

桥梁结构用 Q345qE 热轧 H 型钢试制

陈 琳¹, 魏 彬¹, 惠治国², 郭利宏¹, 王 瑞¹, 李亮军¹, 王 琨¹

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司轨梁轧钢厂, 内蒙古 包头 014010;
2. 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: 为满足桥梁对高强度、高韧性及良好焊接性能的工程结构用钢的需求, 包钢开展了 Q345qE 热轧 H 型钢的试制。通过严格执行冶炼、精炼、连铸及热轧全过程工艺参数要求, 成功完成产品试制。试制钢材的化学成分满足 GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》要求, 产品屈服强度为 417 ~ 419 MPa, 抗拉强度为 533 ~ 538 MPa, 延伸率为 28.5% ~ 33.0%, 低温冲击功 (- 40 °C) 为 178 ~ 201 J, 各项指标均满足标准要求。钢材综合性能稳定, 为 Q345qE 热轧 H 型钢的工业化生产及桥梁工程应用提供了技术支撑。

关键词: 桥梁结构钢; Q345qE; 热轧 H 型钢; 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 - 0001 - 04

Trial Production of Q345qE Hot Rolled H Section Steel for Bridge Structure

Chen Lin¹, Wei Bin¹, Hui Zhiguo², Guo Lihong¹, Wang Rui¹,
Li Liangjun¹, Wang Kun¹

(1. Rail and Beam Rolling Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd.,
Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;

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

Abstract: In order to meet the requirements of steel for engineering structures with high strength, high toughness and good welding performance for bridge, the trial production of Q345qE hot rolled H section steel is carried out by Baotou Steel. It is successfully completed through strictly performing the process parameter requirements of the whole process of smelting, refining, continuous casting and hot rolling. The chemical components of trial - produced steel could meet the requirements of GB/T 714—2015 *Steel for Bridge Structures*, its yield strength is 417 ~ 419 MPa, tensile strength is 533 ~ 538 MPa, elongation is 28.5% ~ 33.0% and low - temperature impact energy (- 40 °C) is 178 ~ 201 J so that all indexes could meet the standard requirements. The comprehensive performances of steel are stable, which could provide the technical support for industrial productions and applications of bridge engineering of Q345qE hot rolled H section steel.

Key words: steel for bridge structure; Q345qE; hot rolled H section steel; mechanical performances

随着我国桥梁工程向大跨度、重载化和轻量化方向发展, 对工程用钢在强度、韧性、焊接性能及服

役可靠性等方面提出了要求^[1]。Q345qE 钢作为一种低合金高强度钢, 具有强度等级适中、低温韧性优

良及焊接性能良好的特点,在公路桥梁和铁路桥梁建设工程中获得广泛应用^[2]。H 型钢因其经济断面、优良力学性能,在桥梁结构的主梁、横梁及支撑构件中应用日益增多。包钢依托先进的异型坯/矩形坯连铸机及型钢生产线,成功完成了 Q345qE 热轧 H 型钢的试制工作。本文对其工艺路线、性能测试结果及关键控制措施进行分析,为后续稳定生产

提供参考。

1 工业试制

1.1 成分控制

国家标准 GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》^[3]中 Q345qE 牌号的化学成分和力学性能要求如表 1、如表 2 所示。

表 1 Q345qE 化学成分(质量分数)

牌号	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	CEV
Q345qE	≤0.18	≤0.55	0.90 ~ 1.60	≤0.020	≤0.010	0.005 ~ 0.060	0.010 ~ 0.080	0.006 ~ 0.030	≤0.43

表 2 Q345qE 热轧 H 型钢的力学性能

牌号	R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	冲击功 $KV_2(-40\text{ }^\circ\text{C})/J$
Q345qE	≥345	≥490	≥20	≥120

如表 1 所示,结合桥梁用钢强韧性的要求,钢中适量添加 Nb、V、Ti 等微合金元素,钢厂可依据实际工艺条件灵活选用。大规模应用于制造桥梁结构的焊接工艺要求钢材具有良好的可焊接性,碳当量过高易引发冷裂纹,影响焊接性能与结构安全性,标准

要求钢材的碳当量(CEV)应控制在 0.43 以下,以确保良好的焊接适应性和结构安全性。

Nb、V、Ti 在钢中具有明显的强化与韧化作用^[4],试制 Q345qE 钢成分采用 Nb-V 复合微合金化方案,表 3 所示为化学成分的内控范围。按内控成分计算的碳当量($CEV = C + Mn/6 + [Cr + Mo + V]/5 + [Ni + Cu]/15$)最大为 0.40,满足标准要求(≤0.43),经计算得出焊接裂纹敏感性指数 $P_{cm} \leq 0.195$ 。

表 3 Q345qE 热轧 H 型钢内控化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Nb + V	CEV
0.09 ~ 0.14	0.20 ~ 0.40	1.40 ~ 1.60	≤0.020	≤0.010	≤0.22	≤0.40

