



加压电渣重熔装备与工艺技术开发

刘福斌¹, 姜周华¹, 李花兵¹, 冯浩¹, 董君伟², 张取一², 郑淮北³

(1 东北大学冶金学院, 沈阳 110819; 2 辽宁省沈抚改革创新示范区东大工业技术研究院, 沈抚改革创新示范区
沈阳 110172; 3 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 成都 610300)

摘要: 加压电渣重熔是目前工业化制备高氮钢和高氮合金最为有效的生产路线, 是当今电渣冶金领域的研究热点和前沿技术。介绍了加压电渣重熔成套设备、工艺技术和主要产品特点。对当前加压电渣炉装备中氮合金加料系统和水-气动态平衡系统等核心部件进行综述; 针对加压电渣重熔生产中的工艺难点, 阐述了氮合金增氮和气相增氮技术的机理和方法、新型高效发热精炼重熔渣系开发及元素精准控制等新工艺技术发展。近年来, 随着国内新建的系列国产化中试规模加压电渣炉的应用和系列高氮钢产品的成功研制, 我国在加压电渣重熔成套装备的自主研制和工艺技术开发上取得的较大突破, 并逐步向国际先进水平迈进。同时, 深入开展工业级加压电渣重熔成套装备的自主研制和工艺技术研发, 保障我国航空、航天和军工等领域高端高品质特殊钢和特种合金等急需的关键材料制备, 是我国发展现代电渣冶金技术的重要方向。

关键词: 加压电渣重熔; 高氮钢; 氮合金化; 渣系; 工艺开发

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00097 **中图分类号:** TF744

Development of Pressurized Electroslag Remelting Equipment and Process Technology

Liu Fubin¹, Jiang Zhouhua¹, Li Huabing¹, Feng Hao¹, Dong Junwei², Zhang Quyi², Zheng Huaibei³
(1 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2 Northeastern University Shenyang Industrial Technology Research Institute, Shenyang 110172, China; 3 Chengdu Advanced Metal Materials Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, China)

Abstract: Pressurized electroslag remelting (PESR) is currently the most effective production route for industrial preparation of high nitrogen steel and high nitrogen alloys, and is currently a research focus and the most advanced technology in the field of electroslag metallurgy. This article introduces the development of the integrated line equipments, process technology, and main product characteristics of PESR. A review is conducted on the core components of the nitrogen alloy feeding system and water-gas dynamic balance system in the current PESR furnace equipment. In response to the current technological difficulties in PESR process, this paper elaborates on the development of new technologies such as the mechanism and method of nitrogen addition and gas-phase nitrogen addition technology for nitriding alloys, development of a new high-efficiency heating refining remelting slag system, and precise element control. In recent years, with the application of series newly built domestically produced pilot scale PESR furnaces and the successful development of series of high nitrogen steel products, China has made a significant breakthroughs in the integrated line equipment independent research and technological development, and gradually stepped forward to the international advanced level. At the same time, deepening the independent research and development of industrial grade PESR equipment and process technology research and development, ensuring the preparation of key materials urgently needed for high-quality special steels and special alloys in China's aviation, aerospace, and military industries fields and so on, is an important direction for the development of modern electroslag metallurgy technology in China.

Key Words: Pressurized Electroslag Remelting; High Nitrogen Steel; Nitrogen Alloying; Slag System; Process Development

电渣冶金集熔化、精炼、凝固于一身, 是特种熔炼领域内产量最大的一种特种熔炼方法, 应用最为广泛^[1]。近年来, 国内外电渣冶金取得了突飞猛进的发展, 新理论、新工艺、新技术和新装备层出不

穷^[2-3], 形成了一个跨专业、跨行业的新学科。加压电渣重熔 (Pressurized electroslag remelting, PESR) 是当今电渣冶金领域的研究热点和前沿技术之一, 具有在几个或几十个大气压的氮气压力下重熔合

基金项目: 辽宁省科技计划联合计划 (2023 JH2/101700302)

作者简介: 刘福斌 (1978—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** liufb@smm.neu.edu.cn; **收稿日期:** 2024-04-18

通信作者: 姜周华 (1963—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** jiangzh@smm.neu.edu.cn

金的能力。加压电渣重熔铸锭氮含量可超过常压氮溶解度,显著改善材料的力学和耐蚀等诸多性能^[4]。

加压电渣重熔基本原理如图1所示,在具有动密封装置的压力室内建立加压条件(气体压力必须与冷却水压力动态平衡以保证安全的熔炼条件);电流流经渣池时产生的焦耳热使已知化学成分的自耗电极熔化,并在电极端头形成毫米级厚度的金属液膜;随后金属液膜在多重作用力下汇聚形成金属熔滴;最后金属熔滴穿过渣池,进入金属熔池,并在水冷结晶器中逐渐凝固成铸锭。加压电渣重熔结合了电渣重熔和加压冶金的技术优势,通过气相加压抑制熔炼过程中氮逸出和氮气孔形成,减轻氮偏析,并显著改善钢质纯净度和凝固组织^[5]。此外在炉渣上覆盖的惰性气体能够在熔化过程中增强对易氧化元素(如Al和Ti)的成分控制。

