

氩气保护 ESR 对 EAF-LF-VD-CC 冶炼的高速车轴钢 DZ2 轧坯质量的改善

张锦文^{1,2} 王文先¹ 郭中华² 赵志刚² 王松伟² 王之香² 王玉玲²

(1 太原理工大学材料科学与工程学院,太原 030024;2 山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 采用 EAF-LF-VD-Φ690 mm 铸坯和 EAF-LF-VD-Φ690 mm 铸坯-Φ740 mm ESR 锭两种工艺分别制备了 250 mm × 250 mm 高铁车轴用 DZ2 钢轧坯,并研究了其低倍组织、夹杂物、碳偏析、金相组织和力学性能。结果表明:相比于电弧炉流程工艺,电渣重熔工艺得到的 DZ2 钢轴坯中心疏松和一般疏松从 0.5 ~ 1.0 级降低到 0 ~ 0.5 级,夹杂物尺寸从 2.43 ~ 25.05 μm 降低到 1.42 ~ 9.32 μm,夹杂物形貌由棒状变为球形;横截面上碳含量分布从 0.256% ~ 0.269% 降低到 0.261% ~ 0.265%,碳极差从 0.013% 降低到 0.004%;屈服强度和抗拉强度分别提高了 17.5% 和 13.8%,20 °C 横向和纵向冲击功分别提高 36.2% 和 17.8%。

关键词 高速车轴钢 DZ2 EAF-LF-VD-CC 电渣重熔 夹杂物 碳偏析 力学性能

Improvement on Quality of Rolled Billet of EAF-LF-VD-CC Steelmaking High-Speed Railway Axle Steel DZ2 by Argon Shielding ESR

Zhang Jinwen^{1,2}, Wang Wenxian¹, Wu Zhonghua², Zhao Zhigang², Wang Songwei², Wang Zhixiang² and Wang Yuling²
(1 College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;
2 Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The 250 mm × 250 mm rolled billets of high-speed railway axle steel DZ2 are rolled by EAF-LF-VD-Φ690 mm cast bloom and EAF-LF-VD-Φ690 mm cast bloom-Φ740 mm ESR ingot of two processes. The macrostructure, inclusions, carbon segregation, microstructure and mechanical properties of the blooms are studied. The results show that: compared with EAF process flowsheet, the rating of central porosity and general porosity of DZ2 steel shaft billet obtained by ESR process reduces from 0.5 ~ 1.0 to 0 ~ 0.5 grade; the size range of inclusions reduces from 2.43 ~ 25.05 μm to 1.42 ~ 9.32 μm, and the morphology of inclusion changes from rod-shaped to spherical; the carbon content distribution on cross-section reduces from 0.256% ~ 0.269% to 0.261% ~ 0.265%, and the carbon range difference reduces from 0.013% to 0.004%; the yield strength and tensile strength increase by 17.5% and 13.8%, respectively, and the transverse and longitudinal impact energy at 20 °C increase by 36.2% and 17.8%, respectively.

Material Index High-Speed Axle Steel DZ2, EAF-LF-VD-CC, Electroslag Remelting, Inclusions, Carbon Segregation, Mechanical Properties

随着中国高速铁路快速发展,高铁运营里程达 3.6 万 km,约占世界高铁运营总量的 70%,铁路运输的发展趋势是客运高速化、货运重载化。考虑到我国幅员辽阔,南北方温差大,高速动车组运行区间温度变化从 -40 °C 到 40 °C,高铁车轴作为列车运行的关键部件,服役运行环境极其苛刻,且承受来自车体及钢轨的复杂旋转弯曲和扭转载荷,疲劳破坏是车轴主要的失效形式,因此,要求车轴及其材料具有稳定性、安全性、可靠性和长疲劳寿命特点^[1-3]。随着列车设计时速的不断提高,列车的时速已经超过 350 km/h,对高铁车轴材料的强韧性、疲劳服役性能等综合力学性能要求不断提高,很多学者研究如何提高车轴材料的疲劳强度,如于鑫^[4]等人研究了滚压工艺参数对 EA4T 车轴钢表面质量完整性的

