



弥散型透气砖在 70 吨精炼钢包的实践应用

黄国涛¹, 韦尚锦¹, 李 博¹, 费新刚¹, 肖礼强¹, 余 雷¹, 蔡冰峰²

(1 大冶特殊钢有限公司研究院, 黄石 435001; 2 大冶特殊钢有限公司炼钢事业部, 黄石 435200)

摘 要: 通过对比透气砖的水模拟实验发现, 在相同压力下, 使用狭缝型透气砖时呈现为间歇式出气, 气泡体积较大, 但数量少。弥散型透气砖对钢包内的扰动小, 出气呈现为密集出气, 气泡细小个数多; 且狭缝型透气砖的流量值比弥散型流量值大, 对于钢包内钢液的扰动更大。通过对比透气砖开展的生产试验发现, 相同钢包内使用的弥散型透气砖后残长平均值明显高于狭缝型透气砖; 弥散型透气砖脱硫率 75.94% 低于狭缝型透气砖 85.19%。综合对比相同工艺路线下生产的 GCr15 钢的 Aspex、探伤、高倍等检验数据, 结果表明, 当使用弥散型透气砖与狭缝型透气砖混装时, 平均夹杂物总数为 218.2 个, $\leq 5 \mu\text{m}$ 氧化物夹杂物数量为 7.8 个, 均为最低; 夹杂物平均指数 5.6, 自动线探伤合格率 99.67%, 水浸超声 C 扫描检测无缺陷率 96.67%, B 细平均值为 0.534 级, 为最佳工艺方案。

关键词: 钢包; 透气砖; 狭缝型; 弥散型; Aspex 分析

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2024-00242 **中图分类号:** TF702+.9

Practical Application of Dispersion Breathable Brick in 70 t Refining Ladle

Huang Guotao¹, Wei Shangjin¹, Li Bo¹, Fei Xingang¹, Xiao Liqiang¹, Yu Lei¹, Cai Bingfeng²

(1 Research Institute, Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China;

2 Steelmaking division, Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China)

Abstract: By comparing the water simulation of the breathable bricks, under the same pressure, and it is presented as intermittent outgassing, and the bubbles are large in volume but small in quantity. The diffuse breathable brick has little disturbance to the ladle, and the air outlet is a dense air outlet, and the number of small bubbles is large; And the flow value of slit type breathable brick is greater than that of diffusion type, and the disturbance of the molten steel in the ladle is greater. By comparing the production test of breathable brick, it is found that the average residual length of the diffusion breathable brick used in the same ladle is significantly higher than that of the slit breathable brick. The desulfurization rate of dispersion type breathable bricks 75.94% is lower than that of slit type breathable bricks 85.19%. By comprehensive comparing the test data of Aspex, flaw detection and macrostructure of GCr 15 varieties produced under the same process route, the results show that when using the diffusion breathable tile and slit breathable tile, the average number of inclusions is 218.2, number of oxide inclusions that size $\leq 5 \mu\text{m}$ 7.8, Aspex inclusion index 5.6, qualified rate of automatic flaw detection 99.67%, defect-free rate of water immersion ultrasonic C-scan inspection 96.67%, average grade of B thin 0.534. In summary, it is the best solution.

Key Words: Ladle; Breathable Brick; Slit Type; Dispersion Type; Aspex Analysis

高品质钢具有高净化、高均质化的特点, 尤其是轴承钢, 广泛应用于制作汽车轴承、精密轴承、铁路轴承、风电轴承、重载轴承、大型盾构机轴承及航空轴承等领域^[1-2]。因工作环境恶劣且要求在整个服役周期内需要经受周期性反复滚动摩擦, 要求轴承钢必须具有高纯净度、长接触疲劳寿命及良好的耐磨、耐温、耐蚀等性能。非金属夹杂物与钢基体的结合能力弱, 破坏了钢基体的连续性, 往往是疲劳裂纹的起源。因而, 控制钢中非金属夹杂物是

提高材料寿命的关键。现阶段非金属夹杂物的控制手段主要是两类, 一是减少原辅料带入的外来夹杂物, 二是去除钢水中内生的非金属夹杂物。去除夹杂物的方法常规有两种, 第一种是电磁搅拌方法, 钢包精炼过程中形成电磁场给钢液动力学条件, 均匀钢液成分和温度促进夹杂物上浮, 第二种是钢包底吹氩的方式, 可以加速温度和成分均匀, 精确调节复杂的化学成分, 促进夹杂物碰撞长大, 同时, 气泡在上浮过程中, 包裹钢水中的夹杂物, 促

