



高铁齿轮用钢 18CrNiMo7-6 电渣生产工艺实践

王之香, 南海, 张锦文

(山西太钢不锈钢股份有限公司 技术中心, 太原 030003)

摘要:为达到高铁齿轮钢高洁净度,尤其是单颗粒D类球状夹杂物尺寸 $\leq 10\ \mu\text{m}$ 的目标,开发了电渣工艺生产高铁齿轮用钢 18CrNiMo7-6 ($\%: 0.15 \sim 0.21\text{C}, \leq 0.40\text{Si}, 0.50 \sim 0.90\text{Mn}, 1.50 \sim 1.80\text{Cr}, 1.40 \sim 1.70\text{Ni}, 0.25 \sim 0.35\text{Mo}, \leq 0.010\text{P}, \leq 0.010\text{S}$), $\Phi 250\ \text{mm}$ 钢坯生产工艺流程: EBT 电弧炉-LF-VD-模铸 5.6 t 电极坯-电渣重熔-锻造-退火-检验。采用 5.6 t 电渣锭,渣系为 $\text{CaF}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaO}:\text{MgO}=65:20:10:5$,冶炼过程中熔化率控制在 $500 \sim 550\ \text{kg/h}$,渣量为 $180 \sim 200\ \text{kg}$,采用新渣系后生产高铁齿轮钢的洁净度为 $[\text{O}] \leq 15 \times 10^{-6}$, $[\text{H}] \leq 1.0 \times 10^{-6}$, $\text{P} \leq 0.008\%$, $\text{S} \leq 0.005\%$, A、B、C、D、D_s 类非金属夹杂物级别 ≤ 1.0 级,单颗粒D类球状夹杂物尺寸 $\leq 10\ \mu\text{m}$,淬透性、力学性能等均符合要求。

关键词: 18CrNiMo7-6; 高铁齿轮钢; 电渣重熔; 洁净度; 淬透性

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2022-00208

Production Practice of 18CrNiMo7-6 Electroslag Process for High-speed Rail Gear Steel

Wang Zhixiang, Nan hai, Zhang Jinwen

(Technology Center, Shangxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003)

Abstract: In order to achieve the goal of high cleanliness of high-speed gear steel, especially the size of single-Particle D spherical inclusions $\leq 10\ \mu\text{m}$, electroslag process was developed to produce high-speed rail gear steel 18CrNiMo7-6 ($\%: 0.15-0.21\text{C}, \leq 0.40\text{Si}, 0.50-0.90\text{Mn}, 1.50-1.80\text{Cr}, 1.40-1.70\text{Ni}, 0.25-0.35\text{Mo}, \leq 0.010\text{P}, \leq 0.010\text{S}$), $\Phi 250\ \text{mm}$ steel billet production process is EBT electric furnace-LF-VD-casting 5.6 t electrode billet-electroslag remelting-forging-annealing-inspection. The electroslag slag system of 5.6 t electroslag ingot is $\text{CaF}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaO}:\text{MgO}=65:20:10:5$, in the smelting process the melting rate is controlled at $500-550\ \text{kg/h}$, and the slag amount is $180-200\ \text{kg}$. Compared with the old slag system, after adopting the new slag system the cleanliness of the produced high-speed gear steel is $[\text{O}] \leq 15 \times 10^{-6}$, $[\text{H}] \leq 1.0 \times 10^{-6}$, $\text{P} \leq 0.008\%$, $\text{S} \leq 0.005\%$, and non-metallic inclusion rating of A, B, C, D and D_s series ≤ 1.0 grade, and the size of single-Particle D spherical inclusions is $\leq 10\ \mu\text{m}$. Other hardenability and mechanical properties meet the requirements.

