

· 冶炼与凝固 ·



真空感应炉坩埚寿命的试验研究与工艺优化

刘光辉^{1,2}, 李林森^{1,2}, 刘文学¹, 费三林^{1,2}, 杨进玲^{1,2}, 马 焯³, 倪燕红^{1,2}
(1 大冶特殊钢有限公司, 黄石 435001; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001;
3 联合矿产(天津)有限公司, 天津 300000)

摘要:在真空感应熔炼中,坩埚炉衬的质量直接关系到产品冶金质量、生产安全与成本。试验从炉衬材质选型、制作方式和烧结工艺等方面开展了探究,解析了影响坩埚质量的关键因素和规律。结果表明,相比于氧化镁基材料,采用氧化铝基炉衬可以减少裂纹和剥落;使用自动筑炉代替人工筑炉,炉衬具有更高的密度和均匀性,热硬性更好;炉衬烧结时适当降低升温速率至 40~60 °C/h 并延长保温时间,可均匀温度部分、促进水汽排出,并采用 1 650 °C 烧结;进而制定了有效工艺提高坩埚的服役寿命和冶金质量效果。

关键词:VIM; 炉衬材质; 坩埚寿命; 烧结工艺

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00062 **中图分类号:**TG133

Experimental Research and Process Optimization of Crucible Lining Life of Vacuum Induction Melting Furnace

Liu Guanghui^{1,2}, Li Linsen^{1,2}, Liu Wenxue¹, Fei Sanlin^{1,2}, Yang Jinling^{1,2}, Ma Ye³, Ni Yanhong^{1,2}
(1 Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China; 2 Hubei Provincial key laboratory of high-quality special steel, Huangshi 435001, China; 3 Allied Mineral Products (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: In vacuum induction melting (abbreviated as VIM), the quality of crucible furnace lining is directly related to the metallurgical quality, production safety and cost. The test was carried out to research from the aspects of lining material selection, manufacturing method and sintering process and so on, and the critical factors and rules affecting the crucible quality were analyzed. The results show that compared with MgO based material, Al₂O₃ based furnace lining can reduce cracking and peeling; With using automatic furnace construction instead of manual operation, the furnace lining had higher density and uniformity, and better thermal hardening. Appropriately reducing heating rate to 40 °C/h-60 °C/h and extending insulation time during furnace lining sintering achieved uniform temperature distribution, promoted water vapor discharge, and sintering at 1 650 °C. Then effective process were proposed to improve the service life of VIM lining, and metallurgical quality effect.

Key Words: VIM; Furnace Lining Material; Crucible life; Sintering Process

真空感应熔炼(Vacuum Induction Melting, VIM)是一种在极限真空状态下对钢或合金等金属材料进行感应加热、熔化、精炼、合金化及真空浇注成锭的先进冶炼方法^[1]。凭借能精确控制金属液化学成分、降低有害杂质元素、减少夹杂物形成进而显著提高钢与合金的纯净度等冶金功能优势,目前,在国内外真空感应熔炼法均为高温合金、精密合金、超高强度钢、特种不锈钢等诸多具有特殊要求产品的首选冶炼方法之一。

作为感应炉构造的核心组成部分,坩埚炉衬的质量至关重要,坩埚稳定性和坩埚与金属液接触时的物理化学作用^[2-3]直接影响其相应铸锭产品的化学成分、内外部质量以及设备的安全运行状况、生产率等^[4],因此,提高坩埚质量、保障其稳定性与服

役长寿命,确保感应冶炼过程长时顺行,是获得低成本、高纯净度产品的重要基础。本研究基于坩埚制备试验,从炉衬料材质、制作方式、烧结工艺以及日常操作等方面开展了试验探究工作,分析了影响坩埚质量的关键因素和规律,为真空感应炉坩埚制作工艺的提升提供支持。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验在国外某著名冶金设备厂家进口的真空感应炉上进行,该设备公称容量为 6 t,其坩埚的主要参数见表 1。拟采用不同基体的炉衬料、人工和机械自动捣打炉衬方式、不同烘炉/烧结工艺进行坩埚制作试验并评价其成型质量。

