

新型 S690 低合金高强度钢 $\Phi 219$ mm \times 14 mm 无缝管的 CCT 曲线和调质工艺研究

潘先明 杜坤 李刚 向华钧 杨煌光 王川

(湖北新冶钢有限公司钢管研究所,黄石 435001)

摘要 测定了 S690 钢管 ($\% : 0.15\text{C}, 0.25\text{Si}, 1.32\text{Mn}, 0.012\text{P}, 0.005\text{S}, 0.20\text{Cr}, 0.04\text{Al}, 0.08\text{V}$) $0.01 \sim 30$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却速率下连续冷却转变 (CCT) 曲线,并研究了 $890 \sim 970$ $^{\circ}\text{C}$ 淬火, $600 \sim 690$ $^{\circ}\text{C}$ 回火对其组织和力学性能的影响。结果表明, S690 钢管相变点 Ac_3 为 828 $^{\circ}\text{C}$, Ac_1 为 753 $^{\circ}\text{C}$, Ms 为 395 $^{\circ}\text{C}$, 临界冷却速率为 13 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 存在铁素体、珠光体、贝氏体、马氏体 4 个相变区; 选择 $910 \sim 930$ $^{\circ}\text{C}$ 淬火, 钢管的组织较细小均匀, 平均晶粒尺寸 13.9 μm , 具有较高的硬度, HRC 值 42.5 ; 在 $615 \sim 675$ $^{\circ}\text{C}$ 回火, 钢管可得到均匀的回火索氏体组织, 其综合力学性能优良。

关键词 S690 无缝钢管 CCT 曲线 淬火 回火 索氏体

A Study on CCT Curves and Quenching-Tempering Process of New HSLA Steel S690 $\Phi 219$ mm \times 14 mm Seamless Tube

Pan Xianming, Du Kun, Li Gang, Xiang Huajun, Yang Huangguang and Wang Chuan
(Tube Research Institute, Hubei Xinyegang Co Ltd, Huangshi 435001)

Abstract The continuous cooling transformation (CCT) curves of S690 steel tube ($\% : 0.15\text{C}, 0.25\text{Si}, 1.32\text{Mn}, 0.012\text{P}, 0.005\text{S}, 0.20\text{Cr}, 0.04\text{Al}, 0.08\text{V}$) with cooling rate $0.01 \sim 30$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ are measured and the effect of quenching at $890 \sim 970$ $^{\circ}\text{C}$ and tempering at $600 \sim 690$ $^{\circ}\text{C}$ on structure and mechanical properties of the steel has been studied. Results show that the phase transformation points of steel S690 seamless tube are Ac_3 828 $^{\circ}\text{C}$, Ac_1 753 $^{\circ}\text{C}$, Ms 395 $^{\circ}\text{C}$, and the critical cooling rate of steel is 13 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, and there are ferrite, pearlite, bainite and martensite four transformation zone; with selecting quenching at $910 \sim 930$ $^{\circ}\text{C}$, the structure of steel tube is uniform and fine with average grain size 13.9 μm , and the steel has higher hardness with HRC value 42.5 ; with tempering at $615 \sim 675$ $^{\circ}\text{C}$, the steel tube has uniform tempered sorbite structure and better comprehensive mechanical properties.

Material Index Steel S690 Seamless Tube, CCT Curves, Quenching, Tempering, Sorbite

低合金高强度无缝钢管主要用于起重机臂架、综采支架、液压油缸等工程机械领域,随着装备制造业不断的向着大型化、专业化、轻量化的方向发展,传统的材料如 27SiMn、Q345B、30CrMnSi 等材料已经越难以满足用户对产品品质提升的要求。近年来,随着材料的升级换代,湖南衡管,上海宝钢,湖北新冶钢等均已研发了 890 MPa 级低碳低合金钢管^[1-3],并且实现了批量供货。这类低碳高强度钢主要是通过添加微合金化元素,经调质处理得到回火索氏体组织,利用细晶强化和析出强化作用,使钢具有较高的综合力学性能^[4]。

为满足用户对 690 ~ 890 MPa 级强度区间的个性化需求,湖北新冶钢以 S890 材料为基础,开发了合金元素含量较低的新型 S690 低合金高强度无缝钢管,研究了该材料的连续冷却组织转变规律,绘制了连续冷却转变 (CCT) 曲线,探讨了调质工艺对材料组织和性能的影响。

