

# 210 t BOF-LF-RH-300 mm 板坯 CC 流程高韧性 Q420qE 钢板的研发

姜颖<sup>1</sup> 徐华<sup>2</sup> 黄微涛<sup>1</sup> 向浪涛<sup>1</sup>

(重庆钢铁股份有限公司 1 制造管理部(技术中心); 2 综合管理部, 重庆 401220)

**摘要** 为满足桥梁结构用 Q420qE 钢板抗拉强度  $R_m \geq 540$  MPa、 $-40$  °C V 型冲击功  $\geq 120$  J 的要求, 通过采用 0.05 ~ 0.11C, Nb-Ti 微合金化成分设计以及深脱硫模式、LF + RH 精炼和电磁搅拌等工艺, 确保 300 mm × 2 010 mm 铸坯质量良好。利用 TMCP (thermomechanical control process) 轧制工艺, 轧后堆垛缓冷, 研发 Q420qE 钢 18 ~ 26 mm 板的屈服强度 446 ~ 580 MPa, 抗拉强度 577 ~ 727 MPa, 伸长率 19.0% ~ 28.5%,  $-40$  °C 冲击吸收功 129 ~ 287 J, 各项性能指标均符合国标要求。

**关键词** Q420qE 钢板 高韧性 低碳 TMCP 堆垛缓冷

## Research and Development of Q420qE Steel Plate with High Toughness by 210 t BOF-LF-RH-300 mm Slab CC Flow Sheet

Jiang Ying<sup>1</sup>, Xu Hua<sup>2</sup>, Huang Weitao<sup>1</sup> and Xiang Langtao<sup>1</sup>

(1 Manufacturing Management Department (Technical Center);

2 General Management Department, Chongqing Iron and Steel Co Ltd, Chongqing 401220)

**Abstract** In order to meet the tensile strength  $R_m \geq 540$  MPa and  $-40$  °C V-type impact energy  $\geq 120$  J requirements on Q420qE steel plate for bridge structure, the design with 0.05 ~ 0.11C and Nb-Ti microalloying is adopted. The deep desulfurization mode, LF + RH refining and electromagnetic stirring etc processes are used to ensure the good quality of 300 mm × 2 010 mm cast slab by using TMCP (thermomechanical control process) technology and rolled plate stacked cooling, of developed Q420qE steel 18 ~ 26 mm plate, the yield strength is 446 ~ 580 MPa, the tensile strength is 577 ~ 727 MPa, the elongation is 19.0% ~ 28.5%, and the impact absorption work at  $-40$  °C is 129 ~ 287 J to meet the requirements of national standards.

**Material Index** Q420qE Steel Plate, High Toughness, Low Carbon Design, TMCP, Stacking Slow Cooling

近年来,随着我国经济快速发展带动了桥梁的建设,对桥梁用钢的需求进一步增加,且对桥梁钢的性能要求也逐步提高。因此,研发高强度、高塑性,同时具有良好耐候性和焊接性的桥梁钢板已成为桥梁钢发展的大趋势<sup>[1-2]</sup>。为了适应市场的需求,钢厂结合自身现有技术装备水平,成功研发了高韧性 Q420qE 钢板。

### 1 化学成分设计

为保证钢板具有高强度、高塑性,以及良好的焊接性和耐大气腐蚀性能,化学成分设计采用低碳、微合金化设计思路<sup>[1,3,4]</sup>。采用 Nb、Ti 复合添加,起到细化晶粒和沉淀强化的作用,且 Ti 还可以改善钢的焊接性能<sup>[5]</sup>。Al 在钢水精炼过程中起到脱氧作用,提高钢的洁净度,而且固定 N 元素,防止钢板应

变时效<sup>[6]</sup>。添加适量的 Cr、Ni、Cu 合金元素,提高锈层致密性,增强耐大气腐蚀能力,添加 Mo 微合金元素以改善焊接性能。为使钢板具有良好的塑性,严格控制 P、S 等有害元素的含量。Q420qE 钢化学成分设计见表 1。

### 2 工艺设计及控制

工艺路线:KR 脱硫→210 t 顶底复吹转炉冶炼→双工位 LF→双工位 RH→连铸板坯(300 mm × 2 010 mm)→铸坯冷却→铸坯加热→高压水除鳞→粗轧→中间冷却→精轧→层流冷却→矫直→堆垛缓冷→精整→入库。

