

## 调质处理工艺对微合金化 Q960E 钢 70 mm 板组织性能的影响

成慧梅, 冯俊鹏, 孙电强, 葛阳阳, 王丽敏  
(河钢股份有限公司邯郸分公司技术中心, 邯郸 056000)

**摘要:** 采用 890 ~ 920 °C 淬火和 560 ~ 600 °C 回火工艺对 Q960E 钢 70 mm 板进行性能测试, 并利用金相显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM) 对 Q960E 钢板显微组织进行分析。结果表明: 采用 920 °C 淬火和 560 °C 回火工艺的钢板强韧性匹配最优 (UTS 1 048 MPa, YS 1 005 MPa, el. 14%, -40 °C KV<sub>2</sub> 52 ~ 61 J), 钢板全厚度方向性能分布相对均匀, 硬度值为 27.5 ~ 33HRC; 组织从表面至心部为回火索氏体和残余奥氏体。

**关键词:** Q960E 钢; 70 mm 板; 调质; 组织; 性能

## Effect of Quenching-Tempering Process on Microstructure and Properties of Micro-Alloying Q960E Steel 70 mm Thickness Plate

Cheng Huimei, Feng Junpeng, Sun Dianqiang, Ge Yangyang, Wang Limin  
(Hesteel Company Limited Handan Branch Technology Center, Handan 056000)

**Abstract:** The properties of Q960E steel 70 mm plate quenched at 890-920 °C and tempered at 560-600 °C are tested, and the microstructure of Q960E steel is analyzed by metallographic microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). The results show that the strength toughness matching of the steel plate is the best when quenching at 920 °C and tempering at 560 °C (UTS 1 048 MPa, YS 1 005 MPa, EL 14% and -40 °C KV<sub>2</sub> 52-61 J), the performance distribution of the steel plate in the full thickness direction is relatively uniform, and the hardness value is 27.5-33HRC, the microstructure from the surface to the center is tempered sorbite and residual austenite.

**Material Index:** Q960E Steel; 70 mm Thickness Plate; Quenching-Tempering; Microstructure; Properties

随着工程机械向着大型化、重型化和高效能化方向发展, 普通厚度钢板和低强度钢板已不能满足部分特殊结构件对性能及产量的需求。国内低合金高强度结构钢开发较快, 60 kg 到 100 kg 级高强钢需求量越来越大, 市场前景良好<sup>[1]</sup>。而 100 kg 级超高强钢 (相应标准钢级别为 Q960E, 后文简称 Q960E) 是目前国内工程机械领域里强度级别较高的钢种, 该高强钢具有优良的成型性、焊接性和优良的低温冲击韧性, 被广泛应用于工程机械行业混凝土泵车、履带起重机臂架及拉板、大吨位煤矿机械用液压支架等关键结构件<sup>[2-3]</sup>。

近年来, 随着各大工程机械厂的转型升级, 对厚规格 Q960E 级别超高强钢的需求也逐年增长, 虽然已经有不少学者对厚规格 Q960E 钢展开研究, 但是考虑到压缩比问题以及特厚板的生产难度, 有关特厚规格 Q960E 高强钢板的相关研究少有报道。

本研究采用金相显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM) 和洛氏硬度计对特厚规格 Q960E 高强钢

调质态的微观组织、硬度等性能进行了详细测试分析, 探讨热处理工艺与微观组织、强硬性之间的关系, 为特厚规格高强钢板的工业生产和工程应用提供参考。

### 1 试验材料与方法

#### 1.1 试验材料

试验钢为低合金高强度结构钢 Q960E, 生产工艺包括: 铁水初炼 → 100 t 氧气顶底复吹转炉 → 100 t LF 精炼 → RH 真空处理 → 大板坯连铸 [规格 (1 400 ~ 1 900 mm) × (220 ~ 260) mm] → 铸坯加热 → 3 500 mm 轧机控轧 → ACC 控制冷却 → 淬火炉 → 回火炉; 本试验钢生产用连铸坯断面尺寸为 1 900 mm × 260 mm, 轧制成品板厚度为 70 mm。钢水的熔炼成分见表 1。

#### 1.2 试验方法

热处理工艺是采用合适的淬火 + 回火工艺调整钢板内部组织, 减少内应力进而提高材料的使用性

表 1 Q960E 高强钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical Composition of Q960E high-strength steel/%

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	B
0.16	0.25	1.25	≤0.015	≤0.005	0.025	0.035	0.015	0.50	0.40	0.60	0.0015

