Metallurgical Engineering 冶金工程, 2019, 6(3), 133-140
Published Online September 2019 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/meng
https://doi.org/10.12677/meng.2019.63019

Research and Development Practice of Q355GNHE Steel Plate with Low Temperature, Weldability, High Strength, Toughness and Weather Resistance

Zhenzhen Dong, Shaopu Xu, Zhaohai Gao, Hongyang Li, Baiming Pang, Xi Chen

Iron and Steel Research Institute of Nanyang Hanye Special Steel Co. Ltd., Nanyang Henan
Email: 898552174@qq.com

Received: Aug. 12th, 2019; accepted: Aug. 26th, 2019; published: Sep. 2nd, 2019

Abstract

This paper describes the production process of Q355GNHE steel with low temperature, weldability, high strength, toughness and weathering resistance from 60 mm to 95 mm. KR pretreatment, 120 t converter smelting, VD decarbonization, LF refining, VD vacuum treatment, 400 mm wide slab caster casting, 3800 mm four-high rolling mill TMCP (hot mechanical rolling), ACC laminar flow cooling and high temperature of steel plate are used. The low temperature, weldable, high strength, toughness and weathering steel Q355GNHE in TMCP state has been successfully developed and batch production can be achieved.

Keywords

Low Temperature, Easy Welding, High Strength and Toughness, Q355GNHE, Composition Design, TMCP

低温易焊接高强韧耐候用特厚钢Q355GNHE钢板研发实践

董真真，许少普，高照海，李红洋，庞百鸣，陈　熙

南阳汉冶特钢有限公司钢研所，河南　南阳
Email: 898552174@qq.com

收稿日期：2019年8月12日；录用日期：2019年8月26日；发布日期：2019年9月2日

文章引用: 董真真, 许少普, 高照海, 李红洋, 庞百鸣, 陈熙. 低温易焊接高强韧耐候用特厚钢Q355GNHE钢板研发实践[J]. 冶金工程, 2019, 6(3): 133-140. DOI: 10.12677/meng.2019.63019

摘 要

本文论述了60 mm~95 mm低温易焊接高强韧耐候用钢Q355GNHE生产过程，采用铁水KR预处理、120 t转炉冶炼、VD脱碳处理、LF精炼、VD真空处理、400 mm宽厚板坯连铸机浇注、3800 mm四辊轧机TMCP (热机械轧制)、ACC层流冷却、钢板高温缓冷等生产工艺及合理的成分设计，实现了以TMCP状态的60 mm~95 mm低温易焊接高强韧耐候用钢Q355GNHE钢板研发成功，可达到批量化生产。

关键词

低温易焊接高强韧，Q355GNHE，成分设计，TMCP

1. 前言

耐候钢是指加入少量的 Nb、V、P、Cu、Cr、Ni 等合金，在金属基体表面形成保护层，以提高钢的耐磨性、耐高温性和抗疲劳性。易焊接高韧性的耐低温、耐大气腐蚀性能一般是普通结构用钢的 4~6 倍。易焊接高韧性耐候钢不仅具有良好的耐腐蚀性，而且具有优良的成型性、易焊接性、强韧性、塑性等性能。耐候钢的防腐效果主要与合金元素 Cu、P 有关，Cu、P 使钢表面形成致密、强粘附的保护膜，阻碍了锈的扩散和发展，能很快形成致密牢固均匀的锈层保护膜，阻止材料进一步的腐蚀。耐候钢是耐候钢的重要组成部分，由于铜的时效沉淀强化和 Nb、Ti 等元素的合金化，具有高强度、高韧性和良好的焊接性[1]。为提高钢的强度和韧性，耐候钢一般含碳量低，常含有 Cr、Ni、Nb、Ti、V 等合金元素。因此面对公司发展需求，我公司结合现有生产工艺与装备技术进行研制生产低温易焊接高强韧耐候钢。通过铁水 KR 预处理 → 120 t 转炉 → LF 精炼 → VD 真空处理 → 400 mm 宽厚板坯连铸机浇注 → 3800 mm 轧机生产线，实验出了以 TMCP 状态可满足各性能指标、保探伤的 60 mm~95 mm 厚低温焊接高强韧耐候用钢 Q355GNHE，并完全达到批量生产的条件。所研发的 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 低温焊接高强韧耐候用钢具有较高的塑性和低温易焊接高强韧性，在保证强度富裕量的前提下，具有较小的屈服强度波动范围、屈强度比也比较合适等特点。