#### 2.1 炼钢工艺

(1)铁水预处理。KR 脱硫采用深脱硫模式,保证铁水入转炉 S 含量  $\leq 0.005\%$ 。

表 1 Q420qE 钢化学成分设计 / %  
Table 1 Chemical composition design of Q420qE steel / %

C	Si	Mn	P	S	Als	Ni	Cr	Cu	Mo	Nb	Ti
0.05 ~ 0.11	0.25 ~ 0.35	1.50 ~ 1.65	$\leq 0.020$	$\leq 0.010$	0.015 ~ 0.045	0.20 ~ 0.30	0.30 ~ 0.40	0.10 ~ 0.30	0.090 ~ 0.110	0.030 ~ 0.040	0.010 ~ 0.020

(2) 转炉冶炼。冶炼前期加入稀有合金 FeMo、Cu 板、Ni 板, 冶炼终点温度  $\geq 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 终点氧含量  $\leq 0.10\%$ , 终点成分目标  $0.05\% \sim 0.07\% \text{ C}$ ,  $\text{P} \leq 0.015\%$ ,  $\text{S} \leq 0.010\%$ ; 转炉出钢过程采用强脱氧工艺, 合金化时加入 FeCr, 成分目标  $0.25\% \text{ Si}$ 、 $1.50\% \text{ Mn}$ 、 $0.030\% \text{ Als}$ 、 $0.100\% \text{ Mo}$ 、 $0.25\% \text{ Ni}$ 、 $0.20\% \text{ Cu}$ 、 $0.35\% \text{ Cr}$ , 其余残余元素达到标准。出钢全程钢包吹氩, 按规使用挡渣帽、挡渣锥进行挡渣操作, 确保挡渣效果良好, 防止回 P, 出钢完后加入稠渣剂、冶金石灰, 在钢包渣面上加入 30 kg 铝粒进行顶渣改质。

(3) LF。LF 精炼主要进行温度补偿、埋弧造渣和微合金化操作, 白渣精炼时间  $\geq 15\text{ min}$ , 保证出站钢水中  $\text{S} \leq 0.002\%$ , 成分目标  $0.035\% \text{ Nb}$ 、 $0.015\% \text{ Ti}$ 。

(4) RH。RH 采用本处理模式, 极限真空度  $\leq 273\text{ Pa}$ , 钢水循环时间  $\geq 20\text{ min}$ , 纯脱气时间  $\geq 5\text{ min}$ , 钙处理过程轻吹氩时间  $\geq 5\text{ min}$ , 有效脱除钢液中的 H、O、N 气体, 成分微调, 确保成分达到目标。

(5) 连铸。钢包至中间包采用长水口保护浇注, 严格控制连铸过程工艺, 过热度  $15 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 二冷采用弱冷参数, 结晶器电磁搅拌电流  $> 400\text{ A}$ , 拉速  $0.9\text{ m/min}$ , 结晶器液面波动  $\leq 3\text{ mm}$ 。

## 2.2 TMCP 工艺

TMCP 工艺被广泛应用于桥梁钢的生产, 通过合理控制加热和温度制度、变形制度, 使变形与相变相结合, 最终获得细小晶粒, 并且在控制轧制后合理控制钢板的冷却可以改善组织和性能, 控制轧制和控制冷却相结合的方式可获得良好的综合力学性能。

(1) 加热。铸坯的加热过程既要保证合金元素的充分溶解, 发挥其在加热过程中阻止奥氏体晶粒长大的作用, 且温度又不能过高, 防止奥氏体晶粒粗大。因此综合考虑铸坯的化学成分、钢板的性能要求以及现有设备能力, 参照 Nb、Ti 的固溶温度, 控制铸坯加热时间  $> 4\text{ h}$ , 出炉温度  $1050 \sim 1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 控制轧制。为获得细小的晶粒, 采用两阶段控制轧制, I 阶段在奥氏体再结晶区进行粗轧, 粗轧过程应采用高温、大压下率, 使奥氏体晶粒发生再

