

耐候结构用热轧钢带 Q355NHC 研制与开发

黄利¹ 董磊² 徐龙² 杨雄¹

(1 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 包头 014010; 2 内蒙古包钢金属制造有限责任公司, 包头 014010)

摘 要 选用 Cu、Cr、Ni 微合金化成分体系, 采用热连轧控轧控冷工艺, 精轧终轧温度 845 ~ 875 °C, 卷取温度 585 ~ 615 °C 生产的 8 mm 耐候结构钢 Q355NHC (/%: 0.068C, 0.18Si, 1.17Mn, 0.010P, 0.006S, 0.35Cu, 0.21Ni, 0.49Cr) 带材力学性能为: 屈服强度 463.6 MPa, 抗拉强度 552.3 MPa, 延伸率 28.7%, -20 °C V-型缺口冲击功 251 ~ 256 J, 各项质量指标均满足标准要求。

关键词 Q355NHC 耐候钢 化学成分 控轧控冷

Research and Development of Q355NHC Hot Rolled Steel Strip for Weathering Structure

Huang Li¹, Dong Lei², Xu Long² and Yang Xiong¹

(1 Technology Center of Inner Mongolia Baogang Steel Union Co Ltd, Baotou 014010;
2 Inner Mongolia Bantou Steel Metal Manufacturing Co Ltd, Baotou 014010)

Abstract By selecting Cu, Cr and Ni micro-alloying composition system and controlled rolling and cooling process of hot continuous rolling, finishing rolling temperature 845 ~ 875 °C and coiling temperature 585 ~ 615 °C, the mechanical properties of produce weather-resistant structural steel Q355NHC 8 mm strip (/%: 0.068C, 0.18Si, 1.17Mn, 0.010P, 0.006S, 0.35Cu, 0.21Ni, 0.49Cr) are yield strength 463.6 MPa, tensile strength of 552.3 MPa, elongation 28.7%, and -20 °C V-type notch impact energy 251 ~ 256 J, and the other quality indexes meet the standard requirements.

Material Index Q355NHC Weathering Steel, Chemical Composition, Controlled Rolling and Cooling

耐候钢是在冶炼过程中添加少量的 Cu、Cr、Ni、P 等防腐性元素, 使其暴露在空气中在表面形成一种致密的锈层, 其耐大气腐蚀性能较普通碳素钢高 2 ~ 8 倍, 且使用时间愈久, 耐蚀作用愈突出^[1]。耐候钢在桥梁、建筑、集装箱、管道等结构钢中占比很高, 目前我国的结构用钢主要采用普通钢材, 需要进行涂装防腐, 具有维护成本高、不环保等缺点^[2]。因而, 近年来耐候结构钢越来越受到重视。

近年来, 武钢、济钢、本钢、通钢、太钢等钢厂已经成功研发了不同级别的耐候钢产品, 其中部分企业已研制出强度级别达到 400 MPa 以上的耐候钢。

本研究借助包钢根据其资源优势、生产线装备优势, 利用 2250 mm 热轧生产线设计开发了耐候结构钢 Q355NHC。

1 耐候钢成分及工艺流程设计

1.1 化学成分设计

由于产品特性和技术标准的需要, 耐候钢对化学成分有着严格的要求。成分设计的思路为采用低 C + 低 P + 低 S 成分体系, 添加 Cu、Cr、Ni 等耐腐性元素, 以同时保证产品的耐蚀性能和焊接、低温冲击性。Q355NHC 钢设计和实际检测的化学成分见表 1。

1.2 生产工艺流程设计

为保证 Q355NHC 钢的力学性能要求, 结合现有生产装备和工艺情况, 采用的生产工艺流程为: 高炉 → KR 脱硫 → 转炉 → LF → 板坯连铸 → 步进式加热炉 → 粗轧高压水除鳞 → 定宽压力机 → 粗轧机 → 飞剪 → 精轧高压水除鳞 → 7 架精轧机 → 加密型层流冷却 → 卷取 → 托盘运输系统 → 取样、检验。