Key Words: 18CrNiMo7-6; High-speed Rail Gear steel; Electroslag Remelting; Cleanliness; Hardenability

齿轮箱是动车组列车极为重要的驱动系统组成部件,长期处于高速、重载的工作状态,尤其是随着近些年动车组列车运行速度等级的提升及车辆轻量化发展趋势,使齿轮箱的工作环境变得更加恶劣,而一旦齿轮箱发生故障,将会危及到高速列车的运行安全,进而危及乘客的生命、财产安全^[1-2]。齿轮作为高铁齿轮箱的关键部件,我国在实现自主化时,对各项技术指标提出了比进口产品更高的要求,18CrNiMo7-6 钢是欧洲标准规定的高速铁路用齿轮材料,经过适当的热处理后可获得优良的强韧性,在欧洲已得到应用,为改变我国高铁齿轮材料长期依赖进口的局面,2010 年我国开始国产化齿轮研究,在引进-消化-吸收的基础上,结合我国高铁运行的实际应用环境,对进口材料进行了优化设计,

制定了高于欧洲标准的 18CrNiMo7-6 齿轮钢标准,该标准重点提高了对洁净度、晶粒度及淬透性的要求,为实现高洁净度特别是单颗粒D类球状夹杂物尺寸 $\leq 10\ \mu\text{m}$ 的要求,我公司采用电渣工艺进行试制,因为电渣重熔是在电极熔化末端熔滴形成和下落,渣池与金属熔池界面上熔渣与金属液之间发生系列物理化学反应,可以有效去除自耗电电极中的大尺寸夹杂物,同时有效改善钢的凝固组织^[3-5]。

1 18CrNiMo7-6 高铁齿轮钢电渣后钢坯的主要技术要求

1.1 试验钢的化学成分

采用电渣实践工艺,最终成功开发了 EBT-LF-VD-模铸-电渣-锻造流程的 18CrNiMo7-6 高铁齿轮

基金项目: 山西省重点研发计划项目(201903D111008)“高铁齿轮钢产品关键生产工艺技术开发及应用”

作者简介: 王之香(1975-),女,硕士,正高级工程师;

E-mail: wangzx@tisco.com.cn;

收稿日期: 2022-12-22

钢坯生产工艺,化学成分见表 1。

1.2 非金属夹杂物

Φ250 mm 规格钢坯,在半径 1/2 处取 20 mm × 20 mm × 20 mm 的试样,按照 GB/T10561-2005 进行检测,钢中非金属夹杂物级别见表 2。

1.3 力学性能

在 Φ250 mm 钢坯相对应钢锭帽口位置,取长度 200 mm 样坯进行“淬火+回火”热处理,热处理后在半径 1/2 处取纵向力学性能试样,按照 GB/T228-2021、GB/T229-2020 进行拉伸强度、塑性变形、冲击功等力学性能检验,标准见表 3。

1.4 晶粒度

在 Φ250 mm 规格的高铁齿轮钢坯半径 1/2 处取 20 mm × 20 mm × 20 mm 的试样,经 930 °C 保温 4 h 水淬,按 GB/T6394-2017 标准评定,晶粒度应不低于 6 级,且最高与最低级别差不超过 3 级。

1.5 末端淬透性

在 Φ250 mm 高铁齿轮钢坯半径 1/2 处取 Φ30 mm 毛坯试样,试样经 920 °C 正火,860 °C ± 5 °C 淬火后,按照 GB/T225-2006 进行检验,钢坯的末端淬透性

见表 4。

2 工艺流程及工艺重点

2.1 工艺流程

18CrNiMo7-6 齿轮钢生产工艺流程为:80 t 电弧炉+LF+VD→模铸 5.6 t (Φ550 mm)电极坯→电渣重熔→退火→加热→锻造成 Φ250 mm 钢坯→退火→精整→检验、交库

2.2 工艺重点

2.2.1 电弧炉+LF+VD 冶炼

18CrNiMo7-6 齿轮钢电弧炉冶炼时采用铁水比例 ≥ 80% 冶炼工艺,电弧炉出钢禁止下氧化渣;LF 精炼采用在线加 Al 丸脱氧工艺,要求白渣保持时间 ≥ 20 min,各成分达到内控控制范围且温度达到目标要求后出 LF 工位;之后钢包进 VD 真空脱气处理工位,钢包在 ≤ 67 Pa 高真空度下进行真空脱气处理时间不少于 20 min,抽真空结束后开启底吹氩气搅拌,时间不少于 10 min,达到目标温度后出钢。

2.2.2 电极坯浇注

VD 处理后进入电极坯浇注工序,浇注前保护渣加入钢锭模底部,为保证浇注过程与空气隔绝,

表 1 电极坯及电渣后 18CrNiMo7-6 钢坯的化学成分实际值(质量分数)