加压电渣重熔制备的典型牌号及其化学成分见表1^[6]。其制备的典型产品如:德国VSG公司开发的高氮奥氏体不锈钢P900N、P900NMo和P2000系列^[7],用于大型火力发电机组的护环或转子;法国XD16N和XD15NW、日本ES1和德国Cronidur 30高氮马氏体不锈钢等^[8],用于制造高硬度、高强韧性以及优异的耐蚀性和抗接触疲劳性能的轴承;美国ATI公司开发的Datalloy2、日本Daido Steel公司开发DNM140、美国Carpenter公司开发的15-15HS、奥地利Böhler公司和美国Schoeller-Bleckmann公司联合开发的P550、P580和P650系列等^[9],用于陆地和海

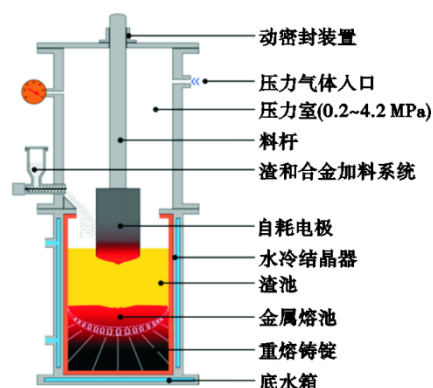


图1 加压电渣重熔原理图

Fig. 1 Schematic diagram of PESR

洋油气钻井作业用无磁钻铤;奥地利Böhler公司开发的M303、M333和M340系列高氮耐蚀塑料模具钢^[10],用于压制成型塑料用高端耐蚀镜面模具等。

随着国防和经济建设快速发展,我国对高品质特殊钢和特种合金的性能要求和需求日益增加^[11-12]。近年,国内特钢企业已引进数台进口加压电渣炉成套装备并顺利生产^[13]。

本文针对加压电渣重熔装备特点和工艺技术发展进行了综述,总结了自主研发实验室规模和中试规模加压电渣炉成套装备和相关工艺技术应用,为国内在加压电渣重熔的后续技术研究、工业级装备自主研发和工程应用提供理论依据和参考。

1 加压电渣重熔装备特点

1980年德国Krupp公司建成了世界上第一台

表1 加压电渣重熔制备的典型牌号及其化学成分(质量分数)

Table 1 Typical grades by PESR and its chemical compositions

牌号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	%
奥氏体钢	P900	<0.12	<1.0	17.0	17.0	-	0.40	
				19.0	19.0	-	0.60	
	PERS铸锭	0.05	0.15	18.5	18.5	-	0.65	
				18.5	18.5	-	1.00	
	X8CrMnNi18-8	<0.10	<1.0	7.5	17.0	4.5	0.10	
				9.5	19.0	6.5	0.20	
PESR电极	0.05	0.15	8.5	18.0	5.5	0.30		
			8.5	18.5	5.5	0.60		
铁素体钢	X20CrNoV11-1	0.17	<0.50	<1.0	10.0	0.30	0.80	-
					12.5	0.80	1.20	-
	PESR电极	0.20	0.15	0.5	12.0	0.50	1.00	0.08
					12.5	0.50	1.00	0.20
马氏体钢	X50CrMoV15	0.42	<1.0	<1.0	13.8	-	0.45	-
					15.0	-	0.60	-
	PESR电极	0.45	0.15	0.5	15.0	-	0.60	0.15
					15.0	-	0.60	0.35

16 t 加压电渣炉;1996 年德国 VSG 公司又建成了 16、20 t 的 2 台加压电渣炉,熔炼室运行压力 4.2 MPa,如图 2(a)所示^[14];德国 ETE 公司建有 20 t 加压电渣炉(压力 4 MPa,1 030 mm 铸锭);奥地利 Böhler 公司建有 16 t,1.6 MPa 的加压电渣炉,如图 2(b)所示。国内抚顺特钢进口奥地利 Inteco 公司的 15 t 加压电渣炉,炉内最大压力为 1.6 MPa;浙江天马轴承集团进口德国 ALD 公司的 8 t 加压电渣炉,炉内最大压力为 4 MPa。

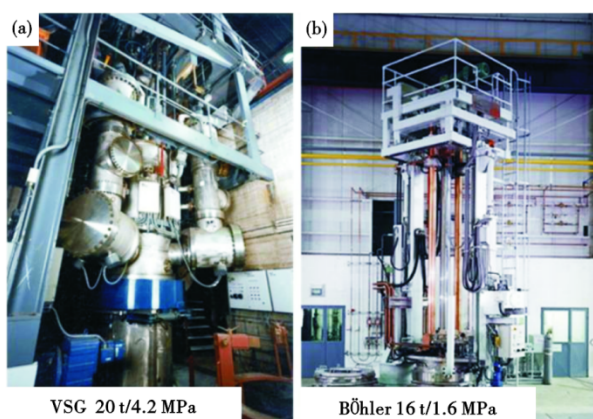


图 2 工业级加压电渣炉成套装备:(a)VSG 公司加压电渣炉,(b)Böhler 公司加压电渣炉

Fig. 2 The equipment of industrial PESR furnace:(a)VSG PESR furnace,(b)Böhler PESR furnace

从文献资料来看,工业级加压电渣炉成套装备由主体框架结构、电极传动装置、称重系统、X-Y 调节机构、压力保护罩(含动密封和高压锁紧装置等)、氮化合金加料系统、加渣系统、熔炼站、炉体行走装置、结晶器及底座、大功率输电系统、充气(氩气/氮气)系统、真空抽气与净化系统、水-气平衡系统、高压水与冷却系统、熔炼电源系统和电控系统等组成。

