

· 试验研究 ·

新型 V-Ti-B 微合金化调质 Q690E 钢板的开发

陈振业^{1,2} 王会岭³ 赵燕青² 杨浩² 陈起³

(1. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819; 2. 河钢集团钢研总院工艺研究所, 石家庄 050023; 3. 河钢集团舞阳钢铁有限责任公司科技部, 平顶山 462500)

摘要 通过低碳及“Mn-Cr-Mo-B-V-Ti”微合金化成分设计及轧制、热处理工艺选择, 成功开发出工程机械用 Q690E 钢板(/% : 0.10 ~ 0.15 C, 0.20 ~ 0.40 Si, ≤ 0.015 P, ≤ 0.005 S, 0.30 ~ 0.40 Cr, 0.20 ~ 0.30 Mo, 0.035 ~ 0.045 V, 0.01 ~ 0.02 Ti, 0.001 ~ 0.002 B)。Q690E 钢板 880 ~ 910 °C 淬火 + 570 ~ 610 °C 回火的微观组织为回火索氏体, 屈服强度 811 ~ 891 MPa, 抗拉强度 852 ~ 938 MPa, -40 °C 冲击功在 132 ~ 167 J, 满足 GB/T16270-2009 对 Q690E 工程机械用钢力学性能的要求, 结果满足用户严格使用要求, 同时降低了生产成本。

关键词 低成本 调质 热处理 力学性能

Research and Development of New V-Ti-B Microalloyed Quenching and Tempering Q690E Steel Plate

Chen Zhenye^{1,2}, Wang Huiling³, Zhao Yanqing², Yang Hao² and Chen Qi³

(1 State Key Laboratory of Rolling Technology and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819; 2 The Centre Iron and Steel technology research institute of HBIS, Shijiazhuang 050023; 3 Department of Science and Technology, Hebei Iron and Steel Group, Wuyang Iron and Steel Co Ltd, Pingdingshan 462500)

Abstract The Q690E steel plate for engineering machinery (/% : 0.10 ~ 0.15 C, 0.20 ~ 0.40 Si, ≤ 0.015 P, ≤ 0.005 S, 0.30 ~ 0.40 Cr, 0.20 ~ 0.30 Mo, 0.035 ~ 0.045 V, 0.01 ~ 0.02 Ti, 0.001 ~ 0.002 B) has been developed through low carbon and “Mn-Cr-Mo-B-V-Ti” microalloyed components design, rolling and heat treatment technology selecting. The microstructure of Q690E steel plate quenched at 880 ~ 910 °C + tempered at 570 ~ 610 °C is tempered sorbite with yield strength 811 ~ 891 MPa, tensile strength is 852 ~ 938 MPa and -40 °C impact energy 132 ~ 167J. It can meet the requirements of GB/T16270-2009 on mechanical properties for Q690E Steel. The result is that, while meeting the increasingly stringent requirements of users, the production costs are reduced.

Material Index Low-Cost, Quenching and Tempering, Heat Treatment Process, Mechanical Properties

TMCP 技术以及微合金化已经广泛应用于工程机械用钢的生产过程中, 但是对于强度级别更高的中厚板而言, 传统的调质热处理(淬火 + 高温回火)生产工艺仍是无可取代的^[1]。目前各钢铁企业对调质型 Q690 级工程机械用钢仍主要采取离线热处理的工艺路线。而离线热处理钢板虽然性能稳定且均匀性好, 技术手段容易实现, 但能耗高, 周期长。

本研究针对 Q690 钢板提出了新的成分体系及轧制、后处理工艺并成功在中试工厂进行了 690MPa 级工程机械用钢的中试试验。新成分体系及工艺与原来 Q690 钢板相比, 大幅降低了贵金属 Ni 和 Cr 的含量。

1 技术要求和成分设计

1.1 技术要求

根据 GB/T 16270-2009《高强度结构用调质钢板》的相关规定, Q690E 钢的化学成分要求见表 1,

力学性能及工艺性能要求见表 2。

1.2 成分、工艺设计

现有 Q690E 钢的成分见表 3, 为 Mn-Cr-Mo-B-Ni-Nb-V 的成分体系, 合金含量较高。

综合钢板焊接性能、强韧性匹配等方面的要求,

表 1 GB/T 16270-2009 Q690E 钢的成分要求 / %

Table 1 Composition requirements of Q690E steel, GB/T16270-2009 / %

| C | Si | Mn | S | P |
|-------|-------|-------|--------|--------|
| ≤0.20 | ≤0.80 | ≤1.70 | ≤0.010 | ≤0.020 |

