研究与开发

模拟海洋大气环境下中碳低合金超高强钢腐蚀行为研究

陈本文[1,2],伞宏宇[1,2],苏春霞[1,2],杨成[1,2],李琳[1,2],钟彬[1,2],徐京丞[1,2]
(1.海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室,辽宁 鞍山 114009;
2.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009)

摘要:以24SiMn2TiB中碳低合金超高强钢为研究对象,在其原成分基础上添加一定量的Cr、Ni、Cu合金元素,通过电化学、盐雾试验研究两者在模拟海洋大气环境下的腐蚀行为,结果表明,24SiMn2TiB钢通过添加0.77%Ni、0.72%Cr和0.32%Cu,在模拟海洋大气环境下可提高耐蚀性能,腐蚀速率较原钢种降低11.1%~22.7%。Ni、Cr、Cu元素有助于腐蚀过程形成稳定的产物α-FeOOH,使锈层更为致密,进一步提升了24SiMn2TiB中碳低合金超高强钢的耐蚀性。

关键词:中碳低合金超高强钢;海洋大气腐蚀;锈层;耐蚀性
中图分类号:TG172 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-4613(2026)05-0034-05
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.05.005

Study on Corrosion Behavior of Medium Carbon Low Alloy Ultra-high Strength Steel in Simulated Marine Atmospheric Environment

CHEN Benwen[1,2], SAN Hongyu[1,2], SU Chunxia[1,2], YANG Cheng[1,2],
LI Lin[1,2], ZHONG Bin[1,2], XU Jingcheng[1,2]
(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: The medium carbon low alloy ultra-high strength steel 24SiMn2TiB was selected as the research subject. Specific alloying elements (Cr, Ni, and Cu) were incorporated into the base composition of the steel, and the corrosion behaviors of both the original and modified steels in a simulated marine atmospheric environment were systematically evaluated by electrochemical measurements and salt spray tests. The results showed that the addition of 0.77% Ni, 0.72% Cr and 0.32% Cu significantly enhanced the corrosion resistance of 24SiMn2TiB steel under simulated marine atmospheric environment, with the corrosion rate reduced by 11.1% to 22.7% compared to the original steel. Further analysis revealed that Ni, Cr, and Cu facilitated the formation of stable corrosion products, particularly α-FeOOH, which contributed to the formation of a compact rust layer and thus further improved the corrosion resistance of the medium carbon low alloy ultra-high strength steel 24SiMn2TiB.

Key words: medium carbon low alloy ultra-high strength steel; marine atmospheric corrosion; rust layer; corrosion resistance

钢铁材料绝大部分暴露于大气中服役,受大气环境中温度/湿度交替变化以及化学污染物等因素的影响容易发生锈蚀,其中在海洋大气和工业大气中的腐蚀最为严重。为了应对大气腐蚀问题,人们开发了耐候钢[1],通过添加Cr、Ni、Cu、Si、Mn、P等元素,在其表面形成致密稳定的氧化层,以此来阻止大气中腐蚀介质的进入[2],还可以

陈本文,硕士,正高级工程师,2001年毕业于辽宁工学院铸造专业。E-mail:cbw_9703024@163.com

通过添加如Sn、Sb等微合金元素可以改善材料耐蚀性能，Sn微合金化能够提高材料的自腐蚀电位，Sb原子可对预先吸附在材料表面的Cl^-、S^{2-}、O_2产生排斥作用，从而有效的改善了耐蚀性能[3-4]。由于Sn、Sb等添加量小，生产成本较低，引起了研究者的广泛关注。20世纪60年代，中国研制出09CuPVRE系列、09CuPTi系列及10CrCuSiV系列等耐候钢种并应用于实际工程建设中。随着中国海洋建设的不断发展，沿海及岛礁的基础建设逐年增加，对钢材的需求量也呈上升趋势。由于海洋大气的高盐、高湿、强风和多变气候特点易造成高盐雾环境，该环境具有强腐蚀性，因此对钢铁材料的耐蚀性提出更高的要求，这也是近年来海洋工程建设材料研究的重点课题。24SiMn2TiB中碳低合金超高强钢的抗拉强度≥1 450 MPa，目前该钢已在内陆重点工程建设中得到广泛应用，近年来，工程建设已拓展至沿海和岛礁建设中，由于海洋大气环境极其恶劣，受高盐分、高温度、高湿度等影响，对材料的耐蚀性要求很高，因此需要研究该钢的耐海洋大气腐蚀性能。本文通过在原钢种化学成分的基础上，添加一定量的Cr、Ni、Cu合金元素，研究其在模拟海洋大气环境下的腐蚀行为。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