与国内成熟的工业级保护气氛电渣炉装备相比,加压电渣炉对压力保护罩(含动密封和高压锁紧装置等)和称重系统提出了更高要求;同时,新增了压力检测和安全控制系统、氮化合金加料系统、水气动态平衡系统和与之匹配的软件控制系统。

1.1 氮化合金加料系统

工业级加压电渣炉上设有合金加料装置,可以在保持炉内压力条件下,向渣池中添加氮化合金颗粒,如 Si_3N_4 (30%~40%N)、 FeCrN (8%~10%N)、 CrN (4%~10%N) 等以实现高氮钢的生产。随着对合金加料精度和稳定性要求的提高,现代加压电渣

炉配备的合金加料器(通常采用螺旋给料机和多点入料方式),能够与熔速动态匹配,实现精确的加料控制和实时监测,提高了合金加入的准确性和效率,如图 3 所示^[15]。

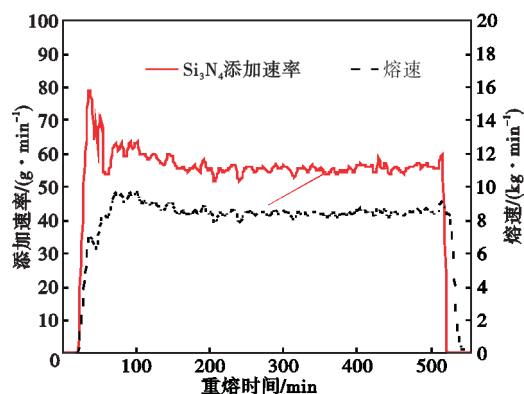


图 3 工艺级加压电渣重熔过程氮化合金加入速度与熔速的匹配

Fig. 3 Matching of nitriding alloy addition rate and melting rate during PESR process

1.2 水-气动态平衡系统

2008 年,东北大学研制了实验室规模加压电渣炉的高压水-气体平衡装置,包括水冷控制管路、气体控制管路和水压气压平衡控制系统和控制电源,其结构如图 4 所示^[16]。之后,优化了该装置控制系统,实现了加压过程实时自动调节水压跟踪气压,快速建立目标压力;重熔时,具有自动围绕目标压力实时调节水-气动态平衡功能。

工业级加压电渣炉结晶器受力面积更大,重熔过程中铜结晶器热面侧(炉内)气体压力和铜结晶器冷面侧冷却水压力差控制更严格问题;应重点解决结晶器冷却水压力和炉内加压气体压力动态精确监测、动态平衡控制算法问题。

2 加压电渣重熔工艺技术发展

加压电渣重熔冶炼高氮钢要解决两个核心问题:一是如何把氮溶解到钢液中;二是如何避免钢液凝固成铸锭时的氮损失^[6]。此外,由于气氛的变化和材料成分的特殊要求,也对加压电渣重熔工艺技术提出了新的挑战。

2.1 氮化合金和气相增氮

氮化铬、氮化锰、氮化钼、氮化钒、氮化钛、氮化硅、氮化硅铁、氮化硅锰、氮化硅钙等系列氮化合金产品已广泛应用于高氮钢生产和奥氏体不锈钢生产中。在加压电渣重熔过程中, Si_3N_4 (30%~40%N)、

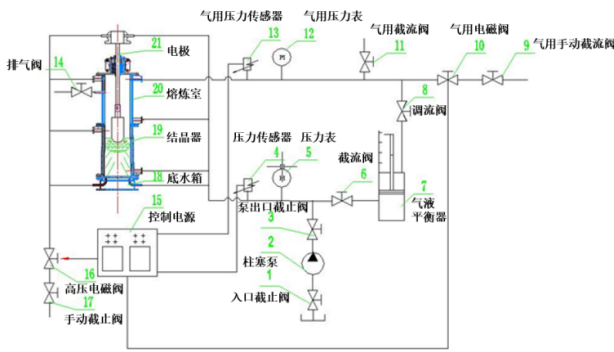


图4 高压水气平衡系统

Fig. 4 Equilibrium system between high-pressurized water and gas

FeCrN (8% ~ 10%N) 和 CrN (4% ~ 10%N) 等氮化合金作为氮源已成功应用。Patel 等^[17]研究了氮气压力和氮化合金种类对氮含量分布的影响, FeCrN 的氮收得率大于 Si₃N₄ 的氮收得率。曹阳等^[18]研究了氮化合金种类对重熔过程和铸锭的影响, 采用 Si₃N₄ 作为氮化合金时, 易造成渣池沸腾、钢锭表面质量差和硅含量超标等问题。随着重熔工艺和控制系统的进步, 近年来, Si₃N₄ 由于氮含量高, 密度适宜和成分命中率高等优点, 被广泛地应用于加压电渣重熔过程。

氮化合金的加入方式主要为采用合金加料器和制造复合电极两种方法。实验室规模加压电渣重熔, 日本 NIMS 研究所和我国东北大学研发了复合电极氮合金外接化法, 但工艺较为复杂, 焊点较多, 且易增氧; 近期, 东北大学研发了复合电极氮合金内接法^[19], 有效地控制了铸锭氧含量。工业级加压电渣重熔, 合金加料器被广泛采用; 但由于铸锭直径大, 铸锭中的氮含量存在轴向上分布均匀, 而径向分布不均匀, 易增 Si, 有时需二次重熔等问题^[20]。Martosinski 等^[21]研究了由加压电渣重熔炉生