结晶充分细化, 并使变形深入到钢板芯部; II 阶段在未再结晶区进行精轧, 精轧过程应尽量采用大的累计变形量, 并控制精轧终轧温度, 从而产生大量均匀的变形带和位错亚结构等缺陷, 为相变提供更多形核位置, 从而获得均匀细小的晶粒。因此, 粗轧开轧温度  $\geq 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 粗轧终轧温度  $\geq 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 中间坯厚度为 3.0 倍成品厚度, 粗轧总压下率  $74\% \sim 82\%$ ; 精轧采用 7 ~ 9 道次轧制, 精轧开轧温度  $860 \sim 910\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 精轧终轧温度  $820 \sim 840\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 精轧总压下率  $67\%$ 。

(3) 控制冷却。为抑制钢板在轧制后晶粒长大, 钢板要尽快运送至层流冷却装置进行控制冷却, 增加铁素体形核, 细化铁素体晶粒。设置上下集管冷却水量比为  $1:1.9 \sim 2.1$ , 辊速  $1.5\text{ m/s}$ , 返红温度控制在  $610 \sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.3 堆垛缓冷工艺

有研究表明, 钢板下线后堆垛缓冷可以减少或消除 TMCP 钢板存在的内应力和组织的不均匀性<sup>[7-8]</sup>, 使钢板塑韧性得到提高。因此钢板矫直后快速下线进行堆垛缓冷, 堆冷温度  $\geq 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 堆冷时间  $\geq 24\text{ h}$ , 并且要求堆垛摆放整齐。

## 3 试制结果及分析

### 3.1 化学成分

$300\text{ mm} \times 2010\text{ mm}$  断面连铸坯的化学成分达到预期设定要求, 实际熔炼化学成分见表 2。

### 3.2 力学性能及工艺性能

按相关要求对成品厚度 18、22、26 mm 钢板取样进行力学性能测试, 拉伸试验取纵向试样, 冲击试验取纵向试样, 弯曲试验取横向试样。钢板的各项指标检测均符合国标 GB/T 714-2015 要求, 结果见表 3。

钢中的 C 元素在 Fe 中形成间隙固溶体, 在位错附近聚集形成柯氏气团钉扎位错, 提高屈服强度和抗拉强度。Mn、Si、Cr、Ni、Cu、Mo 形成置换固溶体, 同样提高钢板屈服强度和抗拉强度, 并且置换式溶质原子造成的畸变比较小, 因此在提高强度的同时对塑性和韧性的损害小。Nb、Ti 元素形成高度弥

表 2 Q420qE 钢熔炼化学成分 / %  
Table 2 Smelting chemical composition of Q420qE steel / %

数值	C	Si	Mn	P	S	Als	Ni	Cr	Cu	Mo	Nb	Ti
实测值	0.07 ~ 0.09	0.26 ~ 0.33	1.52 ~ 1.60	0.008 ~ 0.018	0.002 ~ 0.008	0.025 ~ 0.044	0.20 ~ 0.26	0.31 ~ 0.40	0.18 ~ 0.21	0.090 ~ 0.108	0.030 ~ 0.036	0.013 ~ 0.018
平均值	0.08	0.29	1.55	0.013	0.005	0.032	0.23	0.34	0.20	0.097	0.034	0.016

表3 Q420qE 钢的力学性能及工艺性能(实测值)  
Table 3 Mechanical properties and technological properties of Q420qE steel (measured value)

试样	钢板厚度/ mm	屈服强度 ( $R_{e1}$ )/MPa	抗拉强度 ( $R_m$ )/MPa	断后伸长率 ( $A$ )/%	屈强比 $R_{e1}/R_m$	180° 弯曲试验	-40 °C V型(纵向) 冲击功 /J
1#	18	446 ~ 575	577 ~ 691	20.5 ~ 28.0	0.70 ~ 0.85	完好	165 ~ 263
2#	22	446 ~ 553	604 ~ 687	19.5 ~ 28.5	0.70 ~ 0.82	完好	191 ~ 275
3#	26	452 ~ 580	591 ~ 727	19.0 ~ 25.5	0.68 ~ 0.85	完好	129 ~ 287
GB/T 714-2015	18 ~ 26	$\geq 420$	$\geq 540$	$\geq 19$	-	$D=3a$	$\geq 120$

