

舵杆用 Q345D 钢热处理工艺对组织和性能的影响

范秋梅 付朝波 张永恒 王海珍
(中原特钢股份有限公司, 济源 459008)

摘要 试验研究了 Q345D 级钢(% : 0.18C、0.41Si、1.34Mn、0.05Nb、0.08V、0.024Al) Φ 280 mm 锻材淬-回火处理和正火处理后的组织和性能。结果表明,经 890 $^{\circ}$ C 空冷 200 s,水冷 + 570 $^{\circ}$ C 回火后的钢抗拉强度 $R_m \geq 630$ MPa,屈服强度 $R_e \geq 455$ MPa, -20 $^{\circ}$ C 冲击功 A_{KV} 28 ~ 40 J;910 $^{\circ}$ C 空冷正火后 $R_m \geq 575$ MPa, $R_e \geq 390$ MPa, -20 $^{\circ}$ C A_{KV} 42 ~ 59 J,均满足舵杆产品对力学性能的要求;淬-回火工件距表面 30 mm 的组织为回火索氏体 + 粒状贝氏体,中心组织为珠光体 + 少量粒状贝氏体,正火处理后工件表面与心部均为珠光体 + 铁素体组织。

关键词 舵杆 Q345D 钢 微合金化 热处理 组织 力学性能

Effect of Heat Treatment Process on Structure and Mechanical Properties of Steel Q345D for Rudder Stock

Fan Qiumei, Fu Chaobo, Zhang Yongheng and Wang Haizhen
(Zhongyuan Special Steel Co Ltd, Jiyuan 459008)

Abstract The structure and properties of Φ 280 mm forgings of steel Q345D (% : 0.18C, 0.41Si, 1.34Mn, 0.05Nb, 0.08V, 0.024Al) after quenching + tempering treatment and normalizing treatment have been tested and studied. Results show that with 890 $^{\circ}$ C air cooling for 200 s, then water cooling + 570 $^{\circ}$ C tempering the steel tensile strength R_m is ≥ 630 MPa, yield strength R_e is ≥ 455 MPa and impact energy A_{KV} at -20 $^{\circ}$ C is 28 ~ 40 J; with normalizing at 910 $^{\circ}$ C air cooling, the R_m , R_e and -20 $^{\circ}$ C A_{KV} of steel are respectively ≥ 575 MPa, ≥ 390 MPa and 42 ~ 59 J, all the mechanical properties meet the requirement for rudder stock product; the structure at depth 30 mm from surface of quenched-tempered rudder stock piece is tempered sorbite + granular bainite, at center it is pearlite + minor granular bainite, and all the structure at surface and center of normalized rudder stock piece is pearlite + ferrite.

Material Index Rudder Stock, Steel Q345D, Microalloying, Heat Treatment, Structure, Mechanical Properties

低合金高强度钢是在碳素钢基础上加入少量合金元素,提高强度并改善其使用性能而发展起来的一类工程结构用钢。Q345D 级钢属低合金高强度钢。我国现在有人把低合金高强度钢定义为:凡是合金元素总量在 5% 以下,屈服强度在 275 MPa 以上,具有良好的焊接性、耐蚀性、耐磨性和成形性,通

常以板、带、型、管等钢材形式直接供使用的结构钢种可称之为低合金高强度钢。Q345 钢在 GB/T1591-1994《低合金高强度结构钢》中有较详尽的介绍。汉语拼音字母“Q”代表“屈服”,“345”代表其屈服点数值。Q345 牌号钢在该标准中又分为 A、B、C、D、E 五种。其化学成分规定见表 1。

表 1 Q345 钢种的化学成分要求 /%

Table 1 Requirement for chemical composition of Q345 steel grades /%

级别	C	Mn	Si	P	S	V	Nb	Ti	Al
A	≤ 0.20	1.00 ~ 1.60	≤ 0.55	≤ 0.045	≤ 0.045	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	-
B	≤ 0.20	1.00 ~ 1.60	≤ 0.55	≤ 0.040	≤ 0.040	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	-
C	≤ 0.20	1.00 ~ 1.60	≤ 0.55	≤ 0.035	≤ 0.035	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	≥ 0.015
D	≤ 0.18	1.00 ~ 1.60	≤ 0.55	≤ 0.030	≤ 0.030	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	≥ 0.015
E	≤ 0.18	1.00 ~ 1.60	≤ 0.55	≤ 0.025	≤ 0.025	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.20	≥ 0.015