产的高氮奥氏体(0.8% N)和马氏体不锈钢(0.35% N)成分的均匀性; 铸锭解剖结果表明, 氮含量在纵向上分布比较均匀, 但是在径向上分布不均匀, 这可能是由氮化物在渣池中分布不均匀引起的。工业级加压电渣重熔保证氮含量分布均匀的关键在于控制氮化合金种类、形状和粒度、加入位置分布和添加速度与熔速的动态匹配等因素。

加压电渣重熔过程中, 气相中的氮向钢液传输时可能有以下两种途径: (1) 气相中的氮先溶解在熔渣中, 然后通过渣/金反应进入到钢液; (2) 氮气直接和电极端部的液膜反应导致铸锭增氮。Stein 等^[6, 22]和 Martosinski 等^[21]的研究结果表明, 加压电渣重熔过程中液态金属通过熔渣从气相中吸收的氮含量几乎可以忽略。这主要是因为氮在渣中的质量传输速率非常小, 熔渣中的质量传输是限制性环节。余嘉等^[23]通过热力学、传质动力和实验研究, 提出了加压电渣重熔过程中氮从气相向钢液传输的新机制: 气-渣界面的波动使电极端部下方的部分液膜直接暴露在气相中, 导致吸氮反应在电极端部发生, 如图5所示。

加压电渣重熔过程中, 金属液直接暴露在气相(N₂)能显著增氮。日本的 Yamamoto 等^[24]采用制备中空电极的方式, 在 PESR 熔炼过程中吹入加压氮气(0.98 MPa), 使电极端部的液膜直接与氮气进行反应, 使铸锭中的氮含量升高。但是, 中空自耗电电极制备繁琐, 且加压氮气流流量过大时会造成渣池扰动, 影响熔炼稳定。

针对 PESR 单步法制备高氮钢的局限, 东北大学特殊钢冶金研究所提出了“加压感应(PIM)和加压电渣双联工艺”^[25]。加压双联工艺核心是将现有高氮钢加压冶炼任务进行再分配: PIM 完成气相氮合金化增氮任务, 避免浇铸凝固过程氮气孔析出,

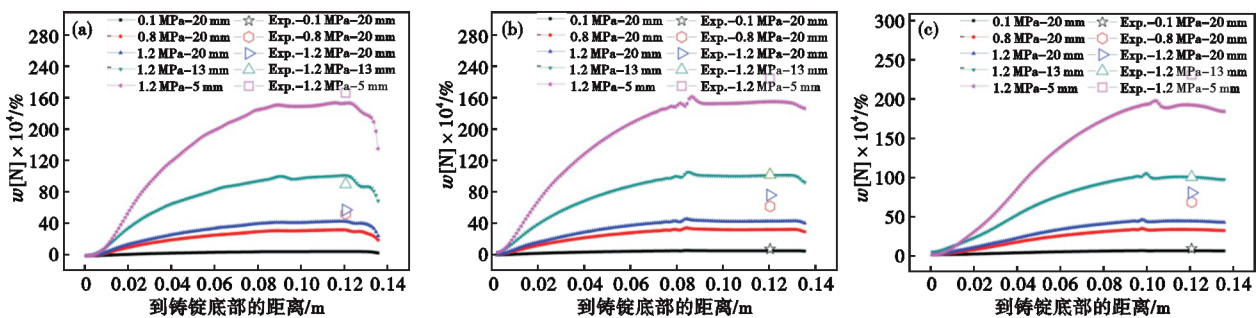


图5 氮传输模拟结果与实验结果的对比: (a) 铸锭中心, (b) 铸锭 1/2 半径, (c) 铸锭边缘

Fig. 5 The comparison between the simulated and measured results of nitrogen transfer : (a) ingot center, (b) 1/2 radius of ingot, (c) edge of ingot

实现氮含量精确控制,同时降低氧、硫等杂质元素含量;PESR抑制氮在凝固过程中的偏析和析出,改善凝固质量,有效去除非金属夹杂物或改善其形态和分布等。随着加压浇注装备和工艺的提升,“加压浇注+加压电渣双联工艺”在吨级高氮钢铸锭的制备上更具有广泛的前景。

2.2 加压电渣重熔渣系开发

针对现阶段以氮化合金为氮源的单步法冶炼,加压电渣重熔高氮钢专用渣系需具有发热、精炼、成型等重要的作用外,还需具有高效发热作用以快速熔化氮化合金。

德国 VSG 公司曾采用 40%CaF₂-30%Al₂O₃-30%CaO 或 34%CaF₂-33%Al₂O₃-33%CaO 渣系,利用 12 t 工业级加压电渣炉生产高氮不锈钢,但洁净度方面的信息未见报道。The Japan Steel Works, Ltd. 公司的 Takahashi 等在实验室规模加压电渣炉,使用 60%CaF₂-20%CaO-20%Al₂O₃ 渣系,并以氮化铬铁(氮含量 7%)为增氮剂,制备出 $w[N]$ 超过 1% 的 Cr-Mn-N 高氮不锈钢。研究发现,高氮钢铸锭无气孔或严重偏析,夹杂物非常细小。Carpenter Technology 公司的 Patel 等在实验室规模加压电渣炉,使用 60%CaF₂-20%CaO-20%Al₂O₃ 渣系,通过添加氮化硅(10 μm , 4 ~ 6 MPa)或氮化铬铁(1 ~ 10 mm, 4 ~ 5.5 MPa),将 Fe-Cr-Mn 钢中 $w[N]$ 由自耗电电极的 0.82% 升高到 1.35%。然而,由于高压氮气气氛下氧势低且熔渣中硫含量随冶炼进行而逐步富集,导致电渣锭中硫含量高且向锭头方向逐渐升高。