项目	炉别	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	[H]	[O]
电极坯成分	55	0.17	0.27	0.71	0.008	0.002	1.68	1.64	0.30	0.01	0.025	0.01	0.000 05	0.001 0
	1#	0.17	0.29	0.65	0.006	0.001	1.69	1.59	0.29	0.01	0.016	0.01	0.000 07	0.001 2
	2#	0.18	0.27	0.64	0.006	0.001	1.62	1.60	0.29	0.01	0.017	0.01	0.000 08	0.001 4
电渣后钢坯成分	3#	0.18	0.28	0.66	0.006	0.001	1.68	1.60	0.30	0.01	0.021	0.01	0.000 08	0.001 0
	4#	0.17	0.24	0.69	0.005	0.001	1.62	1.62	0.27	0.01	0.022	0.01	0.000 06	0.001 1
	5#	0.19	0.28	0.70	0.006	0.001	1.60	1.65	0.28	0.01	0.020	0.01	0.000 09	0.001 3
内控要求		0.16~0.20	0.20~0.35	0.50~0.90	≤ 0.015	≤ 0.010	1.55~1.75	1.50~1.70	0.25~0.35	≤ 0.05	≤ 0.050	≤ 0.20	≤ 0.000 10	≤ 0.001 5
标准要求		0.15~0.21	≤ 0.40	0.50~0.90	≤ 0.025	≤ 0.015	1.50~1.80	1.40~1.70	0.25~0.35	-	-	≤ 0.20	≤ 0.000 10	≤ 0.001 6

表 2 18CrNiMo7-6 钢坯的非金属夹杂物实际值 / 级

编号	A		B		C		D		Ds
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	
1#	0	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0
2#	0	0	0	0.5	0	0	0	0.5	0
3#	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0
4#	0	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0
5#	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0
6#(原渣系)	0	0.5	0.5	1.0	0	0	0.5	1.0	1.0
内控要求	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 0.5	0
标准要求	≤ 0.5	≤ 1.5	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.0

表3 18CrNiMo7-6钢坯的力学性能及要求
Table 3 Mechanical property for 18CrNiMo7-6 billets

炉号	R_m /MPa	$R_{m,CL}$ /MPa	A/%	Z/%	-40 °C纵向 A_{KV} /J
1#	1 308	1 220	12.5	58	199
2#	1 248	1 191	13	56	173
3#	1 329	1 026	15	60	215
4#	1 320	1 026	15	60	210
5#	1 262	1 075	14	56	213
标准要求	≥1 080	≥785	≥10	≥40	≥41

表4 18CrNiMo7-6钢坯的末端淬透性要求
Table 4 End hardenability requirements of 18CrNiMo7-6 billets

端淬距离/mm	J1.5	J5	J9	J15	J20	J30	J40
硬度最大值(HRC)	48	48	47	46	42	42	41
硬度最小值(HRC)	43	42	40	39	35	34	33

全程氩气保护浇注;浇注电极坯锭型为5.6 t圆锭,锭身浇注速度为7.5~9.5 kg/s;帽口的浇注速度1.6~3.2 kg/s,在帽口浇注剩余1/3时均匀加入发热剂,浇注完后,电极坯送电渣工序。

2.2.3 电渣冶炼

电渣重熔前电极坯头尾锯齐,采用8 t电渣锭型、5.6 t规格电极坯(断面尺寸:Φ550 mm),为保证钢中氧含量,采用气氛保护电渣炉,结晶器尺寸:Φ700 mm,电极插入渣池深度40~50 mm、填充比0.45~0.55。在冶炼前,为保证气氛保护效果,需要对结晶器充氩气20 min以上,并将氩气压力提高到0.35 MPa以上,达到良好的气氛保护条件。