表1 6 t真空感应炉坩埚参数
Table 1 Parameters of the crucible of 6 ton VIM furnace

净身高度/mm	净身宽度/mm	熔炼线高度/mm	炉墙厚度/mm	炉底厚度/mm	最大装入量/kg	报警系统
1 794	965	1 187	上口 115 下口 133	152	6 500~7 000	炉墙、炉底 两套独立报警系统

试验选用美国联合矿产耐火材料作为坩埚炉衬料,其具体参数见表2。

在试验阶段本真空感应炉设备上生产的品种包括超高强度钢、高温合金和不锈钢。根据具体合金体系的熔点及其冶炼需要,限制坩埚工作的最高温度为1 700 °C。

1.2 试验方法

本试验中坩埚制作采用炉衬散料现场捣打+烘烤、烧结成型的方式:使用炉衬耐材捣打炉底,以坩埚内腔尺寸作为外形尺寸制作的铁模芯在炉底水平居中放置,固定后分层捣打炉壁并使用振动器夯实,反复,直至渣线以下的炉壁捣打结束;渣线以上的炉壁改用封口耐材,捣打方法相同。

分别采用不同的坩埚炉衬料材质、炉衬捣打制作方法和烧结工艺来制作真空感应炉坩埚炉衬,观测分析坩埚的质量情况;在前述生产品种中,选定高温合金GH4648、316 L不锈钢进行实际生产冶炼,在生产过程过观察坩埚炉衬使用形貌和效果,通过对比分析探究影响坩埚质量的主要因素和规律。

1.2.1 炉衬料材质方案

试验研究氧化镁基和氧化铝基两种炉衬料材质对坩埚寿命的影响,具体方案见表3。根据使用部位的不同,真空感应炉坩埚耐材可分为炉衬耐材(渣线以下炉衬在长期与钢水接触的服役区,需选用烧结温度较高的耐材,更耐用)、封口耐材(渣线以上的所用的炉衬料),以及炉嘴耐材(制作出钢口)^[5]。

1.2.2 筑炉方法

试验研究传统人工筑炉与升级为自动筑炉机

筑炉两种制作方法对坩埚寿命的影响,具体方案见表4。

1.2.3 烧结工艺

炉衬捣打后进行烧结,目的在于提高坩埚的致密性、强度和体积稳定性,以适应冶炼条件下的需要:低温段控制升温速度并阶段性保温,随后在真空升至高温烧结温度进行烤炉。试验研究不同的炉衬烧结工艺(包含升温速度、保温工艺,终烧温度和ación等关键参数变化)对坩埚寿命的影响,根据耐材厂家提供的耐材信息和设备实际条件,拟定3种基本的烘烤烧结工艺方案(1#~3#),具体方案见表5。

2 试验结果与讨论

2.1 炉衬料材质对坩埚的影响

图1所示为氧化镁基和氧化铝基两种炉衬料材质制作感应炉炉衬的热态表现情况。可以看出,采用氧化镁基炉衬料制作的坩埚,其抗裂纹敏感性和热强性相对较差。试验发现:在感应熔炼单炉次生产完毕至出钢后,热态炉衬由高温段向低温段过渡时,在干振料和封口料结合处这个关键区域,会产生明显的因热胀冷缩而形成的裂纹^[6],最大宽度可以达到3~5 mm。

在感应熔炼前期,大量密度和质量大的合金原料如原料钢、镍板、金属铬等在装料时,下落的原料与炉衬接触撞击,由于坩埚炉衬的热强性较差,开裂变得松散的炉衬会被剥离击落,进而掉落到炉底,在后续熔炼时形成金属液表面的浮渣,严重影响冶炼。