后续国外开发出高氮钢加压电渣重熔专用高效发热及精炼渣系,具有发热效果好、强脱硫及高效吸附夹杂物能力,加压电渣重熔过程氮化合金熔化充分,生产出的电渣锭中氮分布均匀性

得到改善。ETE 公司的 Ritzenhoff 等在 7 t 工业级加压电渣炉,使用德国 Wacker 公司生产的 S2027(CaO+17%MgO, 68%CaF₂, 15%Al₂O₃)+3%SiO₂ 渣系,在 3 MPa 氮气下将高氮不锈钢 Cronidur30 中 $w[N]$ 由自耗电电极的 0.13% 升高到电渣锭中的 0.38%。天马轴承采用 40%~50%CaF₂, 0.30%~0.40%Al₂O₃, 20%~25%CaO, 20%~25%SiO₂, 10%~15%MgO 渣系,经二次 PESR 重熔,成功制备饱和高氮不锈钢为 30Cr15MoN 钢。

目前,存在以下问题:①由于渣系电阻较低,导致生产过程中出现氮化合金熔化不充分、增氮效果不佳、氮分布不均匀以及电渣锭洁净度不足;②在电渣重熔的高温条件下,渣中大量不稳定的 Al₂O₃ 会发生热分解或电解反应,炉渣与钢液间也会发生 Al₂O₃ 还原反应,导致电渣锭增铝;③在加压氮气气氛下,极低的氧分压极大地抑制了气-渣界面处(S²⁻)的氧化,导致炉渣中硫含量持续上升,使电渣锭中的硫含量较高。

2.3 硫含量及铝含量控制

电渣重熔过程控制气化脱硫的气-渣界面脱硫反应与气氛密切相关^[26-27],而氮气加压气氛下气相的氧势低,对炉渣中硫的气化氧化几乎没有作用,这导致气化脱硫受到抑制,如图 6 所示^[28]。

2010 年以来,东北大学深入探究了实验级加压电渣重熔高氮不锈钢过程中,硫在电极液膜-熔渣-熔滴-金属熔池间的传质过程和不同气氛下的脱硫行为,如图 7 所示^[29]。阐明了加压电渣重熔超低氧势气氛抑制气化脱硫,导致脱硫效果差的机理;解析了适量 Na₂O 提高渣-金间硫分配系数、改善传质动力学条件的作用机制,开发了 CaF₂-CaO-Al₂O₃-Na₂O 渣系,显著强化了加压电渣重熔的脱硫能力。

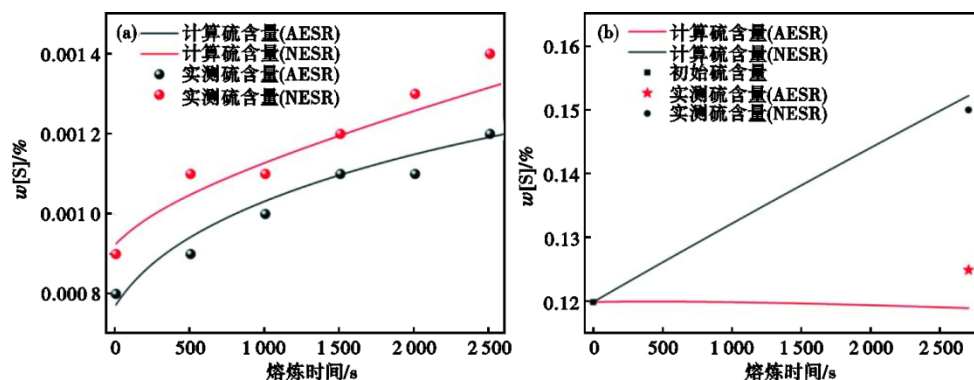


图 6 AESR 与 NESR 计算结果与实验结果对比: (a) 钢液硫含量变化, (b) 熔渣硫含量变化

Fig. 6 Variation of sulfur content in steel and slag with remelting time of AESR and NESR : (a) sulfur content change in molten steel, (b) sulfur content change in slag