注: 可根据需要添加 Cu、Cr、Ni、Mo、B、Nb、V、Ti 等元素

表 2 GB/T16270-2009 Q690E 钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Q690E steel, GB/T16270-2009

| 屈服强度/ MPa | 抗拉强度/ MPa | 延伸率/ % | (-40°C) 纵向 冲击功/J |
|--------------|--------------|-----------|---------------------|
| ≥690 | 770 ~ 940 | ≥14 | ≥34 |

表 3 现有 Q690E 钢板化学成分/%

Table 3 Chemical composition of present Q690E steel plate/%

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Nb | V | Ti | B |
|-------------|--------|------|-------|-------------|--------|---------|---------|---------|----------|-------|--------|
| 0.13 ~ 0.20 | 0.95 ~ | ≤ | ≤ | 0.25 ~ 0.16 | 0.15 ~ | 0.020 ~ | 0.035 ~ | 0.015 ~ | 0.0017 ~ | | |
| 0.15 | 0.40 | 1.05 | 0.015 | 0.005 | 0.32 | 0.23 | 0.24 | 0.030 | 0.045 | 0.025 | 0.0027 |

表 4 新型 V-Ti-B 微合金化调质 Q690E 钢化学成分/%

Table 4 Chemical composition of new V-Ti-B-micro-alloying quenched and tempered Q690E steel/%

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | V | Ti | B | Ceq ⁽¹⁾ | Pcm ⁽²⁾ |
|-------------|--------|------|-------|-------------|---------|--------|---------|------|-------|--------------------|--------------------|
| 0.10 ~ 0.20 | 1.00 ~ | ≤ | ≤ | 0.30 ~ 0.20 | 0.035 ~ | 0.01 ~ | 0.001 ~ | | | | |
| 0.15 | 0.40 | 1.50 | 0.015 | 0.005 | 0.40 | 0.30 | 0.045 | 0.02 | 0.002 | 0.42 | 0.21 |

(1) 碳当量 $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + V + Mo)/5 + (Cu + Ni)/15$

(2) 焊接裂纹敏感系数 $P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$

采用低碳及“Mn-Cr-Mo-B-Ti”微合金化成分设计方案,其中 Cr、Mo、B 提高钢的淬透性,尤其是加入适量的 B 来提高钢的韧性;V 具有较高的析出强化作用,用来提高钢的强度。Ti 是强烈的固 N 元素,细小的 TiN 粒子可有效地阻碍钢在加热时的奥氏体晶粒长大,并且能显著地改善钢的焊接性能^[2]。

磷可降低焊接性能和塑性,使冷弯性能变差;硫可显著降低钢的延展性和韧性,在锻造和轧制时引起裂纹^[3]。因此,应尽量减少磷和硫在钢中的含量,并采用 Ca 对夹杂物进行球化处理。低成本 Q690E 的成分设计如表 4 所示,去掉了原有成分中的 Ni、Nb 两种贵金属,降低了合金 Ti 和 B 的含量,大幅降低了合金成本,且目标钢种的碳当量 C_{eq} 为 0.42,焊接裂纹敏感系数 P_{cm} 为 0.21,具备低焊接裂纹敏感用钢的要求,同时低碳当量能保证钢板的焊接性能。

生产工艺流程:电弧炉冶炼→LF 精炼→真空处理→连铸(模铸)→清理→加热→控轧→翻板检查→抛丸→淬火→回火→翻板检查→切割取样→性能检验→判定、入库。

2 冶炼、轧制及热处理

2.1 冶炼工艺

冶炼过程中,严格控制钢的化学成分和去除有害元素。采用 LF 精炼、VD 真空处理、钙处理等洁净钢生产技术,降低钢中的有害气体及夹杂物含量,为进一步发挥控制轧制的作用,获得理想的产品性能奠定基础。为保证钢中的有效 B 含量,加 B 前钢水应脱氧良好并有一定的 Ti 含量,从而提高 B 的收得率^[4,5]。

