



高铬耐候钢 Q350EW 高温热塑性分析

孟庆勇, 单庆林, 潘宏伟, 路博勋, 石晓伟, 温巨文
(唐山钢铁集团有限责任公司技术中心, 唐山 063000)

摘要:为评估 Q350EW 高铬耐候钢连铸过程裂纹敏感性, 利用 Gleeble3500 热模拟试验机测定了 Q350EW 高铬耐候钢高温热塑性, 并结合 Thermo-Calc 热力学软件理论计算 Q350EW 高铬耐候钢析出相分布规律。利用扫描电镜结合光学显微镜对高温拉伸断口宏观、微观形貌以及断口处的显微组织观察分析。研究结果表明, 随着加热温度升高, Q350EW 高铬耐候钢抗拉强度降低; 断面收缩率曲线在 700~800 °C 附近出现凹谷, 775 °C 时断面收缩率最低为 64.9%。凹谷温度范围内断口形貌主要由韧窝组成, 其断裂机理为韧性断裂; 显微组织分析表明, 原奥氏体晶界出现铁素体致使塑性降低, 但是由于铁素体含量较高, Q350EW 高铬耐候钢塑性仍保持较高水平。通过优化连铸二次冷却等关键工艺参数降低 Q350EW 高铬耐候钢铸坯裂纹风险性, 建议铸坯角部弯曲矫直段温度 < 750 °C。

关键词: Q350EW 高铬耐候钢; 高温热塑性; 断口形貌; 显微组织; 析出相

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2024-00038 **中图分类号:** TG142.1

High-temperature Thermoplastic Analysis on High-chromium Weathering Resistant Steel Q350EW

Meng Qingyong, Shan Qinglin, Pan Hongwei, Lu Boxun, Shi Xiaowei, Wen Juwen
(Technical Center of Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd, Tangshan 063000, China)

Abstract: To evaluate the crack sensitivity of Q350EW high-chromium weathering resistant steel during continuous casting, the high-temperature thermoplastic characteristics of Q350EW high-chromium weathering resistant steel were studied using Gleeble3500 thermal simulation testing machine, and the distribution of precipitates in the steel was calculated using Thermo-Calc thermodynamic software. Scanning electron microscopy and optical microscopy were used to observe and analyze the macrostructure and microstructure morphology of high-temperature tensile fractures and microstructure at the fractures. The research results indicate that as the heating temperature increases, the tensile strength of the test steel decreases; The cross-sectional shrinkage curve shows a concave valley around 700-800 °C, with the lowest cross-sectional shrinkage of 64.9% at 775 °C. The fracture morphology within the range of concave valley temperature is mainly composed of ductile dimples, and its fracture mechanism is ductile fracture. Microscopic analysis shows that ferrite appears at the grain boundaries of the original austenite, leading to a decrease in plasticity. However, due to the high content of ferrite, the plasticity of Q350EW high chromium weather resistant steel still remains at a high level. By optimizing key process parameters such as secondary cooling during continuous casting, the risk of cracking in Q350EW high chromium weather resistant steel billets can be reduced. It is recommended that the temperature of the corner bending and straightening section of the billets be less than 750 °C.

Key Words: Q350EW High Chromium Weathering Steel; Hot Ductility; Fracture Morphology; Microstructure; Precipitate Phase

耐候钢由于具有良好的耐腐蚀性能和优良的力学性能^[1-3]等优点, 并且在关键部位具有良好的耐疲劳性能和抗冲击性能^[4-5], 故被广泛运用于铁路车辆。随着铁路的快速发展, 对铁路车辆所用材料的要求也越来越严格, 特别是材料的耐大气腐蚀性能要求越来越高^[6-9]。目前铁路车辆采用的钢材主要为高强耐候钢 Q450NQR1 等材料, 但是受到磨损腐蚀和复杂环境腐蚀的影响, 车辆局部无法形成稳定

锈层, 缩短了车辆的使用寿命。为解决车体腐蚀寿命短的问题, 适应铁路未来发展要求目标, 急需开发新一代铁路车辆用高耐蚀型耐候钢关键材料。高铬耐候钢 Q350EW 由于在基体中添加的 Cu、Cr、Ni 等合金元素^[10-13], 受环境腐蚀后元素可以富集在内部锈层中, 使锈层的致密度增加, 钢的耐腐蚀性提高。高铬耐候钢 Q350EW 钢中 Cr 含量高达 4.5%, 钢基体自腐蚀电位和耐腐蚀性能显著增加, 凸显高