2.2.3.1 易烧损元素的选择

为防止电渣过程中过度烧铝和硅,在化渣前需向渣中配加铝粉,铝粉的配加量为0.5 kg。

2.2.3.2 渣系选择

张锦文等人^[6]认为,相比于电弧炉工艺生产的钢中生成复合夹杂物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,电渣工艺生成尺寸较小球形Al₂O₃夹杂物。所以渣系的选择对进一步提高纯净度至关重要。高铁齿轮钢的电渣冶炼特选用自配渣系:65%CaF₂/20%Al₂O₃/10%CaO/5%MgO,此渣系选择65%CaF₂含量,因为Ca²⁺与F⁻的结合能比与O²⁻的结合能小;温度上升,渣液与钢的表面张力下降,如果夹杂物与钢液的界面张力大或附着功小,夹杂物容易排出到相界面;渣中配10%CaO和5%MgO,其主要作用

是降低SiO₂的活度,减少还原反应进行,减小氧含量,由于MgO使熔渣的粘度提高,所以渣中一般不应超过10%;配20%Al₂O₃是为了能迅速提高氟化钙渣的比电阻,在同样的电功率下能提高熔化速度,从而提高生产率和降低电耗。但如果太高则容易使钢中含氧量较高。与原70%CaF₂/30%Al₂O₃的渣系相比,增加CaO和MgO组分主要代替Al₂O₃组分,主要目的是为提高碱度并减少球状氧化物的生成,因为电渣钢中的夹杂物主要来自于钢中氧含量,氧含量随稳定性高的CaO量的增加而下降,但随较低稳定性Al₂O₃的增加而增加,不稳定的氧化物容易被钢中较活泼的合金元素还原,所以从降低夹杂物级别方面考虑,设计了65%CaF₂/20%Al₂O₃/10%CaO/5%MgO渣系。

2.2.3.3 电压及电流选择

根据结晶器的单位比功率,选择合适的电压、电流。通常结晶器单位比功率可选为0.2~0.5 kVA/cm²,工作电压按照式(1)计算确定;工作电流按照式(2)计算确定。

$$V=(0.8 \sim 1.8)D+26 \quad (1)$$

$$A=KD \quad (2)$$

式(1)中:V为工作电压,单位为V;D为结晶器直径,单位为cm;

式(2)中:A为工作电流,单位为A;K为结晶器线电流密度,单位为A/cm,其值为100~250;D为结晶器直径,单位为cm。通过计算,确定工作电压为83V、工作电流为14 700 A,选择此工作电压和工作电流进行冶炼过程中的功率调节,逐级增大和减小。

2.2.3.4 熔化率的选择

重熔过程中,应密切注意炉况,熔化率的选取一般为结晶器直径的0.7~0.8倍,此外根据熔化率及钢锭表面状况及时调整功率。钢锭下部与钢锭上部使用的功率下大上小,采用大填充比递减功率恒熔池操作,使熔化率和熔池深度上下接近。冶炼过程中,适当降低输入功率,高铁齿轮钢选用的结晶器尺寸为Φ700 mm,所以将熔化率控制在500~550 kg/h,摆动控制在2%~4%。

2.2.3.5 渣量选择

根据结晶器及电极断面尺寸的大小选择适宜的渣层厚度,Φ550 mm的电极坯用渣量190~210 kg、渣厚110~120 mm。

2.2.4 电渣锭锻造及退火

电渣锭在环形炉预热到 1 000 °C 后转入室式炉加热,加热温度为(1 200±10)°C,保温时间为 3 h,快锻机锻造成 Φ250 mm 圆坯,之后钢坯红退火,退火温度为 700 °C,保温时间为 8 h。

3 钢坯检验结果及讨论

3.1 化学成分及气体含量

高铁齿轮钢化学成分的设计首先是保证材料具有良好的强韧性及综合性能,力学性能的要求沿用了进口高铁齿轮钢的要求,根据齿轮生产厂的齿轮设计、制造需求,在淬透性值的要求上与进口齿轮钢有所区别,它不是要求全截面高淬透性,而是要求从表面到心部由高变低的趋势,所以在成分设计时,主要是考虑齿轮钢淬透性能,一般而言,化学成分对钢的淬透性起着决定性作用。影响淬透性的主要因素是 C 和合金元素,在常用的合金元素中,对降低临界冷却速度从而使钢容易淬火的影响来说,以 Mn 最为强烈,其次为 Mo、Cr、Al、Si、Ni,再次是其它元素^[7]。为保证齿轮钢从表面到心部的淬透性变化,C 要按照中线控制;Mn、Mo、Cr 作为提高淬透性的主要合金元素,生产中按照中限要求控制;Ni 是所有合金元素中能同时提高强度和韧性的唯一元素,所以生产按照中上限控制;为保证晶粒度要求,特添加 Al 作为细化晶粒元素。表 1 为工业化生产的 1 炉高铁齿轮钢及对应 5 个电渣炉号的化学成分和气体含量,其成分满足标准要求。