1.2 工艺路线

Q345qE 热轧 H 型钢试制工艺路线为转炉→LF→VD→连铸→热轧。

采用顶底复吹转炉进行冶炼,控制终点碳含量不超过 0.12%、终点温度 1 620 °C ~ 1 650 °C,冶炼采用双渣法,确保出钢时 $[P] \leq 0.025\%$ 。出钢过程中采用挡渣球+挡渣锥双重挡渣,使出钢下渣量不超过 5 kg/t,减少回磷现象^[5]。在出钢至 1/3 时开始加入硅锰合金、锰铁进行预脱氧,出钢至 2/3 时加入铝锰铁进行终脱氧,控制钢中全氧含量不超过 0.004 0%。

LF 精炼白渣操作,控制精炼渣碱度(CaO/SiO_2)在 3.5 ~ 4.5 范围内。底吹氩气搅拌促进夹杂物上浮,控制氩气流量 10 ~ 15 L/min。根据成分分析结果微调合金元素含量,确保 Nb、V 等微合金元素精准控制在目标范围内。精炼后期进行温度调整,确

保出站温度 1 530 ~ 1 550 °C,保温时间 ≥30 min,保证夹杂物充分聚合去除。

VD 处理真空度 ≤67 Pa,真空时间 15 ~ 20 min,通过氩气搅拌(8 ~ 12 L/min)促进钢中气体逸出,控制钢中 $[H] \leq 0.000 2\%$ 、 $[N] \leq 0.000 8\%$ 。真空处理结束后进行软吹氩操作,软吹时间 ≥15 min,避免钢水二次氧化。

连铸坯断面为 440 mm × 105 mm × 555 mm × 90 mm 异型坯。铸坯拉速控制在 0.8 ~ 1.0 m/min,二次冷却采用气雾冷却方式,比水量 1.2 ~ 1.5 L/kg。连铸出坯后,铸坯入缓冷坑后缓冷 24 h,以消除内应力。

H 型钢采用万能轧机轧制,铸坯加热温度 1 180 ~ 1 220 °C,加热时间 180 ~ 240 min,确保微合金元素充分固溶。粗轧阶段采用 7 道次轧制,累计变形量 ≥70%,终轧温度 950 ~ 1 000 °C;精轧阶段采用

5 道次轧制,终轧温度 820 ~ 850 ℃。H 型钢成品规格 700 mm × 300 mm × 13 mm × 24 mm × 12 000 mm。

2 试制结果

2.1 化学成分

表 4 Q345qE 热轧 H 型钢成品化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Nb + V	CEV	%
0.13	0.23	1.52	0.015	0.008	0.15	0.38	

2.2 力学性能

力学性能测试采用型号 WAW - 600 万能材料试验机,按照 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》^[6],在 H 型钢成品翼板处截取 Φ10 mm 标准拉伸试样,标距 50 mm,拉伸速度 3 mm/min,每组试验平行测试 3 个试样。冲击韧性测试采用型号 JB - 300B 冲击试验机,依据 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》^[7],测试断面 10 mm × 10 mm × 55 mm 的 V 型缺口试样在 -40 ℃ 温度下的冲击功,测试 3 个试样,取其平均值。

拉伸试验和冲击试验结果如表 5 所示。由表 5 可知,Q345qE 热轧 H 型钢屈服强度为 417 ~ 419 MPa,抗拉强度为 533 ~ 538 MPa,伸长率为 28.5% ~ 33.0%,低温冲击功(-40 ℃)为 178 ~ 201 J,均优于 GB/T 714—2015 标准要求,且强度波动范围较小,表明型钢轧制过程中变形均匀。

表 5 试验钢的力学性能

试样编号	R_{dL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	冲击功 $KV_2(-40\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$
1 [#]	419	533	30.5	178
2 [#]	417	534	28.5	201
3 [#]	418	538	33.0	189
标准要求	≥345	≥490	≥20	≥120

2.3 显微组织

在 Q345qE 热轧 H 型钢翼板中心处截取试样,经打磨、抛光后用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,在型号 Vert 5 蔡司光学显微镜下观察显微组织形态并测定晶粒度。晶粒度评级按照 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》^[8]进行,采用截点法计算,统计 5 个视场的平均晶粒度级别。

显微组织如图 1 所示。由图 1 可知,试制钢材

采用型号 PDA7000 直读光谱仪分析试制的 Q345qE 热轧 H 型钢成品材的化学成分,每个样品测 3 个点,取其平均值,检测结果如表 4 所示。由表 4 可知,所有化学成分均满足 GB/T 714—2015 标准要求。