相比之下,如图1(b)所示,采用氧化铝基炉衬

表2 坩埚耐火材料参数
Table 2 Parameters of the crucible refractory

材料名称	主要成分(质量分数)/%		工作温度/°C	施工及固化方式
DRI~VIBE 673M	MgO: 75.2	Al ₂ O ₃ : 22.1	1 595~1 815	干捣或振动
PATCH 674M	MgO: 53.4	Al ₂ O ₃ : 34.3	常温~1 760	手工慢抹或风锤捣打
DRI~VIBE 682	MgO: 15.9	Al ₂ O ₃ : 83.2	1 593~1 815	干捣或振动
DRI~VIBE 481	MgO: 4.0	Al ₂ O ₃ : 91.4	常温~1 650	干捣或振动
STEEL~PAK 90CR	Al ₂ O ₃ : 73.1	SiO ₂ : 12.3	常温~1 760	气捣或手捣
PATCH A53	Al ₂ O ₃ : 93.3	SiO ₂ : 3.7	常温~1 760	湿打或手工捣打、室温固化

表 3 坩埚炉衬的不同材质

Table 3 Different materials of crucible lining

炉衬材质	材质方案
氧化镁基	采用 DRI~VIBE 673M 作为干振料, 制作用于长期与钢水接触的服役区, 采用 PATCH 674M 湿打料, 制作炉衬封口料, 利用 STEEL~PAK 90CR 作为炉嘴料, 制作出钢口
氧化铝基	采用 DRI~VIBE 682 作为干振料, 制作用于长期与钢水接触的服役区, 采用 DRI~VIBE 481 作为干振料, 制作炉衬封口料, 利用 STEEL~PAK 90CR 作为炉嘴料, 制作出钢口

表 4 不同炉衬筑炉方式

Table 4 Different tamping method of crucible lining

筑炉方式	实施方案
人工筑炉	利用手持式博士振动器进行筑炉, 全程去气及振动都依靠人力完成
自动筑炉	利用自动式博士振动器进行筑炉, 全程去气依靠人力完成, 振动依靠设备自动完成

料制作的坩埚, 其抗裂纹敏感性和热强性相对较好, 即使在冶炼更换炉次过程中频繁的出现冷热交替情况, 炉衬也未出现明显裂纹, 保持了良好的完整性。这是由于较好的热强性会保护炉衬受到原料的机械冲击, 基本不会发生分解剥离现象, 炉衬内壁光滑完整。

坩埚材质的化学成分和物化特性是影响坩埚使用寿命的本质原因。炼钢过程温度不断变化, 体积随之膨胀收缩, 受热不均匀时易产生裂纹, 因此,

炉衬材料要有良好的热态稳定性^[6]。研究认为, 由于碱性氧化镁(MgO)材料的化学特性^[5], 在高温高湿度状态下容易发生水解反应, 如式(1), 导致氧化镁基坩埚炉衬发生分解粉化, 显著影响炉衬的强度, 且抗激冷激热性能较差, 使用中热胀冷缩易出现裂纹^[6]。而采用氧化铝(Al₂O₃)作为炉衬料, 其热稳定性高^[7], 在一般的炼钢环境状态下, 能够承受更强的物理冲击、高温及水蒸气影响, 从而明显提高炉衬的使用寿命。



2.2 筑炉方式对坩埚的影响

本试验筑炉过程为分层填充炉衬料和捣打, 每层耐材均使用振动方法夯实, 并使得各层与层间能够连接紧密。采用的传统人工与自动筑炉(振动器)这两种不同的筑炉方式, 二者主要区别在于对炉衬料进行振动紧实时所用的力度及其均匀性存在差异。试验对同样坩埚制作的两种筑炉方式下, 使用的炉衬料重量以及使用过后的炉衬有效密度进行了测算, 结果见表6。

表6中数据显示, 同样容量同样尺寸形式的坩埚, 相比于传统人工实施, 采用气动筑炉机设备进行自动筑炉时, 所用炉衬料平均干振料重量由 2 100 kg 提高到 2 230 kg, 炉衬上部的封口料由 580 kg 提高到 620 kg。计算可知人工筑炉的炉衬有

表 5 炉衬不同烧结工艺

Table 5 Different sintering process of crucible lining

方案编号	低温段升温速度/(°C·h ⁻¹)	低温段保温工艺	终烧结温度/°C及时间/h
1 [#]	100	400、600 °C各保温 2 h	1 600×2
2 [#]	60	400、600 °C各保温 2 h	1 650×2
3 [#]	60	200、400、600、800、1 000、100 °C各保温 2~3 h	1 650×2