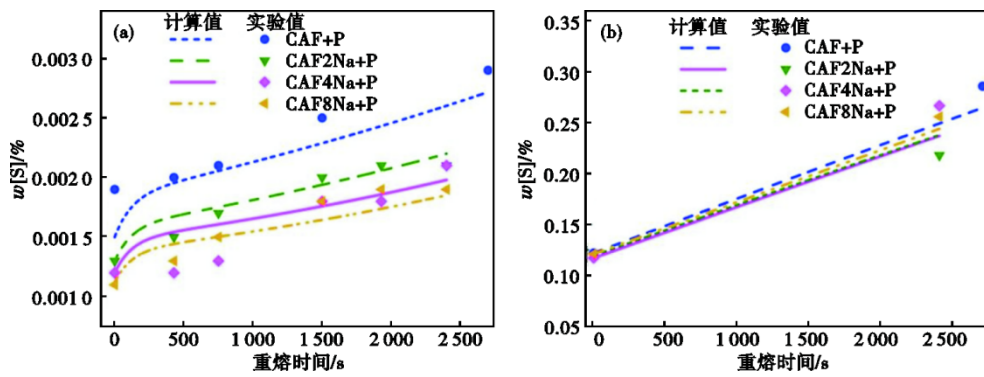


图 7 使用含 Na₂O 炉渣 PESR 过程熔体中硫含量随时间的变化: (a) 钢, (b) 炉渣

Fig. 7 Variation of sulfur content of melt with remelting time during PESR process using Na₂O containing slags : (a) steel, (b) slag

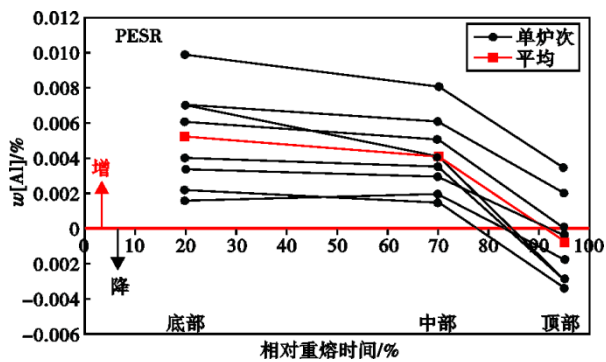


图 8 电渣重熔过程钢中铝含量变化

Fig. 8 Variation of aluminum content in steel during electroslag remelting

高氮不锈钢对钢中的铝极为敏感, 极易在熔炼、凝固或热处理过程形成棱角状、质地坚硬的 AlN 夹杂物, 显著降低钢的韧性和疲劳寿命。Carosi 等^[15]指出, 经过加压电渣重熔的 P900 高氮护环钢铸锭中, 铝含量呈现增高的趋势。图 8 为 P900 钢中铝质量分数的变化量(电渣锭 [%Al]-电极 [%Al]), 可以看出, 相对于自耗电极, 电渣锭铝含量除了最顶部区域外均增高, 且呈底部更高、顶部较低分布规律。类似地, 使用 S2027 渣系加压电渣重熔 Cronidur 30 高氮马氏体不锈钢时, 电渣锭中 $w[Al]$ 由 0.021% 增加至 0.04% ~ 0.05%, 最高增幅达到 0.075%, 远超钢种标准成分的最大值。PESR 过程中铸锭增铝及其导致的 AlN 夹杂物问题, 已成为生产高品质高氮不锈钢的主要瓶颈之一。

东北大学杨守星等^[30-31]基于加压电渣重熔实验和渣-钢反应热力学分析(如图 9 所示), 揭示了加压电渣重熔高氮不锈钢过程电极中硅还原渣中 Al₂O₃ 导致电渣锭严重增铝的机理, 通过合理调控渣系中 SiO₂ 含量, 配合低硅含量自耗电极, 有效抑制增铝反应的进行, 实现了加压电渣重熔高氮

不锈钢过程“零增铝”。有效解决了 PESR 制备高氮不锈钢轴钢中铝含量高和存在大量 AlN 夹杂物的难题。目前, 国内实验室规模和工业规模加压电渣重熔 Cronidur 30 高氮马氏体不锈钢, 铸锭中 $w[S] \leq 0.005\%$, $w[Al] \leq 0.01$ ^[20, 30]。

3 国产加压电渣重熔装备与技术应用

国内东北大学在 2007 年首建了熔炼压力 4 MPa 的 100 kg 加压电渣炉原型机; 2018 年研制 500 kg 加压电渣炉; 2024 年研制的国内首台套具备国际最前沿技术的 50 kg 加压电渣炉, 如图 10 所示。加压电渣重熔成套装备的自主研发为核心工艺技术的突破提供了必要的硬件基础。

依托上述成套装备, 东北大学已持续研发出加压电渣重熔渣系开发、氮化合金和气相精准增氮、凝固压力设置、组织和成分定量控制和加压条件下夹杂物变性等系列关键技术; 成功制备出 $w[N]$ 为 0.8% ~ 1.2% 且成分均匀、组织致密高氮奥氏体不锈钢 P900N、P900NMo 和 P2000, 高氮马氏体不锈钢 Cronidur 30, 高氮塑料模具钢 55Cr17Mo1VN^[32]; 其产品质量与性能国外同类产品相当, 如图 11 所示。

4 总结与展望

(1) 随着我国国防和经济建设快速发展, 对高品质特殊钢和特种合金(韧性、强度、耐腐蚀性以及耐磨性等)性能要求和需求不断提高。加压电渣重熔作为目前商业上制备高氮钢的最成熟的方法, 其装备自主化研制和工艺技术突破的需要日益凸显。

