DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4210

电渣重熔冶炼贝氏体辙叉钢渣系设计研究

李龙飞[1],张　阳[2],林腾昌[1],牛澄洲[1],周晓舟[1]
(1. 钢铁研究总院有限公司 冶金工艺研究所,北京 100081;2. 中国金属学会,北京 100711)

摘　要:针对贝氏体辙叉钢成分及液相线温度特点,以低共晶点原则,借助 FactSage 7.3 热力学软件计算 CaF_2-Al_2O_3-CaO-MgO 渣系相图以及熔点、黏度、电导率等物性参数,进而优选出新型贝氏体辙叉钢专用渣系。利用实验室 10 kg 级电渣重熔炉对比研究了传统二元渣系70%CaF_2-30%Al_2O_3(1#)(质量分数)和设计渣系 47.5%CaF_2-21.5%Al_2O_3-28%CaO-3%MgO(2#,质量分数)电渣重熔冶炼贝氏体辙叉钢成分和低倍组织等冶金质量的差异。结果表明,相比于传统二元渣系,利用设计渣系电渣重熔冶炼的贝氏体辙叉钢脱硫率更高,可达到 90.91%,但钢中硅存在一定程度的烧损且电渣重熔增氢幅度更大。经两种渣系冶炼的电渣锭低倍组织均较为良好,设计渣系重熔电渣锭表面质量更优。

关键词:贝氏体辙叉钢;电渣重熔;渣系设计;脱硫

中图分类号:TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)11-1119-06

Design and Research of Slag System on Bainitic Frog Steel for Electroslag Remelting

LI Longfei[1], ZHANG Yang[2], LIN Tengchang[1], NIU Chengzhou[1], ZHOU Xiaozhou[1]
(1. Department of Metallurgical Technology Research, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. The Chinese Society for Metals, Beijing 100711, China)

Abstract: On the basis of the composition and liquidus temperature characteristics of bainitic frog steel, the phase diagram of the CaF_2-Al_2O_3-CaO-MgO slag system, as well as physical parameters such as the melting point, viscosity, and conductivity, was calculated via FactSage 7.3 thermodynamic software. Furthermore, a new specialized slag system for bainitic frog steel was optimized. The differences in the metallurgical quality, composition, and microstructure of bainitic frog steel during electroslag remelting between the traditional binary slag system containing 70 wt.% CaF_2-30 wt.% Al_2O_3 (slag 1#) and the designed slag system containing 47.5 wt.% CaF_2-21.5 wt.% Al_2O_3-28 wt.% CaO-3 wt.% MgO (slag 2#) were investigated in a 10 kg electroslag remelting furnace. Compared with that of the traditional binary slag system, the desulfurization rate of bainite frog steel smelted by designing slag-based electroslag remelting is greater, reaching 90.91%. However, there is a certain degree of burning loss of silicon in steel, and the increase in hydrogen content is greater during electroslag remelting by slag 2#. The microstructure of the electroslag ingots smelted by the two slag systems is relatively good. The designing slag based remelting electric slag ingot has better surface quality.

Key words: bainite frog steel; electroslag remelting; design of slag system; desulfurization

作为国家重要的基础设施、国民经济的大动脉和大众化的交通工具,铁路在中国综合交通运输体系中处于骨干地位,铁路的发展关乎国计民生。铁路辙叉作为使车轮由一股钢轨越过另一股钢轨的平面交叉设备,既是铁路运输系统中一种高损耗量设备,也是铁路运输系统中最为关键的部件之一。目前,制造铁路辙叉的材料主要包括高锰钢和贝氏体钢[1]。相比于高锰钢,贝氏体钢具有更优良的强度和焊接性能[2-4],可与铁路钢轨焊接,满足超长无缝线路的要求,广泛应用于无缝化普速和高速线路上。

经过二十余年的技术积淀和迭代创新,中铁宝桥自主开发了III代高耐磨贝氏体钢辙叉,性能优于既有的中国铁路总公司标准[5]。考虑到此种高耐磨贝氏体辙叉钢对气体含量以及夹杂物控制的严格要