进其上浮被钢包顶渣吸附,这也是目前钢厂中最常用的方式^[3-5]。

1 试验材料及方法

GCr15轴承钢是特殊钢中产量最大的单一品种,占到轴承钢总量的85%以上^[5-6]。常见的GCr15成分范围及实测值见表1,通过对高频探伤缺陷和Aspex分析结果的定性分析,夹杂物尺寸集中在1~5 μm范围,如图1(a)所示,主要为Al₂O₃类,如图1(b)(c)所示。Al₂O₃为细小弥散型类型的夹杂物,尺寸小在冶炼过程中的钢包扰动下上浮难度大,且Al₂O₃熔点高,硬度大,不易变形等特性,冶炼过程中Al₂O₃夹杂物一般会聚集变大,大尺寸的Al₂O₃夹杂则会严重影响钢材的力学性能^[7]。

现用的70 t钢包为典型的“瘦长型”设计,其钢包高度与直径比值在1.5左右,透气砖为狭缝型,双透气砖分布在包底1/2R处,如图2所示。一方面,细小Al₂O₃类夹杂物由于其体积小,密度接近钢液导致浮力不足,同时,受钢液粘度等影响致使夹杂物上浮难度大,第二方面“瘦长型”钢包中,夹杂物被钢包顶渣吸附所进行的上浮路径相对更长,上浮过程中容易被钢包砖捕捉,在精炼中后期随着温度升高等条件变化,再回到钢液中,在冶炼过程中需要通过钢包底吹Ar₂气等方式,促进夹杂物长大、上浮。因狭缝型透气砖中容易夹钢,如果狭缝型中残钢未及时处理,钢包再次上线使用,就会影响精炼钢包吹通率和底吹效果^[8],故而狭缝型透气砖在使用过程中,对用O₂吹扫清理的要求更高,同时,吹扫过程

中产生较大黄烟,不利于降低员工劳动强度以及改善环境。弥散型透气砖气孔是纳米级显气孔,钢液渗入弥散型砖深度较浅时,贯通气孔中的残钢在反吹时能被高压反吹气体吹出,或者在再次出钢时,透气砖工作层被钢液加热,残钢融化后,被底吹氩气吹出^[9],这是一个很好的选择。

GCr15的生产工艺流程为:铁水+废钢→70 t电弧炉冶炼→LF精炼→VD/RH真空→连铸/模铸,对比透气砖进行水模拟以及使用实际。生产过程中取“球拍”样进行Aspex分析,比对夹杂物数量、尺寸及类别,结合成材后检验探伤数据进行对比,选定最佳的方案,试验计划及方案见表2。

2 透气砖对比

2.1 不同透气砖的水模拟

狭缝型透气砖制作过程中与镶嵌材料整体成型,气泡通过狭缝透气通道吹到钢包中,弥散型透气砖通道为显气孔透气块,形成的纳米级别的孔道,其示意图如图3(a)(b)所示。对比透气砖的水模拟可见,狭缝型透气砖对钢包内的扰动大,呈现为间歇式出气,气泡体积较大但数量少,弥散型透气砖对钢包内的扰动小,出气呈现为密集出气,气泡细小个数多,通过在0.2 MPa等相同压力下的流量检测发现,狭缝型透气砖的流量值比弥散型流量值大,见表3,反映了缝隙式透气砖因具有透气性能好、气体输送过程中阻力小、气量调节范围宽等特点^[10]。使用狭缝型透气砖,钢包内钢液扰动大,有利于夹杂物的碰撞长大,使用弥散型透气砖,非金

表1 GCr15钢的成分(质量分数)范围及实测值

项目	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ti	Ca	O
标准	0.95~1.05	0.25~0.45	0.15~0.35	≤0.025	≤0.020	1.40~1.65	≤0.25	≤0.25	≤0.10	≤0.050	≤0.003 0	-	≤0.001 20
实测	0.99	0.32	0.30	0.015	0.003	1.49	0.02	0.02	0.02	0.027	0.000 7	0.000 2	0.000 35