2. 主要技术控制

2.1. 耐候用结构钢特点

根据耐候钢的用途和环境，需要易焊接性和潮湿环境中长时间的使用，钢中的耐腐蚀合金元素以 Cu、P 为基础，可称为高强韧耐候用钢。这也决定了所研发的 60 mm~95 mm Q355GNHE TMCP 态的低温易焊接高强韧耐候用钢板符合以下要求：

1) 具有高强度和良好的韧性，钢板综合力学性能良好；
2) 具有优质钢的磨蚀、高温、抗疲劳等特性。

2.2. 成分及性能要求

所研发的 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板化学成分、力学性能应符合 GB/T 4171-2008 标准之规定，

60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板力学性能要求见表 1。

Table 1. Mechanical properties of 60 mm~95 mm thick Q355GNHE steel plate
表 1. 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板力学性能

钢板厚度/mm	抗拉强度 Rm/(Mpa)	屈服强度 ReL/(Mpa)	伸长率 A/%	屈强比	−40℃ V 型冲击功 Akv/J
60~95	≥345	490~630	≥22	≤0.85	≥60

2.3. 交货状态及探伤要求

钢板以 TMCP 状态交货，并逐张进行超声波探伤检查，探伤满足 JB/T4730.3-2005 I 级要求。

3. Q355GNHE 研发方案

3.1. 成分设计

Nb 是采用 TMCP 工艺生产低碳高强钢的钢板首选微合金元素，在钢中加入 Nb 时，钢的应变储能显著增加，诱导相变的热力学也随着应变储能的增加而变化。在铁素体晶界上分布着许多诱导沉淀析出的细小碳氮化物，阻止了铁素体的沉淀。成核和生长细化了结构，诱导相变沉淀有利于铌晶粒细化[2]。当仅添加 Nb 合金达不到所需要的强度时，可同时加入 V 合金元素。钢的强韧性由 Nb 含量和 TMCP 工艺条件决定。V 合金在成形和层流冷却过程中析出和析出 V，以提高钢的强度，而不会明显破坏钢的韧性。铌、钒微合金元素还可以抑制加热过程中的奥氏体再结晶，防止奥氏体晶粒长大，并在轧制和冷却后细化晶粒。此外，镍合金能显著提高钢的低温韧性，而且还具有一定的耐腐蚀性，不仅耐酸，而且耐碱。Cr 在钢中能显著增加钢的抗氧化作用，从而改善钢的抗腐蚀能力，同时也能提高钢的硬度和强度。采用 Nb、V、Ni、Cr 和 TMCP 工艺进行强化，可降低 C 含量和碳当量，使得材料具有良好的焊接性能。综上所述，采用 TMCP 交货状态的 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板的化学成分设计见表 2。

Table 2. 60 mm~95 mm thick Q355GNHE steel plate chemical composition design (mass fraction)
表 2. 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板化学成分设计(质量分数)

钢种	技术条件	范围	C	Si	Mn	P	S	Als	Cu	Cr	Ni	Nb	V	I 系数
		最小	/	0.2	/	0.07	≤0.020	0.015	0.2	0.3	/	/	/	5.7
		最大	0.12	0.75	1	0.15		/	0.55	1.25	0.65	/	/	/
Q355GNHE	内控	最小	0.08	0.25	0.85	≤0.080	≤0.005	0.018	0.28	0.40	0.25	0.025	0.030	6.4
		最大	0.11	0.40	0.95			0.035	0.34	0.60	0.35	0.035	0.045	7.4
	目标		**0.095**	**0.30**	**0.90**	**0.075**	**0.003**	**0.025**	**0.31**	**0.50**	**0.30**	**0.03**	**0.038**	**6.8**

3.2. 工艺流程

铁水 KR 预处理、120 t 转炉、VD 脱碳、LF 精炼、VD 真空脱气、浇注、钢坯加热、除鳞——3800 mm 四辊轧机 TMCP 热机械轧制、ACC 冷却、钢板高温缓冷、表面检查、精整、探伤、性能检测、入库。

3.3. 冶炼浇注工艺

为获得良好的高强韧、低温焊接性能，须控制好钢水中 S、H、O、N 及夹杂物含量。提高钢的纯度可以降低钢的方向性，钢液的夹杂物含量对钢板探伤及性能起重要作用。为保证生产和使用低温易焊高