钢种1为24SiMn2TiB，钢种2为在24SiMn2TiB化学成分基础上添加一定量的Ni、Cr、Cu，轧制后的钢板经淬火+低温回火热处理，试验钢的化学成分（质量分数）见表1，试验钢的力学性能见表2。

表1 试验钢的化学成分（质量分数）

Table 1 Chemical Composition of Tested Steels (Mass Fraction) %

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	B	Cu
钢种1	0.24	0.91	1.66	0.014	0.003 6	0	0	0.029	0.002 1	0
钢种2	0.24	0.86	1.60	0.011	0.001 2	0.77	0.72	0.036	0.001 5	0.32

表2 试验钢的力学性能

Table 2 Mechanical Properties of Tested Steels

试验钢	方向	拉伸			−40℃冲击吸收能量(KV_2)/J				表面布氏硬度HBW 10/3000			
		$R_{P0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	N_1	N_2	N_3	平均	N_1	N_2	N_3	平均
钢种1	横向	1 193	1 488	9.26	14.8	15.2	15.3	15.1	461	451	432	448
钢种2	横向	1 238	1 535	10.64	23.3	22.9	20.9	22.4	461	457	461	461

1.2 试验方法

1.2.1 电化学试验

利用EG&E公司生产的M273A恒电位/恒电流仪、5210型锁相放大器和Power Suite软件进行电化学试验及分析。电化学试验装置采用三电极体系，工作电极（即研究电极）为待测试样，工作面积为1 cm^2，参比电极为饱和甘汞电极，辅助电极为铂丝网。采用正弦波激励信号，幅值为10 mV，扫描频率范围为10 mHz～100 kHz。电解质溶液为3.5%NaCl溶液，由去离子水配制，试验温度为(23±1) ℃。

1.2.2 盐雾腐蚀试验

盐雾腐蚀试验设备为Q-FOG，试验按GB/T 10125—1997标准执行，盐雾试验参数见表3，每个试验周期每组平行试样为3个，试样采用水砂纸打磨至抛光，然后经过冷水冲洗—去离子水清洗—酒精清洗—吹干—冷却后进行试验。

表3 盐雾试验参数

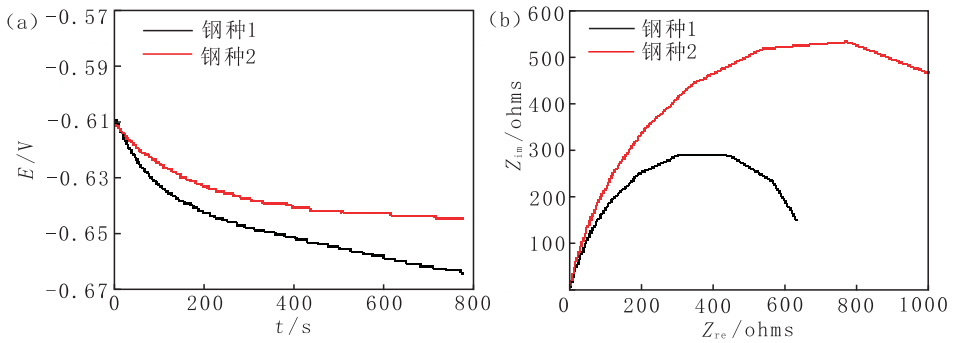
Table 3 The Parameters of the Salt Spray Test

NaCl溶液浓度/%	试验温度/℃	试验周期/h	腐蚀片尺寸/mm	腐蚀片数量（每工艺）/片
50±5	35±2	168、336 480、720	5×50×50	20

2 试验结果及分析

2.1 开路电位和交流阻抗

两钢种的开路电位和交流阻抗结果如图1所示,由图1(a)可知,钢种2的开路电位高于钢种1,说明钢种2发生腐蚀的倾向性小;金辉等人[5]研究发现,随着Cr含量的提高,容抗弧半径不断增加,容抗弧半径越大则表示腐蚀过程中阻抗不断提高,抵抗电化学腐蚀的能力增强,材料的腐蚀速率不断减小;交流阻抗谱图中容抗弧的半径代表了材料的耐蚀能力,由图1(b)可知,钢种2的容抗弧半径大于钢种1,说明其耐蚀性能优于钢种1。因此,从整体上看,钢种2的耐蚀性要优于钢种1。