收稿日期:2024-10-23
基金项目:中央企业自主投入研发专项重点基金(事 23160380Z);国家重点研发计划(2023YFB3710203)
作者简介:李龙飞,1990 年生,博士,高级工程师.主要从事特殊钢及高温合金特种冶炼工艺研究方面的工作.Email:aifei_0105@126.com
引用格式:李龙飞,张阳,林腾昌,牛澄洲,周晓舟.电渣重熔冶炼贝氏体辙叉钢渣系设计研究[J].铸造技术,2025,46(11):1119-1124.
LI L F, ZHANG Y, LIN T C, NIU C Z, ZHOU X Z. Design and research of slag system on bainitic frog steel for electroslag remelting [J]. Foundry Technology, 2025, 46(11): 1119-1124.

中国知网　https://www.cnki.net

求，通常选择“电弧炉–LF(ladle furnace)精炼–VD (vacuum degassing)精炼–模铸+电渣重熔”的冶炼流程。其中，电渣重熔可借助高温熔渣与金属熔滴间相互作用及结晶器冷却控制，获得具有低硫含量、高洁净度、良好的表面质量及凝固组织等特征的电渣锭[6-8]，在电弧炉初炼的基础上进一步提升冶金质量。电渣重熔冶炼特定金属材料时除了设计合理的电制度和冷却制度外，电渣重熔渣系的选择也至关重要，熔渣在冶炼过程中起到发热、精炼钢液、促进电渣锭成型及导热等作用[9]。

电渣重熔选择不同的渣系对电渣锭冶金质量、熔炼指标会产生重要影响，渣系组元类别及所占比例将直接影响电渣锭中易烧损元素控制、夹杂物有效去除效果[10-13]。近年来，国内外研究学者在电渣重熔渣系对不同钢种电渣锭中易烧损元素收得率以及洁净度等冶金质量方面做了大量研究工作。李健等[14]对比研究了70%CaF_2-30%Al_2O_3和55%CaF_2-25%Al_2O_3-17%CaO-3%MgO(质量分数，下同)渣系对NiCrMoV合金钢电渣锭洁净度及元素稳定控制的影响，揭示了渣中添加TiO_2对稳定钢中Ti元素的作用机理，开发了适用性强的新型渣系。赵鸿燕等[15]研究发现向CaF_2-Al_2O_3-CaO三元渣系中加入一定量的SiO_2组元可有效抑制ER90S低铝焊丝钢和1Cr21Ni5Ti低铝不锈钢在电渣重熔冶炼中Al元素的增加。Duan等[16]利用离子共存理论(ion and molecule coexistence theory, IMCT)计算了多种不同配比的电渣重熔渣系组元活度，获得了可以有效抑制Al、Ti、B、Si氧化烧损的渣系。相似地，刘福斌等[17]通过IMCT理论建立了质量作用浓度热力学计算模型，借助渣金平衡实验验证了电渣重熔渣系组元对Inconel 625高温合金Al、Ti元素烧损的影响机制。耿鑫等[18]研究开发了63%CaF_2-30%Al_2O_3-7%MgO新型渣系用于冶炼核级316H不锈钢，该渣系与企业生产所用60%CaF_2-20%Al_2O_3-20%CaO渣系相比具有更低的氢渗透率，可有效抑制电渣重熔冶炼过程中的增氢。王洪涛等[19]研究发现在CaF_2-Al_2O_3-CaO三元渣系中添加3%MgO和5%SiO_2可有效提高H13模具钢的组织性能和表面质量，同时降低冶炼电耗。目前，本文研究对象，即新一代贝氏体辙叉钢在生产中仍选择传统的70%CaF_2-30%Al_2O_3二元渣系，存在夹杂物去除效率低、表面质量不稳定等问题，亟需开展适用性更强的电渣重熔渣系开发工作。

借助FactSage热力学软件、低倍组织分析、化学检测分析等方法，以低共晶点原则优化设计贝氏体辙叉钢专用电渣重熔渣系，并利用10 kg级电渣重熔炉探究了设计渣系与传统二元渣系对贝氏体辙叉钢电渣锭合金元素及低倍组织的影响规律，为贝氏体辙叉钢的工业级制备提供渣系选择的理论依据。