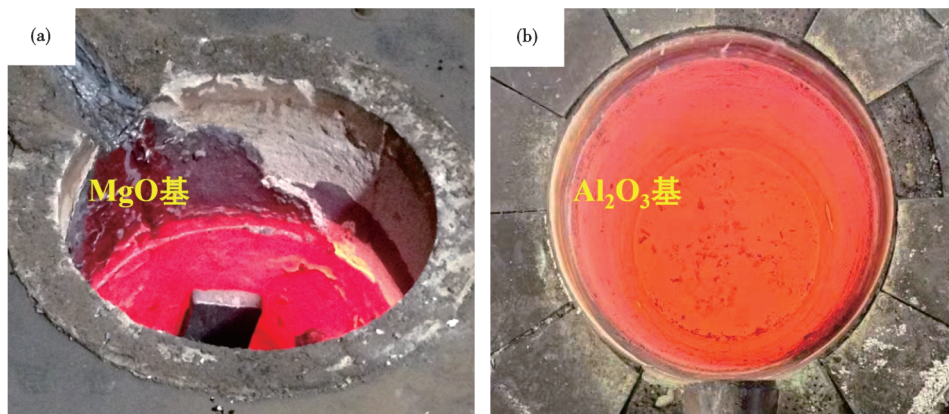
图 1 坩埚炉衬形貌:(a) MgO 基材质, (b) Al₂O₃ 基材质Fig. 1 Morphology of crucible lining: (a) MgO based material, (b) Al₂O₃ based material

表6 不同筑炉结果

Table 6 Result of different lining tamping method

试验类别	炉衬料平均用量/kg	使用过后炉衬有效密度/(g·cm ⁻³)
人工筑炉	干振料 2 100 封口料 580	2.68
自动筑炉	干振料 2 230 封口料 620	2.86

效密度为 2.68 g/cm³, 而采用自动筑炉过后炉衬有效密度提高到 2.86 g/cm³, 炉体的致密程度有了显著提升, 这也是提高坩埚质量和寿命的重要途径。

生产实践中 6 t 容量的感应炉坩埚正常筑炉时间约为 6 h, 由于人工筑炉需要更换不同的工作人员, 不同人员在力度和振动程度上不可避免有所差异, 这导致每一层炉衬料受到的振动力都不一致, 使得炉衬不均匀致密、内部存在不同程度的空隙; 而采用自动筑炉进行筑炉时, 只要确保了气动压力及设备状态, 就可以确保每一层的振动力是相同的, 且比人工振动更致密^[8]。从平均炉衬使用量及有效密度可以得到验证。

2.3 烧结工艺对坩埚的影响

对筑炉结束的炉衬进行烧结, 坩埚的实际使用寿命不仅与制备坩埚的材料和方式有关, 烘炉的工艺设定也显著影响炉衬烧结效果和水汽逸出情况, 进而影响坩埚质量^[9]。分别为采用不同的炉衬烧结工艺(对比低温段升温速度、保温工艺, 烧结温度和时间)时坩埚上、中、下部位的温度变化曲线如图 2 所示。试验采用两种升温速度对炉衬进行升温, 从烧结过程看, 低温段以 80~100 °C/h 的速度升温且不采用保温盖板时, 检测的炉衬漏电流值没有明显升高, 说明炉衬料内的结晶水未完全排出, 同时坩埚上、中、下部温差较大, 达到 200 °C。

