

# 桥梁用耐候结构钢 Q355NH 的研制

董中波, 邹德辉, 程吉浩

(武汉钢铁(集团)公司研究院, 湖北 武汉 430080)

**摘要:**以低 C-Mn 为基, 辅以 Cu、Cr、Ni 等元素微合金化, 配合合理的控轧控冷工艺生产, 开发了桥梁用耐候结构钢 Q355NH。对试制钢板进行了各项力学性能、焊接性能及耐大气腐蚀性性能检验。结果表明: Q355NH 钢强度高, 韧塑性优异, 焊接接头性能优良, 具有较好的耐大气腐蚀性性能, 满足桥梁用耐候结构钢的需求。

**关键词:**耐候结构钢; Q355NH 钢; 耐大气腐蚀性性能

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4620(2017)01-0009-03

## 1 前言

耐候钢, 亦称耐大气腐蚀钢, 其特点是在钢中加入少量 Cu、P、Cr、Ni 等合金元素, 使其在大气中或者其他介质中具有良好的耐腐蚀性能的结构钢, 耐大气腐蚀钢的耐腐蚀性能为普通碳素钢的 2~8 倍, 并且使用时间越长, 耐蚀作用越明显<sup>[1-2]</sup>。研究表明, 依耐候钢成分不同, 钢构件使用环境不同, 耐候钢的抗大气腐蚀能力可比普通钢提高 2~8 倍, 涂装性可提高 1.5~10 倍<sup>[3]</sup>。

桥梁采用耐候钢可以减少加工制造周期, 节约后期涂层的维护成本, 甚至可以免涂装使用。近几年来, 随着资源环境友好型的社会建设需求, 国内桥梁建设应用耐候桥梁钢越来越多。根据市场需求, 某厂开发了桥梁用耐候结构钢 Q355NH, 按照

TMCP 工艺生产, 成本低, 钢板各项性能指标符合技术要求。

## 2 Q355NH 钢的试制

根据 GB/T 4171—2008 标准中 Q355NH 钢技术条件的要求(见表 1), 结合桥梁工程的具体应用特点, 充分考虑耐腐蚀性能需求, 以低 C-Mn 为基础, 辅以 Cu、Cr、Ni 等元素微合金化, 设计了 Q355NH 钢的化学成分(见表 2)。本次 Q355NH 钢板生产厚度规格为 20 mm、40 mm。

表 1 Q355NH 钢技术要求

板厚/mm	$R_{eL}$ (横向)/MPa	$R_m$ (横向)/MPa	$A$ (横向)/%	纵向 KV <sub>2</sub> /J
> 6 ~ 16	≥355	490 ~ 630	≥22	≥34(-20 ℃)
> 16 ~ 40	≥345	490 ~ 630	≥22	≥27(-40 ℃)
> 40 ~ 60	≥335	490 ~ 630	≥21	

表 2 Q355NH 钢设计的化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V	Ni	I
0.06 ~ 0.10	0.30 ~ 0.45	0.90 ~ 1.10	0.015 ~ 0.020	≤0.004	0.25 ~ 0.40	0.50 ~ 0.70	0.020 ~ 0.060	0.15 ~ 0.35	≥6.0

注:  $I=26.01(Cu)+3.88(Ni)+1.20(Cr)+1.49(Si)+17.28(P)-7.29(Cu)(Ni)-9.10(Ni)(P)-33.39(Cu)^2$ 。

Q355NH 钢的成分设计主要是以 C、Mn 保证钢的强度, Cu、Cr、Ni 等合金元素保证钢板的耐腐蚀性能, 充分降低钢中 S 含量和其他气体夹杂, 提高钢水纯净度, 使钢板具有优良的低温韧性。生产工艺流程: 铁水→铁水脱硫→转炉冶炼→RH 处理→连铸→控制轧制及冷却→探伤→检验→入库→发货。试验钢采用顶底复合转炉冶炼, 真空处理充分脱气, 全程保护浇铸, 连铸过程中控制过热度在 15~25 ℃, 末端轻压下处理, 充分降低铸坯偏析, 提高钢板内在质量。铸坯加热温度(1 250 ± 30) ℃, 采用二阶段控制轧制, 轧后根据钢板厚度分档适当加速冷却, 使钢板获得良好的综合性能。

