处侵蚀速率为3.2 mm/炉,菱镁镁碳砖最厚处侵蚀速率为2.3 mm/炉,最薄处侵蚀速率为3.1 mm/炉.

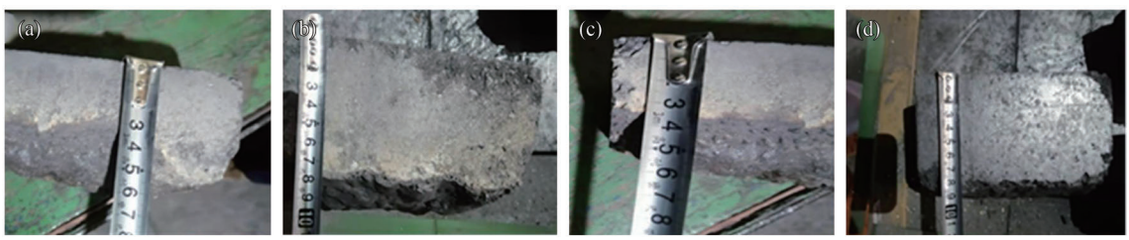


图7 钢包15#下线后残砖测量图片

Fig. 7 Images of residual bricks measurement after ladle 15# off line

(a)(b)—盐湖镁碳砖;(c)(d)—菱镁镁碳砖.

图8示出了钢包2#下线后的镁碳砖渣线部位形貌照片.从图8中可以看出:初期冶炼钢种为40Cr时,并无明显变化;至第10炉次,钢种更换为HRB400E,开始有薄片碳层剥落;至第21炉次,已无碳层脱落,表面平整;至第29炉次,发生侵蚀现象,逐渐开始形成侵蚀层;至第40炉次,钢种更换为20,侵蚀层范围扩大;至第53炉次,侵蚀层加深,侵蚀范围扩大.实验钢包15#与2#所用的两种渣线镁碳砖侵蚀形貌均未出现明显凹坑及馒头状包壁,钢包外无明显高温区.这说明盐湖镁碳砖使用性能与菱镁镁碳砖相近.

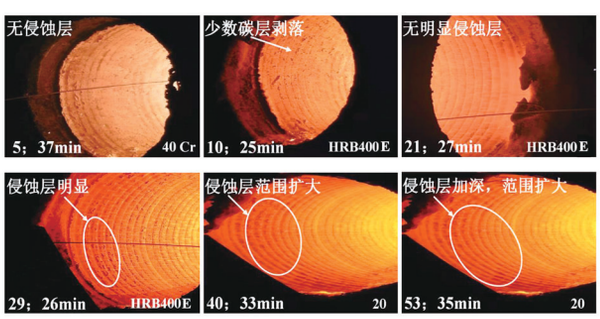


图8 钢包2#不同炉次在各冶炼时间的下线侵蚀情况

Fig. 8 Images of ladle 2# slag line at different furnace times in each smelting time

钢包2#上线的盐湖镁碳砖在使用53炉次后下线,对剩余残砖进行检测,结果如图9(a)(b)所示;将其与同期下线的菱镁镁碳砖残砖进行对比,结果如图9(c)(d)所示.对盐湖镁碳残砖进行测量发现,靠近钢包包沿处剩余厚度为80 mm,靠近耳轴侧剩余厚度为37 mm.菱镁镁碳砖残砖对应位置测得靠近钢包包沿处剩余厚度为80 mm,靠近耳轴侧剩余厚度为40 mm.钢包2#使用的盐湖镁碳砖最厚处侵蚀速率为2.3 mm/炉,最薄处侵蚀速率为3.1 mm/炉,菱镁镁碳砖最厚处侵蚀速率为2.3 mm/炉,最薄处侵蚀速率为3.0 mm/炉.由此可知,盐湖镁碳砖和菱镁镁石碳砖在钢包应用过程中表现基本一致.