Q345 钢的主要特性是具有良好的综合力学性能,低温冲击韧性、冷冲压和可加工性、焊接性能均好。A、B 级视钢材用途和使用需求,可加入或不加入微合金化元素 V、Nb;但 C、D、E 级钢应加入 V、Nb、Ti、Al 的一种或几种,以细化钢的晶粒、防止钢

的过热,提高钢的韧性和强度。钢中也可加入稀土,改善韧性、冷弯性能和钢材的各向异性。

这类钢用途很广,主要包括桥梁、船舶、容器、建筑、车辆等方面应用的可焊接结构钢以及有的低合金钢筋,耐磨低合金钢现在已用在矿山机械上。

船舶公司采用 Q345D 级钢制作舵杆,其技术要求为:工件为台阶轴式,两端细,中间粗,最小台阶处直径为 $\Phi 290$ mm,最大台阶处直径为 $\Phi 465$ mm,工件长度为 6 000 mm。要求性能指标为 $R_e \geq 345$ MPa, $R_m \geq 500$ MPa,要求冷冻等级为 LCE E3 级(即 -20 $^{\circ}\text{C}$,冲击功 $A_{KV} \geq 27$ J)。材料选用 Q345 的 D 级钢(国外钢号 St2-3N)。允许最大碳含量为 0.23%。由于该产品为船用舵杆,使用环境恶劣,腐蚀和磨损较严重,使用中会经常焊接修补,因此要求材料具有良好的焊接性,另外还要保证整体性能的一致性。

1 Q345D 级钢的热处理工艺试验

1.1 钢的冶炼、锻造成形及熔炼成分

因为舵杆使用环境恶劣,需保证钢的质量优良,采用 40 t LF 钢包炉冶炼,碳粉脱氧,脱气前调整 V 含量为 0.05% ~ 0.10%。VD 真空除气,出钢后钢锭热送直接加热锻造,钢锭重 10 t,截面尺寸为 795 mm,采取墩粗、拔长、成型的方式锻造成形。锻件最大锻比为 9.0。锻后进行退火和扩氢处理,钢的熔炼成分见表 2。

表 2 Q345D 钢的熔炼成分 / %

Table 2 Melting end chemical composition of steel Q345D / %

C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	V
0.18	0.41	1.34	0.012	0.005	0.054	0.024	0.08

1.2 热处理工艺与力学性能

采用井式热处理炉,对一工件进行淬火 + 回火处理,即调质处理,淬火加热温度为 (890 ± 10) $^{\circ}\text{C}$,先空冷 (200 ± 10) s 后进行水冷,回火温度为 (570 ± 10) $^{\circ}\text{C}$ 。另一工件进行正火处理,正火加热温度为 (910 ± 10) $^{\circ}\text{C}$,采用快速吹风冷却。

对热处理后的工件在直径 $\Phi 280$ mm 一端的 $1/2$ R(半径)处的轴向方向上分别取拉伸和冲击试样,进行拉伸和冲击试验。试验设备为 WE-30 液压万能材料试验机,JB-30 冲击试验机。其结果见表 3。

表 3 舵杆工件热处理后的力学性能

Table 3 Mechanical properties of rudder stock piece after heat treatment

热处理制度	R_e /MPa	R_m /MPa	A/%	-20 $^{\circ}\text{C}$	0 $^{\circ}\text{C}$
	最小值			A_{KV} /J	A_{KV} /J
正火	390	575	30.0	48/42/59	71/70/79
调质	455	630	20.5	40/28/37	109/108/95
技术要求	≥ 345	≥ 500	-	≥ 27	-