影响规律;李行^[5]等人研究了喷丸处理 EA4T 车轴钢疲劳性能和残余应力松弛行为,而影响车轴疲劳性能的关键因素除材料的强度和表面加工状态外,还有材料的纯净度,钢中夹杂物往往是疲劳裂纹萌生的起裂源^[6],目前高速车轴钢材料国内外的主要生产方式为电弧炉或转炉冶炼→LF + VD(或 RH)精炼→模铸或连铸→轧制或锻造成材^[3]。众所周知,电渣重熔相比电弧炉冶炼可以进一步提升轴承钢、模具钢、高速工具钢等特殊钢的纯净度^[7-11],但很少有企业采用电渣重熔的方式生产车轴钢坯。本试验开展了高速车轴钢 DZ2 的电渣重熔二次精炼工艺生产实践,通过电渣重熔的方式进一步提升钢质的纯净度和车轴钢截面成分均匀性,以期获得高纯净、高均质、高致密的高速车轴钢材料,并与电

表 1 DZ2 高速车轴钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of DZ2 high-speed axle steel / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Mo	Al
电弧炉钢	0.26	0.28	0.68	0.007	0.001	1.00	1.15	0.04	0.26	0.024
电渣重熔钢	0.26	0.25	0.71	0.006	0.001	1.01	1.10	0.05	0.26	0.015
标准	0.24 ~ 0.32	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 0.90	≤0.010	≤0.010	0.90 ~ 1.20	0.50 ~ 1.50	≤0.06	0.20 ~ 0.30	0.010 ~ 0.040

弧炉工艺生产的高速车轴钢材料进行了低倍组织、纯净度、碳偏析、力学性能的比对分析,为更高时速车轴钢材料的开发奠定基础。

1 试验材料

本试验依据 Q/CR639-2018《动车组车轴》标准成分设计要求,冶炼了 DZ2 车轴钢,其化学成分如表 1 所示。采用两种工艺进行试制 DZ2 车轴钢,一种工艺是:采用 80 t EBT 电弧炉冶炼→LF 精炼→VD 真空脱气处理→连铸 $\Phi 690$ mm→轧制 250 mm×250 mm 方坯;其中:电弧炉和钢包容量均为 80 t,连铸机为 3 机 3 流,连铸过程中间包容量 40 t,拉速为 0.24 m/min。另一种工艺是:采用电弧炉流程生产的电极棒再电渣重熔成 $\Phi 740$ mm 电渣锭→轧制 250 mm×250 mm 方坯,其中:电渣重熔公称容量为 8 t;电渣锭重为 7.9 t;电渣重熔电极坯料选用 $\Phi 690$ mm 连铸圆坯,电渣重熔的渣系为 70% CaF_2 + 30% Al_2O_3 ,电渣重熔过程采用氩气保护。

2 检验方法

对两种工艺制备的 250 mm×250 mm 方轧坯分别进行低倍组织、夹杂物、碳偏析、金相组织和力学性能对比分析,试验方法如下:

(1)低倍组织对比:在两种工艺下 250 mm×250 mm 方 DZ2 钢轧坯的横截面上分别锯切厚度为 10 mm 的试样,通过铣床铣平,采用 1:1 盐酸溶液在 40 °C 进行 20 min 浸蚀,对比两种工艺生产的 DZ2 钢的低倍组织。

(2)夹杂物对比:在两种 DZ2 钢低倍片横截面对角线 1/4L 处取样,经过磨平、抛光后,通过扫描电镜观察夹杂物形貌,并通过 EDS 能谱分析两试样中典型夹杂物的主要成分,通过 ASPEx 系统对比分析了两试样中非金属夹杂物的个数、尺寸。

(3)碳偏析对比:在两 DZ2 轧坯横截面上沿对角线和中心线分别等距离取 9 个试样,采用 $\Phi 5$ mm 钻头取屑样,进行 C 含量测定,对比两种工艺

生产的 DZ2 车轴钢在横截面不同位置的 C 含量。

(4)金相组织对比:在两种试验钢的轧坯横截面对角线 1/4L 处取样进行金相组织对比和晶粒度评级,制备 15 mm×15 mm×10 mm 的试样,对试样进行磨平、抛光,采用 4 % 的硝酸酒精溶液进行腐蚀,通过 LEICA-DMR 光学显微镜观察并对比两个试样的金相组织。