基金项目: 河北省“三三三人才工程”资助项目(C20231026)

作者简介: 孟庆勇(1984—), 男, 博士, 高级工程师; E-mail: 039014012@163.com; 收稿日期: 2024-02-26

通信作者: 路博勋(1989—), 男, 硕士, 高级工程师; E-mail: lbxa830@163.com

铬耐候钢 Q350EW 在铁路车辆制造独特优势。

高铬耐候钢 Q350EW 添加大量合金元素 Cr, 然而高 Cr 条件下钢种裂纹敏感性未知^[14-15], 而铸坯裂纹的萌发和扩展与钢的高温力学参数和应力应变状态相关。铸坯浇铸过程铸机对弧精度、弯曲矫直过程、中包钢水静压力以及凝固过程相变等机械应力、相变应力和热应力综合因素作用, 若铸坯高温强度无法抵御应力作用致使裂纹的萌发并伴随连铸进程裂纹扩展, 造成铸坯表面裂纹缺陷或者漏钢等生产事故。然而, 文献公开报道高铬耐候钢 Q350EW 高温力学性能数据匮乏。因此, 本文采用 Gleeble 热模拟机系统性测定高铬耐候钢 Q350EW 高温热塑性, 结合 Thermo-Calc 软件对温度区间(400~1 600 °C)析出相组成进行定量分析。评估连铸过程产生角部裂纹等风险性, 明确不同温度热塑性差异的原因。据此, 实验结果为高铬耐候钢 Q350EW 连铸矫直温度的确定和二冷制度的制定提供理论参考, 避免因高铬耐候钢性能参数与连铸工艺不匹配导致批量铸坯表面裂纹甚至漏钢等恶性生产事故。

1 试验材料与方法

以唐钢生产的 Q350EW 钢种为研究对象, 其化学成分见表 1。

试验采用的原料取自现场生产的板坯(1 500 mm×230 mm)宽度 1/4 处, 机械加工成 10 mm×120 mm 圆棒, 两端带 10 mm 螺纹高温拉伸试样。本次试验采用加热工艺为: (1) Gleeble 热模拟机高温拉伸过程样品室内采用氩气保护(氩气流量 1 L/min)以防止高温状态下试样氧化; (2) 由室温加热至 1 350 °C(升温速率 10 °C/s)并保温 5 min 以实现试样完全奥氏体化、确保钢中析出物回熔彻底并均匀成分; (3) 随后以 3 °C/s 降温速率降温至既定测试温度并保温 2 min; (4) 保温结束后按照 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 应变速率在既定测试温度下进行高温拉伸; (5) 试样拉断后对断裂部位进行水冷, 以保留试样高温状态微观组织。本试验温度区间为 600~1 350 °C, 为精准确定第 III 类脆性区, 在 750~900 °C 温度进行细致试验, 温度间隔为 25 °C。

为精确测定每个试样的断面收缩率 R_A , 利用游

标卡尺测定原始拉伸试样螺旋端部直径, 为消除误差选择 3 个不同位置进行测量, 取 3 次测量均值 d_0 。高温拉伸试样断裂部位通常为不规则圆形断口, 因此, 针对高温拉伸断口选择 4 组不同位置进行测量, 取 4 次测量均值 d 。根据 d_0 和 d 计算出断面收缩率见公式(1), 根据 Gleeble3500 热模拟实验过程采集的力学参数, 确定既定实验温度对应抗拉强度数值。

$$R_A = [1 - (d/d_0)^2] \times 100\% \quad (1)$$

式中, d 为高温拉伸断口直径均值, mm; d_0 为原始试样螺旋端部直径测量均值, mm。

根据试验结果得到既定试验温度条件下高温拉伸断面收缩率和抗拉强度数据。后续采用扫描电镜对既定试验温度拉伸试样高温断口进行分析, 确定断口形貌特征。最后对高温拉伸断口位置进行切割、研磨、抛光后采用 2% 硝酸酒精进行侵蚀, 采用光学显微镜对高温拉伸断口显微组织进行观察, 以确定不同既定实验温度下试样显微组织差异。