强度高韧性钢，对夹杂物要求较高。要求生产该钢种系列的 O ≤ 0.0030%，H ≤ 0.0002%，N ≤ 0.0050%，S ≤ 0.010%。转炉操作严格控制终点 C 含量在 0.05%~0.07%，强化挡渣防止下渣造成夹杂物超标。冶炼时 LF 精炼过程以造白色泡沫渣为主，LF 精炼 AlS 控制 0.030%~0.040%之间，保证脱氧充分，脱氧剂以使用适量的电石、萤石球、铝块等，LF 过程达到白色泡沫渣效果。VD 真空脱气过程阀后真空控制 65 Pa~75 Pa 之间，保压时间按 18 min~22 min 之间。连铸浇注采用低温慢浇氩气保护浇注。

3.4. 加热轧制控冷工艺

因炉气中含有大量 CO_2、H_2O 和过剩 O_2 等氧化性，钢的表面发生氧化形成生氧化铁皮，必须对坯料加热温度及加热速率进行合理的调控。一合理的对炉内气氛进行调控，保证炉内燃烧充分；二有效减少加热时间即减少坯料炉在炉时间。为了抑制氧化铁皮过量增长，采用低温烧钢工艺可以从有效解决的氧化铁皮增多[1]。另外此钢种 Ni 的加入可以改善 Cu 在钢中的热脆性，并对钢的韧性大有提升。此钢种钢坯在加热炉内加热时，Nb 的 NbC 应变诱发沉淀阻碍变形奥氏体的恢复和再结晶，阻止奥氏体晶界高温增大，形成了更加细小的再结晶晶粒。钢坯具体加热工艺为预热段温度控制小于 980℃，二加热段温度 1180℃~1200℃，均热段温度 1170℃~1190℃，铸坯加热时间 10~12 min/cm，加热温度严禁超过 1210℃。为了减少钢坯加热出炉后的钢坯表面氧化铁皮钢坯出钢前，先除磷一次，再进加热炉加热 5~10 mim (即二次回炉暖钢)再次除磷。钢坯表面氧化铁皮面积约 1%~3%，为轧制时提供了良好的基础。

粗轧阶段轧制，在结晶区合适的压下量进行高温轧制，开轧温度 980℃~1050℃。此时，奥氏体晶粒随轧制温度慢慢的进行细化，并反复破碎和再结晶逐渐变细。为了实现晶粒结构的完全破碎和钢坯芯部缺陷的最大焊接，必须加大道次变形量保证轧制变形能有效地传递到超厚钢板的芯部。

精轧阶段控温轧制，在奥氏体未再结晶区的精轧阶段进行控温轧制，此时轧后的奥氏体晶粒得到了有效的抑制，因此，随着轧制道次的增加，变形后的奥氏体晶粒沿轧制方向逐渐拉长，在变形后的奥氏体晶粒中形成大量的变形带和位错。变形奥氏体的晶界、变形带和位错是铁素体的形核点[3]。随着变晶粒形核变形量的扩大，变形带数量增多，分布更加均匀。未再结晶区轧制的累积形变量不低于 60%，相变获得的铁素体晶粒产生塑性变形，以进一步提高钢板的强度及韧性。晾钢厚度 150 mm，晾钢结束，790℃~820℃之间再次多个小道次轧制，确保后每道次压下率控制在 16%~18%之间，终轧温度控制 770℃~800℃之间。

钢板轧制后进入 ACC 层流冷却装置进行快速冷却，防止或延缓了碳化物在冷却过程中过早析出，使碳化物在铁素体中分散析出，提高了强度，提高了钢的塑性、韧性等综合力学性能。钢板入水温度控制 ≥ 750℃，返红温度控制在 580℃~620℃，冷速控制在 9℃/s~11℃/s，可以多次冷却。

3.5. 堆冷工艺

钢板高温堆冷可缓解轧制过程和冷却过程中产生的机械应力、相变应力、温度应力，同时也促进了钢中 H 的扩散，减少因 H 扩散不均匀引起的钢板内部质量问题，提高钢板的韧性和减少干板内部缺陷。钢板高温缓冷温度控制在 420℃~450℃，钢板下线后堆冷时间 ≥ 72 小时，钢板温度降至 200℃以下后可拆垛。

4. 实验结果简析

4.1. 成分及性能检验结果

使用 LAB-LAVFC01A 真空直读光谱仪、WE1000 液压万能材料试验机、JB-300 冲击试验机对钢板化学成分及性能检测数据见表 3、表 4。

Table 3. 60 mm~95 mm thick Q355GNHE steel plate composition (mass fraction, %)
表 3. 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板成分(质量分数，%)