(2) 我国在中试级加压电渣重熔成套装备的自主研发和工艺技术开发上取得的较大突破, 但仍需加速工业级加压电渣炉成套装备国产化的自主研

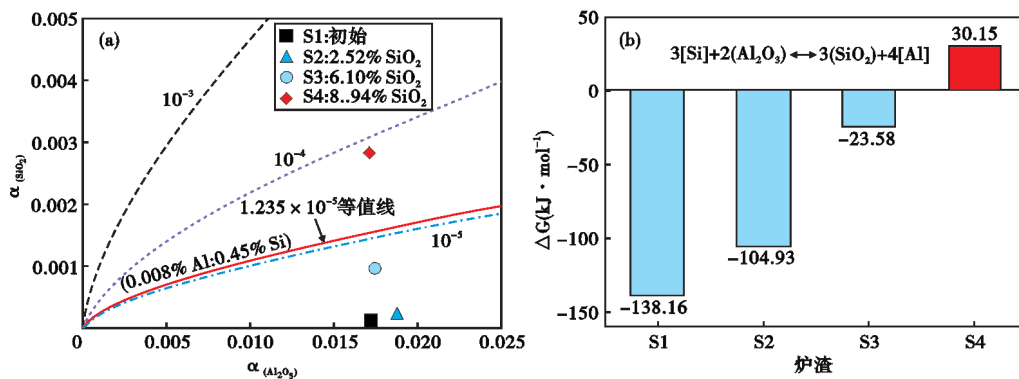


图 9 Al₂O₃和SiO₂活度图中 $a_{SiO_2}^3/a_{Al_2O_3}^2$ 等值线, 1 973 K 温度下实验渣的活度分布和 [Si]+(Al₂O₃) 反应吉布斯自由能变化 (a) 活度比的等值线图; (b) 反应吉布斯自由能
Fig. 9 Isolines of $a_{SiO_2}^3/a_{Al_2O_3}^2$ in the Al₂O₃ and SiO₂ activity map, the activity distribution of the experimental slags at 1 973 K, and Gibbs free energy change of [Si]+(Al₂O₃) reaction (a) activity ratio; (b) gibbs free energy



图 10 成都先进金属材料产业技术研究院 50 kg 加压电渣炉
Fig. 10 The equipment of 50 kg PESR furnace in Chengdu Advanced Metal Materials Industry Technology Research Institute Co., Ltd.

制。应重点突破工业级加压电渣炉对压力工况下的动密封系统、称重系统、压力检测和安全控制系统、氮合金加料系统、水气动态平衡系统和与之匹配的软件控制系统。

(3) 通过合金加料器加入氮合金仍是现阶段工业级加压电渣重熔高氮钢增氮的主要方式, 铸锭氮含量分布均匀的关键在于控制氮合金种类、形状和粒度、加入位置分布和添加速度与熔速的动态匹配等因素。结合气相增氮的特性和优点, “加压浇注(增氮)+加压电渣双联工艺(保

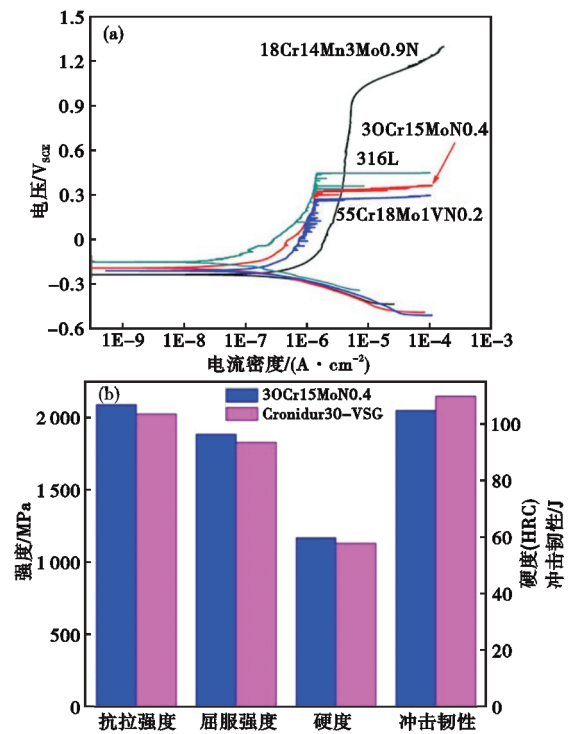


图 11 国产加压电渣炉产品性能: (a) 耐蚀性, (b) 力学性能
Fig. 11 Performance of domestically produced PESR products: (a) Corrosion resistance, (b) Mechanical properties

氮)”在吨级高氮钢铸锭的制备上将更具有广泛的前景; 压力的精确设定是气相增氮的重要研究方向。

(4) 加压电渣重熔高氮钢专用渣系要具有强脱硫、高效吸附夹杂物能力和高效发热作用以快速熔化氮合金。结合母材成分控制技术, 开展协调高效发热、精炼和元素控制的新型渣系设计, 是未来加压电渣重熔技术的重要发展方向。