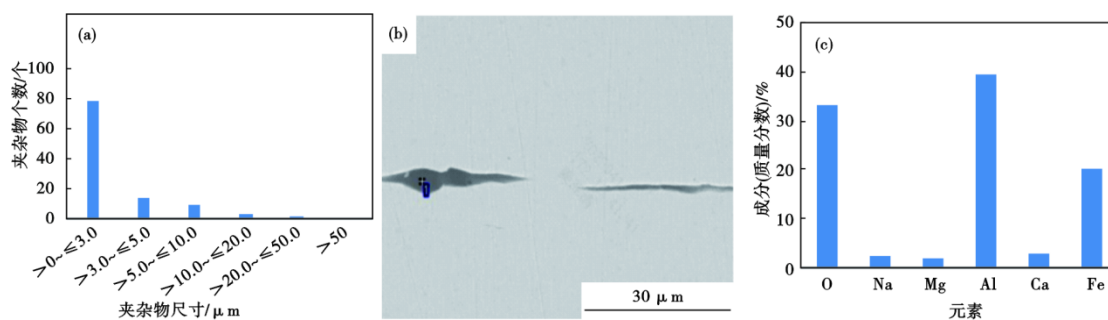


图1 GCr15缺陷定性分析:(a)夹杂物尺寸,(b)夹杂物形貌,(c)夹杂物能谱分析

Fig. 1 Defect qualitative analysis of GCr15 : (a) inclusion size, (b) inclusion morphology, (c) inclusion energy spectrum analysis

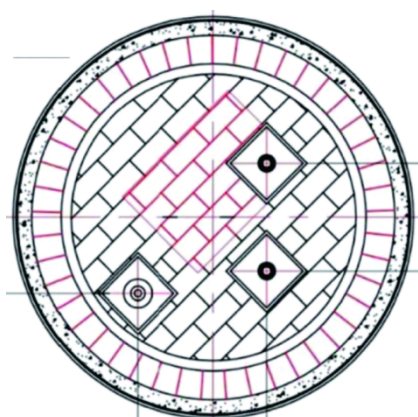


图 2 70 t 钢包透气砖位置示意图

Fig. 2 Location schematic diagram of breathable bricks in 70 t ladle

表 2 GCr15 钢不同透气砖试验方案

Table 2 Different breathable brick test schemes of GCr15 steel

试验计划	试验方案
计划 1	狭缝型+狭缝型
计划 2	弥散型+狭缝型
计划 3	弥散型+弥散型

属夹杂物和有害气体碰撞的概率显著增加,吸附细小夹杂物和吸收有害气体的效率提高^[11]。

表 3 弥散型透气砖及狭缝型透气砖流量对比

Table 3 Comparison of flow of diffusion and slit breathable brick

试验方案	0.2 MPa 流量/(m ³ ·h ⁻¹)	0.3 MPa 流量/(m ³ ·h ⁻¹)	0.4 MPa 流量/(m ³ ·h ⁻¹)	0.5 MPa 流量/(m ³ ·h ⁻¹)
狭缝型	23.5	27.3	30	32.5
弥散型	21.8	23.9	26.8	28.5

2.2 不同透气砖的使用对比

两个透气砖要求同上同下,钢包吹扫方式一致,氧气流量要求 ≤ 0.8 MPa,吹开透气砖上残钢残渣,以目测透气砖内部轮廓明显变黑,反吹流量计流量(标准态)显示 ≥ 50 L/min,即代表钢包吹扫完成。因透气砖为损耗功能件,在钢包运行期间需进行更换,只允许钢包挖一次渣线,一次渣线钢包运行期间常规需要使用三个透气砖,透气砖使用寿命要求为第一个 ≤ 20 次,第二个要求 ≤ 15 次,第三个要求 ≤ 10 次,每次更换透气砖需对透气座砖进行修补,保证透气座砖的运行质量。同时,为保证安全运行,热修过程中对需透气砖厚度进行测量,第一个透气砖 ≥ 15 次,第二、三个透气砖 ≥ 6 次每次上线前需对残长进行测量,如运行过程中发现了警示标识或者测量透气砖有效残长 < 150 mm,则需及时对透气砖进行更换。弥散型透气砖透气性良好,几乎不用烧氧,比狭缝型砖易吹开^[12],为使数据更有代表性,测量计划 2 中相同钢包中两个不同类型透气砖的残长,如图 4(a)所示,并记录数据进行统计分析,因吹扫容易,弥散型式透气砖在使用烧氧管进行清理时烧损小,用后残长平均值明显高于狭缝型透气砖,见表 4。

表 4 相同钢包中不同类型透气砖的残长平均值对比

Table 4 Comparison of average remaining length of different types breathable bricks in same ladle