1 试验材料和方法

试验材料为湖北新冶钢生产的 S690 热轧无缝钢管,材料的规格为 $\Phi 219$ mm \times 14 mm,材料的化学成分如表 1 所示。

采用膨胀法测定 S690 无缝钢管材料的 CCT (continuous cooling transformation) 曲线,试验设备为 DIL805L 型静态相变仪,试样尺寸为 $\Phi 4$ mm \times 10 mm 的圆棒试样:(1) 试样以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 速率从室温加热到 600 $^{\circ}\text{C}$,再以 0.05 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 速率加热到 950 $^{\circ}\text{C}$,保温 10 min,冷却至室温,分析其膨胀曲线,确定 Ac_3 、 Ac_1 及 Ms 温度;(2) 试样以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 速率从室温加热到 950 $^{\circ}\text{C}$,保温 10 min,以 $0.01 \sim 30$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 不同的速

表 1 试验 S690 无缝钢管的化学成分/ $\%$

Table 1 Chemical composition of tested steel S690 seamless tube/ $\%$

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Cu | Al | V |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| 0.15 | 0.25 | 1.32 | 0.012 | 0.005 | 0.20 | 0.02 | 0.10 | 0.04 | 0.08 |

率冷却,分析不同冷却速率的温度-应变膨胀曲线,对比金相分析,从而绘制 CCT 曲线。

淬火温度主要根据钢的临界点确定,亚共析钢通常加热至 A_{c_3} 以上 $30 \sim 50$ $^{\circ}\text{C}$,考虑合金元素的作用,为了加速奥氏体化,低合金钢的淬火温度一般为 A_{c_1} (或 A_{c_3}) 以上 $50 \sim 100$ $^{\circ}\text{C}$ ^[5]。通过相变点及 CCT 相图测得的临界转变速率,将试样加热到不同的淬火温度,保温 2 h 后水淬^[3]。根据不同淬火加热温度下的组织与硬度变化规律,确定最佳的淬火温度范围,再进行回火温度梯度试验,检验不同回火温度下的材料力学性。

室温拉伸试验在 CMT5305 微机控制电子万能试验机上进行,拉伸试样直径为 $\Phi 5$ mm,拉伸速度为 3 mm/min;室温冲击试验在 JB-500 摆锤式冲击试验机上进行,冲击试样尺寸(mm)为 $10 \times 10 \times 55$, V 型缺口。金相试样经 4% 的硝酸酒精溶液浸蚀后,使用蔡司金相显微镜和 Quanta400F 场发射扫描电镜观察其组织形貌。

2 分析与讨论

2.1 相变点及 CCT 曲线

通过测定的温度-膨胀曲线,采用切线法确定临界温度为: A_{c_3} 828 $^{\circ}\text{C}$, A_{c_1} 753 $^{\circ}\text{C}$, M_s 395 $^{\circ}\text{C}$ 。不同冷却速率的试样冷却之室温后,其金相组织如图 1 所示。

由图 1 可知,当冷速为 $0.01 \sim 0.3$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,所得

到的组织为多边形铁素体 + 珠光体 + 粒状贝氏体的混合组织,并且随着冷却速度的增大,多边形铁素体晶粒逐渐细化;当冷速为 $0.5 \sim 3$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,显微组织全部为贝氏体,并且原奥氏体晶界仍然清晰可见;随着冷却速度($5 \sim 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$)的进一步增大,过冷度不断增加,贝氏体转变温度逐渐降低,粒状贝氏体向板条状贝氏体转变,并且开始进入马氏体相变区,出现贝氏体 + 马氏体的混合组织;当冷速达到 13 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,可得到全马氏体组织。

根据温度-膨胀曲线找出不同冷速下的相变起始温度和终了温度,结合金相分析的结果,在时间-温度坐标中做出 S690 钢管材料的连续冷却转变曲线,即动态 CCT 曲线(图 2)。过冷奥氏体以不同速率连续冷却时,存在四个相变区:铁素体和珠光体的转变,以及贝氏体、马氏体的转变。其中高温转变组织为铁素体、珠光体,中温转变组织为贝氏体,低温转变组织为马氏体。

2.2 不同淬火温度下的显微组织及硬度

试验所采用的新型 S690 低合金高强度无缝钢管材料成分中含有少量的 Cr、Mo、V 等合金元素,而淬火加热温度影响着奥氏体晶粒直径和合金元素在钢中的溶解分布状态,由此改变钢的淬透性和相变后的马氏体板条束尺寸,进而影响钢的力学性能^[6]。