3.2 非金属夹杂物

高铁齿轮钢 A、B、C、D 类粗系夹杂物均要求 ≤ 0.5 级且 D_s 类夹杂物 ≤ 1.0 级,工业化生产内控要求单颗粒 D 类球状夹杂物尺寸 ≤ 10 μm,也就是要去除 D_s 类夹杂物。由于高铁齿轮钢炼钢采用的是铝脱氧工艺,根据胡梦頔研究,齿轮钢冶炼过程中,夹杂物完成了 Al₂O₃ → Al₂O₃·MgO → Al₂O₃·CaO 的转变,RH 真空结束后夹杂物中 MgO 含量降低,CaO 含量升高,18CrNiMo7-6 钢 LF 精炼调整成分后检测至软吹结束检测,1~10 μm 夹杂总去除率 54%,大于 10 μm 夹杂数量总去除率 66%^[8]。刘金鑫等人^[9]也认为在精炼过程中生成的夹杂主要为镁铝钙的复合夹杂物和 CaS、MgS 等硫化物。因高铁齿轮钢 S 含量控制的很低,所以,电弧炉钢中夹杂物主要以氧化物夹杂为主,即 B 类、D 类、D_s 类。为解决大颗粒 D_s 类夹杂物,进一步降低 B 类、D 类夹杂物级别,特选用自配渣系:65%CaF₂/20%Al₂O₃/10%CaO/5%MgO 电渣冶

炼,与之前采用的 70%CaF₂/30%Al₂O₃ 渣系相比,此渣系可去除电极坯中的大颗粒夹杂物,特别是 D_s 类夹杂物,进一步减少 B 类、D 类夹杂物数量,保证钢质洁净度,非金属夹杂物控制效果见表 2,1#~5# 为新渣系控制效果,6# 为 70%CaF₂/30%Al₂O₃ 原渣系控制效果,从表 2 中可看出,原渣系 6# 存在 B 类、D 类粗系夹杂物及 D_s 球状大颗粒夹杂物,D 类夹杂物检验 1.0 级,超标。1#~5# 为新渣系控制效果,与 6# 旧渣系对比,1#~5# 完全去除了 B 类、D 类粗系夹杂物,仅存在小尺寸的 B 类、D 类夹杂物,对照 GB10561-2005 夹杂物评级尺寸看,实现了单颗粒 D 类球状夹杂物尺寸 ≤ 10 μm 的目标。

3.3 淬透性、力学性能和晶粒度

淬透性、力学性能和晶粒度按照技术要求进行检测,从图 1 末端淬透性结果可见,硬度从表面到心部由高到低而变化,很好的满足了标准要求。正交热处理实验获得了“870 °C 保温 1 h 淬火+180 °C 保温 1 h 回火”的力学性能热处理工艺,结果见表 3,采用电渣工艺后高铁齿轮钢的拉伸和冲击性能远高于标准要求。通过在电渣渣料中添加 Al 后,有效的防止了电渣过程中 Al 的烧损,保证了成品 Al 含量,起到了细化晶粒的作用,检测 5 个炉次的晶粒度结果均在 7~8 级,满足了晶粒度要求,晶粒度典型图片如图 2 所示。