2.2 轧制工艺

按成分设计,采用 500 kg 多功能真空感应炉冶炼 Q690 钢一炉,浇铸 250 mm × 250 mm × 480 mm 的铸坯两块,经检测,成分均落在设计范围内。利用膨胀法结合金相-硬度法,在 Formast-F 全自动相变仪上测定了 Q690E 的连续冷却转变静态 CCT 曲线^[6],如图 1 所示,Q690 钢的 $AC_1 = 732\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $AC_3 = 865\text{ }^\circ\text{C}$ 。

根据相变点制定了加热、轧制及热处理工艺。加热制度:加热 II 段温度不高于 1 260 °C,均热温度 1 220 ~ 1 260 °C,确保均热段保温 ≥ 40 min,总加热时间 ≥ 10 min/cm,保证钢坯烧透、均匀。轧制工艺:两阶段控轧,粗轧开始温度 ≤ 1 100 °C,精轧总压下率 60% ~ 70%,II 阶段开轧温度 840 ~ 900 °C,轧后水冷,终冷温度 750 ~ 800 °C,堆垛缓冷。为减少钢材内部疏松缺陷,适当增加粗轧单道次压下量,晾钢过程采用中间水冷却,增大心部与表面温差,从而在轧制过程中加大心部变形量,以利于减少心部缺陷^[7]。轧后在保证板型的情况下,尽量提高冷速,通过加速冷却,控制相变组织,细化晶粒,为随后的调质处理做好组织准备。采用上述工艺生产 10 mm × 310 mm × 1 270 mm、20 mm × 293 mm × 875 mm、35 mm × 267 mm × 678 mm 三块。

3 产品性能分析

Q690E 钢板的热处理工艺及力学性能如表 5 所示。切取金相试样,研磨抛光后用 4% (体积分数) 的硝酸酒精溶液侵蚀,使用 ZEISS Image Alm 型金相

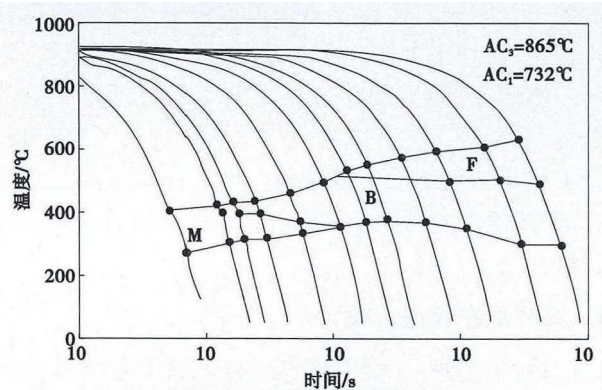


图 1 Q690E 钢的静态 CCT 曲线
Figure. 1 Static CCT curves of Q690E steel

表 5 新型 V-Ti-B 微合金化调质 Q690E 钢热处理工艺及力学性能/%

Table 4 Heat treatment process and mechanical properties of new V-Ti-B micro-alloying quenched and tempered Q690E Steel / %

| 钢板厚度/mm | 热处理工艺 | ReH/MPa | Rm/MPa | A50/% | 1/4 处(-40℃)纵向冲击功/J |
|---------|----------------------|---------|---------|-------|--------------------|
| 10 | 880℃淬火,返红300℃+590℃回火 | 823 | 887 | 19 | 146,149,167 |
| 20 | 880℃淬火,返红300℃+570℃回火 | 811 | 852 | 20 | 143,151,148 |
| 35 | 910℃淬火,返红300℃+610℃回火 | 891 | 938 | 18.5 | 132,137,141 |
| | GB/T 16270-2009 要求 | ≥690 | 770-940 | ≥14 | ≥34 |

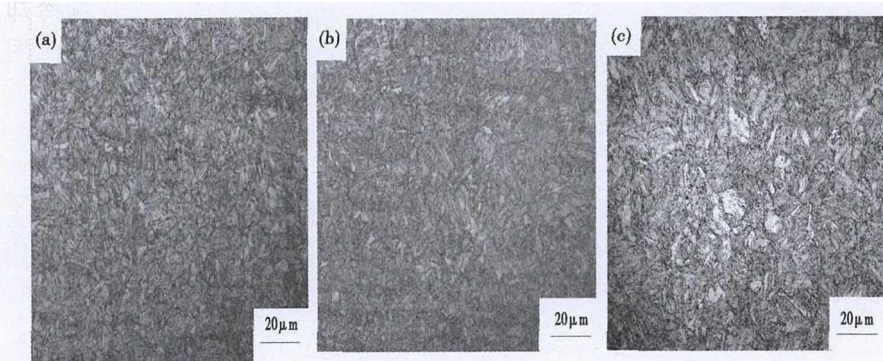


图 2 新型 V-Ti-B 微合金化调质 Q690 钢板的组织形貌(厚度 1/4 处):(a) 10 mm 板;(b) 20 mm 板;(c) 35 mm 板

Fig. 2 Morphology of structure of new V-Ti-B micro-alloying quenched and tempered Q690 steel plate at (at thickness 1/4): (a) 10 mm plate; (b) 20 mm plate; (c) 35 mm plate