能,从而使钢板具有良好的综合力学性能<sup>[4]</sup>。为了更好的比较不同的热处理工艺对特厚规格 Q960E 钢组织、性能的影响,根据化学成分和生产现场的实际设备能力,设计了 2 种淬火 + 3 种回火工艺进行正交试验,确定最佳的热处理工艺。试验采用厚度规格为 70 mm 的 Q960E 钢板。

(1) 淬火工艺

轧后的钢板在不同的温度下进行淬火试验,提高钢板的强度,淬火温度分别为 890 °C 和 920 °C 详细工艺见表 2。

(2) 回火工艺

对淬火处理后的 Q960E 钢板,在不同温度下进行回火试验,回火温度分别为 560、580、600 °C,通过不同回火工艺调整钢板的强度和韧性,得到高强度、高韧性的钢板。具体回火工艺见表 3。

(3) 性能检测

对上述工艺下不同温度淬火 + 回火后的钢板试样,分别在钢板宽度方向 1/4 位置取横向拉伸和硬度试样,拉伸试样尺寸为 Φ10 mm × 350 mm,利用 SHT5605P 型微机控制电液伺服万能试验机进行拉伸试验,测量其屈服强度、抗拉强度、断后伸长率,同时沿厚度方向取横截面为 70 mm × 20 mm 试样,采用 SERIES2000 型英斯特朗洛氏硬度计对钢板厚度方向进行硬度检测。

(4) 组织检测

采用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀,抛光腐蚀后的试样通过金相显微镜和扫描电子显微镜对其微观组织进行观察,分析不同热处理工艺对钢板的组织、性能的影响。

2 结果分析与讨论

2.1 不同热处理工艺 Q960E 钢性能检测

GB/T 16270-2009《高强度结构用调质钢板》中未给出 50 mm < H ≤ 100 mm 的 Q960E 钢屈服强度、抗拉强度、断后伸长率要求,行业里一般协议约定 50 mm < H ≤ 100 mm 的 Q960E 钢屈服强度 ≥ 920 MPa,抗拉强度为 980 ~ 1 150 MPa、断后伸长率 ≥ 10% (H 为钢板成品厚度)。

Q960E 钢的各项性能检测结果参照 GB/T 16270-2009《高强度结构用调质钢板》,由表 4 中可以看出,6 种不同热处理工艺设计的试验,其力学性能均达到了协议约定要求。

从整体数据来看,采用 920 °C 淬火 + 回火得到的钢板综合性能均优于采用 890 °C 淬火 + 回火后的钢板性能,究其原因是淬火温度主要影响合金元素的固溶程度和奥氏体晶粒尺寸,进而影响淬火后获得马氏体组织的能力,最终造成力学性能的差

表 2 Q960E 钢 70 mm 板淬火工艺参数

Table 2 Hardening process parameters of Q960E steel 70 mm plate

试样编号	淬火温度/°C	加热速率/(min · mm <sup>-1</sup> )	保温时间/min
1	890		
2	920	2.0	20

表 3 Q960E 钢 70 mm 板回火工艺参数

Table 3 Tempering process parameters of Q960E steel 70 mm plate

试样编号	淬火温度/°C	回火温度/°C	加热速率/(min · mm <sup>-1</sup> )	保温时间/min
1-1		560		
1-2	890	580	4.0	30
1-3		600		
2-1		560		
2-2	920	580	4.0	30
2-3		600		

表 4 Q960E 高强钢的力学性能

Table 4 Mechanical properties of Q960E high-strength steel /%

试样编号	热处理工艺	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	-40 °C KV <sub>2</sub> /J	冲击功平均值/J
1-1	890 °C + 560 °C	969	1 025	12.5	48.7, 64.8, 63.8	59.1
1-2	890 °C + 580 °C	960	1 010	14	65, 62.5, 73	66.8
1-3	890 °C + 600 °C	935	1 001	15.5	82, 109, 95	95.3
2-1	920 °C + 560 °C	1 005	1 048	14	52, 61, 58	57.0
2-2	920 °C + 580 °C	988	1 039	15	72, 85, 69	75.3
2-3	920 °C + 600 °C	970	1 013	14.5	86, 103, 98	95.7
	协议约定	≥920	980 ~ 1 150	≥10		≥27

异<sup>[5]</sup>。随淬火温度升高,会促进低合金钢中的 Mo、Cr、Ti、Nb 等更多的强碳化物形成元素析出,且温度升高会促进奥氏体晶内固溶量增多;进而在回火过程中析出更多的合金碳氮化物,有利于提高强度,同时碳氮化物的析出起到了抑制晶粒长大的作用<sup>[6]</sup>,从而在提高强度的同时也保证了良好的韧性。