2 试验结果与分析

2.1 Q350EW 高铬耐候钢的高温热塑性及拉伸强度

研究表明, 钢种的断面收缩率 < 60%, 连铸过程铸坯产生裂纹风险显著增加, 因此, 选择 $R_A=60\%$ 为区分高热塑性和低热塑性的临界值^[16]。通过实验测量和计算高铬耐候钢 Q350EW 高温热塑性和高温抗拉强度参数, 采用 Origin 数据分析软件绘制高铬耐候钢 Q350EW 既定试验温度下高温热塑性和抗拉强度曲线, 如图 1 所示。

由图 1 可知, 高铬耐候钢 Q350EW 在 600~700 °C 时, 断面收缩率随着拉伸温度增加而上升; 在 700~775 °C 时, 断面收缩率随着拉伸温度增加而降低; 在 775~825 °C 时, 断面收缩率随着拉伸温度增加而上升; 在 825~950 °C 时, 断面收缩率为 88%~91% 维持在较高水平。根据上述 $R_A=60\%$ 为区分高热塑性和低热塑性的临界值为准则, 高铬耐候钢 Q350EW 在 600~1 300 °C 无第 III 脆性区。

由图 1 高温拉伸强度曲线可知, Q350EW 高铬耐候钢 1 250 °C 高温强度较低; 随着温度的进一步

表 1 高铬耐候钢 Q350EW 化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of high-chromium weathering resistant steel Q350EW

Table 1 Chemical composition of high-chromium weathering resistant steel Q350EW													%	
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Nb	V	N	Ca	
0.027	0.21	0.38	0.012	0.002	4.53	0.33	0.38	0.038	0.017	0.016	0.024	0.006 5	0.001 8	

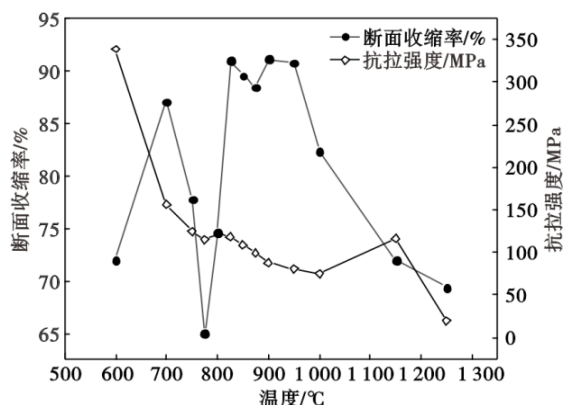


图 1 高铬耐候钢 Q350EW 高温热塑性和高温拉伸强度
Fig. 1 Ductility and tensile strength curves of high-chromium weathering resistant steel Q350EW at high temperatures

降低至 1 000 ~ 775 °C, 抗拉强度呈现缓慢增加的趋势; 而随着温度进一步降低至 750 °C 以下, 抗拉强度急剧增加。整体来看随着拉伸温度的增加 Q350EW 高铬耐候钢抗拉强度呈现降低趋势, 是由于拉伸过

程回复、再结晶的驱动力增强, 基体抵御变形能力降低。此外, 随着温度降低至 750 °C 以下, 加工硬化起主要作用造成抗拉强度增加明显; 高温阶段存在抗拉强度高值可能与钢中微合金元素碳氮化物的晶界析出效应相关。

2.2 高温断口形貌和显微组织

为深入分析高铬耐候钢 Q350EW 高温热塑性特性, 利用 Thermo-Calc 热力学软件计算 400 ~ 1 600 °C 高铬耐候钢 Q350EW 析出相组成, 如图 2 所示, 图 2 (a) 为线性坐标, 图 2 (b) 为对数坐标。

由 Thermo-Calc 软件理论计算结果可知, 高铬耐候钢 Q350EW 基体相主要由铁素体 (F)、奥氏体 (γ) 构成, 主要析出相有 AlN 、 $(Cr, Fe)_7C_3$ 、 MnS 、Cementite (渗碳体)、 $(Cr, Fe, Ni)_3P$ 以及 $(Cr, Fe, Mn)_{23}C_6$ 等相。高铬耐候钢 Q350EW 不同类型基体相和析出相的开始析出温度、结束析出温度和最大析出量 (摩尔分数), 见表 2。