1 实验材料与方法

利用中频真空感应炉冶炼1支重约30 kg的贝氏体辙叉钢铸锭，其化学成分如表1所示。铸锭在特定工艺下锻造成直径为40 mm，表面光亮的棒材，去掉冒口，将其中间切开成2支单重约12 kg的电渣重熔自耗电极。选用内径为ϕ80 mm的水冷结晶器在实验室小型电渣重熔炉上进行冶炼实验，所用的两种渣系成分如表2所示。两种渣系冶炼实验所用渣量均为1 kg，并于冶炼前由分析纯试剂配制混匀，在1 600 ℃保温60 min预熔，随后将高温液态渣直接加入电渣炉内，冶炼过程中结晶器内部持续通入氩气保护。冶炼电压均为34 V，电流为1 500~1 600 A，熔速在0.48~0.52 kg/min范围内波动。

表1 贝氏体辙叉钢实验钢化学成分
Tab.1 Chemical composition of the bainite frog steel

(mass fraction/%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	N	H	O
0.25	1.76	1.82	0.009 6	0.011	1.42	0.41	0.52	0.021	0.002	0.000 1	0.002

表 2 两种电渣重熔用渣系化学组成
Tab.2 Chemical compositions of the two slag systems for electroslag remelting

(mass fraction/%)

Slag	CaF_2	Al_2O_3	CaO	MgO
1#	70.0	30.0	0	0
2#	47.5	21.5	28	3

在分析研究电渣锭冶金质量时，采用150 g硫酸铜+35 mL硫酸+500 mL盐酸溶液侵蚀电渣锭纵剖面，分析低倍组织特征，并在2支电渣锭冒口处取样检测O、S、H、Si等元素含量，并与电极母材中的结果进行对比分析。

2 实验结果及讨论

2.1 电渣重熔渣系设计

电渣重熔渣系在冶炼过程中起到非常关键的作用，为了满足各项指标要求，必须从熔点、黏度、电导率、密度、蒸气压等多项物理化学性质进行综合考虑，优选出与冶炼钢种相匹配的渣系。多元渣系的

中国知网 https://www.cnki.net

低共晶点通常作为电渣重熔渣系选择的基本原则，这是由于当渣系成分不在低共晶点处时，易造成在电渣重熔冶炼过程中熔渣成分的变化且熔点偏高，在重熔开始阶段渣温偏低导致形成渣沟缺陷。因此，本研究也以低共晶点原则开展贝氏体辙叉钢专用渣系的设计。

利用FactSage 7.3热力学软件计算了MgO质量分数为1%、3%、5%的CaF_2-Al_2O_3-CaO-MgO四元渣系相图，相图计算结果如图1所示。从结果中可以看出，3种不同MgO含量的四元相图共存在33个共晶点组分，其中有15组共晶点温度低于1 400 ℃。

结合表1中贝氏体辙叉钢的化学成分，利用JMatPro 软件计算出材料的热力学相图，如图2所示。由结果可知贝氏体辙叉钢的液相线温度相对较低，约为1 410 ℃，因此，在选择低共晶点渣系时，需选择熔点低的组分，初选出4组渣系，成分如表3所示，A、B、C、D 4组渣系的熔点分别为1 302.1、1 244.6、1 277.4和1 268.6 ℃。

同样地，利用FactSage 7.3软件计算了4组渣系在1 300~1 700 ℃温度范围内黏度的大小，结果如图3所示。其中，在计算过程中考虑了各组渣系在低温下同时存在固相与液相的情况，利用修正的Einstein-Roscoe公式(1)计算了固液混合熔渣的黏度值。

$$\eta=\eta_0(1-w)-2.5 \tag{1}$$

式中，η为包含固相颗粒的液态渣黏度，Pa·s；η_0为不含固相颗粒的液态渣黏度，Pa·s；w为熔渣中固相颗粒的质量分数。

从4组渣系黏度随温度变化关系可以看出，A渣黏度相对较高，而B、C、D 3组渣在1 400 ℃以上温度时黏度值均低于0.05 Pa·s，根据李正邦院士团队早期测试分析，电渣重熔渣池温度为冶炼钢种液相线温度之上200~300 ℃[20]，因而B、C、D 3组渣在电渣重熔冶炼贝氏体辙叉钢时流动性良好，可保证冶炼过程的稳定。