由此看出调质处理和正火处理的力学性能均满足产品的指标要求。

1.3 显微组织分析

调质热处理和正火热处理组织。在工件表皮下 30 mm 处及中心 $\Phi 60$ mm(距工件表面下 110 mm 处)取试样,分别做 $\times 100$ 和 $\times 500$ 显微组织观察,调质热处理的工件皮下 30 mm 处的组织为回火索氏体 + 回火粒状贝氏体,回火索氏体属低碳马氏体经高温回火的组织, $\times 100$ 、 $\times 500$ 组织观察如图 1(a, b)所示。

中心 $\Phi 60$ mm 处的组织为铁素体、珠光体 + 少量粒状贝氏体, $\times 100$ 、 $\times 500$ 组织观察如图 1(c, d)所示。

正火处理的工件表面与心部区域相似,都是珠光体 + 铁素体组织,只是心部区域的铁素体多一些,铁素体和珠光体的晶粒细小,为 8 ~ 9 级,少量 7 级,100X 组织观察如图 1(e, f)所示。

2 结果分析与讨论

Q345D 级钢正火和调质热处理均能满足船用舵杆的力学性能指标要求,低温冲击韧性也很好。该钢属非调质钢,但调质处理的屈服强度更高一些,尤其是零度温度下的冲击功很高,达 100 J 左右, -20 $^{\circ}\text{C}$ 下的冲击功比正火热处理略低一些,这可适当调整回火温度以提高。

调质热处理的屈服强度较高,是因为这种钢有较好的组织,采取快速水冷却的方式,虽然直径较大,但表面 30 mm 处已有部分马氏体组织,高温回火后为综合性能良好的回火索氏体,以及部分回火贝氏体组织,如图 1(a, b)所示。由于冷速较大,心部区域还有部分粒状贝氏体组织。

这种钢碳量低,虽然有马氏体组织形成,但不易形成淬火裂纹,所以可采用水冷却。另外,除碳元素外钢中的 Mn 是主要合金元素之一,在这种铁素体-珠光体钢中, Mn 可以使珠光体量增多; Mn 降低珠光体的形成温度,细化珠光体的片间距,提高钢的强度;当 Mn 含量超过 1.5% ~ 1.6% 时,将促使贝氏体的形成^[1]。因 Mn 有降低 Ac_1 和 Ac_3 点的作用,是促使奥氏体形成的元素,称为 γ 稳定剂^[2]。所以虽然碳量较低,但因 Mn 元素的作用,使之水冷却时表面区域能得到强韧性较好的贝氏体和部分低碳板条马氏体组织,正火空冷时形成片间距小的细珠光体组织,保证了所需要的钢的强度要求,这也是这种低碳钢的最大特点之一。