钢种	厚度 (mm)	化学成分												
		C	Si	Mn	P	S	Als	Cu	Cr	Ni	Nb	V	CEV	I 系数
Q355GNHE	60~95	0.10	0.30	0.94	0.078	0.001	0.037	0.301	0.42	0.30	0.033	0.037	0.401	6.4

Table 4. 60 mm~95 mm thick Q355GNHE steel plate mechanical properties and low temperature impact test data
表 4. 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板力学性能及加低温冲击做性能检测数据

钢种	厚度 mm	屈服强度 MPa	抗拉强度 Mpa	伸长率%	位置	−40℃冲击功 J			−60℃冲击功 J			−80℃冲击功 J		
Q355GNHE	60	415	543	26.0	纵向	289	274	286	271	240	266	195	171	162
Q355GNHE	60	400	534	27.0	纵向	280	279	261	259	244	246	197	212	235
Q355GNHE	60	415	543	26.0	横向	150	125	155	130	132	100	/	/	/
Q355GNHE	95	392	550	25.0	纵向	277	285	279	248	230	228	214	203	197
Q355GNHE	95	384	524	30.0	纵向	264	270	275	278	262	252	209	212	208
Q355GNHE	95	392	550	25.0	横向	168	163	153	108	113	136	/	/	/

由上表可知，所冶炼的 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板碳当量为 0.401，耐大气腐蚀系数 I 为 6.4，为钢板焊接性能、低温韧性、耐大气腐蚀性能提供保障。通过 TMCP 工艺生产的 Q355GNHE 钢板性能优异，各项指标均远超过 GB/T 4171-2008 标准的规定。其中屈服、抗拉强度富裕量超过 30MPa，−40℃冲击功超过 270J 以上，−60℃冲击功超过 230J 以上，−80℃冲击功超过 160 J。钢板超声波探伤检验符合 JB/T4730.3-2005 I 级要求要求。

4.2. 高倍结果分析

使用德国卡尔蔡司 A1m 显微镜分别对 60 mm、95 mm 厚钢板取样进行晶粒度、内部组织和夹杂类型检测，检测数据见表 5，内部组织见图 1。

Table 5. 60 mm~95 mm thick Q355GNHE steel plate high power test data
表 5. 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板组织检测数据

厚度 (mm)	硫化物		氧化物		硅酸盐		球状氧化物		晶粒度	带状组织	表面处组织
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗			
60	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0	9.0~10.0	0	F60% + P20% + B20%
95	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0	9.0	0	F65% + P20% + B15%
厚度 (mm)	硫化物		氧化物		硅酸盐		球状氧化物		晶粒度	带状组织	厚度 1/2 处组织
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗			
60	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0	9.0~10.0	0	F80% + P20%
95	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0	9.0~10.0	0.5	F80% + P20%
厚度 (mm)	硫化物		氧化物		硅酸盐		球状氧化物		晶粒度	带状组织	厚度 1/4 处组织
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗			
60	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0	9.0	0	F80% + P20%
95	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0	9.0~10.0	0.5	F80% + P20%