根据Ogino等[21]和董艳伍等[22]总结的经验公式(2)，可计算出4组渣系的电导率。

$$\kappa=\exp(1.911-1.38x_x-5.69x_x^2)+0.003\,9(T-1\,973) \tag{2}$$

$$x_x=x(Al_2O_3)+0.2x(CaO)+0.8x(MgO) \tag{3}$$

式中，渣系中各氧化物的适用范围为x

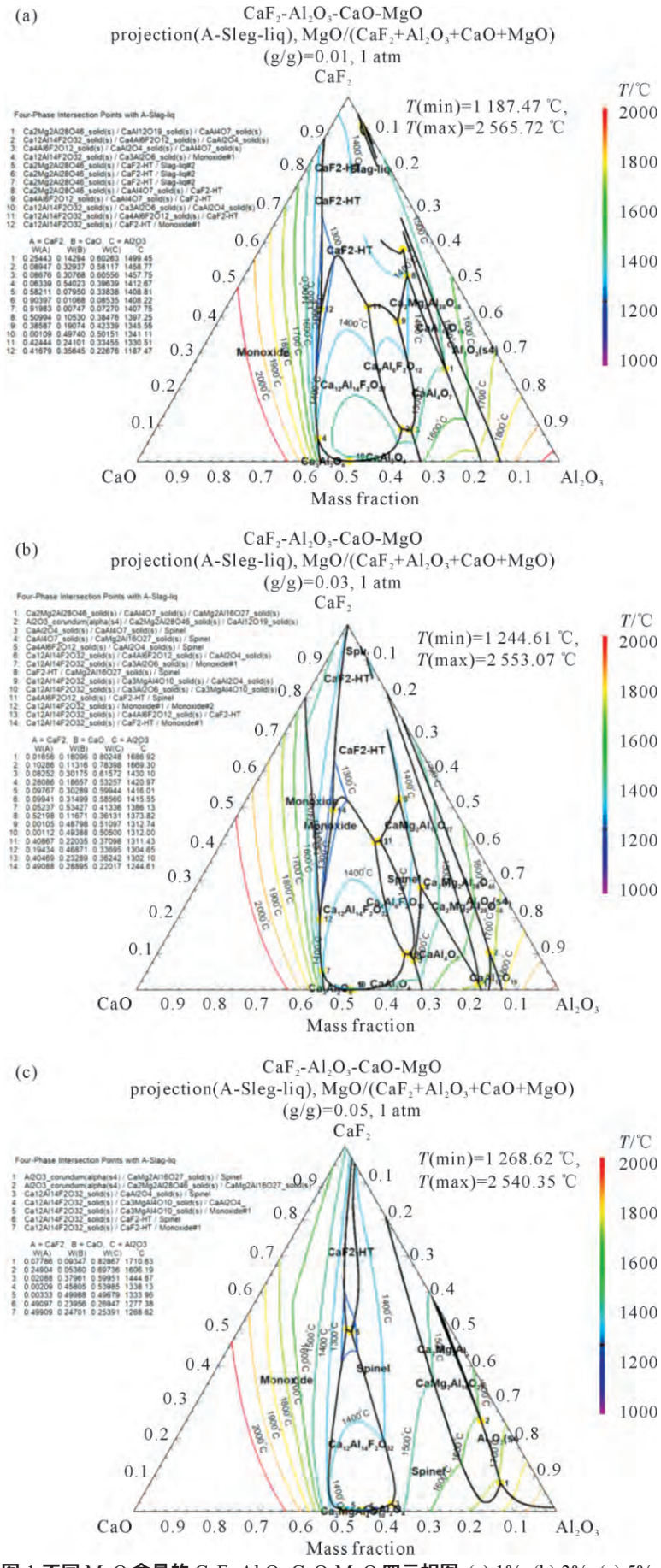

图 1 不同 MgO 含量的 CaF_2-Al_2O_3-CaO-MgO 四元相图：(a) 1%; (b) 3%; (c) 5%

Fig.1 Phase diagrams of the CaF_2-Al_2O_3-CaO-MgO quaternary system with different MgO contents: (a) 1 wt.%; (b) 3 wt.%; (c) 5 wt.%