低温段以 40~60 °C/h 速度升温并采用保温棉盖板时, 炉衬漏电流值明显升高, 同时能清楚地看到炉衬料出现水汽, 将炉衬料中吸附的水分缓慢蒸发

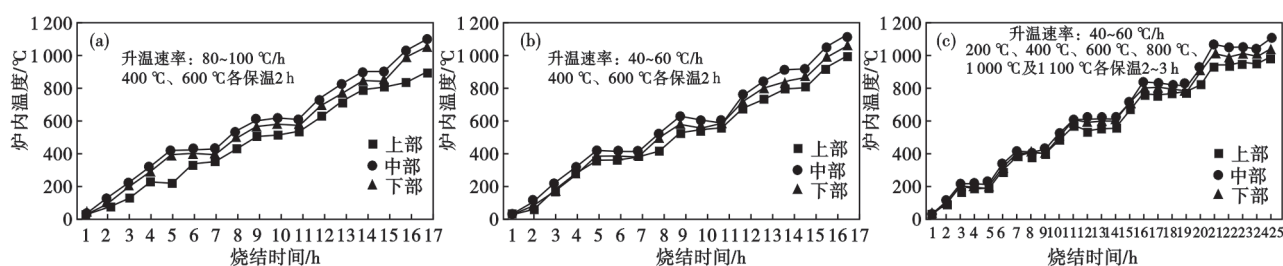
掉, 避免后期坩埚内表因大量水分的排出而开裂; 此外, 烧结时上、中、下部的温差缩小至 100 °C 以内。从烧结后坩埚的实际使用情况来看, 采用保温盖板及低温升温的炉衬寿命更高。研究分析认为, 低温烘烤时水蒸气的逸出速度不会太快, 可以避免在坩埚中产生早期裂纹^[4,6,10], 因此, 应将升温速度放缓并做好保温, 均匀各部位温度, 因此, 在炉衬料厂家产品说明推荐的 100~200 °C/h 的升温速率基础上, 根据 6 t 真空感应炉炉壁厚度引起的匀温时间延长, 降低至 60 °C/h 左右。另外, 炉口处增加保温盖板后, 可以进一步减少热损、缩小上中下区域炉衬的温差, 说明延长保温时间可以增加温度在炉衬中间的扩散, 以达到均温的目的。

如图 3 所示, 坩埚烘烤和烧结阶段, 合理的低温段升温速度和足够的分阶段保温时间必须保证温度的均匀性和水汽缓慢蒸发排出, 规避裂纹风险; 在后期烧结过程, 按照抽真空→充氩气保护→升温至烧结温度→保温的工艺进行, 形成高强度的致密层。烧结应根据厂家产品说明与技术规范推荐的干振料和封口料的参数信息确定最佳烧结温度: 试验条件下, 选用 DRI-VIBE 682 和 DRI-VIBE 481 捣打 Al₂O₃ 基炉衬, 合理烧结温度宜在 1 630~1 650 °C。

2.4 工艺控制措施与效果验证

以上试验结果表明, 炉衬材质、筑炉方法、烧结工艺均是坩埚质量和寿命的重要影响因素, 根据分析的影响规律, 生产技术部门制定以下工艺控制措施, 以提高真空感应炉坩埚寿命: ①优先采用氧化铝基炉衬材料制作坩埚, ②使用自动筑炉机代替传统人工筑炉, 提高捣打密实度, ③炉衬烘干、烧结过程中通过适当降低低温段的升温速度至 40~60 °C/h 并在 200、400、600、800、1 000、1 100 °C 分多个阶段延长保温时间, 采用 1 650 °C 终烧结温度。

真空感应炉生产单位在现场逐步实施坩埚炉

图2 烧结过程炉衬温度变化:(a) 1[#]工艺,(b) 2[#]工艺,(c) 3[#]工艺Fig. 2 Temperature curve of lining during sintering process: (a) 1[#] process, (b) 2[#] process, (c) 3[#] process