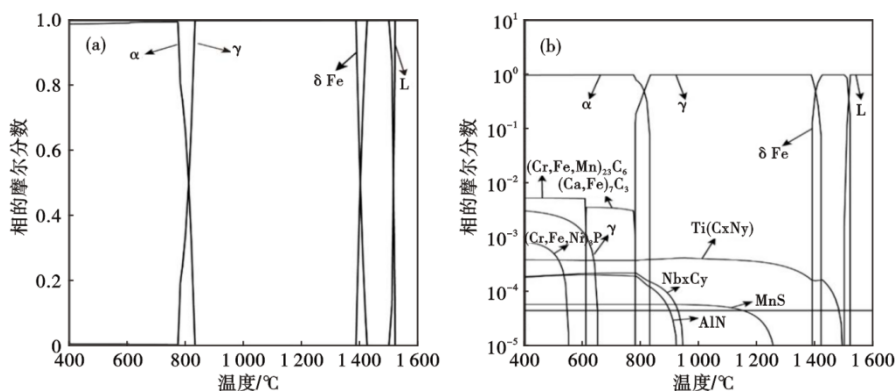


图 2 高铬耐候钢 Q350EW 析出相: (a) 线性坐标, (b) 对数坐标

Fig. 2 Main precipitates of high-chromium weathering resistant steel Q350EW : (a) linear coordinates, (b) logarithm coordinates

表 2 高铬耐候钢 Q350EW 开始析出温度、结束析出温度和最大析出量

Table 2 Start and finish temperatures of precipitating and maximum mole fraction of the precipitates of high-chromium weathering resistant steel Q350EW

基体相/析出相	开始析出温度/°C	结束析出温度/°C	最大析出量(摩尔分数)
L	-	1 486	1
δ -Fe	1 513	1 400	0.967
Ti(CxNy)	1 429	-	4.161×10^{-4}
γ	1 414	776	0.967
MnS	1 254	-	5.993×10^{-5}
NbxCy	939	-	2.310×10^{-4}
AlN	921	-	1.943×10^{-4}
α	822	-	0.967
$(Cr, Fe)_7C_3$	776	-	3.680×10^{-3}
γ	650	605	3.095×10^{-3}
$(Cr, Fe, Mn)_{23}C_6$	605	-	5.574×10^{-3}
$(Cr, Fe, Ni)_3P$	548	-	8.312×10^{-4}

结合图 2 和表 2 可知, Q350EW 钢种 822 °C 时发生奥氏体向铁素体相变, 775 °C 时转变完成。由于高铬耐候钢 Q350EW 钢中 Cr 含量较高, 650 °C 时出现少量的富 Cr 奥氏体相, 该相不能稳定存在, 在 605 °C 左右转变为 $(Cr, Fe, Mn)_{23}C_6$ 相。

由于试样在 600 ~ 800 °C 这一温度范围内会出现断面收缩率值较其他温度范围低的现象, 因此, 应用扫描电镜对 600、700、775、800 °C 断口的宏观形貌和微观形貌进行了观察, 并用光学显微镜对断口附近的组织进行了研究, 如图 3 所示。

由图 3(a) 可以看出, 虽然 Q350EW 钢在 600、775、800 °C 的塑性较 700 °C 低, 但是其断口均呈现韧窝状, 只是韧窝的深度较 700 °C 时浅。由图 3(b) 可知, 高温拉伸断口宏观形貌呈现韧性断裂特征, 断口呈现韧窝状, 且韧窝的大小不一。这种韧性断裂的初始阶段为拉伸过程塑性变形阶段基体内部形成空洞, 随着变形持续进行空洞聚集拓展并缩颈, 在形变进一步作用下试样发生断裂。

为确定不同温度下断口附近的组织, 利用 MVS100-1000Z 试验机对试样的维氏硬度进行了测定, 每种组织测定三次取其平均值。结合图 3(c) 中试样断口附近的形貌, 可以发现, 600 °C 拉伸时, 试

样的组织为珠光体(196.2HV)+贝氏体(216.3HV); 700、775、800 °C 拉伸时断口附近的组织为铁素体+珠光体+贝氏体, 700 °C 断口铁素体呈细条状, 775 °C 铁素体呈多边形块状, 800 °C 断口铁素体呈粗长条状, 775、800 °C 断口处金相组织中铁素体含量显著高于 700 °C, 铁素体的硬度分别为 187.3、184.1、189.5HV; 珠光体的硬度分别为 205.8、206.0、206.7HV, 贝氏体的硬度分别为 213.2、223.3、223.0HV, 见表 3。