中国知网　https://www.cnki.net

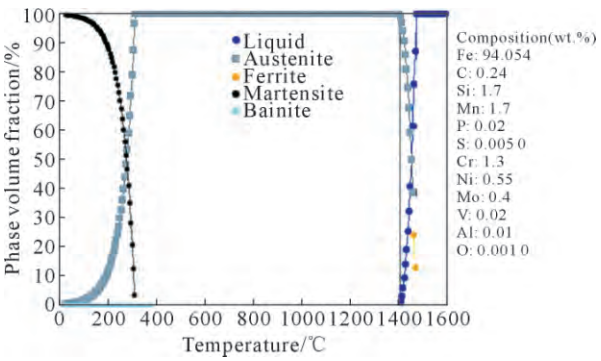

图 2 贝氏体辙叉钢热力学相图

Fig.2 Thermodynamic phase diagram of bainitic frog steel

表 3 初选 4 组贝氏体辙叉钢用电渣重熔渣系组分

Tab.3 Preliminary selection of 4 sets of electric slag remelting slag system components for bainitic frog steel

(mass fraction/%)

Slag	CaF_2	Al_2O_3	CaO	MgO
A	39.25	35.15	22.59	3.00
B	47.62	21.36	28.03	3.00
C	46.64	25.60	22.76	5.00
D	47.41	24.12	23.47	5.00

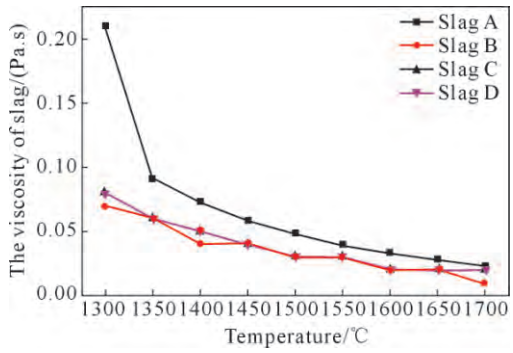

图 3 4 组渣系黏度随温度变化关系

Fig.3 Relationships between the viscosity of the four slag systems and the temperature variation

(Al_2O_3)=0~0.5、x(CaO)=0~0.65、x(MgO)=0~0.1；κ为熔渣电导率，$\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$；T为温度，℃；温度适用范围为1 550~1 780 ℃。

将4组渣系组元含量带入公式(2)中，可分别计算出4组渣系电导率分别为0.99、2.37、1.78和1.93 $\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$。通常情况下，熔渣的电导率低电阻率高，在相同电流电压条件下电渣重熔冶炼，熔炼速率和效率更高。

通过以上对CaF_2-Al_2O_3-CaO-MgO四元渣系熔点、黏度、电导率等物性参数的计算，可初步优选出用于贝氏体辙叉钢电渣重熔冶炼的渣系，为47.5%CaF_2-21.5%Al_2O_3-28%CaO-3%MgO(即表2中的B渣)。

2.2 两种渣系冶炼电渣锭质量分析

图4为两种渣系冶炼贝氏体辙叉钢电渣锭表面形貌的照片。从图中可以看出，经1#渣系重熔后的电渣锭底部表面不平整，存在渣沟，而经2#渣系重熔后的电渣锭从下至上表面平整光滑。这主要与两种渣系自身熔点差异有关，通过热力学计算可知1#渣系的熔点为1 326 ℃，2#渣系的熔点为1 251 ℃，1#渣系的熔点高导致重熔开始起弧阶段渣温偏低，易引起电渣锭表面出现渣沟缺陷。此外，在相同的结晶器条件下，2#电渣锭直径略大于1#电渣锭，这意味着使用2#渣系电渣重熔冶炼过程中渣皮厚度较小，径向传热效果更优，有利于浅平熔池的形成，提高电渣锭的凝固质量。

图 4 两种渣系冶炼电渣锭表面形貌

Fig.4 Surface morphology of the electroslag ingots smelted by the two slag systems

