

海洋工程用 S420MLO 高强耐低温热轧 H 型钢的开发

刘丽娟, 宋振东, 惠治国, 卜向东, 李学东, 张晓晨, 谭晓东

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 在中试试验的基础上, 包钢进行了海洋工程用 S420MLO 高强耐低温热轧 H 型钢工业试制。试制结果表明, 试验钢的屈服强度大于 450 MPa, 且具有一定的富裕量, 抗拉强度在 615 ~ 628 MPa 之间, 屈强比平均为 0.75, 延伸率达到 26% 以上, 在 -40 °C 条件下的冲击功满足标准要求, 表明其具有优异的强韧性。试验钢微观组织主要由铁素体和珠光体构成, 基体中存在纳米级的析出相(长度 100 nm, 宽度 20 ~ 30 nm), 对钢的性能有显著提升作用。开发的 S420MLO 高强耐低温热轧 H 型钢综合性能优异, 为海洋平台等装备的安全服役提供了坚实的材料支撑。

关键词: S420MLO 热轧 H 型钢; 海洋工程用钢; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG335.1

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2026)02 - 0043 - 04

Development of S420MLO Hot - rolled High - strength Low Temperature Resistant H Beam for Ocean Engineering

Liu Lijuan, Song Zhendong, Hui Zhiguo, Bu Xiangdong,
Li Xuedong, Zhang Xiaochen, Tan Xiaodong

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The industrial trial production of S420MLO hot - rolled high - strength low temperature resistant H beam for ocean engineering is carried out by Baotou Steel based on the industrial tests. The results showed that the yield strength of test steel was greater than 450 MPa and with certain surplus, its tensile strength was 615 ~ 628 MPa, average yield ratio was 0.75, elongation could reach over 26% as well as impact energy at -40 °C could meet standard requirement so that it is with excellent strength and toughness. The microstructure of test steel is mainly composed of ferrite and pearlite, the nano precipitated phase in matrix is with length of 100 nm and width of 20 ~ 30 nm, which could significantly improve the properties of steel. The S420MLO hot - rolled high - strength low temperature resistant H beam developed is with excellent comprehensive properties, which could provide the solid material support for safe service of such equipment as ocean platforms.

Key words: S420MLO hot - rolled H beam; steel for ocean engineering; microstructure; mechanical properties

随着全球海洋资源开发向深海、极寒区域持续拓展, 海洋工程结构面临着盐雾腐蚀、海浪冲击、低

温脆裂与复杂焊接等多重极端挑战^[1]。从深海油气平台到海上风电场、从极地科考设施到超大型导

管架,结构材料的综合性能直接决定了工程的安全寿命、建造效率与综合成本^[2-4]。

海洋工程领域所用钢材,按照应用场景可划分为海洋平台用钢、海洋能源设备用钢与海底油气管线用钢三个主要品类。依据结构的具体类型以及实际服役条件,需选用不同强度等级的钢材,但整体来看,低合金高性能结构钢仍是这类钢材的主流选择。在三大品类中,海洋平台用钢的市场需求量最大,这类钢材的核心用途是制造海洋平台的焊接构件。海洋平台作为开发海洋资源的核心超大型焊接结构,需承载总重量达数百吨以上的各类设备,这种恶劣的服役环境决定了海洋平台用钢必须具备高强度、高韧性、耐低温、抗疲劳、抗层状撕裂、易焊接加工以及耐海水腐蚀等多项综合性能^[5,6]。

为推动我国海洋工程用钢产业的发展,科技部在 2016 年启动了“十三五”海洋工程用钢重点研发专项,核心目标是加快高强度、大规格、易焊接海洋工程用钢的研发进程及其工程化应用,为我国海洋工程建设与边防安全保障提供高品质的钢铁材料支撑,有效提升我国海洋工程建设的整体水平与核心实力^[7]。