表 3 高铬耐候钢 Q350EW 拉伸断口出金相组织和显微硬度

Table 3 Metallographic structure and microhardness of high-chromium weathering resistant steel Q350EW tensile fracture

温度/°C	组织类型+硬度(HV)
600	珠光体(196.2)+贝氏体(216.6)
700	铁素体(187.3)+珠光体(205.8)+贝氏体(213.2)
775	铁素体(184.1)+珠光体(206.0)+贝氏体(223.3)
800	铁素体(189.5)+珠光体(206.7)+贝氏体(223.0)

结合热力学计算的结果和断口附近的组织, 可以发现 775、800 °C 的塑性值较低, 是因为该温度范围内发生了奥氏体→铁素体转变, 并伴有 $(Cr, Fe)_7C_3$

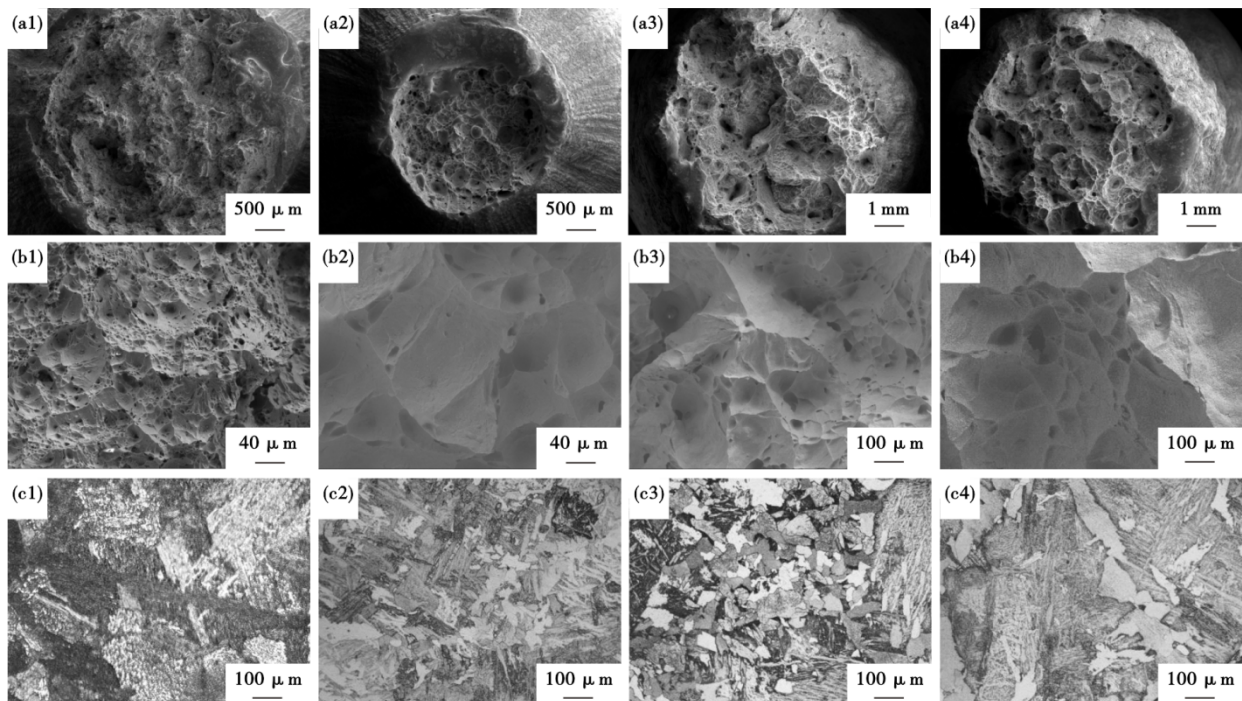


图 3 (1)600 °C、(2)700 °C、(3)775 °C 及 (4)800 °C 拉伸试样的宏观形貌(a1 ~ a4)、微观形貌(b1 ~ b4)及拉伸的断口处显微组织(c1 ~ c4)