(5)力学性能对比:首先对两种工艺生产的 DZ2 钢 250 mm×250 mm 轧制方坯进行调质热处理,热处理工艺制度为:采用箱式电阻炉对试样进行正火 (900 ± 10) °C + 淬火 (860 ± 10) °C + 回火 (650 ± 10) °C 热处理,淬火介质为水。调质热处理后的试样按照 Q/CR639-2018《动车组车轴》标准位置进行取样,制取典型的拉伸和冲击试样,拉伸试样尺寸直径 $D = 10$ mm,标距 $L_0 = 50$ mm;冲击试样尺寸 10 mm×10 mm×55 mm。

3 试验结果及讨论

3.1 低倍组织对比

对两种试验钢的 250 mm×250 mm 方坯横截面铣床铣平,采用 1:1 盐酸溶液在 40 °C 进行浸蚀,两试验钢的低倍组织如图 1 所示。

从图 1 可以直观地看出,电渣重熔工艺相比电弧炉工艺的轴坯低倍组织更加致密。参照 GB/T1979-2001《结构钢低倍组织缺陷评级图》对两低倍组织进行评级,其结果为:电弧炉工艺轴坯评级为中心疏松、一般疏松 0.5 ~ 1.0 级,而电渣重熔工艺下

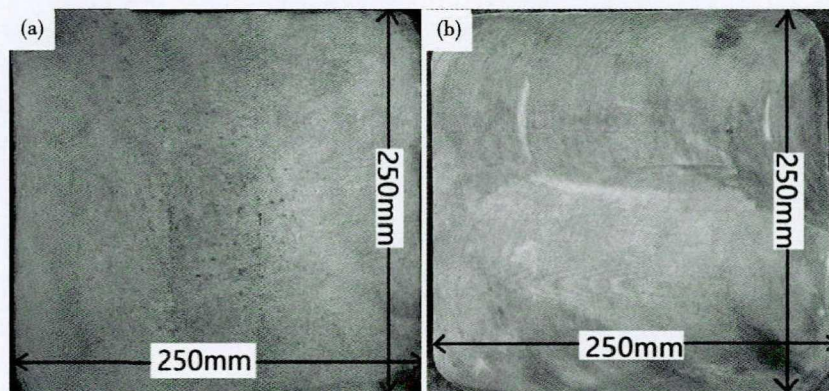


图 1 轧坯低倍组织:(a)电弧炉流程工艺;(b)电渣重熔工艺

Fig. 1 Macrostructure of rolled billet: (a) EAF flowsheet process; (b) ESR process

低倍组织评级为中心疏松、一般疏松 0~0.5 级。可见电渣重熔工艺生产的 DZ2 钢轧坯低倍质量的疏松和缩孔优于电弧炉工艺,可提高最终产品的致密性和综合力学性能。

3.2 夹杂物分析

车轴服役过程主要承受弯曲载荷、扭转载荷或弯扭复合载荷,并可能受到一定冲击,受力状态复杂。其主要失效形式为疲劳破坏^[12-13],而疲劳破坏又是与钢中夹杂物密切相关,所以车轴钢对夹杂物的要求较为严苛。根据 GB/T10561-2015《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》在 250 mm × 250 mm 方轧坯 1/4L 处进行取样,通过扫描电镜(SEM)观察两种工艺的试样中典型夹杂物形貌并测定其主要成分,如图 2 所示。采用大面积试样检测的 ASPEX 自动扫描电镜系统统计对比分析了电渣高速车轴钢与电弧炉材质钢中非金属夹杂物,如图 3 所示。