在海洋平台建造过程中,采用高强度、超高强度且高韧性的钢材,能够有效减轻平台结构的自身重

量,提升平台的可变载荷承载能力与自持能力,优化平台总排水量与钢结构自重的比例,满足低温环境下的服役要求,同时还能大幅降低平台的建造与安装成本^[8]。

在此背景下,遵循 EN 10225-2《固定式海上结构用可焊接结构钢技术交货条件 第 2 部分:型钢》国际标准的 S420MLO 高强度海洋结构用钢,以其精准适配海洋环境服役条件的核心优势,成为推动海洋工程向高端化、轻量化发展的关键材料支撑。包钢成功研发出适用于海洋工程领域的 420 MPa 级高强度耐低温热轧 H 型钢,各项性能满足 S420MLO 型钢标准。

1 试验材料与方法

1.1 技术要求

本研究以 EN 10225-2 标准为指导,通过合理设计钢的化学成分和生产工艺制备了 S420MLO 热轧 H 型钢。具体而言,采用低碳当量(CEV)成分设计以改善焊接性能,添加适量 Mn、Si、Cr 元素提升基础强度,利用 Nb、V、Ni 微合金元素的细晶强化与析出强化效应提升钢的强韧性,并严控 P、S 含量以优化综合性能。其化学成分及性能要求如表 1、表 2 所示。

表 1 S420MLO 钢的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	V	Ni	Nb
≤0.14	≤0.55	≤1.65	≤0.025	≤0.015	≤0.08	≤0.7	≤0.05

表 2 S420MLO 热轧 H 型钢的性能要求

屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	延伸率 $A/\%$	屈强比	冲击功 $KV_2(-40\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$	碳当量(CEV)/%	P_{cm}
≥420	500~660	≥19	≤0.9	≥50	≤0.43	≤0.24

1.2 中试试验

依据设计的中试试验钢化学成分,利用 25 kg 中频感应炉熔炼钢锭,经 550 mm 热轧机组轧制成厚度 25 mm 的钢板,其力学性能检测结果如表 3 所示。试验结果显示,钢板屈服强度偏低标准下限,余量不足。

表 3 中试试验钢板的力学性能

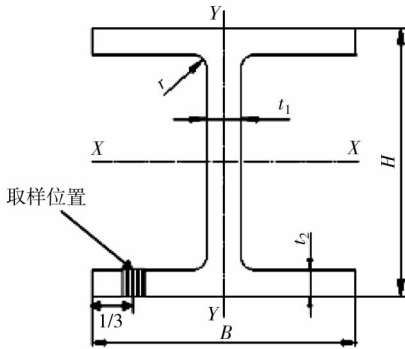
屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	延伸率 $A/\%$	屈强比	冲击功 $KV_2(-40\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$
425	563	27.0	0.76	103
419	551	25.0	0.76	85

2 工业试制

工业试制前,在中试试验的基础上优化了成分设计。S420MLO 热轧 H 型钢的工业试制工艺流程为高炉铁水→KR 脱硫铁水预处理→100 t 顶底复吹转炉→100 t LF 精炼炉→异形坯连铸→步进式加热炉→高压水除鳞→BD 开坯→CCS 串联式万能轧制→热锯→步进冷床冷却→矫直→锯切,H 型钢成品试制规格为 HN700×300×13×24 和 HW200×200×8×12。

2.1 检测项目

如图 1 所示,在其翼缘 1/3 区域制取金相试样,切割成 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的金相样品,经砂纸逐级研磨处理后,采用体积分数 4% 的硝酸酒精溶液对样品表面进行腐蚀,再通过金相显微镜观察样品的显微组织特征。



H - 高度; B - 宽度; t_1 - 腹板宽度;

t_2 - 翼缘宽度; r - 圆角半径

图 1 试验钢的取样位置

制备透射电镜观测用试样,首先将样品加工为 1.2 mm 厚的薄片,经砂纸打磨至 $50 \sim 60\ \mu\text{m}$ 厚度,冲制为 $\Phi 3\text{ mm}$ 的小圆片,将小圆片置于体积分数 6% 的高氯酸酒精溶液中,在 $-18 \sim -25\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下进行减薄处理,处理完成后采用透射电子显微镜对样品内部的微小析出相进行观测。

