稀土高性能耐候桥梁宽厚钢板Q500qENH研发*

高 军[1],屈文胜[1],周可哥[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份薄板坯连铸连轧厂,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古交通厅设计研究院,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要: 开发了屈服强度500 MPa级别耐候宽厚桥梁钢板,具有高强度、高韧性、加工不变形和抗低温断裂性能及高耐候等综合性能,能够满足GB/T 714—2015标准要求,适合在极寒区域和免涂装使用。

关键词: 耐候桥梁; Q500qENH; 稀土宽厚钢板
中图分类号: TG142.1,TG335 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2020)03-0039-03
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.03.010

Research and Development of High-performance Weather-resistant Wide and Heavy Steel Plate Q500qENH with Rare Earth for Bridge

Gao Jun[1], *Qu Wen-sheng*[1], *Zhou Ke-ge*[2]

(1. *CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Design and Research Institute of Inner Mongolia Transport Dept., Hohhot* 010020, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The weather-resistant wide and heavy steel plate for bridge with yield strength of 500 MPa has been developed. It is with such comprehensive properties as high strength, high toughness, processing without deformation, resistance to low-temperature fracture and high weather resistance that it can meet the requirements of GB/T 714—2015 standard as well as is suitable for using in extremely cold areas and without coating.

Key words: weather-resistant bridge; Q500qENH; wide and heavy steel plate with rare earth

普通桥梁钢强度等级低、疲劳性能差,不适合在极寒地区和大跨度项目中使用,而且不耐大气、海洋环境腐蚀,工程维护成本较高[1]。因此国外提出了高性能钢(High Performance Steel,HPS)研发,除了具备高强度外,还具有优良的焊接性能、低温韧性,尤其是耐腐蚀性能和疲劳性能较普通桥梁钢提高3~8倍[2],能够抗工业大气、酸雨、海洋及海水腐蚀,适合在大跨度海上工程中使用,安全性较高、维护费用较低。为填补包钢宽厚板产品空白,完善桥梁钢产品系列,进行了Q500qENH研发,以适应中国近年来各种公路桥、铁路桥、跨海大桥等大规模建设需求。

1 Q500qENH桥梁钢的性能

依据GB/T 714—2015桥梁用结构钢标准,力学性能要求见表1,而且要求耐腐蚀指数$I \geqslant 6.0$,一般用耐大气腐蚀性指数(I)越大,耐大气腐蚀性能越

* 收稿日期:2020-03-27
作者简介:高 军(1982-),男,内蒙古鄂尔多斯市人,高级工程师,现从事耐磨钢、管线钢、耐蚀钢等宽厚板产品研发和技术质量管理工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

好。计算公式：$I = 26.01w(Cu) + 3.88w(Ni) + 1.20w(Cr) + 1.49w(Si) + 17.28w(P) - 7.29w(Cu)w(Ni) - 9.10w(Ni)w(P) - 33.39w(Cu)^2$，所以要求添加合金 Cu、Cr、Ni，同时要兼顾高韧性、焊接性能和成本控制的技术难点，包钢采用合理的化学成分与热处理工艺设计，保证Q500qENH具有优良的综合性能和较低的生产制造成本。

表1 Q500qENH力学性能要求

横向拉伸				纵向冲击		180°冷弯		推荐屈强比
R_{eL}/MPa		R_m/MPa	A/%	温度/℃	冲击功 KV_2/J	D=弯心直径 a=试样厚度		
≤50 mm	>50~100 mm					≤16 mm	>16 mm	
≥500	≥480	≥630	≥18	-40	≥120	D=2a	D=3a	协议

2 生产工艺

按照包钢宽厚板生产线的配置情况和产品最终交货状态，避免用户加工过程应力释放变形，同时兼顾优良的综合性能，工艺路线为：KR脱硫扒渣→210 t顶底复吹转炉→LF炉精炼→RH炉精炼→板坯连铸→冷板坯再加热→双机架四辊可逆轧机轧制→ACC冷却及热矫→剪切→淬火+高温回火→取样检验。

2.1 成分设计

通过适当提高C含量、降低Mn和Nb含量，没有添加高温回火析出强化V和贵重合金Mo元素，适量添加Cu、Cr、Ni和稀土等耐候合金元素优化组合，提高钢的韧性和强度，降低屈服强度和冷裂纹敏感性和焊接热影响区的硬度，同时保证较低的屈强比，通过精准的控轧控冷及热处理调质工艺，获得优良的铁素体和贝氏体组织，进而保证了钢板强度、韧性、抗震性、加工性、耐候性和焊接性等各项性能的合理匹配。具体化学成分如表2所示，耐候指数I为6.36，根据ASTM G101规定，当钢的化学成分计算值I值大于等于6时，认为该钢种为高耐候钢，可以在工程中免涂装使用。