显微镜行组织观察, Q690E 钢厚度 1/4 处的金相组织如图 2 所示。

从力学性能检测数据可知, 试制钢各项性能优异, 断后延伸率及低温冲击韧性远高于国标要求。从微观组织来看, 试生产的几块钢板微观组织均为回火马氏体和回火贝氏体的混合组织, 部分板条束贯穿整个奥氏体晶粒, 在原奥氏体晶界处以及板条束间有碳化物析出, 这种混合组织即为通常所说的回火索氏体, 淬火温度越高板条束的尺寸越大。几块试生产 Q690E 钢板宏观力学性能呈现出这样的规律:(1) 淬火温度越高, 板条束的尺寸越大, 冲击功越低, 这是因为随淬火温度的升高, 原奥氏体晶粒尺寸会增大, 淬火后得到的板条束尺寸也相应增大, 而粗大的板条束使得钢的强度降低。(2) 回火温度越高, 钢板强度越高、冲击功高。这主要是因为回火温度越高, 碳化物析出越多, 且细小, 等轴状回火索氏体的体积分数和平均晶粒尺寸增大, 则板条束状回火马氏体减少, 表现在力学上就是钢的强度升高、冲击韧性更优异。

经测算, 所设计开发的新型低成本 Q690E 钢生产成本比原来 Q690E 钢板降低 247 元/t, 在满足各项性能的同时极大地提升了 Q690E 高强度钢的市场

竞争力, 具有良好的推广应用前景。

4 结论

(1) 采用低碳及“Mn-Cr-Mo-B-Ti”微合金化成分设计, 两阶段轧制后水冷以及离线调质的工艺, 开发出了低成本调质型 Q690E 钢板。

(2) 所开发的钢板的微观组织为回火索氏体, 屈服强度 811~891 MPa, 抗拉强度 852~938 MPa, -40℃下纵向冲击功在 132~167J, 钢板的各项力学性能均符合 GB/T16270-2009

对 Q690E 工程机械用钢的要求。

(3) 所开发的 Q690E 钢板在保证优良综合性能的基础上大幅度降低了合金成本, 能够满足国内外工程机械行业对低成本 Q690E 钢板的需求, 具有良好的推广应用前景。

参考文献

- [1] 晏 轻, 王福明, 程慧静, 等. WQ960E 工程结构用钢 CCT 曲线的测定与分析[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(5): 92-96.
- [2] 张云燕, 陈洪伟, 陆在学, 等. 热处理工艺对 690MPa 级高强度结构钢性能的影响[J]. 钢铁研究, 2007, 45(10): 29-30.
- [3] 桑德广, 张 朋. 热处理工艺对 960MPa 级调质钢板强韧性的影响[J]. 宽厚板, 2013, 19(3): 6-9.
- [4] 张规华, 李常牛, 桑德广. 低合金高强度钢 WQ960E 的研制开发[J]. 宽厚板, 2010, 16(2): 5-8.
- [5] 冯路路, 张炜星, 何元春. 高强度结构钢 Q690E 的开发[J]. 宽厚板, 2009, 15(4): 27-29.
- [6] 李德刚, 杨维宇, 白雅琼, 等. 60 mm 厚 Q690D 钢连续冷却转变静态 CCT 曲线及组织[J]. 热加工工艺, 2014, 43(10): 54-56.
- [7] 蒙耀华, 张 朋. 连铸坯成材大厚度高强钢 S690QL 的开发与研究[J]. 宽厚板, 2016, 22(3): 7-9.

陈振业(1983-), 男, 博士生, 高级工程师, 2006 年武汉科技大学(本科)毕业, 中厚板新产品开发及新工艺研究。

E-mail: chenchenye@hbisco.com

收稿日期: 2018-08-16