次数	狭缝型	弥散型
第 1 次	268	293
第 2 次	223	261
第 3 次	165	209

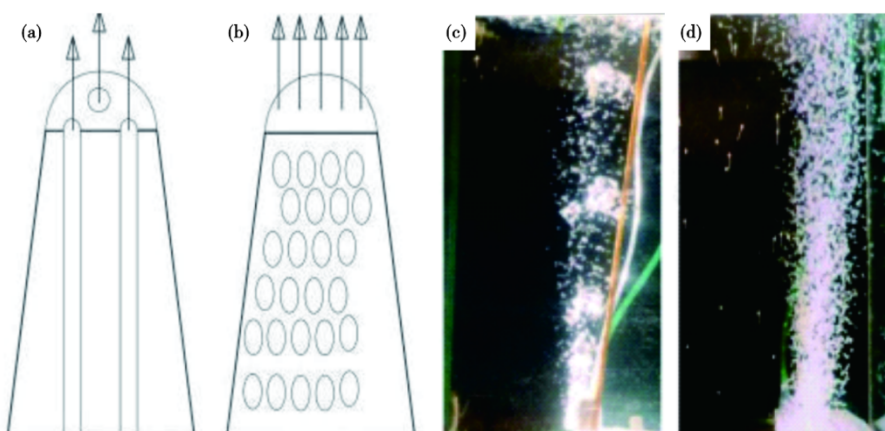


图 3 狭缝型、弥散型透气砖对比:(a)狭缝型透气砖示意图,(b)弥散型透气砖示意图,(c)狭缝型透气砖水模拟,(d)弥散型透气砖水模拟

Fig. 3 Contrast slit type breathable brick and water simulation with dispersion type : (a) diagram of slit type, (b) diagram of dispersion type, (c) water simulation of slit type breathable brick, (d) water simulation of dispersion type breathable brick

使用相同流量观察钢液面,两个透气砖在精炼过程液面以及软吹过程液面未见明显差异,如图 4(b)(c)所示。

相同冶炼操作工艺下,统计对比不同方案的脱 S 率,计算公式如式(1)。

$$\text{脱硫率} = \frac{(\text{电弧炉出钢钢包样 } w[S] - \text{精炼炉第一样 } w[S])}{\text{电弧炉出钢钢包样 } w[S]} \times 100\% \quad (1)$$

统计三种试验计划的脱硫率,发现计划 1 和计划 2 接近,计划 3 脱硫率最低,见表 5,狭缝型透气砖透气量大、搅拌效率高,有利于深脱硫及快速合金化^[13-14]。

3 试验结果与分析

3.1 Aspex 分析数据对比

夹杂物指数是衡量钢水纯净度的重要指标,通

表 5 不同试验计划的钢包和精炼 $w[S]$ 及脱硫率
Table 5 Ladle and refining $w[S]$ and desulfurization rate for different test plans

试验计划	平均钢包样 $w[S]$	平均精炼第一样 $w[S]$	脱硫率 %
计划 1	0.018 9	0.002 8	85.19
计划 2	0.018 3	0.003 2	82.51
计划 3	0.018 7	0.004 5	75.94

过取样进行的 Aspex 分析,见表 6。

表 6 GCr15 品种不同计划的夹杂物数据(平均值)
Table 6 Inclusion data for GCr 15 varieties grades for different test plans (mean)

试验计划	夹杂物指数	夹杂物总数/个	$\leq 5 \mu\text{m}$ 氧化物夹杂物数量/个
计划 1	11.62	516	37.2
计划 2	5.62	218.2	7.8
计划 3	5.68	243.2	6.3

计划 2、计划 3 夹杂物指数、夹杂物总数相近,且明显低于计划 1,且小颗粒的夹杂物数量明显减少。通过 Aspex 分析,相比计划 1,计划 2、计划 3 的炉次氧化物尺寸在 $\leq 5 \mu\text{m}$ 范围内的数量尤其是 Al_2O_3 的数量下降明显,如图 5 所示。

3.2 探伤数据对比

选取相同冶炼工艺生产的 GCr15 轴承钢,经轧制后成材规格 $\phi 43 \text{ mm} \sim \phi 48 \text{ mm}$ 范围的黑皮圆棒,按相同的 EN10308—2002 探伤标准进行自动化探伤,计划 2 的自动探伤数据合格率最高,见表 7。