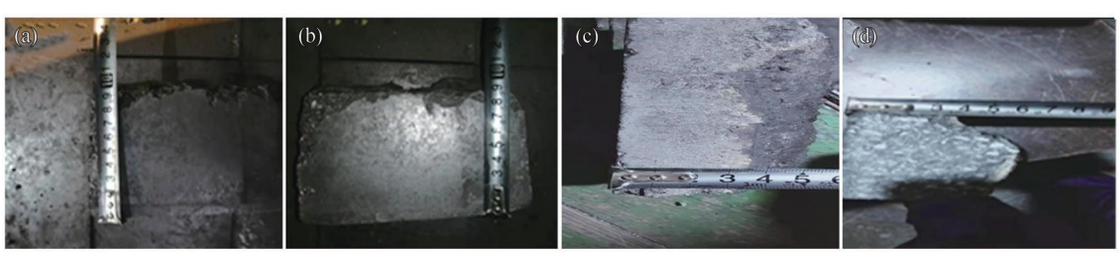


图9 钢包2#下线后残砖测量图片

Fig. 9 Images of residual brick measurement after ladle 2# off line

(a)(b)—盐湖镁碳砖;(c)(d)—菱镁镁碳砖.

应用于渣线的含碳耐火材料在侵蚀过程中受马兰戈尼效应(Marangoni effect)的影响,侵蚀反应主要发生在钢-渣-耐火材料三种物质的界面[16],如图10所示.具体而言,在渣线镁碳砖的侵蚀过程中,钢水与氧化镁骨料不润湿,但与石墨润湿,溶渣与氧化镁骨料润湿,但与石墨不润湿.石墨被钢水润湿后造成了氧化,导致基质的松散与剥落,而氧化镁骨料受到渣的润湿而形成低熔相,向溶渣中溶解并扩散.以上两种反应交替进行,造成了含碳耐火材料的损毁与破坏,故提高氧化镁含量可以降低溶渣润湿的强度.在氧化镁骨料的溶解扩散过程中,

高纯度的氧化镁可以在接触面形成局部的高熔点相，以降低溶渣侵蚀的速度，并黏附于表面，阻止溶渣的进一步渗透.在含碳量相近的前提下，氧化镁含量更高、杂质相含量更少的盐湖镁砂骨料在对抗钢包溶渣侵蚀方面具有较好的效果.

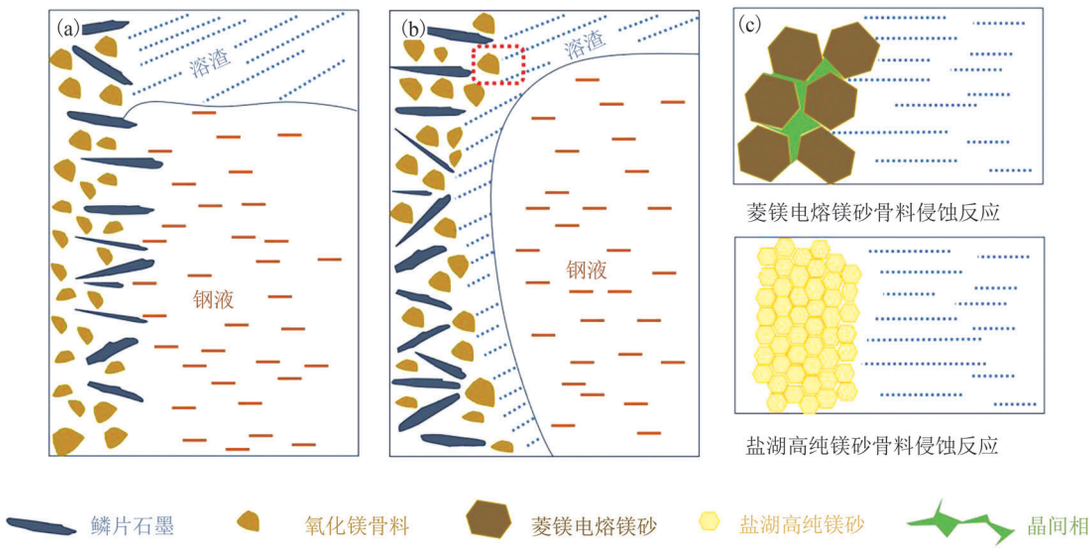


图 10　钢包耐火材料的马兰戈尼效应侵蚀示意图及镁砂侵蚀反应示意图

Fig. 10　Schematic diagram for Marangoni effect corrosion of ladle refractories and corrosion of different MgO aggregates