随着回火温度从 560 °C 提升到 600 °C,钢板强度下降明显,分析原因是随着回火温度的升高析出碳化物发生粗化和球化,钉扎作用减弱,从而导致屈服强度下降较快<sup>[7]</sup>。当回火温度达到 600 °C 时,出现了屈服强度和抗拉强度均下降现象,此时屈服强度为 970 MPa,富余量较小;从上述试验情况来看,当采用 920 °C 淬火和 560 °C 回火时,即 2-1 试样综合性能最佳,相对于 GB/T 16270-2009 中对 Q960E 钢的性能指标要求具有充足的富余量,因此,将 920 °C 淬火 + 560 °C 回火确定为最合适的热处理工艺。

## 2.2 最优热处理工艺钢板全厚度硬度检测

评定厚板钢材的综合力学性能,如果取表面钢材做性能试验,得出的结果偏高,作为材料的平均性能,显然是不安全的;如果取中心位置钢材做性能检测试验,得出的结果值代表整块钢板的综合性能,显然是不经济的。因此,为了验证当前热处理工艺下, Q960E 钢板全厚度方向淬透性以及性能分布情况,选取对 2-1 回火后的钢板在全厚度方向制取硬度试样,试样大小为 25 mm × 25 mm × 70 mm,并用英斯特朗的洛氏硬度计进行全厚度方向显微硬度值测试,按照从上表面→1/4 处→中心处→3/4 处→下表面的顺序,逐个打点测试,打点间隔 2 ~ 3 mm。

由图 1 中可见, Q960E 钢板全厚度方向硬度值分布相对均匀,硬度值均超过 27.5HRC,说明试验钢具有良好的淬透性。除去上下表面由于试验点距离表面较近,存在试验误差外,在距离钢板上、下表

面 30 mm 厚度范围内,硬度值分布均匀,分别为 31 ~ 32.5HRC 和 30 ~ 31.4HRC。而在板厚 1/2 处,硬度值最低为 27.5HRC,这主要是由于淬火过程中,大量的高压冷却水同时自钢板上、下方喷射到其上下表面,钢板的传热冷却过程从其上下表面率先启动,并呈现一个由表及里的冷却速度递减分布,因此其洛氏硬度从钢板表面向心部逐渐降低<sup>[8]</sup>。

## 2.3 最优热处理工艺下钢板组织检测

为了进一步分析内部组织结构对钢板性能的影响,选取对 2-1 回火后的试样分别对钢板近表面,厚度 1/4 处,厚度 1/2 处进行金相、电镜显微组织观察,详情如图 2 所示。

钢板热处理后全厚度方向主要组成均为回火索氏体和少量残余奥氏体组织。接近钢板表面处马氏体边界清晰,靠近钢板 1/2 处位置马氏体边界模糊,原因是在回火过程中,由于碳化物沿着淬火马氏体原始板条边界析出,使得板条边界相对模糊。文献 [9] 表明,板条间存在的残留奥氏体能有效缓解裂

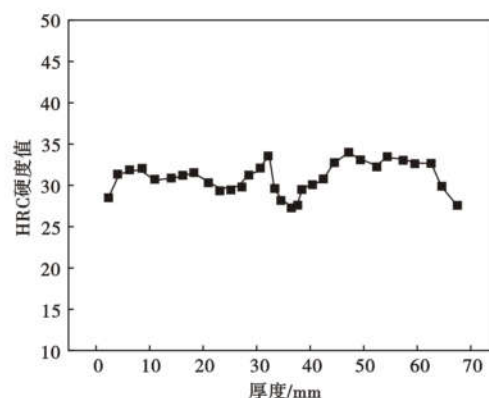


图 1 70 mm Q960E 钢板全厚度方向硬度分布  
Fig. 1 Hardness distribution of 70 mm Q960E steel plate in thick direction

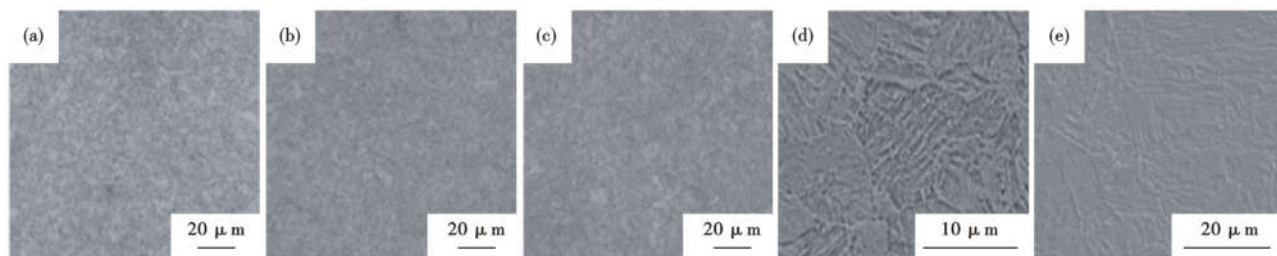


图 2 70 mm Q960E 钢板 (a) 上表面, (b) 厚度 1/4 处, (c) 中心, (d) 3/4 处和 (e) 下表面组织: (a) (e) 回火索氏体, (b) (d) 回火索氏体 + 残余奥氏体, (c) 回火索氏体 + 少量板条贝氏体 + 残余奥氏体