从图 2(a)可以看出,采用电弧炉工艺生产的 DZ2 车轴钢中,存在较大尺寸的棒状(长度 25 μm)非金属夹杂物,从图 2(a)可以看出其主要成分为 CaO + Al₂O₃,该类大颗粒非金属夹杂物对车轴的力学性能带来非常不利的影响,该类夹杂物的生成主要是因为电弧炉 + 连铸过程中保护浇铸可能存在吸气,同时生成的夹杂物不能充分上浮造成的。从图 2(b)可以看出,采用电渣重熔工艺生产的 DZ2 车轴钢中非金属夹杂物主要呈球状,其尺寸较小约 5 μm,根据图 2(b)可以看出其主要成分为 Al₂O₃ 和少量 CaO,球形小颗粒夹杂相比长条状夹杂物不容易形成疲劳裂纹萌生源。相比于电弧炉工艺生产的 DZ2 车轴钢中复合夹杂物 CaO + Al₂O₃,电渣重熔二次精炼过程进一步经过渣洗作用,无大颗粒夹杂,钢中存在的夹杂物尺寸在 10 μm 以下,形状呈球形,电渣工艺生成的尺寸较小球形 Al₂O₃ 夹杂物对 DZ2 车轴钢的疲劳性能影响较小。

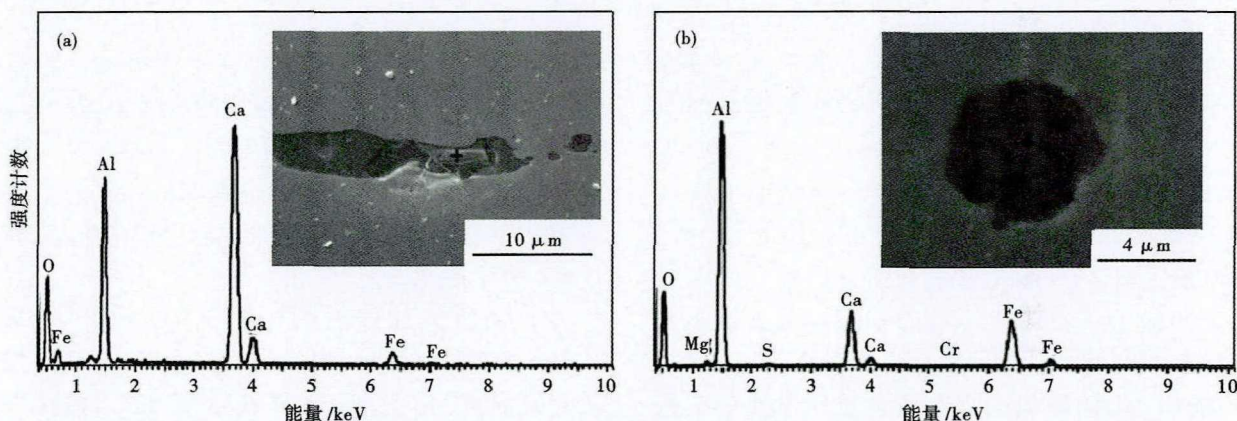


图 2 扫描电镜观察 DZ2 钢轧坯非金属夹杂物:(a)电弧炉工艺;(b)电渣重熔工艺

Fig. 2 Observation of nonmetallic inclusions in DZ2 steel rolled billet by SEM: (a) EAF flowsheet process; (b) ESR process

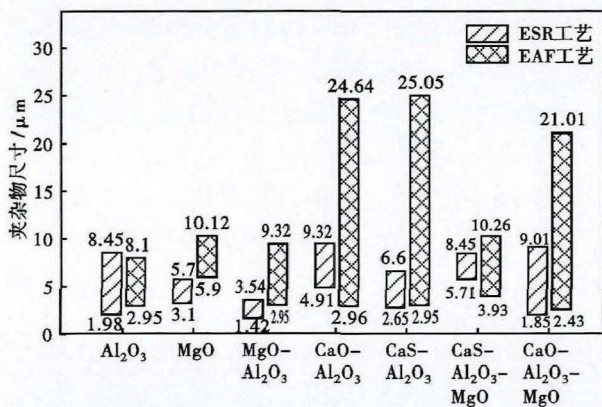


图 3 电渣重熔与电弧炉流程工艺轧坯中夹杂物分析

Fig. 3 Inclusion analysis of rolled billet by ESR and EAF flow-sheet process steel