3　结论

(1)盐湖卤水生产的高纯镁砂的物相为方镁石相，氧化镁含量高，杂质少.其显微结构致密，晶粒生长完全，晶界发育完善，晶间相较少且分布均匀.在以盐湖水氯镁石为原料制备氧化镁过程中，析出的高活性物相是氧化镁致密化的关键因素.

(2)盐湖高纯镁砂制备的镁碳砖的理化指标均优于 99%菱镁电熔镁砂制备的钢包镁碳砖.在实际应用中，对比钢包镁碳砖现场使用的侵蚀情况、剥落情况及热稳定性，盐湖高纯镁砂打制的钢包镁碳砖基本与氧化镁质量分数 97%～98%的电熔镁砂打制的钢包镁碳砖效果基本一致，侵蚀寿命与残厚也相近.所实验的钢包在应用中都达到某特钢钢厂指标要求，故盐湖高纯镁砂制备的镁碳砖可以良好替代菱镁电熔镁砂制备的镁碳砖，具有一定的市场前景和应用价值.

4　参考文献

[1] 陈英春，周佳芬，路贵民，等. 高纯镁砂及氧化镁陶瓷研究进展[J]. 化工进展，2019，38(1)：505-515.
(Chen Yingchun，Zhou Jiafen，Lu Guimin，et al. A review on the production technologies of high-purity magnesia and magnesium oxide ceramics [J]. Chemical Industry and Engineering Progress，2019，38(1)：505-515.)

[2] Guo Z Q，Bi D L，Ma Y，et al. Approaches to high-grade sintered magnesia from natural magnesite [J]. China's Refractories，2020，29(3)：7-12.

[3] 高陟，马北越，任鑫明，等. 利用菱镁矿制备先进镁质材料的研究进展[J]. 耐火材料，2020，54(1)：88-92.
(Gao Zhi，Ma Beiyue，Ren Xinming，et al. Research progress of preparing advanced magnesia materials from magnesite[J]. Refractories，2020，54(1)：88-92.)

[4] 汪衢，白丽梅，马玉新，等. 菱镁矿煅烧制备氧化镁及其活性检测的研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分)，2022(1)：36-44.
(Wang Qu，Bai Limei，Ma Yuxin，et al. Research progress on preparation of magnesia by calcination of magnesite and its activity detection [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)，2022(1)：36-44.)

[5] 许嘉龙. 辽宁省镁质耐火材料的行业现状、存在问题及发展建议[J]. 耐火材料，2013，47(1)：70-73.
(Xu Jialong. Present situation，existing problems and development suggestions of magnesia refractories in Liaoning Province[J]. Refractories，2013，47(1)：70-73.)

[6] 周晓蕾. 关于实现辽宁镁质耐火材料行业高质量发展的思考[J]. 耐火与石灰，2021，46(3)：14-16.
(Zhou Xiaolei. Reflection on achieving the high-quality development of magnesia refractory industry in Liaoning province[J]. Refractories & Lime，2021，46(3)：14-16.)

[7] 兰志鹏，苑小舟，杨欣，等.菱镁矿及其尾矿化学法除杂技术进展[J].耐火材料，2026，60(2)：167-172.
(Lan Zhipeng，Yuan Xiaozhou，Yang Xin et al. Research progress on impurity removal and quality improvement of magnesite and its tailings by chemical method[J]. Refractories，2026，60(2)：167-172.)

[8] Pan X J，Dou Z H，Zhang T A，et al. Separation of metal ions and resource utilization of magnesium from saline lake brine by membrane electrolysis[J]. Separation and Purification Technology，2020，251：117316.