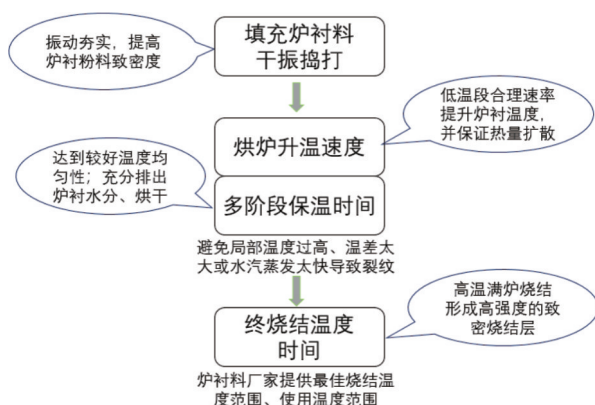


图3 炉衬烧结工艺要求及参数影响

Fig. 3 Requirement of lining sintering process and effect of parameters

衬工艺控制措施, 捣打烧结炉衬质量明显提升, 坩埚使用炉次数由之前 20~30 次提高到普遍 40 次以上, 显著提高了感应冶炼顺行和生产效率, 相同设备下产量得到更好的保障。经过对近几年 6 t 真空感应炉炉龄的统计, 相关数据结果如图 4 所示, 可以看出, 随着工艺的优化与改进, 炉龄得到了明显的提升, 目前一次坩埚的服役炉次可以长期稳定在 50~55 次。

试验结果表明, 炉衬材质、筑炉方法、烧结工艺均是坩埚质量和寿命的重要影响因素, 根据分析的影响规律, 生产技术部门制定优化工艺控制措施, 以提高真空感应炉坩埚寿命。

参考文献

- [1] 王振东, 曹孔健, 何纪龙. 感应炉冶炼[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] 赵鸿燕. 真空感应炉坩埚材质对镍基合金 Inconel 690 氧硫含量的影响[J]. 特殊钢, 2011, 32(6): 43-46.
- [3] 薛正良, 高俊波, 齐江华, 等. 真空感应熔炼过程炉衬材料向钢液供氧现象的研究[J]. 特殊钢, 2005, 26(1): 6-8.
- [4] 金开锋, 吴瑞云, 彭伟平, 等. 真空感应炉坩埚制备及维护应用[J]. 中国设备工程, 2020(10): 35-36.
- [5] 成建强, 胡显军, 顾 晔, 等. 真空感应熔炼炉氧化铝材质坩埚的制备[J]. 铸造, 2022, 71(11): 1431-1434.

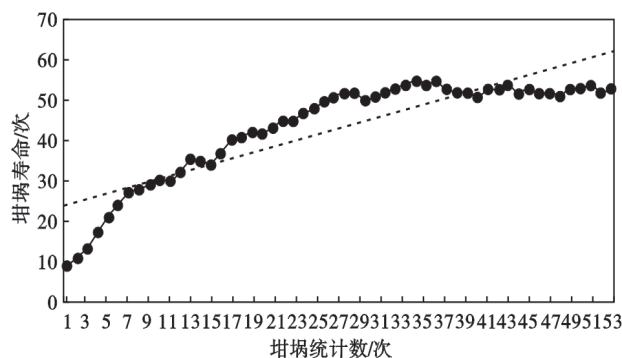


图4 坩埚寿命增长情况

Fig. 4 Increase of crucible life

3 结论

1) 相比于氧化镁基炉衬料, 试验条件下采用氧化铝基制作坩埚炉衬, 可以有效地降低坩埚裂纹倾向和剥落的程度。

2) 采用自动筑炉机代替传统人工筑炉, 能够有效地控制振动时炉衬的受力大小和均匀性, 确保炉衬更高的有效密度和内部均匀性, 提高炉衬热硬性。

3) 炉衬烘干和烧结过程中通过适当降低低温段的升温速度并且延长保温时间, 可以缩小炉衬各个区域的温度差, 提高烘干、排出炉衬中水汽的效果, 并在 1 650 °C 终烧结, 进而提升炉衬质量。

4) 经工艺调整, 坩埚寿命由 20~30 次提升至 50~55 次, 坩埚平均使用寿命提升 40% 以上。

- [6] 钱建辉. 提高中频感应炉炉龄的措施[J]. 铸造, 2008, 57(11): 1219-1220.
- [7] 潘起雄. 刚玉-尖晶石坩埚在中频感应炉上的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(3): 254-255.
- [8] 李广太. 感应电炉炉衬材料的选择与筑炉操作[J]. 铸造, 2005, 54(10): 1039-1041.
- [9] 徐文峰. 中频感应炉烘炉工艺对坩埚寿命影响因素分析[J]. 工业加热, 2001, 30(6): 53-54+56.
- [10] 鲁靖国. 影响感应电炉坩埚使用寿命的因素分析[J]. 现代钢铁, 2004, 24(3): 32-34.