

高韧性Q370qE桥梁钢的研制开发

鞠传华

(山钢股份济南分公司,山东 济南 250101)

摘要:在C、Mn固溶强化的基础上微合金强化,通过控轧控冷技术,开发了高韧性Q370qE桥梁钢。金相组织分析及CCT曲线测试表明,实际生产中终轧温度应控制在 ≤ 820 °C,热轧态钢板强度和塑性指标能够满足技术协议要求,但低温冲击韧性富裕量小。钢板经880 °C正火处理,强度及韧性可达到最佳匹配,组织性能均匀稳定,-40 °C低温冲击功均在160 J以上,完全满足技术协议要求。

关键词:桥梁钢;Q370qE钢;低温韧性;微合金化;控轧控冷;正火

中图分类号:TF762.3;TG142.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4620(2016)02-0007-03

1 前言

Q370qE钢为桥梁用结构钢,属于较高质量等级的低合金结构钢,主要用于铁路桥梁和公路桥梁等的建设,用于制作钢桥的钢箱或型钢梁的焊接结构件^[1]。尤其是铁路桥梁,在实际运营过程中,长期经受疲劳载荷,其安全可靠性是关注的重点。根据桥梁的设计特点,对钢板强韧性、焊接性能、屈强比、抗层状撕裂能力提出了更高要求,特别是对低温冲击韧性,要求-40 °C低温冲击功 ≤ 100 J。为此,山钢股份济南分公司研发了高韧性Q370qE钢,以满足该类大桥建设的要求。

2 高韧性Q370qE钢的技术要求

2.1 力学性能

根据客户设计要求,制定了高韧性桥梁钢技术协议,力学性能要求见表1。客户对冲击韧性的要求非常高,要求厚度 ≤ 24 mm的钢板-40 °C冲击功 ≥ 100 J,厚度 > 24 mm的钢板-40 °C冲击功 ≥ 120 J,已接近国标GB/T 714—2008规定值47 J的3倍。

表1 Q370qE钢要求的力学性能

规格/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	5%应变时效 A_{k1} /J	180°冷弯, B=2a	-40 °C纵向冲击功/J
≤ 16	≥ 370	≥ 530	≥ 21	≥ 41	d=2a	≥ 100
17~24	≥ 355	≥ 510	≥ 20	≥ 41	d=3a	≥ 120
25~35	≥ 355	≥ 510	≥ 20	≥ 41	d=3a	≥ 120
36~50	≥ 330	≥ 490	≥ 20	≥ 41	d=3a	≥ 120

2.2 成分设计方案

为保证钢板既有较高的强度又有较高的低温冲击韧性以及良好的焊接性能,成分设计在C、Mn固溶强化的基础上进行微合金化,通过控轧控冷技

术,达到提高钢材强度和低温冲击韧性的目的。

1)C。在Q370qE桥梁钢的化学成分设计中,为使钢板具有良好的焊接性能、较好的低温冲击韧性,必须降低钢中C含量。C含量控制在0.14%左右为宜。

2)Mn。Mn元素的主要作用是降低奥氏体转变温度,细化铁素体晶粒,提高钢的强度和韧性,还可以消除硫对钢材的有害影响。特别是对于有焊接要求的高锰钢种,Mn/C比值越大,低温韧性越好。

3)P、S、N的控制。为保证钢板好的冲击韧性,要求钢中有害元素P、S的含量应尽可能低。高韧性Q370qE钢应尽可能达到洁净钢水平,钢中P、S、全氧、N、H质量分数之和控制在 $< 160 \times 10^{-6}$ 水平,以满足钢的性能要求。

4)微合金化。微合金化是指向钢中添加Nb、V、Ti等合金元素。这些合金元素在钢中可以与C、N结合形成碳化物、氮化物及碳氮化合物,这些化合物具有在高温时溶解、低温时析出的特性。因此可以在钢坯加热时阻碍原始奥氏体晶粒长大,在轧制过程中抑制再结晶及再结晶后的晶粒长大,在低温时起到析出强化作用^[2]。