收稿日期: 2016-09-09

作者简介: 董中波, 男, 1980 年生, 2003 年毕业于武汉科技大学冶金工程专业, 硕士。现为武钢研究院高级工程师, 从事桥梁用结构钢的研发工作。

## 3 试制结果及分析

### 3.1 拉伸性能

按 GB/T 228.1—2010 标准要求对 20 mm、40 mm 厚钢板进行了常温拉伸试验, 试验结果见表 3。

表 3 Q355NH 钢拉伸试验结果

厚度/mm	$R_{eL}$ /MPa	$R_m$ /MPa	$A$ /%
20	448	550	28.5
40	425	575	29.0

从表 3 中可以看出, Q355NH 钢具有较高的强度和塑性水平, 满足技术要求, 富余量较大, 钢板板效应较小。

### 3.2 冲击性能

对 20 mm、40 mm 厚度的 Q355NH 钢板进行了纵向系列低温夏比(V 型缺口)冲击试验。测定了试验

温度下的冲击吸收功  $KV_2$ 、晶状断面率、侧胀值,试验分别按照 GB/T 229 和 GB/T 12778 标准规定执行。试验结果见图1。

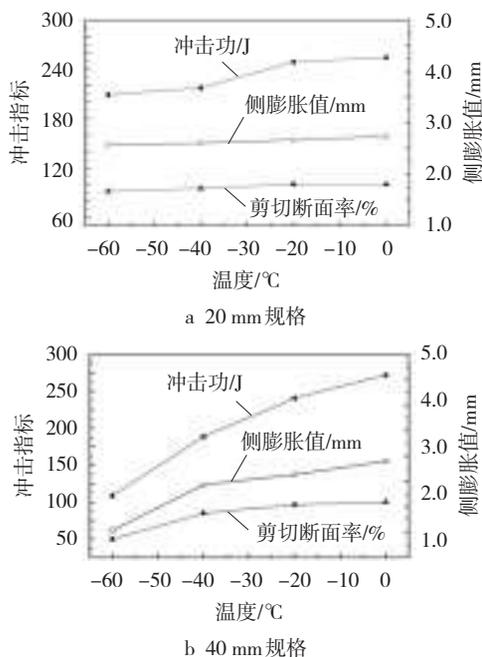


图1 Q355NH钢板纵向系列低温夏比(V型缺口)冲击试验

由结果可见,按照  $KV_2$  为 50% 平台能所对应的温度 ( $vT_E$ )、晶状断面率为 50% 时所对应的温度 ( $vT_S$ )、侧胀值为 0.38 mm 时所对应的温度 ( $vT_{0.38}$ ) 3 个判据,确定的韧脆转变温度均低于  $-60^\circ\text{C}$ ,说明 Q355NH 钢低温冲击韧性优良。这对桥梁的使用提供了一定的安全保证。

### 3.3 金相组织检验

在 20 mm、40 mm 厚钢板冲击样上切取试样,经过镶嵌、研磨、抛光机侵蚀后,在奥林巴斯 GX71 金相显微镜下观察组织,结果见图2。同时,制作薄膜试样,在日本电子 JEM-2100FX II 型透射电镜下观

察其精细组织,结果见图3。

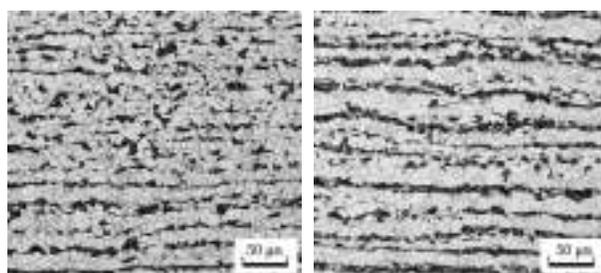


图2 不同厚度规格 Q355NH 钢金相组织

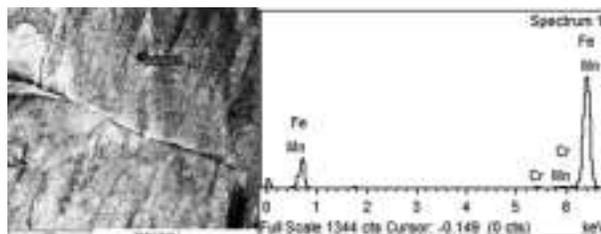


图3 Q355NH 钢精细组织 (40 mm 规格)