表2 Q500qENH钢板化学成分(质量分数)

C/%	Si/%	Mn/%	P/%	S/%	Cr、Ni、Cu/%	Nb/%	Ti/%	P_{cm}/%	I
0.09	0.15	1.35	0.015	0.001	1.1	0.015	0.01	0.20	6.36

$w[N] \leqslant 40\times10^{-6}$，$w[O] \leqslant 30\times10^{-6}$，$w[H] \leqslant 1.2\times10^{-6}$，$w[B] \leqslant 5\times10^{-6}$，$w[RE] \geqslant 8\times10^{-6}$

2.2 轧制及热处理工艺

采用奥氏体再结晶和未再结晶两阶段控轧，通过合理控制终轧温度和减小亚晶强化机制，降低屈服强度和屈强比，空冷后快速热处理淬火+高温回火+堆垛缓冷，以消除内应力，同时获得了优良的贝氏体组织性能。

3 实物性能

3.1 力学性能及加工性能

Q500qENH的力学性能如表3和表4所示，具有均匀的横纵向拉伸性能，屈强比小于0.85，-40 ℃冲击功都大于260 J，韧脆转变温度为-75 ℃，断面收缩率达到Z35等级，180°冷弯未发现裂纹，火切后不变形，符合GB/T 714—2015的要求。

3.2 抗断裂性能

依据GB/T 6803—2008《铁素体钢的无塑性转变温度落锤试验方法》对Q500qENH典型规格钢板进行NDTT落锤试验和系列冲击试验，试验结果如表5所示，钢板的NDTT温度在-60~-75 ℃之间，具有良好的抗低温断裂性能。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　厚度 30 mm 钢板常规力学性能结果

取样位置	取样方向	$R_{P0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	屈强比	Z/%	KV_2(－40 ℃)/J
表面	横向	554	671	23.5	0.83	79,80	299,285,296
	纵向	545	668	24.5	0.82	80,80	299,298,299
心部	横向	551	658	23	0.84	77,80	288,262,269
	纵向	544	654	23	0.83	79,76	299,293,299

表 4　钢板系列温度冲击试验结果(KV_2)　　J

－100 ℃	0 ℃	－20 ℃	－40 ℃	－60 ℃	－80 ℃
11,27,17	359,365,358	358,351,366	299,298,299	248,262,300	210,249,26

表 5　钢板 NDTT 性能

规格/mm	NDTT/℃
30	－60
30	－75

表 6　钢板双重拉伸试验结果

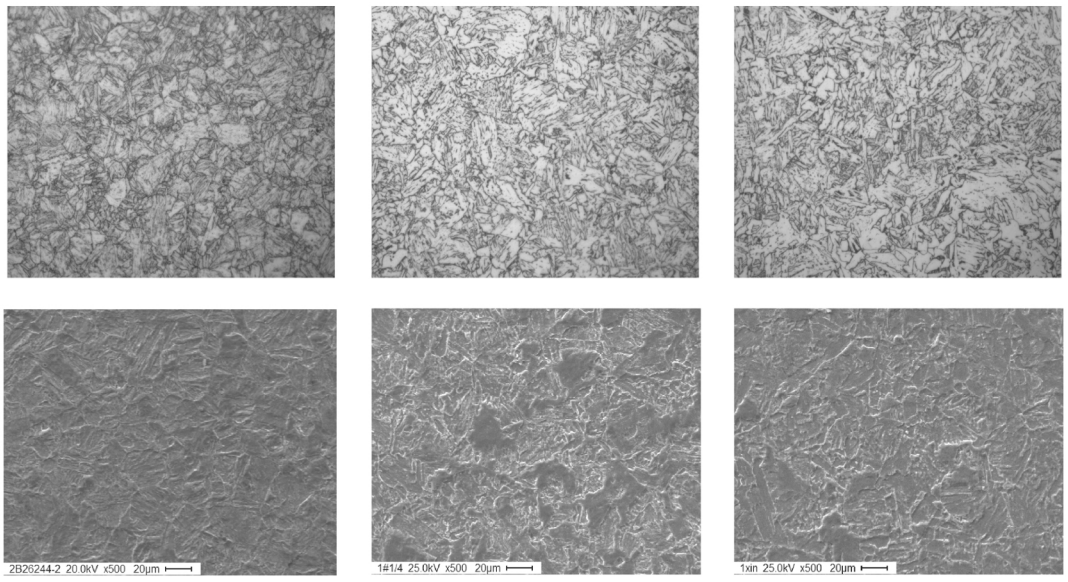
钢板	试验温度/℃	主拉伸应力/MPa	试样厚度/mm	止裂长度/mm
Q500qENH	－20	300	30	117
				120