Fig. 2 Structure of 70 mm Q960E steel plate at upper surface (a), 1/4 thickness (b), center (c), 3/4 thickness (d) and bottom surface (e): (a) (e) tempered sorbite, (b) (d) tempered sorbite + residual austenite and (c) tempered sorbite + less lath bainite + residual austenite

纹尖端应力,从而改变裂纹走向,提高钢板韧性。

在扫描电镜下,可以看到回火马氏体组织保持了原来马氏体的形貌、原始奥氏体晶界及马氏体束组织,大部分的马氏体束仍保留着板条形状,并且在晶界处观察到极少量的碳化物析出。随着距表面距离的增大,回火马氏体板条束宽度逐渐减小,组织也逐步转变为回火索氏体+板条贝氏体+部分残余奥氏体。结合不同位置处的硬度试验(图 1),在靠近钢板厚度 1/2 处,伴随着回火马氏体板条束宽度尺寸的减小,残余奥氏体比例增加,钢板的硬度下降,韧性提高。

### 3 结论

(1)通过 890~920℃ 淬火、560~600℃ 回火不同热处理工艺试验后对钢板性能进行检测,确定采用 920℃ 淬火、560℃ 回火为生产 Q960E 钢特厚板

的最佳热处理工艺,此时钢板的屈服强度为 1 005 MPa,抗拉强度 1 048 MPa,延伸率 14%, -40℃ 低温冲击功均值 57.0 J,均符合力学性能要求。

(2)采用 920℃ 淬火、560℃ 回火工艺对试验钢进行热处理后,70 mm 厚度试验钢在全厚度方向硬度分布相对均匀,平均硬度值为 30.82HRC,除板厚 1/2 处硬度值较低外,在距离钢板上、下表面 30 mm 厚度范围内,硬度值分布均匀,分别为 31~32.5 HRC 和 30~31.4HRC。

(3)经过 920℃ 淬火、560℃ 回火工艺对试验钢进行热处理后,钢板全厚度方向的组织主要为回火索氏体和少量残余奥氏体,组织稳定性较好、Q960E 钢强韧性匹配良好。

### 参考文献

[1] 房玉佩,谢振家,尚成嘉. 感应回火对 1 000 MPa 级高强度低合金钢碳化物析出行为及韧性的影响[J]. 金属学报,2014,50(12): 1413-1420.

[2] 李灿明. 高强高韧钢 Q960E 的生产工艺[J]. 金属热处理, 2021,46(7):182-186.

[3] 张媛钰. 高强度工程用 Q960E 的工业开发[J]. 现代冶金,2020, 48(1):4-6.

[4] 娄旭. 金属材料热处理工艺及技术发展形势[J]. 冶金管理, 2021(19):20-21.

[5] 陈敏侠,易春洪. 淬火工艺对 70 mm Q960E 钢冲击性能的影响[J]. 金属加工(热加工). 2021, (12):53-56.

[6] Maropoulos S, Ridley N, Karagiannis S. Structural Variations in Heat Treated Low Alloy Steel Forgings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 380(1/2):79-92.

[7] 于浩,张道达,肖荣亭,等. 回火温度对 Q960 钢析出物组织特征的影响[J]. 北京科技大学学报,2011,33(6):715-720.

[8] 郑建平,汪杰,黄贞益,等. 回火温度对 Q960E 高强钢组织和性能的影响[J]. 热处理. 2016,31(6):16-19.

[9] 谭若兵,陈大明,康沫狂. 残余奥氏体在疲劳裂纹尖端的应变诱发相变[J]. 兵器材料科学与工程,1992(8):1-4.

## 《特殊钢》杂志官方投稿网站

[www. specialsteeljournal. com](http://www.specialsteeljournal.com)

地址:湖北省黄石市黄石大道 316 号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

邮编:435001 咨询电话:15961618632 0714-6292935 6297386 6297313

《特殊钢》编辑部邮箱:E-mail:tsghs@sina.com, tsghs@citicsteel.com