从图2、图3可以看出,试样主控组织为铁素体+珠光体,铁素体的比例在 60% 左右,软质项铁素体和硬质相珠光体的合理匹配,使钢板获得较高的强度和韧性,并具有较低的屈强比。珠光体呈片层状,间距较小,使组织得到细化,对钢板强韧性均有益处。试样位错密度较大,表明钢板强度较高。有极少量含有 Fe、Mn 和少量 Cr 的渗碳体颗粒析出,尺寸为 100 nm 左右,该尺寸的渗碳体可认为是钢中的强化相,对强度起到一定的强化作用,如果尺寸进一步扩大,将对钢的韧性和塑性产生较坏的影响。

### 3.4 焊接性能

选取 40 mm 厚 Q355NH 钢板进行了埋弧、气体保护及手工 3 种方式的焊接试验,焊接材料、工艺参数及焊接接头的力学性能见表4。

表4 40 mm 规格(纵)Q355NH 钢焊接工艺参数及接头力学性能

焊接方法	焊材牌号	电流 /A	电压 /V	焊速 / (cm·min <sup>-1</sup> )	线能量 / (kJ·cm <sup>-1</sup> )	$R_m$ / MPa	$R_m$ / MPa	A / %	-40 °C $KV_2$ / J		
									焊缝	熔合线	HAZ (0.5 mm)
手工焊	CJ556N	170	25.0	15	~ 17	515	598	24.5	94(108,93,83)	88(85,92,88)	83(85,81,84)
气保焊	WER44-8	270	27.5	29	14~17	520	605	23	108(123,112,89)	101(100,96,108)	88(101,85,79)
埋弧焊	WQ-1+CHF101	620	31.5	30	35	465	589	29	105(103,94,118)	104(93,99,122)	70(101,72,38)

由表4中数据可以看出,Q355NH 钢板具有优良的焊接性能,3种焊接方法及不同线能量焊接接头均具有优良的接头综合性能,3种焊接方法对焊接工艺规范具有较好的适应性,能满足桥梁用钢的焊接技术条件要求。

### 3.5 耐腐蚀性能

目前一般采用室内周浸试验模拟金属材料在大气中的真实条件,可以模拟不同的工业环境,在较短的周期内获取试验钢的耐腐蚀性能数据,为设计和生产带来便利。此次试验模拟的环境为工业

性大气,对比钢为 Q345B 和 ASTM A588 Gr.A,按 TB/T 2375 标准规定执行。试验溶液为  $1.0 \times 10^{-2}$  mol/L  $\text{NaHSO}_3$ ; 补给溶液为  $2.0 \times 10^{-2}$  mol/L  $\text{NaHSO}_3$ ; 试验温度  $(45 \pm 2)^\circ\text{C}$ ; 相对湿度  $70\% \pm 5\%$ ; 周浸轮转速 1 圈/60 min。该试验标准溶液是模拟地面酸雨环境,钢板使用环境为地面上。

采用 3 块试样平行试验。腐蚀前,试样用电子天平称重,测量尺寸;腐蚀后,肉眼观察腐蚀产物。按 GB/T 5776,用机械方法去除腐蚀产物(不损伤基体),再浸入酸中清洗腐蚀产物(酸液配比:比重为

1.1的HCl 500 mL,六次甲基四胺 20 g,加水至 1 L),在 50 °C 下除净后,取出用自来水冲洗干净,放入无水酒精中浸泡脱水,取出及时吹干,放在干燥器中 24 h 后在电子天平上称重。试验结果见图 4、图 5。

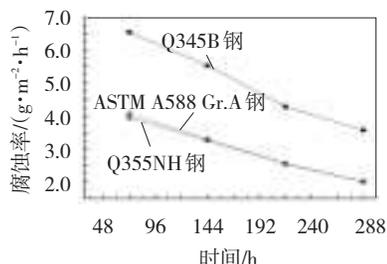


图4 腐蚀率与试验时间的关系

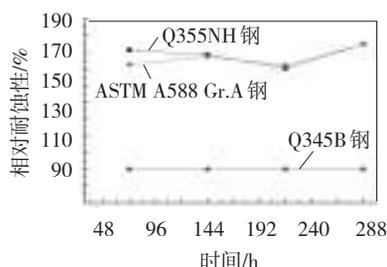


图5 相对耐蚀性与试验时间的关系

1) 随着腐蚀时间的增加, Q355NH 钢和对比钢的腐蚀率减小, 长期腐蚀行为有相同的趋势。这与工业性大气环境下的电化学反应过程有关。在工业性大气环境下, 腐蚀初期的电化学反应为:  $\text{HSO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_3^{2-} + \text{H}^+$ , pH 值减小, 故腐蚀严重; 腐蚀后期,  $\text{SO}_3^{2-} + \text{O}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ , pH 值增大, 故腐蚀减缓。