5)Ni。Ni是非碳化物形成元素,在钢中为纯固溶元素。由于Ni不从组织中析出,因而可降低相变温度,最终细化晶粒,不但可以提高强度,同时可以改善韧性。Q370qE钢中加入Ni主要是为满足厚规格钢板的超高韧性要求。

基于上述原则,考虑板厚效应,在化学成分的设计上根据钢板厚度范围采取了两套化学成分设计方案,见表2(另加Nb、V、Ti适量;厚度 ≥ 25 mm,加Ni $\leq 0.30\%$)。

表2 Q370qE桥梁钢设计化学成分(质量分数)%

厚度/mm	C	Si	Mn	P	S	Als
< 25	≤ 0.16	≤ 0.45	≤ 1.60	≤ 0.015	≤ 0.005	0.015~0.050
≥ 25	≤ 0.16	≤ 0.45	≤ 1.60	≤ 0.015	≤ 0.005	0.015~0.050

收稿日期:2015-12-30

作者简介:鞠传华,男,1982年生,2005年毕业于东北大学材料科学与工程专业。现为山钢股份济南分公司工程师,从事物理性能检验工作。

3 试制分析与讨论

3.1 轧制工艺

轧制工艺选用再结晶型和未再结晶型两阶段控制轧制工艺。粗轧阶段采用再结晶型控制轧制,开轧温度1 000~1 100 ℃,道次压下率 $\leq 10\%$,粗轧总压下率要求保持在50%以上。充分发挥再结晶区

轧制反复完全再结晶对细化晶粒的作用,获得均匀细小的高温奥氏体组织。

精轧阶段采用未再结晶区控制轧制,精轧温度 ≥ 950 ℃,第二阶段累积压下率 $\leq 50\%$,终轧温度控制在800~880 ℃,然后控冷,以发挥未再结晶区控制轧制对晶粒细化的作用,细化铁素体晶粒。不同终轧温度下,钢板的金相组织如图1所示。

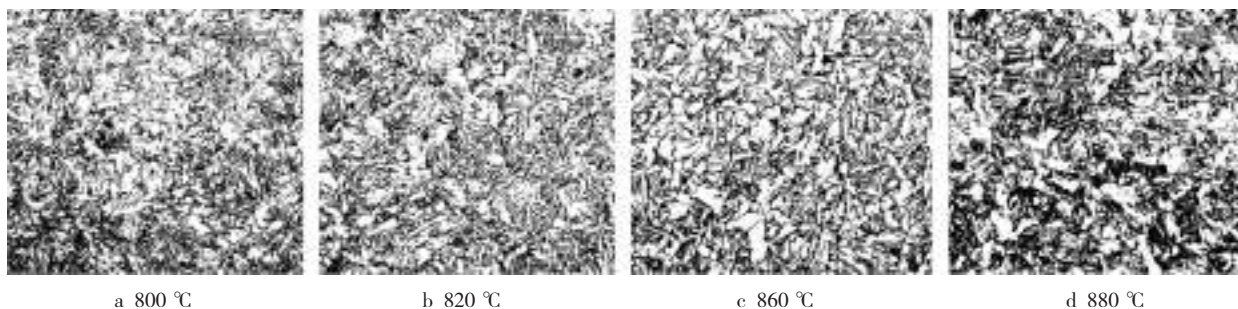


图1 不同终轧温度变形时钢板的金相组织

由图1可知,随终轧温度的升高,铁素体晶粒长大,珠光体的片层间距增加,组织的均匀性变差,当终轧温度超过860 ℃,钢板的金相组织明显粗化。低温变形会导致奥氏体内位错大量增殖,而且会加速微合金元素碳氮化物的析出。位错与析出粒子可成为新相形核的核心,增加了形核位置,有利于组织的细化。而当变形温度较高时,由于位错回复