对1#和2#两种渣系冶炼的10 kg级贝氏体辙叉钢电渣锭纵向剖开，并利用酸溶液对剖面作侵蚀处理，获得低倍组织形貌，如图5所示。从低倍组织的结果中可以看出，经过两种渣系冶炼的电渣锭低倍组织均表现良好，一般疏松均为0.5级，2#渣系冶炼的电渣锭虽存在一个孔洞，但其位于电渣锭顶部中心位置，即电渣重熔补缩末段存在卷渣现象，而电渣锭

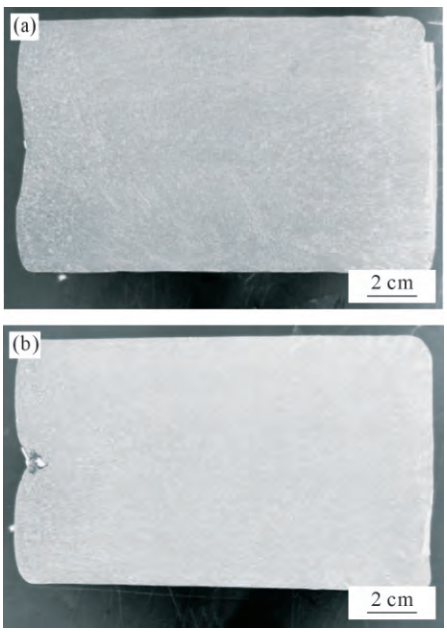

图 5 两种渣系电渣锭低倍组织：(a) 1# 渣系；(b) 2# 渣系

Fig.5 Macroscopic structure of two slag systems for smelting electroslag ingots: (a) slag 1#; (b) slag 2#

中国知网 https://www.cnki.net

内部组织致密。此外，两种渣系电渣锭冒口端凝固熔池轮廓均较为清晰，经测量熔池深度分别为33.2和22.5 mm，这表明在相同渣量条件下1#渣具有更好的保温性，但不利于浅平熔池的形成。

图6为自耗电极以及两种渣系重熔电渣锭冒口位置处Si、S、O、H元素的含量。由结果可知，两种渣系冶炼的电渣锭中O含量均控制较好，2#渣系具有更优的脱硫效果，但是H元素增加幅度更大，这主要是由于与1#渣系相比，2#渣系中含有一定量的CaO组分，其在电渣重熔过程中对自耗电极熔滴起到较好地脱硫效果，但是CaO组分吸水性强，易带入氢导致电渣锭增H。此外，2#渣系重熔的电渣锭中Si元素出现约3.41%的烧损，因此，在后续研究中需计算分析向渣中加入适量的SiO_2含量以弥补钢中Si的烧损。

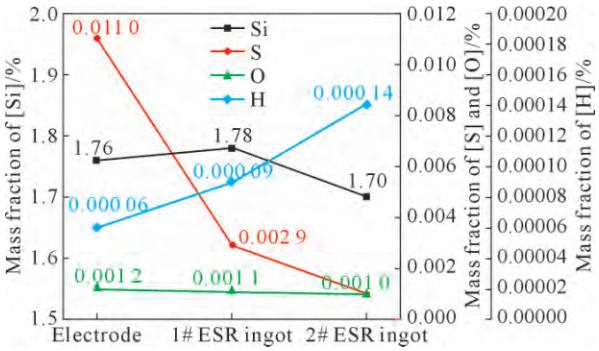

图 6　电极和两种渣系重熔电渣锭各元素含量

Fig.6 Contents of various elements in the electroslag ingots smelted with the two slag systems and the original electrode

3　结论

(1)以低共晶点原则并结合黏度、电导率等物性计算结果，设计优选出贝氏体辙叉钢专用电渣重熔渣系47.5%CaF_2-21.5%Al_2O_3-28%CaO-3%MgO。

(2)两种渣系冶炼的贝氏体辙叉钢电渣锭纵向低倍组织中均无明显缺陷，相比于传统二元渣系，设计渣系熔点更低，渣在重熔开始阶段熔化效果更好且电渣锭表面质量更优，更易形成浅平熔池提升电渣锭凝固质量。

(3)相比于传统二元渣系，设计渣系对电渣重熔贝氏体辙叉钢具有更好的脱硫效果，但出现了增H，且Si元素含量与自耗电极相比存在3.41%的烧损。

参考文献：

[1] 张福成，吕博，郑春雷，张明，杨帅，闫志刚. 高锰钢和贝氏体钢辙叉失效机理及其磨面组织[J]. 机械工程学报，2008, 44(12): 232-237, 243.
ZHANG F C, LYU B, ZHENG C L, ZHANG M, YANG S, YAN Z G. Failure mechanism and worn surface microstructure of high manganese steel and bainite steel crossings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 232-237, 243.