(a)开路电位;(b)交流阻抗

图1 试验钢的开路电位和交流阻抗

Fig. 1 the Open Circuit Potential and AC Impedance of Tested Steels

2.2 腐蚀速率

两试验钢种按照式(1)计算腐蚀速率。

$$V = \frac{W_0 - W_1}{2(a \times b + b \times c + c \times a)t} \times 10^6 \qquad (1)$$

式中,V为腐蚀速率,g/(m²·h);W_0为试样试验前重量,g;W_1为试样试验后重量,g;a为试样长度,mm;b为试样宽度,mm;c为试样厚度,mm;t为腐蚀时间,h。

每组试样的平均年腐蚀速率按式(2)进行换算。

$$V_a = \frac{v_1 + v_2 + v_3}{3} \times 1.1 \qquad (2)$$

式中,V_a为年腐蚀速率,mm/a;v_1、v_2、v_3为每组3个平行试样各自的腐蚀速率,g/(m²·h)。

试验钢不同试验周期平均腐蚀速率见表4。

表4 试验钢不同试验周期平均腐蚀速率

Table 4 the Average Corrosion Rate of Tested Steels for Different Durations

钢种	平均腐蚀速率/(mm/a)			
	168 h	336 h	480 h	720 h
1	1.11	1.08	1.37	1.19
2	0.94	0.96	1.09	0.92

由表4可知,两钢种的腐蚀速率随腐蚀时间的延长先升高而后降低,说明随着腐蚀的进行,钢表面形成的锈层对腐蚀的进行起到了抑制作用。钢种2在每个试验周期的平均腐蚀速率分别为15.3%(168 h);11.1%(336 h);20.4%(480 h);22.7%(720 h),其平均腐蚀速率均低于钢种1,腐蚀速率降低11.1%~22.7%。

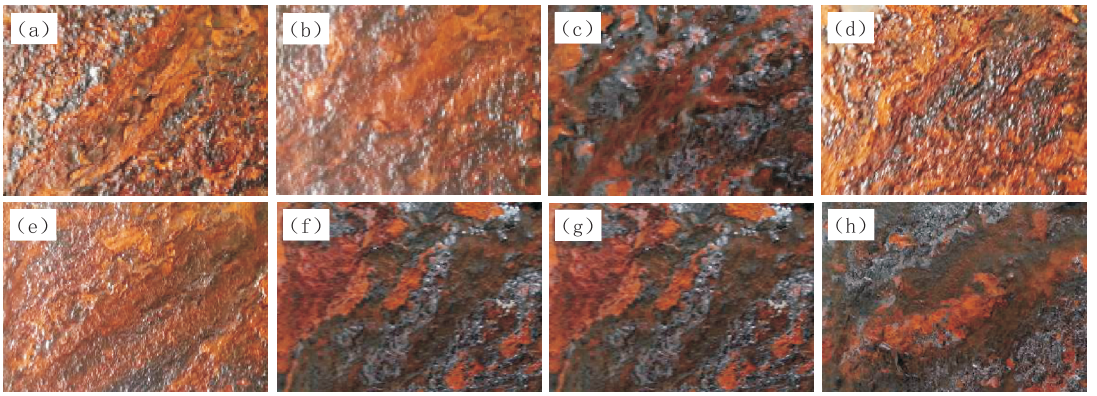
由此可见,在钢种1的化学成分基础上添加一定含量的Ni、Cr、Cu,可以提高该钢的耐Cl^-大气腐蚀性能。

2.3 锈层形貌及XRD物相分析

不同腐蚀周期试验钢的宏观形貌如图2所示。由图2可知,两钢种锈层的演变规律基本相似,在腐蚀168 h后,表面被一层薄的黄褐色、黑色锈层所覆盖;在腐蚀336 h后,锈层具有一定厚度,颜色为黄褐色、黑色,表面出现锈包,有的已经破裂;在腐蚀480 h后,试样表面被一层红、黑色致密的锈层完全覆盖,有锈包出现,锈层凹凸不平;在腐蚀720 h后,试样表面覆盖一层较厚的黄、褐、黑色锈层,已全部覆盖,有锈包,有的已破裂,表面凹凸不平。