S690 无缝钢管在不同淬火加热温度下保温 1 h

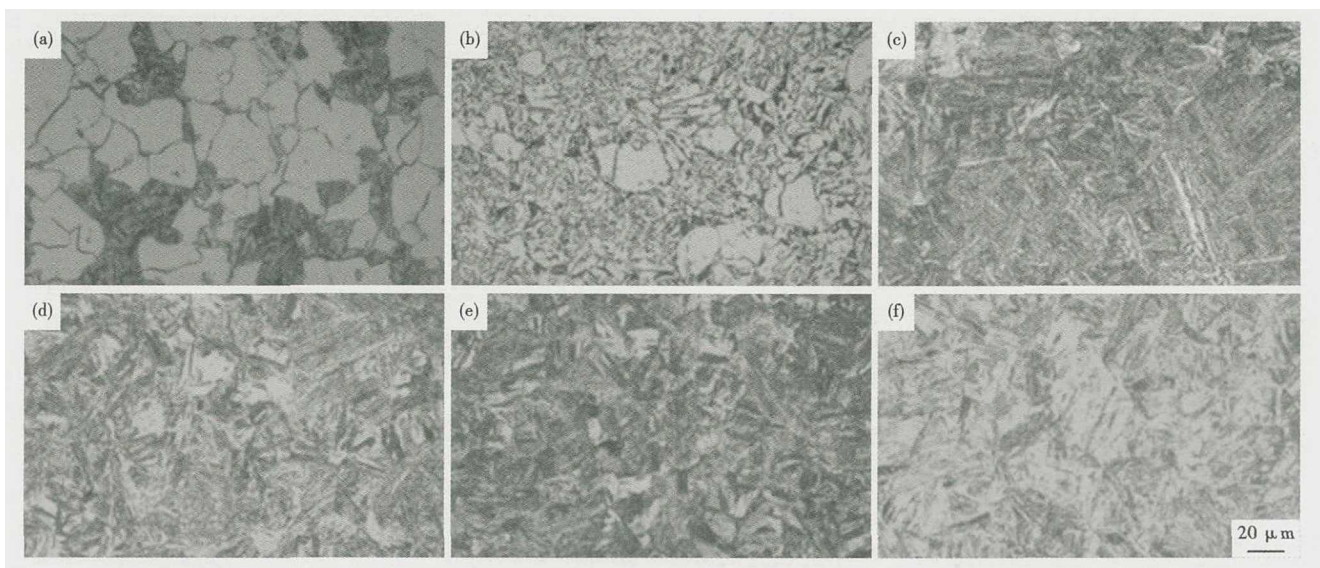


图 1 S690 钢管在冷却速度 0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, F(铁素体) + P(珠光体) + B(贝氏体) (a), 0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, B(b), 5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, B + M(马氏体) (c), 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 少量 B + M(d), 13 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, M(e) 和 30 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, M(f) 时的组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure of steel S690 seamless tube with cooling rate 0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ - F(ferrite) + P(pearlite) + B(bainite) (a), 0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ - B (b), 5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ - B + M(martensite) (c), 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ - minor B + M (d), 13 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ - M (e) and 30 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ - M (f)

水淬后经扫描电镜观察其微组织如图 3 所示。可以看出,水淬后得到全马氏体组织,同一奥氏体晶粒内存在不同位向的马氏体板条,并且随着加热温度的升高,原奥氏体晶粒逐渐粗化,马氏体板条宽度有所增加。不同淬火加热温度下的奥氏体平均晶粒尺寸如表 2 所示,在 950 ℃ 以下时,晶粒尺寸随加热温度的升高增长较缓慢,随着淬火温度的进一步提高,钢中的合金元素在奥氏体中的固溶量增大^[7],抑制晶粒长大的作用减弱,当淬火温度达到 970 ℃ 时,晶粒尺寸由 14.1 μm 迅速长到 17.5 μm。