另外,该钢中选择性的加入微量合金元素如

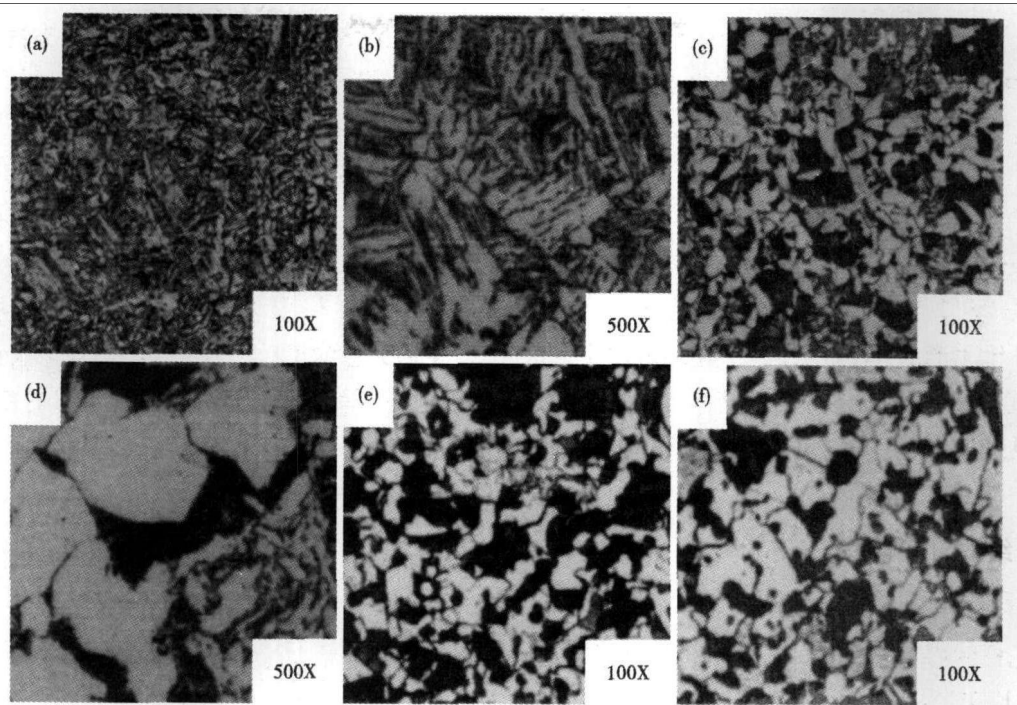


图 1 Q345D 钢舵杆工件组织形貌:调质处理:皮下 30 mm 处-回火索氏体+回火粒状贝氏体(a)(b);心部-铁素体、珠光体+少量粒状贝氏体(c)(d);正火处理:皮下 30 mm-珠光体+铁素体(e);心部-铁素体+珠光体(f)

Fig. 1 Structure morphology of rudder stock piece of steel Q345D: quenched-tempered: at depth 30 mm from surface- tempered sorbite + tempered granular bainite (a) (b), at center- ferrite, pearlite + minor granular bainite (c) (d); normalized- at depth 30 mm from surface- pearlite + ferrite (e), at center- ferrite + pearlite (f)

Al、V、Ti 和 Nb,其量一般不超过 0.1% (允许最高至 0.15%),显著地能使晶粒细化。Al 能形成稳定的弥散的 AlN 颗粒,在高温下它们中的某些粒子仍然保留在奥氏体晶界,并通过钉扎这些晶界以避免过分的晶粒长大。转变到铁素体的珠光体时,钢中 AlN 含量小到 0.03% 时可以得到晶粒直径尺寸为 5~6 μm 。V、Ti 和 Nb 可形成非常稳定的碳化物,它们也能固定奥氏体晶界,因此当奥氏体转变时,得到了细得多的铁素体晶粒尺寸。如图 1(c, e, f) 所示,铁素体和珠光体的晶粒度为 8~9 级,个别为 7 级。由于晶粒细小,从而使正火处理下 -20 $^{\circ}\text{C}$ 的冲击功达到 42 J 以上。

再者,该钢的碳、锰量及微量合金元素的合理配比,不仅使廉价的正火强化方法满足了力学性能指标的要求,还因为碳低正火得到的铁素体+珠光体组织,对使用中的焊接提供了良好的组织要求。因高碳钢在焊接时易在焊区内产生马氏体而形成裂纹,所以一般碳量限制在不大于 0.2%,此钢的碳量设计成分不大于 0.18% 是很科学的,正火状态比调质状态下更利于焊接,因焊条多为低碳钢,焊后空冷焊缝组织一般也为铁素体+珠光体,与基体一致,不

易产生应力变形或裂纹。

3 结论

Q345D 级钢采取淬火+高温回火(也称调质处理)或正火热处理,均能满足舵杆产品对力学性能的要求;调质处理的强度更高一些;低成本较廉价的正火处理其强度也不低,-20 $^{\circ}\text{C}$ 的冲击功达 42 J 以上,优于调质处理,且正火态的组织更有利于焊接。这些均来自于一定量的合金元素 Mn (1.0%~1.6%) 和低 C (最高 0.18%) 与微量细化晶粒元素 Al、V、Ti 和 Nb 的合理配比,所以这种钢在桥梁、船舶、容器、建筑、车辆等行业得到广泛的应用。

参考文献

- 1 董成瑞. 微合金非调质钢. 北京:冶金工业出版社,2000
- 2 霍尼库姆 R W K. 钢的显微组织和性能. 傅俊岩译. 北京:冶金工业出版社,1985

范秋梅(1973-),女,工程师,锻冲工艺及模具。

收稿日期:2010-10-11