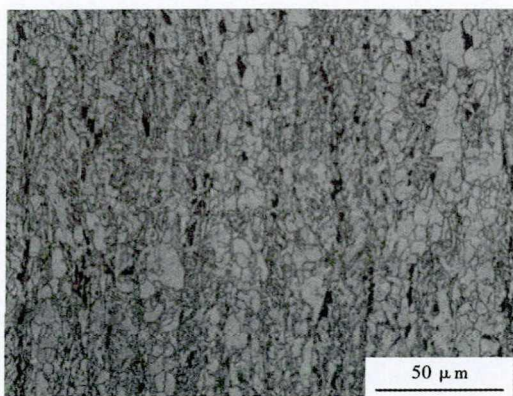


图1 Q420qE 钢 18 ~ 26 mm 板金相显微组织形貌  
Fig.1 Metallographic microstructure of Q420qE steel 18 ~ 26 mm plate

散的碳氮化物小颗粒,对奥氏体晶界起到固定作用,加热时阻止原始奥氏体晶粒长大,在轧制过程中抑制奥氏体再结晶,扩大奥氏体未再结晶区,轧后的快速冷却防止了变形奥氏体在相变前的冷却过程中长大,同时铁素体形核点增加,大的冷却速度也抑制了铁素体晶粒的长大,因此铁素体晶粒得到细化;并且在相变过程中,这些碳氮化物达到高度过饱和,快速析出,起到沉淀强化的作用<sup>[9]</sup>。晶粒细化不但提高钢板的强度,同时由于细小晶粒的晶粒内部和晶界附近的应变相差较小,变形比较均匀,因应力集中引

起开裂的机会相对较小,在断裂之前能承受更大的变形量,所以钢板的伸长率较好。晶粒细化使晶界数量增多,阻碍裂纹扩展的阻力增加,断裂过程中吸收更多能量,即具有较高韧性<sup>[10]</sup>。控制冷却后,钢板进行堆垛缓冷,减少了内应力,对提高钢板塑性和韧性有利。因此,研发的桥梁结构用钢板 Q420qE 具有良好的强度和塑韧性。

### 3.3 显微组织

取样进行金相观察,显微组织为铁素体+珠光体+少量粒状贝氏体,晶粒度 10 ~ 11 级,金相显微组织形貌如图 1 所示。

## 4 结论

(1)通过合理设计化学成分、炼钢工艺、控轧控冷工艺及堆垛缓冷工艺,结合生产实际,严格执行生产工艺要求,成功研发出 18 ~ 26 mm 高韧性 Q420qE 钢板。

(2)研发的 Q420qE 钢板其屈服强度 446 ~ 580 MPa,抗拉强度 577 ~ 727 MPa,伸长率 19.0% ~ 28.5%, -40 °C 纵向冲击功 129 ~ 287 J,屈强比 0.68 ~ 0.85,钢板具有较高的强度和塑韧性,且屈强比较低,综合力学性能良好。

### 参考文献

- [1] 朱旭明. 首秦公司高性能桥梁钢 Q420qE 的开发[D]. 秦皇岛:燕山大学,2015:1-13.
- [2] 刘宝喜,高彩茹,郑文超,等. 高韧性桥梁钢 Q420qD 的开发[J]. 中国冶金,2018,28(2):67-72.
- [3] 袁少威,许少晋,刘庆波,等. 80 mm 桥梁用抗层状撕裂 Q420qE-Z35 钢板的试制[J]. 中国冶金,2013,23(6):26-29.
- [4] 孔雅. Q420qE 厚规格钢板 TMCP 工艺开发及应用[J]. 轧钢,2018,35(3):82-83.
- [5] 李恒坤,崔强,邓伟,等. 500 MPa 级高性能桥梁结构用钢的研发[J]. 宽厚板,2016,22(1):5-10.
- [6] 谢华. 高延伸率热轧深冲钢的生产实践[J]. 轧钢,2001,18(2):22-24.
- [7] 郑磊,付中原. 桥梁板 Q420qD-Z25 生产实践[J]. 轧钢,2017,34(1):81-83.
- [8] 张少凯,张觉灵,杨海西,等. 低温高冲击 Q420qE 钢中厚板的研发[J]. 河北冶金,2012(5):9-11.
- [9] 王有铭,李曼云,韦光. 钢材的控制轧制和控制冷却[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:3-85.
- [10] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007:162-185.

姜颖(1989-),女,硕士(2015年长春工业大学),工程师,2012年东北大学(本科)毕业,热轧产品工艺技术研究。  
E-mail:920299871@qq.com

收稿日期:2020-09-02