过程较快,同时应变诱导析出相应推迟,因而位错多边形结构稳定性差,细化效果也减弱。实际生产中终轧温度控制在 ≤ 820 ℃较为合适。

3.2 CCT曲线测定

在900 ℃变形量为30%时,不同冷却速度对相转变组织的影响如图2所示。

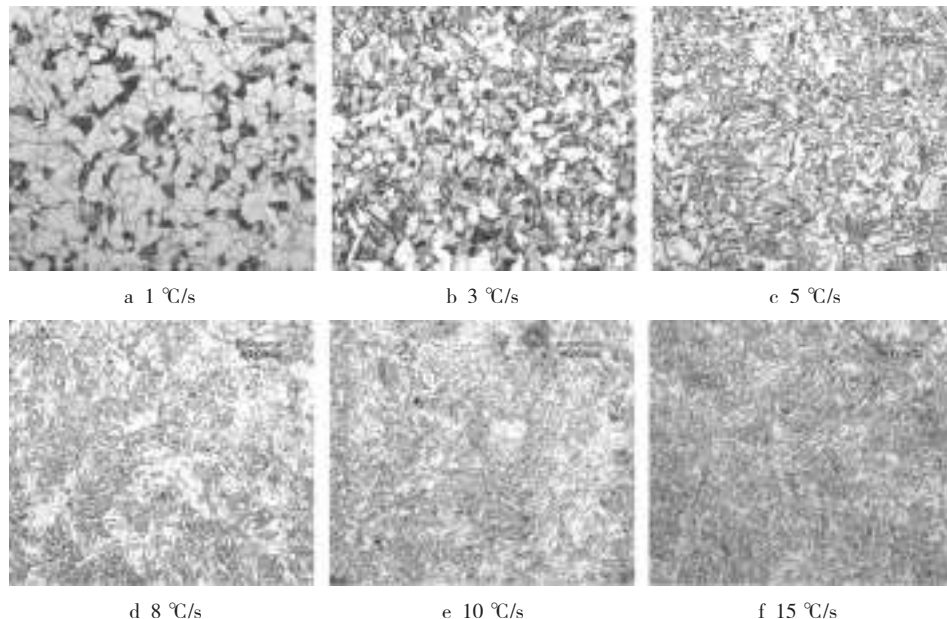


图2 相同变形条件不同冷却速度对钢板室温组织的影响

由图2可见,在冷却速度为1~15 ℃/s范围内,均可得到以细小均匀的铁素体和珠光体为主的组织,并且冷却速度 ≤ 5 ℃/s时,得到的组织为完全的铁素体和珠光体,冷速越大晶粒越细化;当冷速超过5 ℃/s后,开始出现少量的板条状贝氏体组织,随冷速不断增大,贝氏体组织所占的体积分数也不断增加;冷却速度超过15 ℃/s时,得到全部的贝氏体组织,并且随冷却速度的增加,贝氏体的板条层越

来越细。

通过测量热膨胀曲线数据及观察金相组织绘制了钢的CCT曲线见图3。冷速为1~25 ℃/s时,相转变开始温度和结束温度分别为741~552 ℃和600~475 ℃。铁素体转变温度区间为580~741 ℃,贝氏体转变温度区间为475~581 ℃。由此可以得出,Q370qE桥梁钢终轧后冷却速度应控制在5~8 ℃/s,开冷温度控制在650~700 ℃,终冷温度

≤538 ℃,可获得细小均匀的铁素体和珠光体组织,在保证强度的基础上,提高钢板的低温冲击韧性。

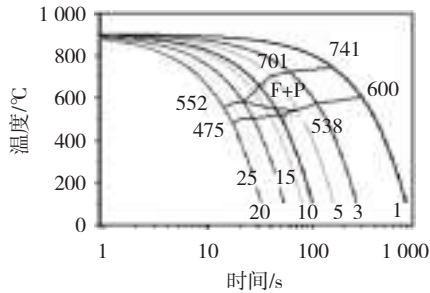
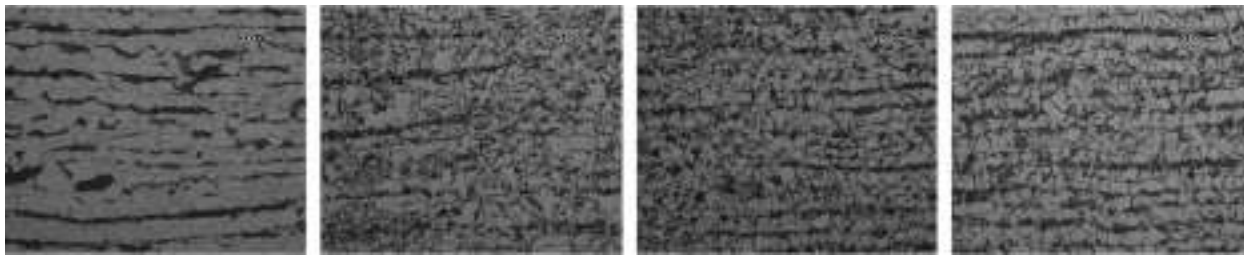