的显微组织为均匀的铁素体 + 珠光体,珠光体呈带状分布,带宽较窄($\leq 5\ \mu\text{m}$)。晶粒度评级结果为 7.5 ~ 8 级,平均晶粒度 7.8 级,细晶粒结构是保证钢材高强度和高韧性的重要原因。此外,在扫描电镜(SEM)下观察到少量 NbC、V(C,N)等微合金碳氮化物析出相,尺寸约 50 ~ 100 nm,均匀分布于铁素体基体中,起到弥散强化作用。

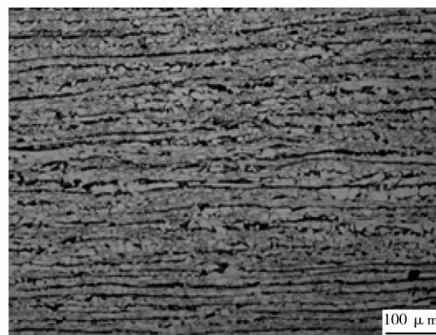


图 1 显微组织

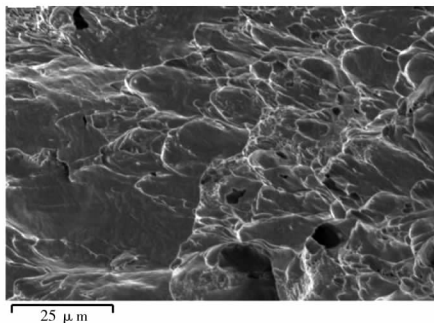
图 2 为在 SEM 下观察到的 2[#]试样在 -40 ℃ 下的冲击断口形貌,冲击断口断裂源区和扩展区呈现韧窝形貌,显示为典型的韧性断裂,表明钢材在低温环境下具有优异的抗冲击能力。

2.4 分析与讨论

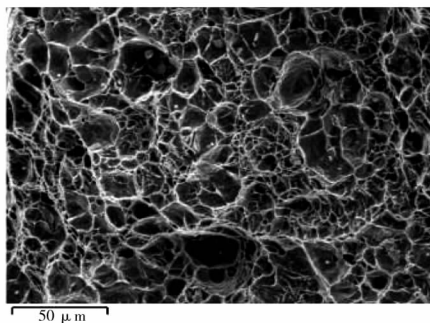
转炉冶炼通过控制终点碳和温度减少了后续脱氧合金化的负担,控制下渣量避免了磷的回升,使得成品中磷含量处于较低水平,有利于提高钢材的低温韧性。LF 炉高碱度精炼渣增强了脱硫和脱氧能力,氩气搅拌促进了夹杂物的上浮和去除。钢中均匀分布的微合金元素为实现析出强化创造了条件。VD 真空处理降低了钢中的气体含量,特别是氢含量的降低有效减少了氢致裂纹的风险。软吹氩操作

进一步促进了微小夹杂物的聚合长大,提高了钢水的纯净度,对改善钢材的焊接性能和冲击韧性至关重要。连铸电磁搅拌细化了铸坯晶粒,减少了成分

偏析。合理的拉速和二次冷却制度保证了铸坯的表面质量和内部组织均匀性,缓冷处理则消除了铸坯内部的残余应力,避免了后续轧制过程中裂纹的产生。



(a) 断裂源区



(b) 断裂扩展区

图 2 2#试样在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的冲击断口 SEM 形貌

热轧适宜的加热温度和时间确保了微合金元素的充分固溶,为轧制后的析出强化提供了足够的溶质原子。粗轧大变形量破碎了铸态组织,细化了晶粒。控制精轧终轧温度,通过在奥氏体未再结晶区的累积变形实现了晶粒的进一步细化。最后通过轧后控制冷却获得了均匀铁素体和珠光体的相变组织,保证了钢材的力学性能。

3 结论

(1)桥梁结构用 Q345qE 热轧 H 型钢采用“转炉→LF→VD→连铸→热轧”工艺路线正确,试制产品化学成分和力学性能满足 GB/T 714—2015 标准要求。

(2)试制产品低温冲击功($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)满足标准要求,低温韧性良好。

(3)试制的桥梁结构用 Q345qE 热轧 H 型钢产品质量稳定可靠,为工业化批量生产和工程应用提供了技术支持。

参 考 文 献

[1] 毛新平,武会宾,汤启波. 我国桥梁结构钢的发展与创新[J]. 现代交通与冶金材料,2021,

1(6):1-5.

[2] 程鼎,夏勤,吴保桥,等. 国内外桥梁结构用钢的现状[J]. 安徽冶金科技职业学院学报,2016,26(3):1-4.

[3] 全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183). 桥梁用结构钢:GB/T 714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

[4] 吴晓春. 合金元素在金属材料组织演变中的作用及性能影响探究[J]. 新疆钢铁,2025(1):24-26.

[5] 魏宝森. 转炉的挡渣出钢技术探讨[J]. 冶金能源,2013,32(2):13-16.

[6] 全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183). 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

[7] 全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183). 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法:GB/T 229—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.

[8] 全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183). 金属平均晶粒度测定方法:GB/T 6394—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.