2) Q355NH 钢的耐腐蚀性能明显优于 Q345B 钢, 与 ASTM A588 Gr.A 钢相当。3 种钢腐蚀初期的腐蚀率相差较大, 后期腐蚀速率减缓, 且腐蚀后期腐蚀率差别减小。Q355NH 钢和 ASTM A588 Gr.A 钢中均含有 Cu、Cr、Ni 等合金元素。其耐腐蚀性能较好与这些合金元素及锈层结构是分不开的。根据表面富集学说的理论, 在锈层中, Cu 等合金元素富集在锈层的表面, 即富集与靠近基体金属的锈层中, 从而改善了锈层的保护作用, 提高了钢的耐大

气腐蚀性能; Cr 是热力学不稳定元素, 其腐蚀电位比 Fe 低, 但很容易钝化, 在能实现合金钝化的条件下, 合金中 Cr 含量愈高, 钝化越容易发生, 腐蚀率愈小。此外, Cr 在 Fe 中可以无限固溶, 形成无限固溶体。因此, 在腐蚀过程中, Cr 可以在锈层中形成 Fe-Cr 的多元合金氧化物, 也可以在锈层的微裂纹处、晶界处富集。合金元素的富集, 堵塞了外部介质通往基体的道路。同时, 促使锈层生长致密, 大大延缓了基体的腐蚀速率<sup>[4]</sup>。Ni 在铁基合金中常用来增加合金的热力学稳定性, 从而提高耐腐蚀性能。

## 4 结束语

以低 C-Mn 为基, 辅以 Cu、Cr、Ni 等元素微合金化, 通过转炉冶炼+炉外精炼, 控轧控冷工艺生产, 开发了桥梁用耐候结构钢 Q355NH; Q355NH 钢各项力学性能指标满足技术要求。钢板强度高, 板厚效应较小, 低温冲击性能优异, 焊接接头性能优良。其主控组织为“铁素体+珠光体”, 组织结构中元素的析出不明显; 周浸试验显示, 与对比钢 Q345B 和 ASTM A588 Gr.A 相比, Q355NH 钢耐大气腐蚀性能明显优于普通低合金钢 Q345B, 与耐大气腐蚀用钢 ASTM A588 Gr.A 相当。

Q355NH 钢试制成功以后, 批量生产 5 000 余 t, 先后应用于港珠澳大桥、兰州西固桥及部分城市路桥工程, 产品质量优良, 完全满足用户的技术要求。

### 参考文献:

- [1] 于千. 耐候钢发展现状及展望[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(11): 1-4.
- [2] 夏志升, 王新志, 张振申, 等. 低成本厚规格耐候钢 Q355NH 的生产实践[J]. 河南冶金, 2015, 23(6): 15-17.
- [3] 陈小波, 陈建华, 朱永宽, 等. SPA-H 耐候钢轧制工艺研究[J]. 河南冶金, 2011, 19(5): 28-29.
- [4] 张全成, 吴建生, 郑文龙, 等. 合金元素的二次分配对耐候钢抗大气腐蚀性能的影响[J]. 材料保护, 2001, 34(4): 4-7.

## Research and Development of Atmospheric Corrosion Resisting Structural Steel Q355NH for Bridge

DONG Zhongbo, ZOU Dehui, CHENG Jihao

(Research and Development Center of WISCO, Wuhan 430080, China)

**Abstract:** Atmospheric corrosion resisting structural steel Q355NH for bridge was developed by using low C-Mn as the base, and Cu, Cr, Ni elements were used to controlled rolling and cooling process. The mechanical properties, welding performance and atmospheric corrosion resistance of the steel plate were tested. The results show that the Q355NH steel had high strength, excellent toughness, excellent welding joint performance and better resistance to atmospheric corrosion performance, which could meet the requirements of atmospheric corrosion resisting structural steel Q355NH for bridge.

**Key words:** atmospheric corrosion resisting structural steel; Q355NH steel; atmospheric corrosion resistance