图3 Q370qE钢动态连续冷却转变曲线



a 热轧态

b 850 ℃ × 36 min 正火

c 880 ℃ × 36 min 正火

d 910 ℃ × 36 min 正火

图4 Q370qE钢热轧态及不同正火温度处理后的金相组织

热轧态及850 ℃、880 ℃、910 ℃温度正火处理后钢板的力学性能如表3所示。可见,热轧态钢板强度和塑性指标能够满足技术协议要求,但是-40 ℃低温冲击功均值为123 J,富裕量小。钢板经正火处理后,强度指标有所下降,但是塑性和低温

3.3 热处理工艺

选取25 mm厚的Q370qE钢板,分别在850、880、910 ℃温度下进行正火处理,保温36 min。正火后钢板试样的金相组织如图4所示。由图4可知,Q370qE热轧态时,各个部位的晶粒大小不一,组织均匀性差;在850 ℃正火时,由于温度偏低,奥氏体不能够充分均匀化,组织没有达到正火处理的目的,晶粒也没有得到细化;880 ℃正火时,各区域晶粒都得到了细化,条带已经退化成不连续的团状;910 ℃正火时,晶粒开始粗化,珠光体开始球化。

冲击韧性指标大幅提升。对比3种正火温度的性能指标,880 ℃正火时,强度及韧性为最佳匹配。因此,正火处理工艺选择正火温度(880 ± 10) ℃、保温系数1.4 min/mm较为合适。

表3 25 mm厚不同状态Q370qE钢板力学性能

状态	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	5%应变时效 A_{k1} /J	180°冷弯, B=2a, d=3a	-40 ℃纵向功/J
热轧态	431	569	24	46,64,51	完好	123(111, 134, 125)
850 ℃正火	389	534	28	87,79,85	完好	152(154, 150, 152)
880 ℃正火	397	545	26	118,122,123	完好	183(193, 164, 192)
910 ℃正火	382	529	29	103,99,101	完好	167(174, 166, 160)

4 结论

Q370qE钢的成分和工艺设计合理,力学性能和金相组织均匀稳定,各项性能指标满足技术条件要求,可依照此进行工业化规模生产。Q370qE钢具有优异的低温韧性,-40 ℃低温冲击功均在160 J以

上,完全满足桥梁行业较高的低温韧性要求。

参考文献:

- [1] 胡洵璞,刘丹.Q370qE桥梁钢的生产工艺控制[J].炼钢,2010,26(4):28.
- [2] 陈钊,洪君.高性能桥梁结构用Q370qE钢的研制[J].宽厚板,2013,19(3):18.

Development of Q370qE High Toughness Steel for Bridge Structures

JU Chuanhua

(Jinan Branch of Shandong Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: Based on the solid solution strengthening of C and Mn, the Q370qE of high toughness for bridge steel was developed using thermo mechanical control process. Metallographic structure inspection and CCT curve test showed that in the actual production of final rolling temperature should be controlled at 820 ℃ or lower, hot rolled steel plate strength and plasticity index can meet the requirements of technical agreement, but low temperature impact toughness has small amount of redundancy. Steel plate after 880 ℃ normalizing treatment, the strength and toughness can achieve the best matching. The microstructure and properties were uniform and stable, and low temperature impact energy was more than 160 J at -40 ℃. The steel can fully meet the technical agreement requirements.

Key words: steel for bridge; Q370qE steel; low temperature impact toughness; microalloying; TMCP; normalizing