不同腐蚀周期去锈后试验钢的宏观形貌如图3所示。由图3可知,两钢种在腐蚀168 h后,试样表面出现大小不一且较浅的腐蚀坑;在腐蚀

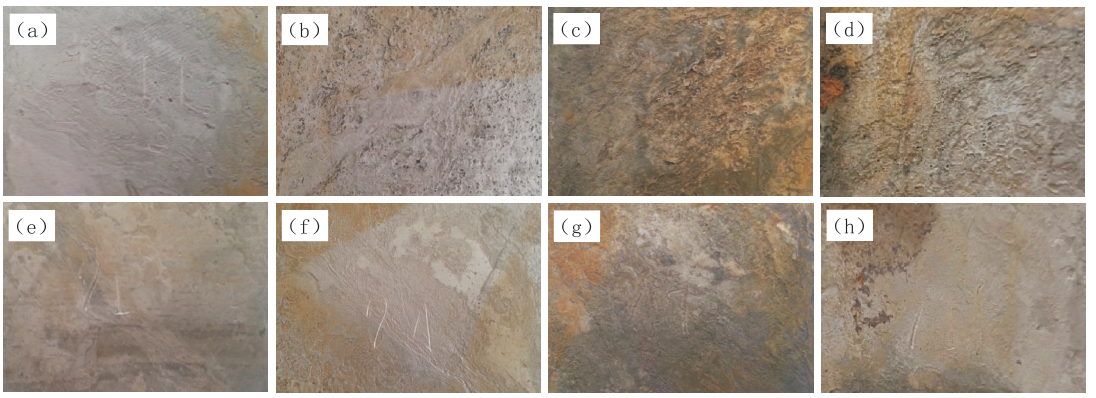
336 h后，钢种1试样表面腐蚀坑增多且有一定深度，钢种2试样表面腐蚀坑较少且较浅；在腐蚀480 h后，试样腐蚀程度较336 h加重，钢种1试样表面存在较多的腐蚀坑，并且腐蚀纹理加重，腐蚀纹理呈淡黄色（为主）或灰黑色，钢种2试样表面腐蚀坑较少，较平坦；在腐蚀720 h后，钢种1试样表面存在较多腐蚀纹理，凹凸不平，钢种2试样表面腐蚀纹理较少，较平坦。总体来看，随着腐蚀时间的延长，钢种2试样去锈后表面腐蚀纹理较少，表面较平坦。



（a）钢种1腐蚀168 h；（b）钢种1腐蚀336 h；（c）钢种1腐蚀480 h；（d）钢种1腐蚀720 h；
（e）钢种2腐蚀168 h；（f）钢种2腐蚀336 h；（g）钢种2腐蚀480 h；（h）钢种2腐蚀720 h

图2 不同腐蚀周期试验钢的宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic Morphologies of Tested Steels under Different Corrosion Durations



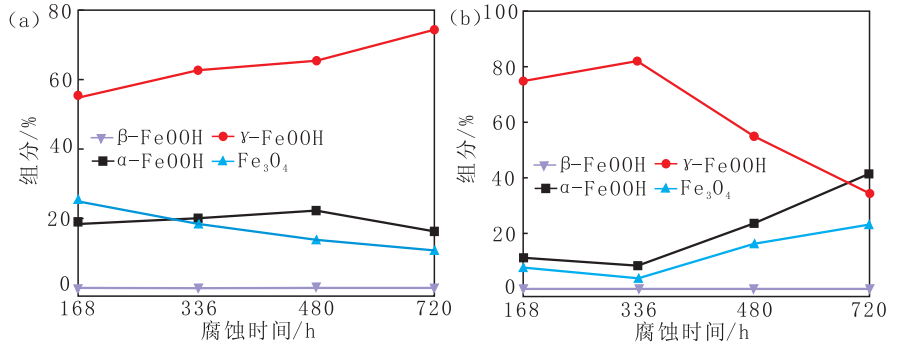
（a）钢种1腐蚀168 h；（b）钢种1腐蚀336 h；（c）钢种1腐蚀480 h；（d）钢种1腐蚀720 h；
（e）钢种2腐蚀168 h；（f）钢种2腐蚀336 h；（g）钢种2腐蚀480 h；（h）钢种2腐蚀720 h

图3 不同腐蚀周期去锈后试验钢的宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic Morphologies of Derusted Tested Steels Subjected under Different Corrosion Durations