从图 3 可以看出,电弧炉工艺生产的 DZ2 车轴钢中夹杂物尺寸为 2.43 ~ 25.05 μm,而电渣重熔后钢中夹杂物尺寸较小,夹杂物尺寸为 1.42 ~ 9.32 μm,未发现有尺寸超出 10 μm 的夹杂物。从夹杂物的类型来看,基本上以 MgO、Al₂O₃ 氧化物、CaS 形式的硫化物或两者的复合夹杂物为主。

根据 GB/T10561-2015《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》对两种工艺试验钢中的非金属夹杂物进行评级。结果如表 2 所示。

从表 2 评级结果可以看出,电弧炉工艺生产的高速车轴钢夹杂物评级 C 类 ≤ 1.0 级, D 类和 D_s 类夹杂 ≤ 0.5 级;电渣重熔工艺的金相试样显微镜视场中仅可见球状的 D 类夹杂和 D_s 类夹杂,评级级

表 2 电渣重熔与电弧炉流程工艺轧坯夹杂物评级对比/级
Table 2 Comparison of inclusion rating in rolled billet by EAF flowsheet process and ESR process /rating

项目	A类		B类		C类		D类		D _s
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	
电弧炉工艺	0	0	0	0	1.0	0	0.5	0	0.5
电渣重熔工艺	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.5
标准	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤1.5

别为 0.5 级,未见有长条状非金属夹杂物。可见电渣重熔工艺对钢中 C 类非金属夹杂的控制优于电弧炉工艺。

3.3 碳偏析对比

采用 Φ5 mm 钻头沿 DZ2 钢两轧坯横截面上对角线和中心线分别等距离钻取碳偏析铁屑样,对角线取样间距为 42.5 mm,中心线取样间距为 30 mm。

分析结果得出,相比于电弧炉流程冶炼,电渣重熔 DZ2 钢轧坯横截面上碳含量均匀程度较好。电渣重熔 DZ2 钢轧坯横截面上碳含量分布为 0.261% ~ 0.265%,碳极差为 0.004%,电弧炉冶炼的 DZ2 钢轧坯横截面上碳含量分布为 0.256% ~ 0.269%,碳极差为 0.013%。可见电渣重熔 DZ2 钢轧坯横截面上碳极差比电弧炉工艺的减小了 69.2%。电渣重熔和电弧炉工艺的 DZ2 钢轧坯横截面中心的碳含量分别为 0.264% 和 0.269%,电渣重熔的中心碳含量比电弧炉工艺减小了 0.005%,可见电渣重熔对中心碳含量的降低也有一定作用。综上所述,电渣重熔后的钢坯的成分均匀性进一步提升,对最终产品热处理后性能的稳定性和一致性提供了重要保障。

3.4 金相组织对比

在两种工艺的试验钢的轧坯横截面对角线 L/4 处取样进行金相组织对比和晶粒度评级,制备 15 mm × 15 mm × 10 mm 的试样,对试样进行磨平、抛光,采用 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀,通过 LEICA-

DMR 光学显微镜观察并对比两个试样的金相组织。两个试样的金相组织如图 4 所示。

从图 4 可以看出,在正火(900 ± 10)℃ + 淬火(860 ± 10)℃ + 回火(650 ± 10)℃ 热处理后,两工艺下 DZ2 钢的金相组织均为回火马氏体 + 回火贝氏体,根据 GB/T6394-2017《金属平均晶粒度法》评级,电弧炉工艺下 DZ2 钢晶粒度在 7.0 ~ 7.5 级,电渣