(下转第 540 页)

manufacturers after immersion in 3.5% NaCl solution[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(4):1701-1716.

[23] Lv S L, Yang Z M, Zhang B, et al. Corrosion and passive behaviour of duplex stainless steel 2205 at different cooling rates in a simulated marine-environment solution[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(9):943-953.

[24] Shao H B, Wang J M, He W C, et al. EIS analysis on the anodic dissolution kinetics of pure iron in a highly alkaline solution[J]. Electrochemistry Communications, 2005, 7(12): 1429-1433.

[25] 白怡怡. 典型雾霾组分对 $Ni_2FeCrMo_{0.2}$ 高熵合金的腐蚀作用机制研究[D]. 西安:西安理工大学,2023.
(Bai Yiyi. Study on the corrosion mechanism of $Ni_2FeCrMo_{0.2}$ high-entropy alloy subjected to typical haze componants [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.)

[26] Suo D H, Dai W, Liu Y Y, et al. Optimizing annealing temperature for Duplex Stainless Steel 2205 in acidic NaCl environments according to corrosion resistance[J]. Corrosion Science, 2023, 222: 111374.

[27] Liu C, Revilla R I, Liu Z Y, et al. Effect of inclusions modified by rare earth elements (Ce, La) on localized marine corrosion in Q460NH weathering steel[J]. Corrosion Science, 2017, 129: 82-90.

[28] 张继. 铈对低镍不锈钢中非金属夹杂物和钢组织及性能的影响研究[D]. 北京:北京科技大学,2023.
(Zhang Ji. Effects of cerium on nonmetallic inclusions, microstructure and properties of low-nickel stainless steels[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.)

(上接第515页)

[9] 郭光远.盐湖水氯镁石制取高纯氧化镁工艺研究[J]. 海湖盐与化工,2005,(3):12-13.
(Guo Guangyuan. Study on preparation of high purity magnesium oxide from bischofite in salt lakes[J]. Sea-Lake Salt and Chemical Industry, 2005, (3): 12-13.)

[10] 毕秋艳,党力,曹海莲,等. 青海盐湖镁资源开发与利用研究进展[J]. 盐湖研究,2022,30(1):101-109.
(Bi Qiuyan, Dang Li, Cao Hailian, et al. Development and utilization of magnesium resources in Qinghai salt lakes[J]. Journal of Salt Lake Research, 2022, 30(1): 101-109.)

[11] 李陇岗,钟辉,杨建元. 盐湖水氯镁石制备高纯镁砂的研究进展[J]. 盐湖研究,2004,12(1):57-61.
(Li Longgang, Zhong Hui, Yang Jianyuan. Advances in preparation of magnesia from bischofite in salt lakes[J]. Journal of Salt Lake Research, 2004, 12(1): 57-61.)

[12] 林丽芬. 卤水脱硼和超低硼氧化镁的制备[J]. 无机盐工业,1984,16(4):6-11.
(Lin Lifen. Boronization of brine and preparation of ultra-low boron magnesium oxide[J]. Inorganic Chemicals Industry, 1984, 16(4): 6-11.)

[13] Guo Z Q, Ding Q, Liu L, et al. Microstructural characteristics of refractory magnesia produced from macrocrystalline magnesite in China[J]. Ceramics International, 2021, 47(16): 22701-22708.

[14] 史幸福,刘国彦,王世界,等. 钢渣碱度对镁碳砖侵蚀速率的影响[J]. 耐火材料,2018,52(3):184-187.
(Shi Xingfu, Liu Guoyan, Wang Shijie, et al. Effect of steel slag alkalinity on erosion rates of magnesia carbon bricks[J]. Refractories, 2018, 52(3): 184-187.)

[15] Jia X D, Tian L, Mao S, et al. Slag erosion-resistant coating for periclase-magnesia-aluminum spinel brick [J]. Ceramics International, 2021, 47(22): 31407-31412.

[16] Mukai K. Wetting and Marangoni effect in iron and steelmaking processes[J]. ISIJ International, 1992, 32(1): 19-25.