拉伸试验与冲击试验的试样均取自试制 H 型钢翼缘 1/3 处,其中拉伸试样加工为标准规格,在拉伸试验机上以 2 mm/min 的速率进行拉伸性能测试;V 型冲击试样同样取自 H 型钢翼缘 1/3 处,采用 N1750 型 750 J 冲击试验机测试其在 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的低温冲击性能。

2.2 试制结果

2.2.1 力学性能

本次试制 S420MLO 热轧 H 型钢轧制规格为 $\text{HN}700 \times 300 \times 13 \times 24$,试验钢的力学性能检测结果详见表 4。由表 4 可知,试验钢的屈服强度均大于 450 MPa ,且具有一定的富裕量,抗拉强度在 $615 \sim 628\text{ MPa}$ 之间,屈强比为 $0.75 \sim 0.76$,延伸率均达到 26% 以上。由此可见试验钢表现出良好的强度和塑性变形能力,在 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的冲击功满足标准要求,表明试验钢具有良好的低温冲击韧性。

表 4 试验钢的力学性能

编号	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	延伸率 $A/\%$	屈强比	冲击功 KV_2 ($-40\text{ }^\circ\text{C}$)/J
1#	472	628	28.0	0.75	62.0
2#	471	622	29.5	0.76	72.5
3#	464	620	27.5	0.75	71.3
4#	462	615	26.5	0.75	64.3
平均	467.25	621.25	27.88	0.75	67.53
标准	≥ 420	$500 \sim 660$	≥ 19	≤ 0.9	≥ 50

2.2.2 显微组织

图 2 为试验钢的金相组织形貌。试验钢的组织由铁素体与珠光体构成。通过定量统计方法测得,铁素体平均晶粒尺寸为 $22.48\ \mu\text{m}$,体积分数占比为 72.5%。通过 Hall - Petch 公式计算得出细晶强化对试验钢屈服强度的贡献量为 116.78 MPa 。由图 3 的试验钢透射电镜照片可以看到,基体中存在很多纳米级的析出相(长度约 100 nm ,宽度约 $20 \sim 30\text{ nm}$),析出颗粒尺寸细小、分布均匀,这类纳米级析出相可与基体形成稳定界面,起到钉扎位错的作用,抑制位错滑移及增殖。位错滑移时需绕过或切过析出颗粒,从而消耗额外能量,因此能够显著提高钢的屈服强度与抗拉强度。

2.2.3 断口分析

图 4 为试验钢在 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 下的冲击断口形貌。由图 4 可见,试验钢的冲击断口形貌呈现典型的河流状花样。断裂源区内分布大小不均的韧窝,表明材料断裂过程由脆性断裂与韧性断裂交替发生。另外,断口基体中分布着细小夹杂物,其在受力过程中与基体界面处产生应力集中,并优先形成微小孔洞,成为韧窝形核的核心。孔洞的长大与聚合需消耗更多外力做功,可有效延缓断裂进程。由细小夹杂物形成的微孔,其尺寸较小且分布均匀,这使得断口中韧窝数量增加、尺寸趋于均匀,进而显著提升钢材的冲击韧性与断裂韧性。当裂纹在钢中萌生后,细小夹杂物通过两种方式阻碍其扩展:裂纹遇到夹杂物时,被迫改变扩展方向,从而增加裂纹扩展路径长度,消耗额外能量;部分与基体结合性良好的细小夹杂物,可通过自身变形或与基体的协同作用,有效削弱裂纹尖端的应力集中,进而延缓裂纹萌生与扩展速率,减少断口产生明显的解理面或沿晶断裂现象。