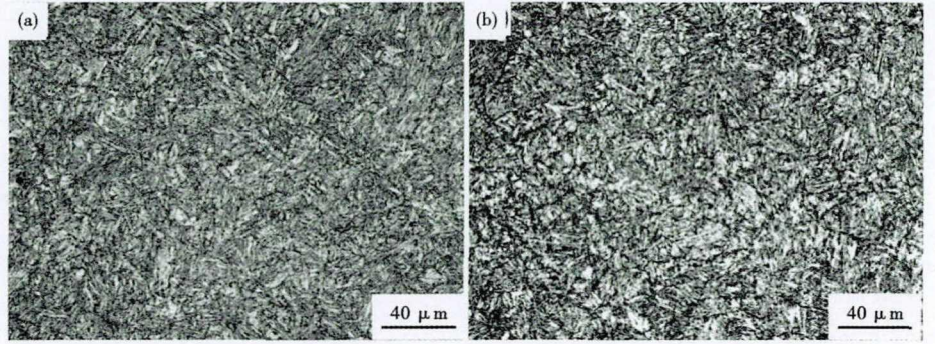


图 4 DZ2 钢轧坯调质热处理后金相组织:(a)电弧炉流程工艺;(b)电渣重熔工艺
Fig.4 Metallographic structure of DZ2 steel rolled billet after quenching and tempering heat treatment: (a) EAF flowsheet process;(b) ESR process

重熔工艺下 DZ2 钢晶粒度为 7.5 ~ 8.0 级。可见电渣重熔工艺下 DZ2 钢的晶粒度略优于电弧炉工艺,这是因为:电渣重熔过程凝固较快,形成的初生奥氏体尺寸较小,在后续的轧制过程能得到更为细小的晶粒,相同调质热处理工艺后晶粒也相应细小均匀。

3.5 力学性能对比

把调质热处理后的试样按照 Q/CR639-2018《动车组车轴》标准位置进行取样,制取典型的拉伸和冲击试样,分别检测了屈服强度(R_{el})、抗拉强度(R_m)、伸长率(A)、断面收缩率(Z),检测了 20℃ 常温条件下 DZ2 调质钢横向和纵向的冲击性能(U2-5 mm,代表 U 型 5 mm 缺口深度),及 -40℃ 低温条件下 DZ2 调质钢横向和纵向的冲击性能(U2-2 mm,代表 U 型 2 mm 缺口深度),其结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,电弧炉和电渣两工艺条件下,其力学性能均满足标准要求。电渣重熔工艺条件下的屈服强度(R_{el})较电弧炉工艺提高了 17.5%,抗拉强度 R_m 提高了 13.8%,断面收缩率提高了 3%;20℃

表 3 电渣重熔与电弧炉工艺 DZ2 钢轧坯的力学性能对比

Table 3 Comparison of mechanical properties of DZ2 steel rolled billet between by EAF flowsheet process and ESR

项目	R_{el} / MPa	R_m / MPa	A / %	Z / %	冲击功 /J			
					U2-5 mm 深 20℃ 纵向	U2-5 mm 深 20℃ 横向	U2-2 mm 深 -40℃ 纵向	U2-2 mm 深 -40℃ 横向
电弧炉工艺	601	744	21.5	65	98/88/90	88/86/83	210/198/188	154/160/160
电渣重熔工艺	706	847	21.5	67	123/87/115	108/128/114	201/175/168	168/150/151
标准	450	680 ~ 850	≥18	-	50	25	30	25

横向冲击功提高 36.2%, 20 °C 纵向冲击功提高 17.8%, 两种工艺条件下低温(-40 °C) 横向和纵向冲击功变化不大。可见, 相比于电弧炉工艺, 电渣重熔工艺得到的 DZ2 钢强度和常温冲击功得到了一定幅度的提高, 其它方面的力学性能(伸长率、断面收缩率、低温冲击功)与电弧炉工艺生产的 DZ2 钢相当。

4 结论

(1) 相比于电弧炉工艺, 电渣重熔工艺生产的 DZ2 钢 250 mm × 250 mm 轧坯低倍组织的致密性更优, 轴坯中心疏松和一般疏松从 0.5 ~ 1.0 级降低到 0 ~ 0.5 级。

(2) 电弧炉工艺生产的 DZ2 车轴钢中存在 25 μm 棒状复合夹杂物 CaO + Al₂O₃, 而电渣工艺生产

的车轴钢中未见大尺寸的夹杂物, 仅存在尺寸较小 (< 10 μm) 球形夹杂物。

(3) 电渣重熔 DZ2 钢轧坯横截面上碳极差比电弧炉工艺的减小了 69.2%, 电渣重熔和电弧炉冶炼的 DZ2 钢轧坯横截面上碳含量分布分别为 0.261% ~ 0.265% 和 0.256% ~ 0.269%, 碳极差分别为 0.004% 和 0.013%。