2 耐候钢工业化生产

2.1 冶炼工艺

采用 260 t 转炉完成顶底复吹冶炼工艺, 出钢

表 1 Q355NHC 钢化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of Q355NHC steel / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
标准	0.062 ~ 0.075	0.15 ~ 0.20	1.15 ~ 1.19	0.008 ~ 0.013	0.005 ~ 0.006	0.33 ~ 0.37	0.19 ~ 0.22	0.48 ~ 0.50
检测值	0.068	0.18	1.17	0.010	0.006	0.35	0.21	0.49

温度 $\geq 1\,620\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 LF 精炼工序进行成分微调,同时调整温度,钢中的耐腐蚀元素 Cu、Cr 等合金易使坯壳产生收缩,造成表面纵裂^[3],所以冶炼终点 S 含量 $\leq 0.005\%$ 、P 含量 $\leq 0.015\%$;连铸坯厚度为 230 mm,过热度控制在 $25\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,拉速控制在 $1.0\sim 1.2\text{ m/min}$ 。经过对板坯质量进行冷酸洗抽检,连铸坯中心偏析为 C 类 1.0 级,中心疏松 0.5 级。

2.2 轧制工艺

2.2.1 热轧加热工艺

耐候钢 Q355NHC 成分中含 Cu 元素,其不宜在加热炉中长时间高温存放,以避免 Cu 在 $1\,080\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时在表面富聚,引起钢板表面裂纹^[4]。所以加热过程中严格控制加热工艺参数,保证出炉目标温度。热轧生产过程中的加热制度见表 2。

2.2.2 热轧工艺

热轧轧制过程中,要求其中一架粗轧机的压下量要大于 50%,以确保粗轧结束进入精轧前奥氏体晶粒发生完全再结晶,细化奥氏体晶粒^[5],避免混晶的出现,保证板带性能的均匀性,且轧制过程中必须控制好中间坯的厚度和精轧开轧温度、终轧温度和卷取温度。具体热轧工艺参数要求见表 3。为保证精轧开轧温度、精轧终轧温度,粗轧采用 3+5 模式,精轧轧制后进入层流冷却(隔 1 开 1),后进行钢带卷取,钢带成品尺寸为厚度 8.0 mm $\times$ 宽度 1 200 mm。

3 耐候钢试验结果分析

3.1 显微组织分析

用 Axio observer A1M 光学显微镜(OM)对生产钢带的基体进行显微组织检测,8 mm 带材的金相组织照片见图 1,工业化生产试制的 Q355NHC 耐候钢金相组织为铁素体和珠光体,组织细小均匀,晶粒度为 11.5~12 级。

3.2 力学性能检验分析

生产 8 mm 钢带卷取后冷却至室温,从板宽 $1/4$ 处取横向拉伸试样,在室温下进行拉伸试验,经检验 Q355NHC 耐候结构钢屈服强度平均值为 463.6 MPa,抗拉强度平均值为 552.3 MPa,延伸率平均值为 28.7%,力学性能稳定且富余量足。利用摆锤冲击试验机进行冲击试验,冲击试样尺寸(mm)为 $7.5\times 10\times 55$,缺口类型为 V 型。经检验产品的冲击功平均值为 260 J,均满足标准要求,180°冷弯全部合格。Q355NHC 钢带力学性能

表 2 Q355NHC 钢加热工艺参数

铸坯尺寸/ mm	在炉时间/ min	二加 + 均热 时间/min	均热温度/ $^{\circ}\text{C}$	出炉温度/ $^{\circ}\text{C}$
230	160~230	≤ 90	1 160~1 190	1 150~1 190

表 3 Q355NHC 钢热轧工艺参数

中间坯厚度/ mm	精轧开轧 温度/ $^{\circ}\text{C}$	精轧终轧 温度/ $^{\circ}\text{C}$	卷取温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却模式
35~55	≥ 950	845~875	585~615	层流