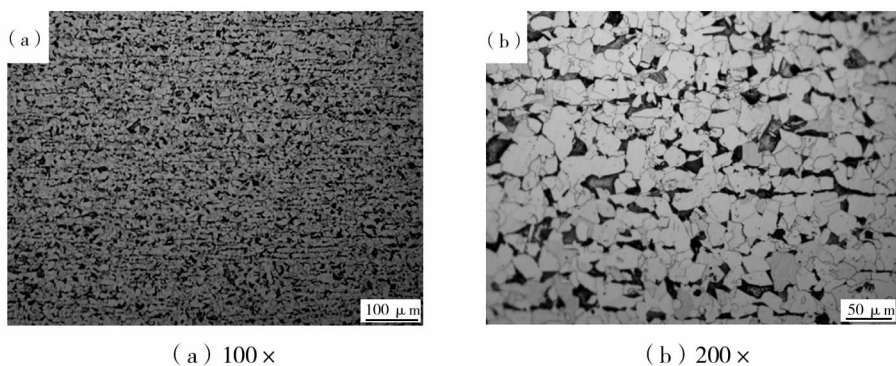


图 2 试验钢的显微组织

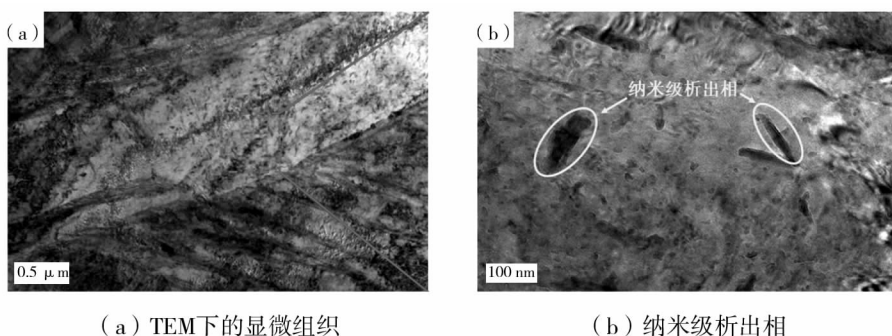
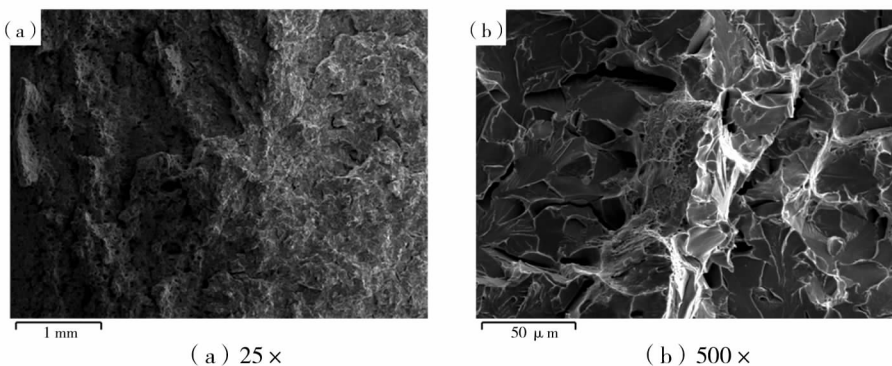


图 3 基体中的析出相(TEM 照片)

图 4 试验钢的冲击断口形貌(在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下)

3 结论

(1) 通过中试试验和工业试制, 成功开发出性能优异的海洋工程用 S420MLO 高强耐低温热轧 H 型钢, 其平均抗拉强度 621.25 MPa, 平均屈服强度 467.25 MPa, 平均延伸率 27.88%, 屈强比平均 0.75, 试验钢各项指标满足标准要求。

(2) 试验钢显微组织由铁素体和珠光体组成, 在透射电镜下观察到基体中有长度 100 nm 级尺寸

的析出相, 析出相能够钉扎位错, 抑制其运动与增殖, 有助于提升钢的屈服强度和抗拉强度。

(3) 试验钢的低温冲击断口(在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下) 呈现细小的夹杂物, 可以诱导微孔形核以及阻碍裂纹扩展, 起到消耗额外能量和改变断裂路径的作用。断口基体中分布着细小夹杂物, 其在受力过程中与基体界面处产生应力集中, 并优先形成微小孔洞, 成为韧窝形核的核心。

(下转第 69 页)