图 4 为 S690 钢的淬火硬度与加热温度的关系曲线,随着淬火温度的升高,Cr、Mo、V 的碳化物逐渐溶解,奥氏体基体的合金度也逐渐增高,合金元素

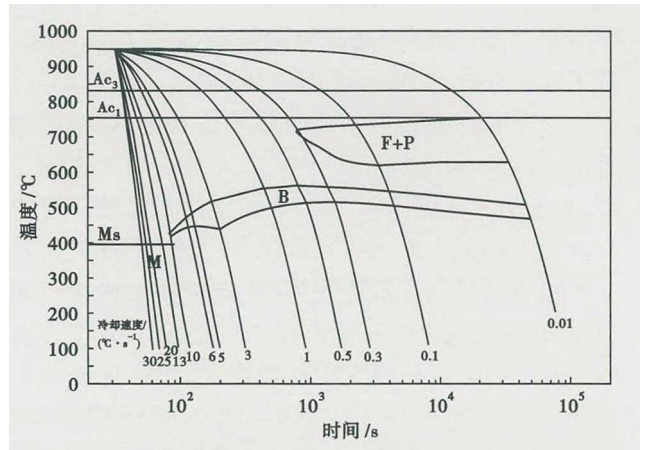


图 2 S690 钢管的 CCT(连续冷却转变)曲线
Fig. 2 Continuous cooling transformation (CCT) curves of steel S690 seamless tube

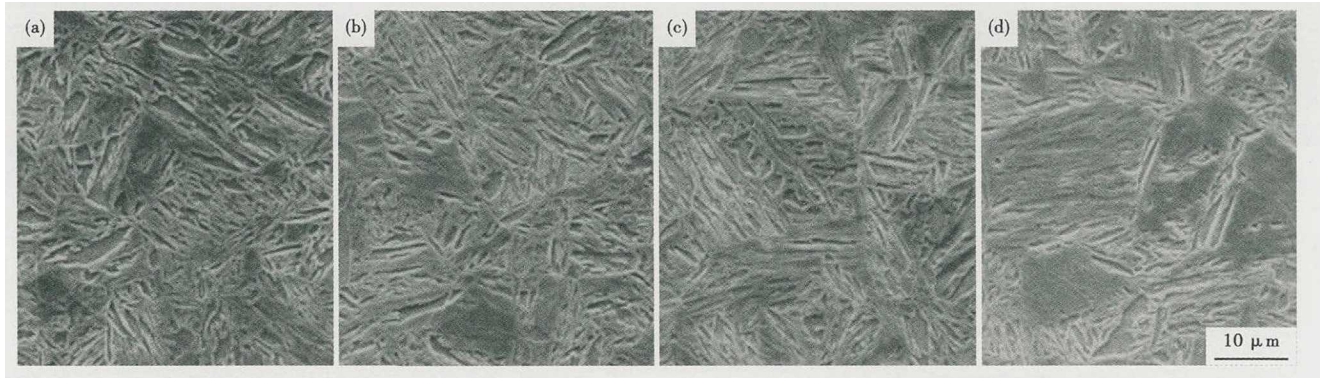


图 3 S690 无缝钢管(a)890 ℃,(b)930 ℃,(c)950 ℃和(d)970 ℃,1 h 水冷的组织形貌,SEM
Fig. 3 Morphology of structure of steel S690 seamless tube with quenching at 890 ℃ (a), 930 ℃ (b), 950 ℃ (c) and 970 ℃ (d) for 1 h, SEM

表 2 S690 无缝钢管淬火温度对奥氏体晶粒尺寸的影响
Table 2 Effect of quenching temperature on austenite grain size of steel S690 seamless tube

| 淬火温度 /℃ | 平均晶粒尺寸 /μm |
|---------|------------|
| 890 | 12.7 |
| 910 | 13.6 |
| 930 | 13.9 |
| 950 | 14.1 |
| 970 | 17.5 |

在奥氏体中的均匀度亦逐渐提高^[8],所以淬火温度在 890 ~ 910 ℃ 淬火硬度呈上升趋势,在 910 ~ 950 ℃ 时,伴随着晶粒尺寸的逐渐增大,淬火硬度呈缓慢下降趋势,当温度超过 950 ℃ 时,粗晶粒导致其淬火硬度明显下降。