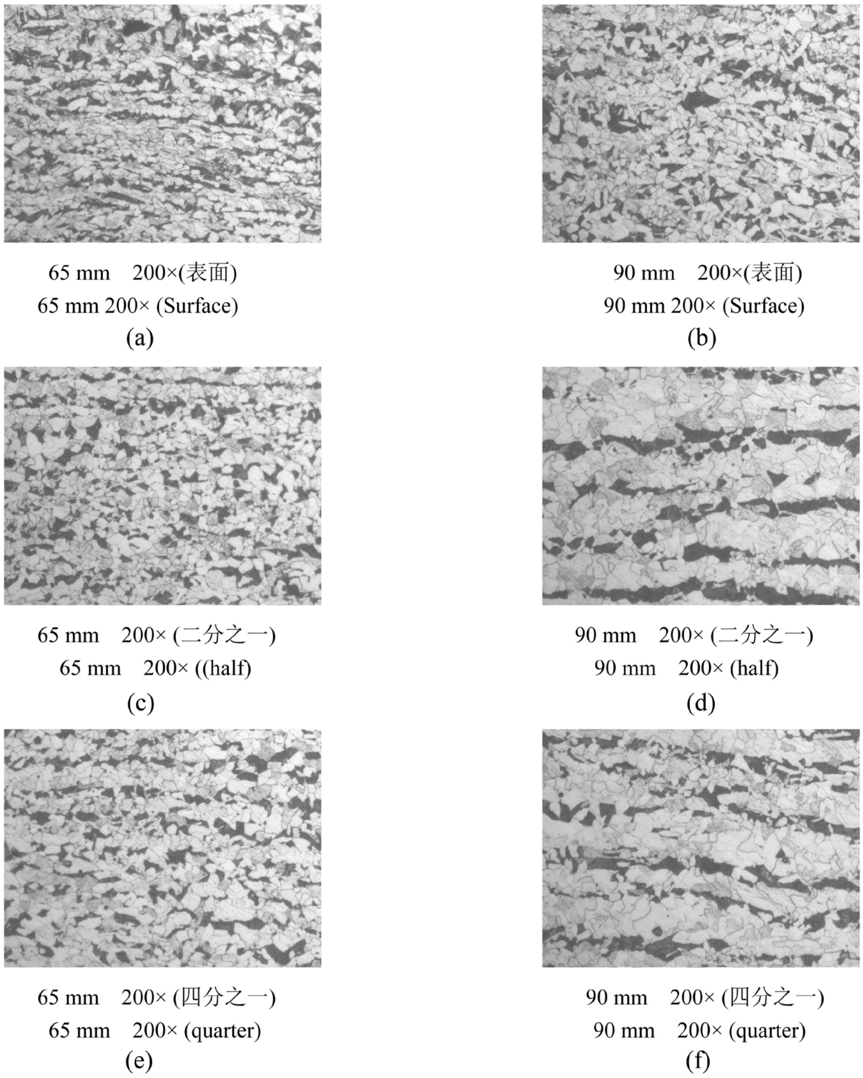


Figure 1. Q355GNHE metallographic image
图 1. Q355GNHE 金相组织图片

从表 5 可以看出，钢板中夹杂物含量低，各类夹杂物含量总和 ≤ 1.5，经控轧控冷工艺的特厚钢板，对 60 mm 钢板来说，表面、1/4、1/2 处组织晶粒度细小，为 9.0 级~10.0 级，带状组织 0.5 级，厚度方向组织差异小。但对于 95 mm 厚度钢板来说，1/4、1/2 处组织晶粒度细小，但存在轻微带状组织，厚度方向组织差异大于 60 mm 钢板，这与控制轧制和冷却过程厚板心部形变及冷却速度小于表面有关。综合来看，通过 Nb、V、Cr、Ni、Cu 等复合微合金化和控轧控冷工艺相结合生产的 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板，钢板内部组织结构均匀、晶粒度细小、带状条轻微，满足钢板指标要求。

5. 大气曝晒腐蚀试验分析

其中 Q345 是南阳汉冶特钢有限公司生产的低合金钢，Q355GNHE 是南阳汉冶特钢有限公司生产的耐候钢根据合金元素对其耐腐蚀性能的影响，在 Q355GNHE 钢中添加了适量的 Cu、Cr、Ni 等元素。

本次实验耐候钢的腐蚀性能主要在南阳汉冶特钢有限公司办公楼附近，四季交替，气候变化适合耐候钢的腐蚀实验。实验时间 2017 年 8 月~2018 年 11 月。实验钢的实际成分质量分数见表 6。

Table 6. Chemical compositions of experimental steels (%)
表 6. 实验钢的成分质量分数(%)

钢种	化学成分										
	C	Si	Mn	P	S	Als	Cu	Cr	Ni	Nb	V
Q355GNHE	0.10	0.30	0.94	0.078	0.001	0.037	0.301	0.42	0.30	0.033	0.037
Q345	0.167	0.30	1.44	0.015	0.005	0.018	/	/	/	0.011	0.030