两钢种不同腐蚀周期的锈层XRD物相分析结果如图4所示，由图4可知，钢种1随着腐蚀时间的延长，γ-FeOOH含量逐渐增多，表明腐蚀仍在持续；α-FeOOH含量先增多后减少，Fe_3O_4含量呈逐渐减少趋势。总体来看，钢种1随着腐蚀时间的进行，稳定的腐蚀产物α-FeOOH和Fe_3O_4含量并没有呈增多的趋势，表明耐腐蚀锈层还没有完全形成，腐蚀仍在继续。钢种2随着腐蚀时间的延长，γ-FeOOH含量呈先增多而后减少的趋势，α-FeOOH含量呈逐渐增多趋势，Fe_3O_4含量呈逐渐增多趋势，α-FeOOH含量的逐渐增多主要是因为钢种2中加入了一定量的Ni、Cr、Cu元素，Ni能促进锈层中γ-FeOOH转变为α-FeOOH，使锈层更稳定致密。低合金钢中加入1%～3%Ni在含盐大气中具有良好的抗腐蚀性能，可加速内锈层的形成[6]。Cr在腐蚀开始时，先和O反应，在钢表面形成致密的氧化膜，抑制腐蚀性介质到达钢基体的表面，提高钢的耐蚀性。Cr在内锈层中富

集可促进α-FeOOH的形成和细化[7-8]。Cu会在锈层/基体界面富集,形成致密的氧化膜,阻挡Cl^-、O_2、H_2O渗透,尤其在含Cl^-环境中,提升抗点蚀能力。Cu可促进α-FeOOH的形成[9],相关研究表明钢中添加0.25%Cu使碳钢的腐蚀速率明显下降,腐蚀产物主要由稳定的α-FeOOH及少量的γ-FeOOH组成,锈层较碳钢更加致密[10]。总体来看,钢种2随着腐蚀时间的进行,稳定的腐蚀产物α-FeOOH和Fe_3O_4含量呈逐渐增多的趋势,表明耐腐蚀锈层已基本形成,腐蚀已趋近平衡状态。



(a)钢种1;(b)钢种2

图4 两钢种不同腐蚀时间XRD结果

Fig. 4 XRD Results of Two Steel Grades with Different Corrosion Durations

锈层的保护性参数α/γ^*越大,表明锈层的保护性越强,α指α-FeOOH的含量,γ^*指锈层中其余各物相(γ-FeOOH+β-FeOOH+δ-FeOOH+Fe_3O_4含量)[11],锈层中物相比例见表5,由表5可知,随着腐蚀时间的延长,钢种2的α/γ^*值大于钢种1,说明钢种2的耐蚀性优于钢种1。

表5 试验钢锈层中物相比例

Table 5 Phase Proportion of Tested Steels in the Rust Layer

腐蚀时间	钢种1					钢种2				
	α-FeOOH	γ-FeOOH	Fe_3O_4	α-Fe	α/γ^*	α-FeOOH	γ-FeOOH	Fe_3O_4	α-Fe	α/γ^*
168 h	18.2	54.5	24.2	3.0	0.23	12	79	8	1	0.14
336 h	19.8	62.4	17.8	0	0.25	9	87	4	0	0.10
480 h	22.0	65.0	13.0	0	0.28	25	58	17	0	0.33

3 结论

(1)24SiMn2TiB中碳低合金超高强钢通过添加0.77%Ni、0.72%Cr和0.32%Cu,在模拟海洋大气环境条件下可提高其耐海洋大气腐蚀性能,腐蚀速率较原钢种降低11.1%~22.7%。

(2)通过对添加一定量的Ni、Cr、Cu的24SiMn2TiB中碳低合金超高强钢不同腐蚀周期XRD结果分析表明,Ni、Cr、Cu元素有助于腐蚀产物形成稳定的α-FeOOH,进一步提升了24SiMn2TiB中碳低合金超高强钢的耐蚀性能。

参考文献

[1] 柯伟,董俊华. Mn-Cu钢大气腐蚀锈层演化规律及其耐候性的研究[J]. 金属学报,2010,46(11):1365-1378.

[2] Johnson J B,Elliott P,Winterbottom M A,et al. Short-term atmospheric corrosion of steel at two weather and pollution monitored sites[J]. Corrosion Science,1977,17(8):691-700.

[3] 杨柳. Sn微合金化对690MPa级桥梁结构钢耐蚀性影响规律及机理研究[D]. 北京:北京科技大学,2025.

[4] 何春雨. 含Sb车体用钢在煤炭浸出液环境腐蚀行为与耐蚀机理研究[D]. 北京:北京科技大学,2024.

[5] 金辉,谌芳元,董峰辉. 含Cr调质态桥梁用钢的腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺,2018,47(6):88-92.