综合考虑淬火温度对晶粒尺寸及淬火硬度的影响,选用 910 ~ 930 ℃ 淬火,材料的组织较细小,具有较高的硬度。

2.3 回火温度对 S690 组织和性能的影响

选择淬火加热温度 910 ℃ 和 930 ℃,保温 1 h

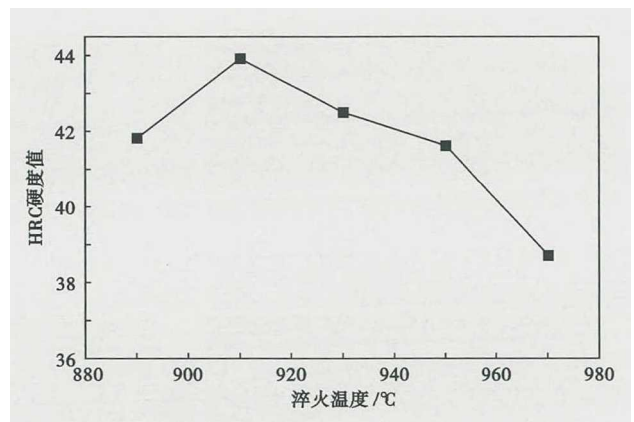


图 4 淬火温度对 S690 钢无缝管 HRC 硬度值的影响
Fig. 4 Effect of quenching temperature on HRC hardness value of steel S690 seamless tube

后水淬,再分别经过 600、615、630、645、660、675、690 ℃ 进行高温回火,保温 3 h 后空冷。

图 5 为回火温度对材料力学性能的影响。可以看出,相同回火工艺条件下,经 910 ℃ 淬火相对于 930 ℃ 淬火,试样的硬度、强度、冲击功要高一些。

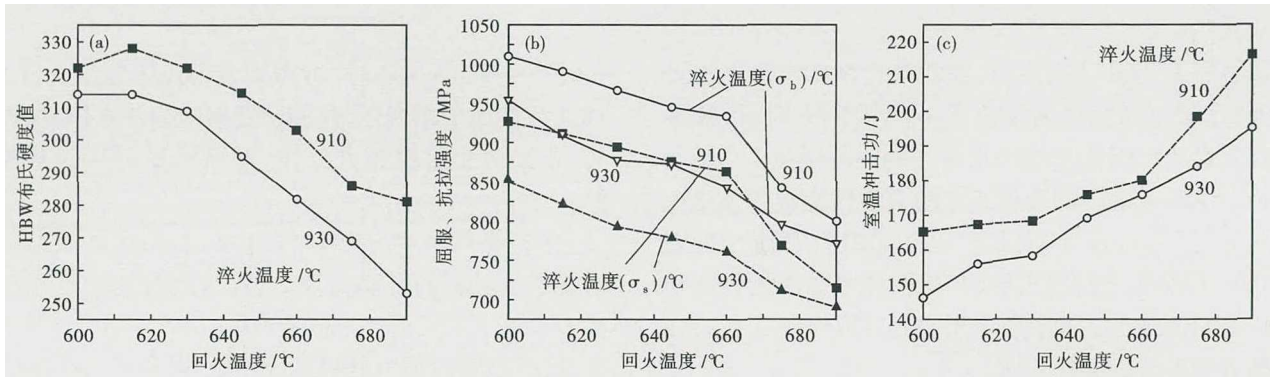


图5 淬火和回火温度对 S690 无缝钢管布氏硬度值(a),屈服和抗拉强度(b)和室温冲击功(c)的影响

Fig.5 Effect of quenching and tempering temperature on brinell hardness value (a), yield and tensile strength (b) and ambient impact energy (c) of steel S690 seamless tube

随着回火温度的升高,马氏体分解,析出 θ -碳化物^[9],铁素体基体中的合金元素的固溶度降低,试样的硬度和强度逐渐降低,而冲击功逐渐升高。由于合金元素的作用,提高了 S690 低合金钢抵抗回火软化过程的能力,并且随着 Mo、V 合金碳化物的弥散析出增多,成为固溶体的主要强化相,产生二次硬化效应,抑制硬度和强度的降低^[10]。二次硬化元素 Mo 和 V 的二次硬化峰值温度分别为 570 ~ 580 $^{\circ}\text{C}$ 和 600 ~ 625 $^{\circ}\text{C}$ ^[11-13],因此,当回火温度在 600 ~ 630 $^{\circ}\text{C}$ 时,试样硬度的降低和冲击功的增长变化趋势