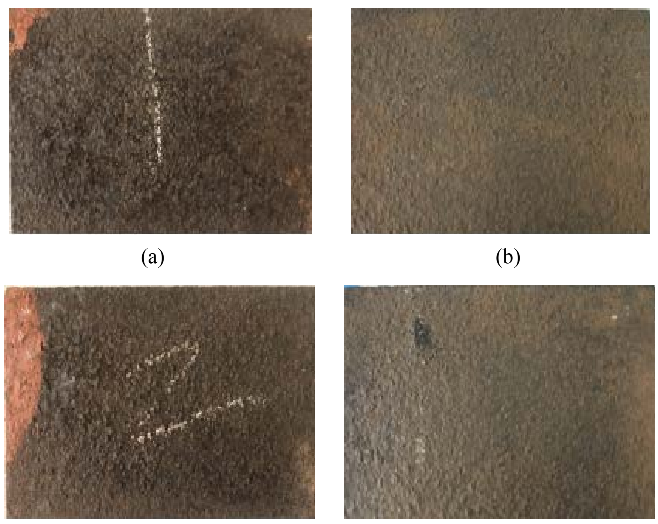
使用小天秤分别对实验试块腐蚀前、腐蚀后进行称重，小天枰精确度显示小数点后两位；使用量程范围 0~150 mm 精度为 0.02 mm 分别实验试块腐蚀前、腐蚀后进行测量厚度，称重和厚度变化数据对比如表 7。

Table 7. Result of atmospheric exposure test (thinning contrast)
表 7. 大气曝晒腐试验的结果(厚度减薄对比)

大气曝晒称重对比			大气曝晒厚度对比		
钢种	腐蚀前	腐蚀后	钢种	腐蚀前	腐蚀除锈后
Q345	1.18 Kg	1.20 Kg	Q345	60.50	60.02
Q355GNHE	1.18 Kg	1.90 Kg	Q355GNHE	60.50	60.18

根据腐蚀速度的计算公式：X = (试片试前称重 − 试验后试片称重) × 876,000 (计算常数)/(试片表面积 * 试验时间 * 试片材质密度) mm/a，单位换算后，得出 Q345 和 Q355GNHE 腐蚀速率分别为 0.0025 mm/a 和 0.0007 mm/a；注：试片材质密度按 7.84/cm^3。

从图 2(a)~(d)和表 7 和表 8 可以看出，同等条件下的大气曝晒腐 Q345 锈蚀层比 Q355GNHE 锈蚀层严重；Q345 锈蚀层除锈后厚度与 Q355GNHE 锈蚀层除锈后厚度薄；Q345 腐蚀速率比 Q355GNHE 腐蚀速率快。



(a) (b) (c) (d)

Figure 2. Surface decay in atmospheric exposure test. (a) Q355GNHE corrodes the front surface of rust removal; (b) Q355GNHE corroded and rust removal surface; (c) Q345 corrodes the front surface of rust removal; (d) Q345 corrodes the surface after rust removal
图 2. 大气曝晒腐试验的表面腐。(a) Q355GNHE 腐蚀除锈前表面；(b) Q355GNHE 腐蚀除锈后表面；(c) Q345 腐蚀除锈前表面；(d) Q345 腐蚀除锈后表面

Table 8. Result of atmospheric exposure test (corrosion rate calculated)
表 8. 大气曝晒腐试验的结果(腐蚀速率通过计算得知)

地点	气候特征	腐蚀速率 mm/a (毫米/年)	
		Q345	Q355GNHE
办公楼	工业气候	0.0025	0.0007

6. 结论

1) 通过合理的成分调控和生产工艺，成功研发了 60 mm~95 mm 厚 TMCP 交货状态的 Q355GNHE 钢板，该钢板各项性能对比标准均有较大富余量，尤其−80℃冲击功均超过 160 J，具备良好了的低温易焊接性。其钢板超声波探伤检验符合 JB/T4730.3-2005 标准 I 级要求。

2) 经过对钢板内部组织结构进行检测，钢板中夹杂物及夹杂物总量均较低，通过 Nb、V、Cr、Ni、Cu 等复合微合金化、钢坯低温加热、控轧控冷等工艺相结合生产的 60 mm~95 mm 厚 Q355GNHE 钢板，钢板内部组织结构均匀、晶粒度细小、带状条轻微，满足钢板指标要求。

3) 耐大气腐蚀实验的结果表明南阳汉冶特钢有限公司生产的 Q355GNHE 其耐腐蚀性要明显优于普通钢 Q345；Q355GNHE 的年腐蚀速率为 0.0007 mm/a，符合用户对耐候的使用要求。

参考文献

[1] 陈勇. 耐候钢的发展及开发中的关键技术浅析[J]. 新疆钢铁, 2006, 100(4): 1-3.
[2] 谢天舒. 铌对耐候钢连续冷却转变组织、析出规律的影响[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
[3] 陈健就, 贺达伦. 现代化宽厚板厂控制轧制和控制冷却技术[J]. 宝钢技术, 1999(2): 10-16.