同时也抽样进行水浸超声 C 扫描检测,检验标准:SEP1927—2010,4 级,检测频率 10 MHz,检测总

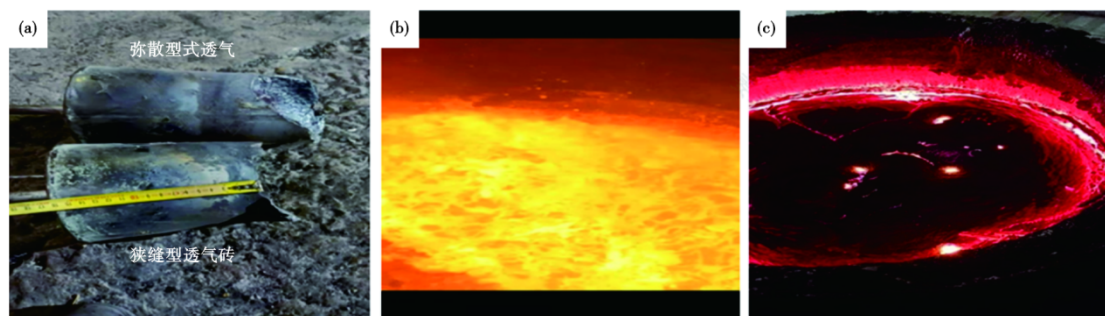


图 4 透气砖对比及液面情况(计划 2): (a) 用后透气砖; (b) 精炼过程液面; (c) 软吹液面

Fig. 4 Comparison of breathable brick and liquid level(plan 2) : (a) used breathable brick, (b) ladle refine surface, (c) soft blow surface

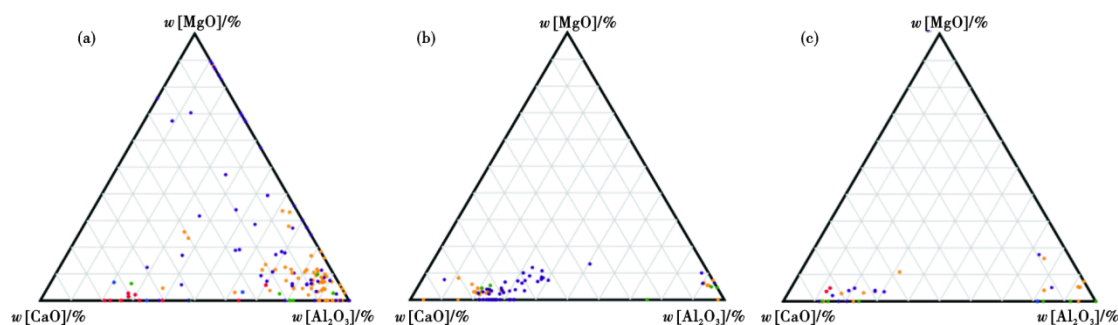


图 5 GCr15 品种不同方案的氧化物夹杂物的 Aspex 分析: (a) 计划 1, (b) 计划 2, (c) 计划 3

Fig. 5 GCr15 oxide inclusions Aspex pictures of different plans : (a) plan 1, (b) plan 2, (c) plan 3

表 7 GCr15 品种自动化探伤数据对比

Table 7 Comparison of automated flaw data of GCr15 grades

试验计划	探伤支数/支	报警支数/支	合格率/%
计划 1	2578	30	98.84
计划 2	3010	10	99.67
计划 3	4122	16	99.61

体积 $\geq 5 \text{ dm}^3$, 计划 2 的水浸超声 C 扫描无缺陷率最高, 见表 8。

表 8 GCr15 品种水浸超声 C 扫描检测数据对比

Table 8 GCr15 qualified rate of water immersion ultrasonic C-scan inspection

试验计划	批次数/个	报警支数/个	无缺陷率/%	最大影像缺陷/mm
计划 1	52	4	92.31	10
计划 2	30	1	96.67	9
计划 3	48	3	93.75	7

3.3 高倍分析对比

有资质的检验人员对 GCr15 轴承钢进行高倍分析, 按 GB/T10561—2023 标准对氧化物 B 类夹杂物进行评级, B 粗均为 0 级不具可比性, 对不同试验计划下 B 细数据进行统计, 从数据中可以看出, B 细指标依次为计划 3 好于计划 2, 最差为方案 1, 见表 9。