较小。

图6为930 $^{\circ}\text{C}$ 淬火后的试样经不同温度回火后的金相组织(500X),可见经 600 ~ 690 $^{\circ}\text{C}$ 回火处理后,组织均为回火索氏体,虽然回火温度的升高伴随着有晶粒长大的趋势,但晶粒尺寸整体上较为细小,实际晶粒度为 8 ~ 7 级。通过扫描电镜观察(图7),水淬马氏体经回火后得到的回火索氏体仍保留了板条特征。在 600 $^{\circ}\text{C}$ 回火时,基体上已经开始析出细小的粒状碳化物;630 $^{\circ}\text{C}$ 回火时,析出的细小粒状碳化物数量明显增多,大量分布在基体和原马氏体板

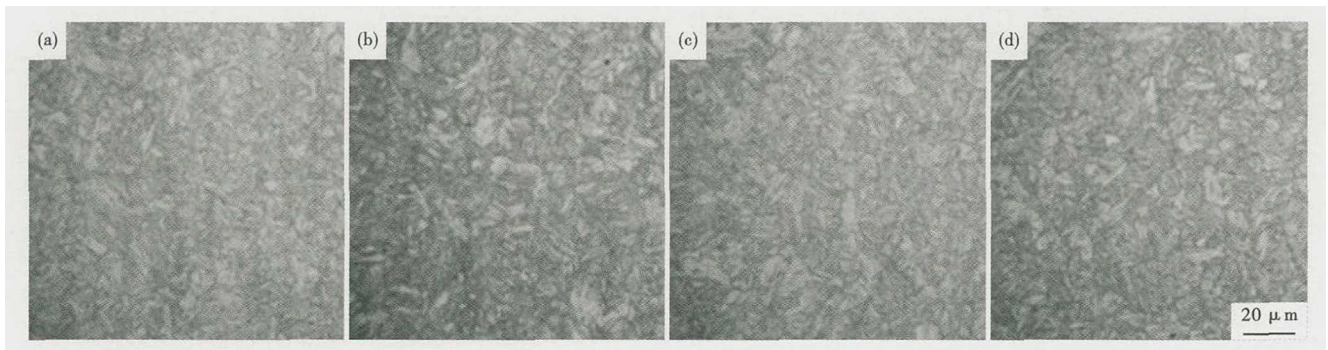


图6 S690 无缝钢管 930 $^{\circ}\text{C}$ 淬火,600 $^{\circ}\text{C}$ (a),630 $^{\circ}\text{C}$ (b),660 $^{\circ}\text{C}$ (c)和 690 $^{\circ}\text{C}$ (d)回火的组织形貌,光学

Fig.6 Morphology of structure of steel S690 seamless tube with quenching at 930 $^{\circ}\text{C}$ and tempering at 600 $^{\circ}\text{C}$ (a), 630 $^{\circ}\text{C}$ (b), 660 $^{\circ}\text{C}$ (c) and 690 $^{\circ}\text{C}$ (d), optical

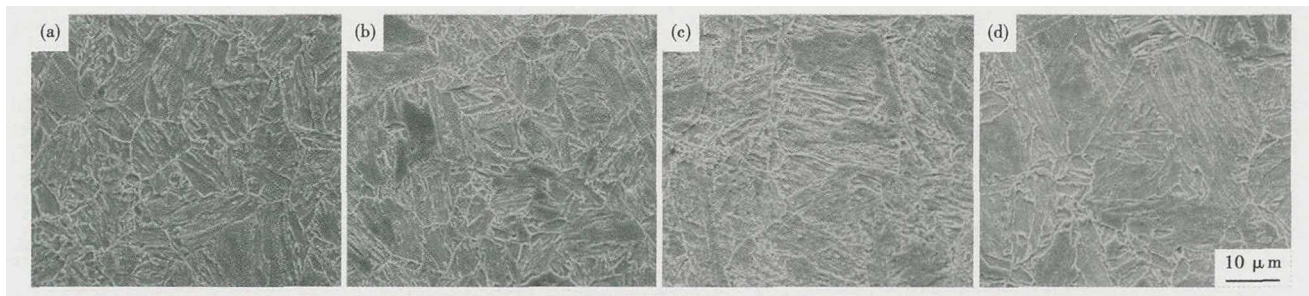


图7 S690 无缝钢管 930 $^{\circ}\text{C}$ 淬火,600 $^{\circ}\text{C}$ (a),630 $^{\circ}\text{C}$ (b),660 $^{\circ}\text{C}$ (c)和 690 $^{\circ}\text{C}$ (d)回火的组织形貌,扫描电子显微镜