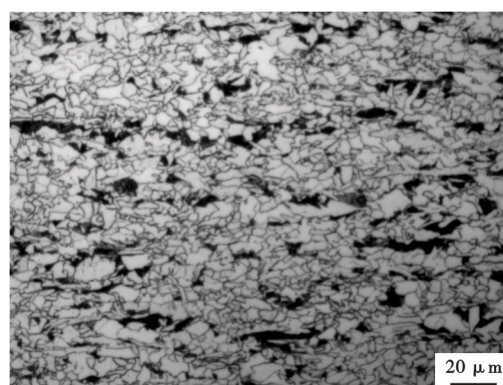


图 1 Q355NHC 钢 8 mm 热轧带材的组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure of Q355NHC steel 8 mm hot-rolled strip

检测结果见表 4。

为检验产品在其他低温下的韧性情况,对生产的钢带进行 0、-20、-40、-60 $^{\circ}\text{C}$ 系列温度的冲击试验,从表 4 可以看出,随着冲击温度的降低,钢带的冲击功值也随着降低,但不同温度下的冲击功值均在 200 J 以上。

从检测的冲击功值可以看出,工业化生产试制的 Q355NHC 产品已达到 Q355NHE 级别。利用 LEOEVO50HV 扫描电镜对 -40 $^{\circ}\text{C}$ 、-60 $^{\circ}\text{C}$ 两个温度下的冲击试样断口进行了观察,由图 2 可见,不同温度下,断口的韧窝尺寸和深度也存在差异^[6]。在 -40 $^{\circ}\text{C}$ 、-60 $^{\circ}\text{C}$ 冲击温度下,冲击裂纹扩展区断口均呈韧窝状,断裂方式为穿晶韧性断裂,韧窝大小不等,韧窝内有螺旋形滑移条纹,说明该处经历过很大

表 4 Q355NHC 钢 8 mm 热轧带材力学性能

编号	屈服强度 (R_{eL})/MPa	抗拉强度 (R_m)/MPa	延伸率 (A)/%	冲击功/J				180°冷弯 $d=2a$
				0 $^{\circ}\text{C}$	-20 $^{\circ}\text{C}$	-40 $^{\circ}\text{C}$	-60 $^{\circ}\text{C}$	
1	447	547	29.0	260.3	245.6	236.4	226.3	合格
2	480	554	29.0	263.3	246.3	239.1	225.3	合格
3	464	556	28.0	260.0	251.2	236.4	224.7	合格
平均值	463.7	552.3	28.7	260.3	247.7	237.3	225.4	-
标准要求	≥ 355	490~630	≥ 22	-	≥ 34	-	-	-

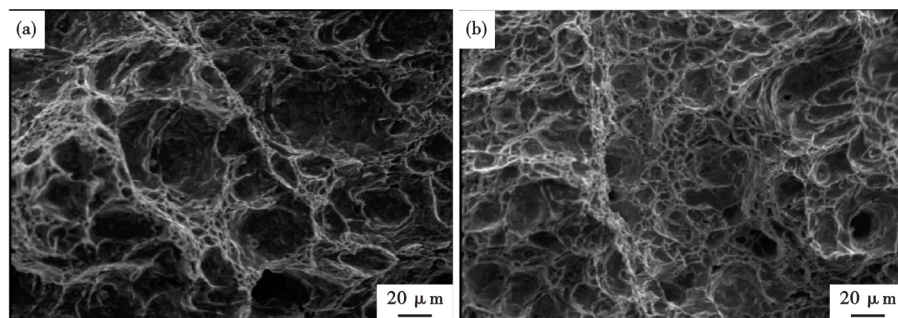


图2 Q355NHC 钢低温冲击断口形貌: (a) -40 °C; (b) -60 °C

Fig.2 Fracture morphology of steel Q355NHC at low temperature impact: (a) -40 °C; (b) -60 °C