3.3　钢板止裂性能

依据中船重工企业标准 Q/725－1181—2014，对 30 mm Q500qENH 钢，开展等温型双重拉伸试样试验，评价钢板止裂性能，等温型双重拉伸试验结果见表 6，钢板的止裂性能较好，与调质钢板的组织均匀性有关。

4　显微组织

Q500qENH 钢板 T/4 处组织以回火索氏体和贝氏体为主，T/2 处组织以贝氏体为主，组织细小均匀，晶粒度等级 9－11 级，如图 1 所示。均匀细小的组织有利于阻碍裂纹的扩展，使钢板具有良好的低温韧性和抗低温断裂性能。



30 mm Q500qE表层　　30 mm Q500qE T/4　　30 mm Q500qE T/2

图 1　30 mm 钢板显微和电镜扫描组织

(下转第 46 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

抗氢致开裂测试(HIC)要求每个厚度至少做1组(3个)试样,在距钢带边部1/2处纵向取样,按NACE TM0284标准要求进行试验;硫化氢应力腐蚀试验(SSC)要求每个厚度至少做1组(3)试样,在距钢带边部1/2处纵向取样,按NACE TM0177以及4点弯曲测试法(ASTM 039)进行试验,试验中采用72%实际屈服强度的加载应力,拉伸表面上不得出现任何表面开裂或裂纹,试验结果见表7。

表7 HIC和SSC实验结果比较

HIC试验			SSC试验	备注
CLR/%	CTR/%	CSR/%	裂纹长度/mm	
≤15	≤5	≤2		标准范围
≤15	≤5	≤2		协议范围
0	0	0	无裂纹	检测结果

HIC和SSCC测试结果全部合格,裂纹长度率、裂纹敏感率、裂纹厚度率均为0,充分体现了超低S、低碳高纯净钢的控制对钢材的抗H_2S腐蚀能力的提升发挥了重要作用。

4 结论

(1)通过以上两组案例说明,抗硫化氢管线用钢技术要求已趋向多元化,高要求和超标准的多样化产品设计是企业能够优先占有国际市场、提升品种钢质量服务的重要途径之一。

(2)钢材强度和塑韧性的良好匹配与生产工艺依依相关,通过合理的化学元素控制,钢质纯净的炼钢工艺,结合严谨的热轧工艺,其综合机械性能不仅能够满足技术要求,而且HIC、SSCC指标均满足用户要求,特别是表现出来的低温韧性已达到国际先进水平。

参 考 文 献

[1] 中研智业研究院. 中国焊接钢管市场现状调研与发展前景分析报告(2015 - 2020年)[R]. 北京: 中研智业研究院,2016.

[2] API SPEC 5L,管线钢管规范[S].

[3] 姚春发. 管线钢氢致裂纹影响因素研究进展[J]. 上海金属,2014,36(5):54 - 58.

[4] 战东平,姜周华,王文忠,等. 高洁净度管线钢中元素的作用与控制[J]. 钢铁,2001,36(6):67 - 70,78.

[5] 王春明. 管线钢的合金设计[J]. 鞍钢技术,2004,(6):22 - 28.

[6] 周琦. 管线钢中的硫化夹杂物与氢致开裂[J]. 材料工程,2002(9):37 - 46.

[7] 郝瑞辉. 合金元素在管线钢中的作用与控制[J]. 上海金属,2006,28(6):58 - 62.

[8] 夏春祥. 钙处理钢中夹杂物行为的研究[J]. 武钢技术,2012,50(3):8 - 12.

(上接第41页)

5 结论

(1)研发的Q500qENH贝氏体高性能耐候桥梁钢各项性能满足标准要求,具有低屈强比、良好的低温韧性和抗低温断裂性能,满足标准GB/T 714—2015要求。

(2)耐候指数I大于6.0,耐大气腐蚀性能良好,可以暴露在空气中免涂装使用。

(3)研发的宽厚板稀土高性能Q500qENH高性能耐候钢微观组织为回火索氏体+贝氏体,组织及性能均匀。

参 考 文 献

[1] 刘玉擎. 耐候钢桥的发展及其设计要点[J]. 桥梁建设,2003,(5):39.

[2] 邓伟. 高性能耐候桥梁钢Q345qENH—Q420qENH系列品种的开发[J]. 南钢科技与管理,2015,(2):16.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net