Fig. 3 Overall morphology (a1-a4), micromorphology (b1-b4) and nearby microstructure (c1-c4) of the tensile specimens tested at (1)600°C, (2)700°C, (3)775°C and (4)800°C

相的析出,使得晶界强度弱化。600 °C塑性值低的原因是一方面随着拉伸温度的降低,试样中铁素体含量减少;另一方面铁素体基体上析出了大量碳化物, $(Cr, Fe, Mn)_{23}C_6$ 等碳化物钉扎在晶界处,破坏了基体的连续性。

基于高温热塑性试验性研究和理论计算,优化二冷制度和连铸工艺参数,实际浇铸过程弯曲矫直段铸坯角部温度控制在730~750 °C,避开775 °C最低塑性温度范围。铸坯表面检查未发现角裂、横裂等缺陷,为热轧工序提供无表面缺陷铸坯。

3 结论

(1) 以断面收缩率低于60%作为脆性温度区间

作为标准,高铬耐候钢Q350EW不存在第三类脆性温度区间,但是该钢在700~800 °C塑性较其他温度区间差。

(2) 高铬耐候钢Q350EW在600、775、800 °C的塑性值较低,但是其断口均呈现韧窝状,断裂方式为塑性断裂。

(3) 775、800 °C高温热塑性值较低,是因为该温度范围内发生了奥氏体→铁素体转变,并伴有 $(Cr, Fe)_7C_3$ 相的析出,使得晶界强度弱化。600 °C塑性值低是铁素体含量减少和钉扎在晶界处的 $(Cr, Fe, Mn)_{23}C_6$ 等碳化物破坏了基体的连续性二者综合作用的结果。

参考文献

- [1] 陆匠心, 李爱柏, 李自刚, 等. 宝钢耐候钢产品开发的现状及展望[J]. 中国冶金, 2004, 14(12): 23-28.
- [2] 蒋栋初, 刘从德, 印传磊. 09CuPCrNi 耐候钢生产工艺研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(6): 8-11.
- [3] 黄利, 董磊, 徐龙, 等. 耐候结构用热轧钢带Q355NHC研制与开发[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 66-68.
- [4] 封辉. 355 MPa级耐候钢中Cu、Cr和P元素的作用[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [5] 郑健, 彭志贤, 袁渊, 等. Cu/Sb/Sn/Mo/W对新课标09CrCuSb钢组织及力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 84-89.
- [6] Liu W M, Liu J, Pan H B, et al. Synergistic effect of Mn, Cu, P with Cr content on the corrosion behavior of weathering steel as a train under the simulated industrial atmosphere[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 834: 155095.
- [7] Zhang Y, Huang F, Hu Q, et al. Effect of micro-phase electrochemical activity on the initial corrosion dynamics of weathering steel[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 241: 122045.
- [8] 汪川, 曹公旺, 潘辰, 等. 碳钢、耐候钢在3种典型大气环境中的腐蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(1): 39-46.
- [9] 刘雨薇, 赵洪涛, 王振尧. 碳钢和耐候钢在南沙海洋大气环境中的初期腐蚀行为[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1247-1254.
- [10] Sun M H, Du C W, Liu Z Y, et al. Fundamental understanding on the effect of Cr on corrosion resistance of weathering steel in simulated tropical marine atmosphere [J]. Corrosion Science, 2021, 186: 109427.
- [11] 汪兵, 刘志勇, 陈吉清, 等. Cr含量对耐候钢耐候性的影响[J]. 材料保护, 2014, 47(5): 61-63+8-9.
- [12] 陈健, 陈玉鑫, 黄涛, 等. 不同铬含量耐候钢在高湿热模拟环境中的耐腐蚀性能[J]. 机械工程材料, 2019, 43(4): 53-58.
- [13] 刘芮, 陈小平, 王向东, 等. 合金元素对耐候钢在海洋大气环境下耐蚀性的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(20): 19-22+27.
- [14] 王谦, 王雨, 谢兵, 等. 合金钢连铸结晶器保护渣的基本功能[J]. 特殊钢, 2004, 25(1): 1-4.
- [15] 蔡开科. 连铸坯表面裂纹的控制[J]. 鞍钢技术, 2004(3): 1-8.
- [16] 陶素芬, 王福明, 严国卫, 等. A105钢的高温热塑性[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(12): 96-102.