的塑性变形均为韧性断口,表明 Q355NHC 钢带的塑性较好。

3.3 夹杂物分析

用 Axio observer A1M 光学显微镜(OM)、EDAX GENESIS 能谱仪对生产钢带的基体进夹杂物及能谱检测,夹杂物类型的级别见表5,夹杂物能谱分析见图3。工业化生产试制的 Q355NHC 钢带夹杂物控制良好,非金属夹杂物含量少,均小于0.5级,说明钢带洁净度高。从图3的能谱分析检测出夹杂物成分主要为 Al_2O_3 。

表5 Q355NHC 钢热轧带材非金属夹杂物类型和级别/级
Table 5 Non-metallic inclusions type and rating in steel Q355NHC hot-rolled steel strip /rating

编号	A	B	C	D	Ds
1 [#]	0.5	0.5	0	0.5	0.5
2 [#]	0.5	0.5	0	0.5	0.5

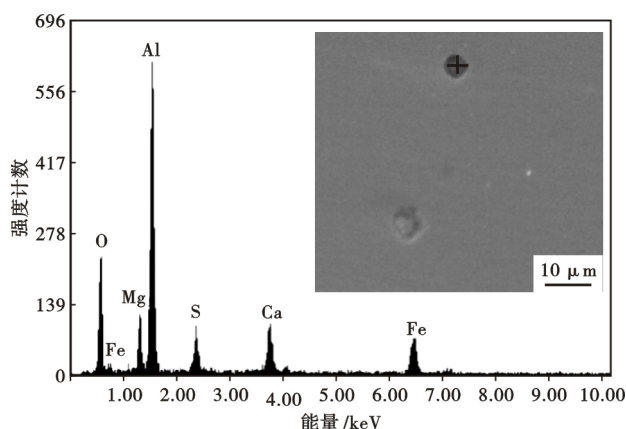


图3 Q355NHC 钢带非金属夹杂物及能谱分析

Fig.3 Non-metallic inclusions and energy spectrum analysis of Q355NHC steel strip

4 产业化应用

小规模工业化生产试制的 Q355NHC 耐候钢各项指标满足要求,根据用户的需要,开展工业化生产。目前 Q355NHC 钢带成分及温度控制稳定,产品质量稳定。用户使用反馈效果良好,实现3 000 t 批量供货。

5 结论

(1) 研制与开发的 Q355NHC 耐候钢的精轧终轧温度为 845 ~ 875 °C,卷取温度为 585 ~ 615 °C,轧制后力学性能指标均满足标准要求。

(2) 工业试制生产出的 Q355NHC 钢带微观组织为铁素体和珠光体,晶粒细小均匀,晶粒度为 11.5 ~ 12 级。低温冲击性能良好,0 °C 低温 V 型冲击功 ≥ 220 J, -20 °C、-40 °C、-60 °C 冲击功 ≥ 200 J,冲击断口形貌成韧窝状,且钢带具有良好的冷加工成型性。

(3) 研制与开发出的 Q355NHC 钢带成分及温度控制稳定,产品质量稳定。用户使用反馈效果良好,实现3 000 t 批量供货。

参考文献

- 钱余海,李自刚.加速腐蚀环境下高强耐候钢 Q450NQR1 的耐腐蚀性能研究 [J]. 宝钢技术,2007(2):5-7.
- 文小明.铁道货车用 Q450NQR1 高强钢的研制开发 [C].第4届中国金属学会青年学术年会论文集.本溪:中国金属学会,2008:156-157.
- 卢晓禹,王少炳,黄利,等.取向硅钢热轧钢带 BTQ001 研制与开发 [J]. 特殊钢,2020,41(5):38-41.
- 黄日东.2250 mm 生产线 520-750MPa 热连轧耐磨钢的研究 [J]. 包头:内蒙古科技大学,2019.
- 卢军辉,王晓春,刘家琪,等.高耐候性 Q450NQR1 货车车厢板的开发 [J]. 钢铁,2013,48(2):75-78.
- 董磊.高强度船板钢 DH36 生产工艺的研究 [J]. 包头:内蒙古科技大学,2019.

黄利(1981-),男,硕士(2017年内蒙古科技大学),高级工程师,板材产品研发。E-mail: hl-49810812@126.com

收稿日期:2021-05-25