[2] DAVID D, SCHOLL M, SEHITOGLU H. Development of bainitic frogs for HAL service[J]. Railway Track & Structures, 1997, 93(12): 14-16.

[3] 张福成，杨志南，康杰. 铁路辙叉用贝氏体钢研究进展[J]. 燕山大学学报，2013, 37(1): 1-7.
ZHANG F C, YANG Z N, KANG J. Research progress of bainitic steel used for railway crossing[J]. Journal of Yanshan University, 2013, 37(1): 1-7.

[4] 王璞. 30 t轴重重载道岔合金钢组合辙叉应力分析[J]. 铁道建筑，2020, 60(4): 80-83.
WANG P. Stress analysis for alloy steel combined frog of 30 t axle load heavy haul turnout[J]. Railway Engineering, 2020, 60(4): 80-83.

[5] 施庆峰，杨志南，张福成. 贝氏体钢组合辙叉心轨过早失效原因微观分析[J]. 铁道建筑，2022, 62(11): 32-35.
SHI Q F, YANG Z N, ZHANG F C. Microscopic analysis of premature failure of center rail of the bainite steel composite frog[J]. Railway Engineering, 2022, 62(11): 32-35.

[6] 陈希春，王飞，史成斌，任昊，冯涤. 电渣重熔工艺对GH4169脱硫的影响[J]. 钢铁研究学报，2012, 24(12): 11-16.
CHEN X C, WANG F, SHI C B, REN H, FENG D. Effect of electroslag remelting process on desulphurization of GH4169[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 24(12): 11-16.

[7] 刘福斌，臧喜民，姜周华，耿鑫. 导电结晶器电渣重熔中非金属夹杂物的去除[J]. 中国冶金，2010, 20(5): 5-8.
LIU F B, ZANG X M, JIANG Z H, GENG X. Removal of Non-metallic inclusions in current-conductive mould ESR process[J]. China Metallurgy, 2010, 20(5): 5-8.

[8] 杨波锋，刘建华，韩志彪，刘洪波，何杨，姚春发. 电渣重熔对FeCrAl不锈钢中夹杂物的影响[J]. 钢铁研究学报，2015, 27(10): 19-25.
YANG B F, LIU J H, HAN Z B, LIU H B, HE Y, YAO C F. Effect of electroslag remelting on inclusions in FeCrAl stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(10): 19-25.

[9] 温秋林，王宇，韩智，李瑞新，马琳琳，王璨，张海军. 电渣重熔用渣系发展趋势及含MgO渣系开发应用[J]. 大型铸锻件，2023(5): 13-16.
WEN Q L, WANG Y, HAN Z, LI R X, MA L L, WANG C, ZHANG H J. Development trend of slag system for electroslag remelting and development and application of MgO containing slag system[J]. Heavy Casting and Forging, 2023(5): 13-16.

[10] 李星，耿鑫，姜周华，李花兵，徐芳泓，王立新. 电渣重熔高温合金渣系对冶金质量的影响[J]. 钢铁，2015, 50(9): 41-46.
LI X, GENG X, JIANG Z H, LI H B, XU F H, WANG L X. Influences of slag system on metallurgical quality for high temperature alloy by electroslag remelting[J]. Iron & Steel, 2015, 50(9): 41-46.

[11] 邬中华，郭波，王松伟，王育田，张锦文. 保护气氛电渣重熔对DZ2高速车轴钢成分及夹杂物的影响[J]. 特殊钢，2023, 44(1): 19-24.
WU Z H, GUO B, WANG S W, WANG Y T, ZHANG J W. Effect of electroslag remelting in protective atmosphere on composition and inclusions of DZ2 high speed axle steel[J]. Special Steel, 2023,

中国知网　https://www.cnki.net

44(1): 19-24.