综上, 通过以上的 Aspex、探伤、高倍分析等检验数据, 结合水模拟对比分析, 实际生产过程中, 计划 2 的装配模式为最有利于夹杂物改善的装配模

表 9 GCr15 品种非金属夹杂物 B 细的检验结果

Table 9 GCr15 test results of nonmetallic inclusion B thin

试验计划	B 细最小值/级	B 细最大值/级	B 细平均值/级	最大值占比/%
计划 1	0.5	1.0	0.584	57.14
计划 2	0.5	1.0	0.534	42.86
计划 3	0.5	1.0	0.542	33.33

式。其中狭缝型透气砖的大气泡扰动有利于夹杂物碰撞长大, 弥散型透气砖的小气泡多个数有利于带动细小夹杂物的上浮, 综合作用下, 能较好地去除夹杂物。

4 结语

1) 对比透气砖的水模拟可见, 在相同压力下, 使用狭缝型透气砖时呈现为间歇式出气, 气泡体积较大但数量少。弥散型透气砖对钢包内的扰动小, 出气呈现为密集出气, 气泡细小个数多; 且狭缝型透气砖的流量值比弥散型流量值大, 对于钢包内钢液的扰动更大。

2) 弥散型透气砖能满足生产要求, 弥散型透气砖用后残长平均值明显高于狭缝型透气砖, 弥散型透气砖脱硫率 75.94% 低于狭缝型透气砖 85.19%。

3) 当使用弥散型透气砖与狭缝型透气砖混装时, 平均夹杂物总数为 218.2 个, 1~5 μm 氧化物夹杂物数量为 7.8 个, 均为最低; 夹杂物平均指数 5.6, 自动线探伤合格率 99.67%, 水浸超声 C 扫描检测无缺陷率 96.67%, B 细平均值为 0.534 级, 为最佳方案。

参考文献

- [1] 李向龙, 王德永, 屈天鹏, 等. 新型狭缝型-弥散型透气砖组合高效底吹工艺[C]//第十四届中国钢铁年会论文集. 1-6.
- [2] 刘洪波, 刘颖, 谢荣圆, 等. 高碳铬轴承钢全流程夹杂物演变机理及关键控制工艺[J]. 中国冶金, 2024, 34(2): 117-125.
- [3] 王宁, 秦德越, 李宝宽, 等. LF 精炼过程中通电升温阶段底吹氩方式的优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 507-513.
- [4] 张麒格, 李宝宽, 王长军. 底吹钢包内离散气泡运动及界面波动对脱硫行为影响[J]. 材料与冶金学报, 2021, 20(1): 31-37+44.
- [5] 刘西峰, 李大亮, 韩建林, 等. 底吹氩对 100 t 双透气砖钢包流场影响的数值模拟[J]. 工业加热, 2022, 51(4): 39-44.
- [6] 张健, 夏佃秀, 许荣昌, 等. GCr15 铸坯碳偏析对组织与摩擦磨损特性的遗传性影响[J]. 钢铁, 2025, doi: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20240603.
- [7] 马超, 刘毅, 张福利, 等. 软吹对 GCr15 轴承钢洁净度的影响[J]. 炼钢, 2024, 40(3): 33-38.
- [8] 孙振栋, 窦存超, 郭宁, 等. 夹杂物对 42CrMo4 钢塑性及韧性的影响分析[J]. 热加工工艺, 2024, 53(12): 81-86+99.
- [9] 王永强, 庞小栓. 弥散型透气砖在 100 吨精炼钢包的实践应用[J]. 天津冶金, 2022(2): 24-26.
- [10] 陈卢, 许远超, 郭鹏, 等. 钢包透气砖的发展及其典型复合结构的损毁分析[J]. 耐火材料, 2020, 56(4): 283-288.
- [11] 杜亭辉, 冯亮花, 吴明涛, 等. 底吹气泡运动行为及其对混匀影响的水模实验[J]. 特殊钢, 2024, 45(3): 22-26.
- [12] 刘欣宇, 王子铮, 郭宗昶, 等. 新型高效非对称底吹去除钢中夹杂物新工艺[J]. 连铸, 2024, 49(3): 74-79.
- [13] 李志勋, 王永辉, 李建泽, 等. 刚玉质弥散透气砖的性能与应用[J]. 耐火与石灰, 2016, 41(5): 14-17+22.
- [14] 王崇, 周朝刚. 钢包用弥散式透气砖的应用[J]. 连铸, 2019, 44(5): 58-62.