[6] Toshiyasu N,Hideki K,Kazuhiko N,et al. Effect of Co and Ni on the corrosion behavior of low alloy steels in wet/dry environments[J]. Corros Science,2000,42(9):1611-1621.

[7] 姜杉,王瑞珍,侯清宇,等. 模拟流动海水腐蚀环境下含Cr钢与C钢的锈层研究[J]. 热加工工艺,2012,41(18):72-79.

(下转第59页)

[3] 张艳利,彭西高,程庆先.连铸钢包及炉外精炼钢包用耐材技术的研究与发展[J].耐火与石灰,2023,48(6):5-17.
[4] 郝明,孙凯明,张建平,等.基于红外热成像的钢包监测系统设计[J].自动化技术与应用,2024(6):32-34.
[5] 何平,李勇,张海风,等.钢包温降规律与全程加盖保温节能技术研究[C]//第十八届全国炼钢学术会议论文集,西安:中国金属学会,2014:81-85.
[6] 孙晓婷,田琳,李国栋,等.基于ANSYS模拟钢包壁耐火层温度分布及优化设计[J].冶金能源,2018(3):21-24.
[7] 秦永坤,赵艳宇,程树森.钢包热状态数学模型[J].中国冶金,2025,35(6):54-56.
[8] 秦志伟,张萌.我国金属材料工业节能减排与环境保护分析[J].黑龙江环境通报,2024(7):41-43.
[9] 张利民,朱立光,肖鹏程,等.钢包保温层数值模拟分析及应用[J].铸造技术,2020,41(9):852-856.
[10] 张利民,朱立光,张利军,等.钢包保温层优化及应用[J].中国冶金,2020,30(5):11-16.
[11] 徐海强,王胜,郭士萌,等.钢包钢水保温技术效果对比[J].河北冶金,2020(3):61-65.
[12] 温巨文,武晓阳,路博勋,等.降低钢包全流程钢水温度损失的措施与实践[J].天津冶金,2022(4):14-17.

(编辑 许营)
修回日期:2025-04-10

(上接第38页)

[8] 吴红艳,翁镭,魏子荐.铁路车辆用高Cr耐蚀钢的组织和性能[J].材料热处理学报,2018,39(4):93-99.
[9] 曹国良,李国明,陈珊,等.Cu对低合金钢耐海水腐蚀的影响[J].材料工程,2011(9):62-67.
[10] 马丽微,王向东,陈小平,等.铜对碳钢耐大气腐蚀性能的影响[J].天津冶金,2007(5):21-24.
[11] 李琳,钟斌,高鹏,等.Q690qENH钢暴晒两年的大气腐蚀性能[J].腐蚀与防护,2015,36(9):869-872.

(编辑 白璐)
修回日期:2024-07-24

(上接第42页)

度及良好的韧性,是重型卡车大梁的优选材料。

参考文献

[1] 郑东升.汽车大梁板P510L生产工艺优化研究[D].沈阳:东北大学,2008:3-15.
[2] 李光瀛,马鸣图.我国汽车板生产现状及展望[J].轧钢,2014,31(4):22-32.
[3] 刘丽萍,关晓光.700 MPa级高强汽车用钢热轧工艺研究与应用[J].轧钢,2018,35(2):20-25.
[4] 李永亮.700 MPa级高强度汽车大梁钢成分设计与组织控制研究[D].北京:北京科技大学,2017.
[5] 张智刚,刘妍,宿成.Ti微合金化700 MPa级大梁钢组织和性能研究[J].包钢科技,2022,48(2):42-45.
[6] 杨栋,李超.微钛处理对钒氮微合金H型钢组织性能影响[J].山西冶金,2022,45(8):1-2,29.
[7] 惠亚军,潘辉,周娜.650 MPa级V-N微合金化汽车大梁钢化机制研究[J].金属学报,2015,51(12):1481-1488.
[8] 雍岐龙,刘正东,孙新军.钛微合金钢中碳氮化钛固溶量及化学组成的计算与分析[J].钢铁钒钛,2005,26(3):12-16.
[9] 田云生,孙拓,王佰双.安钢700 MPa低碳高强钢碳氮控制工艺研究[J].特钢技术,2020,26(2):16-20.
[10] 中华人民共和国国家质量监督检验疫总局中国国家标准化管理委员会.GB/T 3075—2021 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法[S].北京:中国标准出版社,2022.

(编辑 白璐)
修回日期:2025-07-03