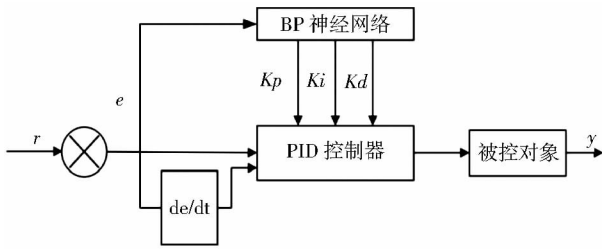


图4 BP神经网络控制器结构图

确定BP网络的结构,确定输入层的节点数 M 、隐含层节点数 Q ,给出各层加权系数 ω_{ij} 和 ω_{li} ,选定学习速率 η 和 α 为惯性系数;采样得到输入和输出,计算此时的误差值error;计算神经网络各层神经元的输入、输出,输出层的输出就是PID控制器的三个参数;根据PID控制器计算系统的输出 $u(k)$;进行神经网络的学习,在线调整加权系数,实现PID控制器的自适应调整。

7 结束语

本文研制的自行轨道式巡检机器人已经在钢铁企业的焦炉地下室、变电站等工业场景上线运行。自行轨道式巡检机器人在作业过程中能够克服焦炉煤气交换区域的高粉尘、高温等影响,呈现出稳定运行、故障率低等特点。巡检机器人在变电站与焦炉巡检作业过程中,能够按照指定的时间、速度完成巡检任务,并且能准确地定位焦炉换气盖板、变电站表盘等巡检对象,满足了工业化应用的要求。

巡检机器人的上线运行,有效地避免了巡检作业人员长期或频繁进入高危、高温区域,降低了人员的工作强度,改善了现场作业人员的工作环境,达到了危险作业区3D岗位机器人换人的目的,取得了良好的效果,具有较高的社会与经济效益。本文研究的自行轨道式巡检机器人造价低,场景适应性强,能够满足不同的巡检要求,具有较高的实用价值,在冶金、煤化工、矿山等领域具有极强的推广应用价值。

参考文献

- [1] 李新海,徐宝军,肖星,等. 变电站挂轨机器人智能巡检系统技术研究[J]. 电气传动,2021,51(19):43-49.
- [2] 张晖,廖俊蓉,付建美,等. 隧道智能巡检机器人应用研究[J]. 科技创新与生产力,2022,43(9):98-100,104.
- [3] 田雨洁,王中昊,徐锦,等. 小型城市轨道交通智能巡检机器人机械结构设计研究[J]. 电子制作,2020(22):81-82,44.
- [4] 芦建文,王宏,代东明,等. 焦炉换气设备智能巡检系统的研究[J]. 洁净煤技术,2021,27(2):392-396.
- [5] 芦建文,郑淑霞,吴海峰. 复合机器人工业搬运系统的研究与应用[J]. 包钢科技,2023,49(4):73-76.
- [6] 芦建文,赵楠. 声音识别技术在设备故障检测中的应用研究[J]. 包钢科技,2022,48(3):86-89.

(上接第46页)

参考文献

- [1] 史术华,脱臣德,梁文洲,等. 显微组织对460 MPa级特厚海工钢强韧性的影响[J]. 金属热处理,2025,50(10):45-53.
- [2] 阎军,苏琦,许琦,等. 海洋工程典型装备智能化研究进展[J]. 科技导报,2024,42(13):16-26.
- [3] 曹胜利,张庆军,张彩军. 焊接热输入对EH420海工钢热影响区组织和性能的影响[J]. 中国冶金,2025,35(4):58-66,90.
- [4] 罗登,朱拓,高海亮,等. 控制轧制对直接淬火EH500海工钢的组织与性能影响[J]. 钢铁,2025,60(3):104-116.
- [5] 宋继强,白学飞,马林,等. 厚规格海工钢组织调控与力学性能研究[J]. 轧钢,2025,42(2):115-121.
- [6] 李家安,赵坦,李文斌,等. 开冷温度对420 MPa级海洋工程用钢延伸性能的影响[J]. 轧钢,2024,41(3):21-28.
- [7] 郭随华. 中国建材总院科技在行动:“十三五”国家重点研发计划“海洋工程高抗蚀水泥基材料关键技术”项目进展与阶段成果介绍[J]. 中国建材,2018(10):124-126.
- [8] 李红涛. 新兴海洋工程装备发展动向[J]. 中国船检,2024(9):43-48.