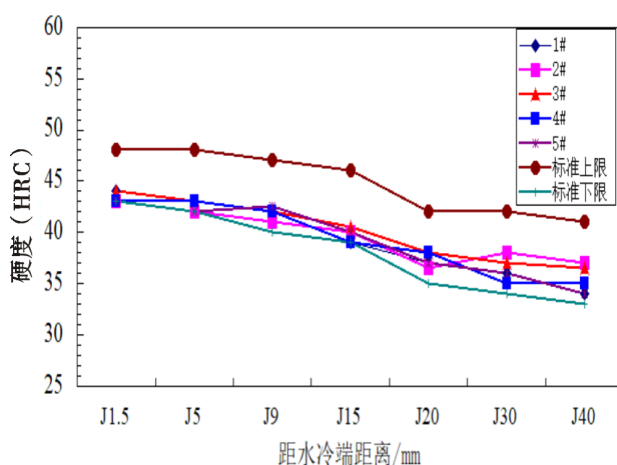


图 1 18CrNiMo7-6 钢坯的末端淬透性曲线

Fig. 1 End hardenability curve of 18CrNiMo7-6 billet

4 结论

(1) 通过内控化学成分、电弧炉+LF 精炼+VD 真空脱气冶炼技术和电渣工艺控制技术,本企业生产的高铁齿轮钢坯材质洁净度、淬透性、晶粒度、拉伸

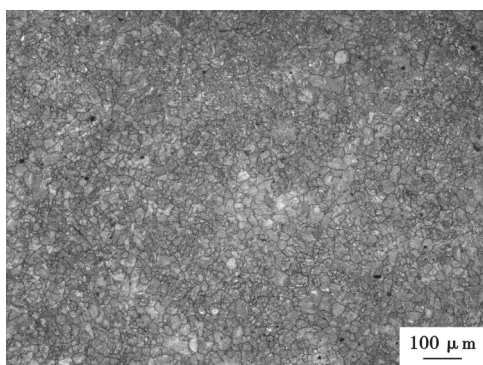


图2 18CrNiMo7-6 钢坯的晶粒度典型照片

Fig. 2 Typical photograph of grain size of 18CrNiMo7-6 billet

性能和冲击性能等技术指标均符合高铁齿轮钢坯

技术要求。

(2)通过电渣冶炼工艺中 65%CaF₂/ 20%Al₂O₃/ 10%CaO/ 5%MgO 专用渣系控制,与原渣系 70%CaF₂/ 30%Al₂O₃ 比较,夹杂物得到进一步改善,采用专用渣系后,工业化生产的高铁齿轮钢的洁净度为 [O] ≤ 15 × 10⁻⁶, [H] ≤ 1.0 × 10⁻⁶, P ≤ 0.008%, S ≤ 0.005%, 去除了 B 类、D 类粗系夹杂物,仅存在小尺寸的 B 类、D 类夹杂物,其它夹杂物均 ≤ 0.5 级,实现了单颗粒 D 类球状夹杂物尺寸 ≤ 10 μm 的目标。

(3)本企业生产的 18CrNiMo7-6 高铁齿轮用钢,各项性能均满足标准要求,尤其是淬透性能及 -40 °C 冲击韧性很好的满足了齿轮使用要求。

参考文献

- [1] 孙川,谢全浩,郭锐. 动车组齿轮箱故障分析[J]. 工业与信息化, 2020, 1: 24-27.
- [2] 赵博. 基于故障树方法的高铁转向架齿轮箱的故障分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2018: 3-4.
- [3] 李世健,成国光,苗志奇,等. 自耗电极冶金质量对 G20CrNi2Mo 轴承钢电渣锭洁净度的影响[J]. 特殊钢, 2018, 39(6): 6-10.
- [4] 李阳,姜周华,李花兵,等. 炼钢过程中的夹杂物[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 218-219.
- [5] 赵海波,陈列. 电渣重熔对 GCr15 轴承钢化学成分和夹杂物特性的影响[J]. 特殊钢, 2016, 37(4): 44-48.
- [6] 张锦文,王文先,鄂中华,等. 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[J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 25-29.
- [7] 孙后金,张永安,张三平. 22CrMoH 齿轮钢奥氏体晶粒度影响因素及混晶原因分析[J]. 山东冶金, 2019, 6: 29-31.
- [8] 胡梦颀. 70 t EAF-LF-RH 冶炼 18CrNiMo7-6 齿轮钢过程的夹杂物变化[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 21-23.
- [9] 刘金鑫,冯桂萍,张龙,等. 60 t LF-VD 精炼过程 18CrNiMo7-6 齿轮钢夹杂物的演变[J]. 特殊钢, 2016, 37(6): 5-8.

“讲文明树新风”公益广告

绿色环保
人人有责