[12] 李龙飞，林腾昌，何西扣，陈正宗，姚同路，孟华栋. 不同渣系及平衡时间对C-HRA-3合金元素烧损及夹杂物特征影响[J]. 铸造技术，2022, 43(10): 882-888.
LI L F, LIN T C, HE X K, CHEN Z Z, YAO T L, MENG H D. Effects of different slag systems and equilibrium time on the element burning loss and inclusion characteristics of the C-HRA-3 alloy[J]. Foundry Technology, 2022, 43(10): 882-888.

[13] 巨建涛，安家良，史成斌，郑顶立，棘广恒. 电渣重熔用低氟渣与Incoloy825合金中Al、Ti反应性的研究[J]. 稀有金属材料与工程，2020, 49(1): 233-240.
JU J T, AN J L, SHI C B, ZHENG D L, JI G H. Reactiveness of low fluorine slag for electroslag remelting to Al and Ti of Incoloy 825 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(1): 233-240.

[14] 李健，凌海涛，柴锋，罗小兵，常立忠. 电渣重熔过程中渣系对NiCrMoV合金钢电渣锭洁净度的影响[J]. 特殊钢，2023, 44(4): 35-42.
LI J, LING H T, CHAI F, LUO X B, CHANG L Z. Effect of slag system on the cleanliness of electroslag ingots during electroslag remelting fo NiCrMoV steel[J]. Special Steel, 2023, 44(4): 35-42.

[15] 赵鸿燕，刘承志，杜晓健. 电渣重熔低Al钢过程中渣系对Al含量的影响[J]. 铸造技术，2021, 42(10): 835-838.
ZHAO H Y, LIU C Z, DU X J. Effect of slag composition on Al content during electroslag remelting process of low-Al steel[J]. Foundry Technology, 2021, 42(10): 835-838.

[16] DUAN S C, PARK J H. Comparison of oxidation behavior of various reactive elements in alloys during electroslag remelting (ESR) process: An overview[J]. ISIJ International, 2022, 62(8): 1561-1572.

[17] 刘福斌，张海宝，高俊哲，耿鑫. 电渣重熔Inconel 625合金铝钛氧化的热力学分析 [J]. 东北大学学报(自然科学版)，2022, 43(5): 652-659.
LIU F B, ZHANG H B, GAO J Z, GENG X. Thermodynamic analysis of aluminum and titanium oxidation during electroslag remelting process of Inconel 625 alloy[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(5): 652-659.

[18] 耿鑫，姜周华，葛春钰，辛光瀚. 渣系组元对电渣重熔核级316H不锈钢中氢含量的影响[J]. 特殊钢，2024, 45(4): 83-88.
GENG X, JIANG Z H, GE C Y, XIN G H. Influence of slag system ingredients on hydrogen content in 316H stainless steel for electroslag remelting in nuclear power applications[J]. Special Steel, 2024, 45(4): 83-88.

[19] 王洪涛，韩毅华，曹立军，朱立光. H13热作模具钢电渣重熔渣系优化[J]. 钢铁，2022, 57(8): 111-122.
WANG H T, HAN Y H, CAO L J, ZHU L G. Optimization of electroslag remelting slag system of H13 hot work die steel[J]. Iron & Steel, 2022, 57(8): 111-122.

[20] 李正邦. 电渣冶金的理论与实践[M]. 北京：冶金工艺出版社，2010.
LI Z B. Electroslag metallurgy theory and practice[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

[21] OGINO K, HASHIMOTO H, HARA S. Measurement of the electrical conductivity of ESR fluxes containing fluoride by four electrodes method with alternating current[J]. Tetsu-to-Hagane, 1978, 64(2): 225-231.

[22] 董艳伍，姜周华，李花兵，邵国强，于昂，陈瑞，宋照伟. 电渣冶金用含氟渣系电导率计算方法[J]. 材料与冶金学报，2012, 11(4): 274-277.
DONG Y W, JIANG Z H, LI H B, SHAO G Q, YU A, CHEN R, SONG Z W. Conductivity calculation of slag containing fluoride used for electroslag metallurgy[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2012, 11(4): 274-277.

(责任编辑：杨浩雪)

中国知网 https://www.cnki.net