参考文献

- [1] 傅杰. 第二代电渣冶金技术与重大装备制造[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(S1): 8-13.
- [2] 李正邦. 电渣冶金的发展历程、现状及趋势[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(S1): 1-7.
- [3] 姜周华, 董艳伍, 耿鑫, 等. 高品质特殊钢电渣重熔技术的开发和应用[J]. 钢铁, 2023, 58(9): 15-25.
- [4] Mori G, Bauernfeind D. Pitting and crevice corrosion of super-austenitic stainless steels [J]. *Materials and Corrosion*, 2004, 55(3): 164-173.
- [5] Jiang Z H, Zhu H C, Li H B, et al. Pressurized metallurgy for high performance special steels and alloys [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 143: 012038.
- [6] Stein G, Menzel J. High pressure electroslag remelting - a new technology of steel refining [J]. *Int J of Materials and Product Technology*, 1995, 10(3/4/5/6): 478-488.
- [7] Liu S C, Hashida T, Takahashi H, et al. A study on fractography in the low-temperature brittle fracture of an 18Cr-18Mn-0.7N austenitic steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1998, 29(3): 791-798.
- [8] Jin J, Shao T M. Effects of single- and dual-element ion implantation on tribomechanical properties of Cronidur 30 bearing steel [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 344: 303-311.
- [9] Saller G, Aigner H. High nitrogen alloyed steels for nonmagnetic drill collars. standard steel grades and latest developments [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2004, 19(1): 41-49.
- [10] 朱红春, 姜周华, 李花兵, 等. 加压技术在高品质特殊钢冶炼和凝固中的作用 [J]. 钢铁, 2015, 50(11): 37-44.
- [11] 曹文全, 俞峰, 王存宇, 等. 高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向 [J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 1-10.
- [12] 肖爱平, 张洲, 李德胜, 等. 电渣重熔渣系对 GCr15 轴承钢洁净度的影响 [J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 34-37.
- [13] 史智越, 宁鑫, 杜敏, 等. 30Cr₁₅Mo1N 高氮不锈钢轴承钢组织结构表征与旋弯疲劳机制 [J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 121-126.
- [14] Stein G, Hucklenbroich I. Manufacturing and applications of high nitrogen steels [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2004, 19(1): 7-17.
- [15] Carosi A, Kleimt B, Paura G, et al. Mastering P-ESR technology for high nitrogen steel grades for high value applications [J]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010: 21-48.
- [16] 姜周华, 曹阳, 李花兵. 一种平衡加压电渣炉内气体和冷却水压力的设备: CN201195737Y [P]. 2009-02-18.
- [17] Patel A D, Hecht J, Magee J H, et al. On nitrogen pick-up during pressure-ESR of austenitic steels: International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting [C]. Pittsburgh, USA, 2009: 253.
- [18] 曹阳. 高氮奥氏体不锈钢的加压电渣重熔制备技术及其材料性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [19] 姜周华, 康从鹏, 刘福斌, 等. 一种加压电渣重熔用高氮钢自耗电极及其制备方法: CN113106265A [P]. 2021-07-13.
- [20] 耿金鹏, 赵有为. 一种过饱和高氮不锈钢加压电渣重熔工艺: CN112359217B [P]. 2022-07-08.
- [21] Bartosinski M, Magee J H, Friedrich B. Improving the chemical homogeneity of austenitic and martensitic stainless steels during nitrogen alloying in the pressure electro slag remelting (PESR) process [A]. 1st International Conference on Ingot Casting, Rolling and Forging [C]. Aachen: TEMA, 2012: 1-8.
- [22] Stein G, Menzel J and Choudhury A. Industrial manufacture of massively nitrogen-alloyed steels in a pressure ESR furnace [J]. *Steel Times*, 1989, 217(3): 148-150.
- [23] Yu J, Liu F B, Li H B, et al. Numerical simulation and experimental investigation of nitrogen transfer mechanism from gas to liquid steel during pressurized electroslag remelting process [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50(6): 3112-3124.
- [24] Yamamoto S, Momoi Y, Kajikawa K. Nitrogen addition using a gas blow in an ESR process [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 143: 012005.
- [25] 姜周华, 冯浩, 李花兵, 等. 一种加压感应和加压电渣重熔双联冶炼高氮钢的方法: CN106011371B [P]. 2018-06-22.
- [26] Shi C B, Huang Y, Zhang J X, et al. Review on desulfurization in electroslag remelting [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2021, 28(1): 18-29.
- [27] Liu Y, Zhang Z, Li G Q, et al. Evolution of desulfurization and characterization of inclusions in dual alloy ingot processed by electroslag remelting [J]. *Steel Research International*, 2017, 88(11): 1700058.
- [28] Kang C P, Liu F B, Geng X, et al. Desulfurization behavior of low-sulfur plastic die steel during ESR process under different atmospheres [J]. *ISIJ International*, 2021, 61(1): 219-228.
- [29] Yang S X, Li H B, Feng H, et al. Desulfurization behavior of Fe-18Cr-18Mn alloy during the pressurized electroslag remelting with different atmospheres and Na₂O-containing slags [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2021, 52(3): 1294-1308.
- [30] Yang S X, Li H B, Feng H, et al. Reaction mechanism and control strategy of Aluminum increase in high nitrogen stainless bearing steel during pressurized electroslag remelting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2022, 53(2): 1148-1161.
- [31] Yang S X, Li H B, Feng H, et al. Effects of atmosphere and Na₂O in slag on inclusion characteristics of Al-killed Fe-18Cr-18Mn remelted by (P)ESR process [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2023, 54(4): 2229-2243.
- [32] Kang C P, Liu F B, Zheng H B, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of PESR 55Cr17Mo1VN plastic die steel during quenching and tempering treatment [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2021, 28(12): 1625-1633.