Fig.7 Morphology of structure of steel S690 seamless tube with quenching at 930 $^{\circ}\text{C}$ and tempering at 600 $^{\circ}\text{C}$ (a), 630 $^{\circ}\text{C}$ (b), 660 $^{\circ}\text{C}$ (c) and 690 $^{\circ}\text{C}$, SEM

条边界上;660 ℃回火时,粒状碳化物析出进一步增多,且碳化物颗粒聚集长大;690 ℃回火时,可观察到大量短杆状碳化物以及 α 相的回复组织。

综合考虑不同回火工艺的力学性能规律及组织演变,新型低合金高强度 S690 无缝钢管可选择在 615 ~ 675 ℃进行回火处理,其综合力学性能具有很大的向上延伸区间,完全能满足 770MPa 级别高强度无缝钢管的使用要求。

3 结论

(1) 新型 S690 低合金高强度无缝钢管的相变点 A_{c3} 为 828 ℃, A_{c1} 为 753 ℃, M_s 为 395 ℃, 当冷

却速度达到 13 ℃/s 时,可得到全马氏体组织。CCT 曲线存在四个相变区,高温转变组织为铁素体、珠光体,中温转变组织为贝氏体,低温转变组织为马氏体。

(2) 加热温度为 890 ~ 970 ℃ 时,奥氏体晶粒尺寸随淬火温度的升高而增大,淬火硬度随加热温度的升高先上升后降低,采用 910 ~ 930 ℃ 淬火,材料的组织较细小,具有较高的硬度。

(3) 在 615 ~ 675 ℃ 回火,可得到均匀的回火索氏体组织,其综合力学性能具有很大的向上延伸区间,可满足不同用户对产品品质的需求。

参考文献

[1] 陈绍林. 履带式起重臂架用 HSM770 无缝钢管的开发[J]. 钢管, 2010, 39(5): 42-44.

[2] 许 轲, 刘立功, 王宝森, 等. 890 MPa 钢级钢管的焊接工艺[J]. 金属加工, 2010, 16(5): 42-44.

[3] 赵洁璠, 闵永安, 吴晓春, 等. 不同热处理工艺对 S890 高强钢强韧性的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(5): 129-134.

[4] 王洪涛, 陆 兴, 覃作祥. 一种海洋平台用钢的组织与力学性能[J]. 金属热处理, 2011, 36(11): 23-27.

[5] 赵振东. 钢的淬火回火工艺参数的确定[J]. 金属热处理, 1999, 24(3): 28-29.

[6] 惠卫军, 董 瀚, 王毛球, 等. 淬火温度对 Cr-Mo-V 系低合金高强度钢力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2012, 27(3): 14-16.

[7] 许晨旭, 李云凯, 郭 侃. 淬火温度对 42CrNi2MoWV 钢力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(11): 62-64.

[8] 鲍崇高, 谷丽东, 郭爱军, 等. 采煤机设备连接用 Cr-Mo-V 低合金钢热处理制度及性能研究[J]. 铸造, 2015, 64(7): 661-663.

[9] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 286.

[10] 惠卫军, 董 瀚, 翁宇庆, 等. 回火温度对 Cr-Mo-V 系高强度钢力学性能的影响. 金属学报, 2002, 38(10): 1009-1014.

[11] Archer R S, Briggs J Z and Loeb C M Jr. Molybdenum-Steels, Iron and Alloys[M]. New York: Climax Molybdenum Co., 1970: 9.

[12] Llewellyn D T. Vanadium in Steels[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1996, 23(5): 397-405.

[13] Zhao Z Y. The Design of Alloy Steels[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 155.

[14] 关大伟, 孙显东, 王彦武, 等. SC80 链条用钢动态 CCT 曲线的研究[J]. 轧钢, 2014, 39: 55-57.

[15] 张海峰, 张恒华, 吴晓春, 等. 热处理工艺对 S890 高强度无缝钢管组织与性能的影响[J]. 上海金属, 2014, 36(4): 30-33.

[16] 段争涛, 李艳梅, 朱伏先, 等. 淬火温度对 Q690D 高强钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2012, 37(2): 81-85.

潘先明(1971-), 男, 高级工程师, 1992 年武汉科技大学(本科)毕业, 钢铁材料研究及无缝钢管品种开发。
E-mail: panxianming@citicsteel.com

收稿日期: 2018-02-05

欢迎订阅 2019 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号: 38-183

定价: 16.00 元/期 96.00 元/年

邮编: 435001

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