(4) 电渣重熔工艺条件下的屈服强度(R_{el})较电弧炉工艺提高了 17.5%, 抗拉强度(R_m)提高了 13.8%; 20 °C 横向冲击功提高 36.2%, 20 °C 纵向冲击功提高 17.8%, 两种工艺条件下低温(-40 °C) 横向和纵向冲击功变化不大。

国家重点研发计划项目(2017YFB0304600)

参考文献

- [1] 朱 静, 顾家琳, 周惠华, 等. 高速列车空心车轴国产化的选材和试制[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(2): 60-67.
- [2] 吴 毅. 车组车轴的国产化试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(5): 7-11.
- [3] 杜松林, 汪开忠, 胡芳忠, 等. 国内外高速列车车轴技术综述及展望[J]. 中国材料进展, 2019, 38(7): 641-649.
- [4] 于 鑫, 孙 杰, 李世涛, 等. 滚压工艺对 EA4T 车轴表面质量完整性的影响及预测模型建立[J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 87-95.
- [5] 李 行, 张继旺, 易科尖, 等. 喷丸处理 EA4T 车轴钢疲劳性能和残余应力松弛行为研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 244-250 + 266.
- [6] 崔友久, 惠卫军, 张永健, 等. 连铸与模铸高铁车轴钢的高周疲劳破坏行为[J]. 中国冶金, 2019, 29(12): 31-39.
- [7] 车晓健, 杨卯生, 唐海燕, 等. 高性能 GCr15 轴承钢中夹杂物控制与疲劳性能[J]. 钢铁, 2018, 29(5): 76-85 + 101.
- [8] 王 昊, 李 晶, 史成斌, 等. 国内外电渣重熔 H13 钢中夹杂物的对比[J]. 中国冶金, 2019, 29(2): 17-22.
- [9] 谢志彬, 邵青立, 张国平, 等. 酸性渣重熔含硫高速钢 M35 的质量研究[J]. 特殊钢, 2019, 40(1): 27-30.
- [10] 李正邦. 电渣冶金理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [11] 马 群, 孙常亮, 冯桂萍, 等. 改善 34CrNiMo6 含硫电渣钢 B 类夹杂物的工艺实践[J]. 特殊钢, 2017, 38(1): 39-41.
- [12] 张俊清, 周素霞, 谢基龙. 缺口对车轴钢疲劳性能的影响[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(4): 132-135.
- [13] 黄 国, 黄海明, 王 超, 等. 45# 车轴钢疲劳性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 71-76.

张锦文(1986-), 男, 博士研究生(太原理工大学), 工程师, 2009 年南京航空航天大学(本科)毕业, 铁路车轴钢材料研发。E-mail: zhangjw_2006@126.com

收稿日期: 2020-12-10

下 期 要 目

- | | |
|--|------|
| 80 kg 级低温不预热焊接高强钢的开发 | 杨 俊等 |
| 方坯直接轧制工艺铸-轧界面连铸坯排队过程的衔接优化 | 张宏亮等 |
| N08800 铁镍基合金热变形行为及组织演变 | 李 莎等 |
| 180 t 钢包底吹氩过程钢液流场特性数值模拟 | 杨亚迪等 |
| GH4169 合金 δ 相析出与溶解行为研究 | 白亚冠等 |
| GCr15 轴承钢 120 t LF 精炼终点 CaO-MgO-Al ₂ O ₃ 夹杂的特性研究 | 雷家柳等 |
| X65Q0 Φ457 mm × 25.4 mm 大口径深海海底无缝钢管的开发和应用 | 熊 刚等 |
| 弹性挡圈用 C75S 碳素弹簧钢热轧盘条的研发与生产 | 姜 婷等 |
| 真空预热处理对氩气保护高温退火取向硅钢 30Q140 冷轧板组织和磁性能的影响 | 张 辉等 |
| 控轧控冷和冷床保温工艺对 42CrMo 钢 Φ50 mm 轧材力学性能的影响 | 金启邦等 |