

· 应用与服役 ·



热处理工艺对 S770QL 高强度无缝钢管屈强比的影响

杜 坤^{1,2}, 费新刚^{1,2}, 马金辉^{1,2}, 潘先明^{1,2}, 黎福华^{1,2}

(1 大冶特殊钢有限公司, 黄石 435001; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

摘 要: 屈强比是高强结构用无缝钢管的重要性能指标。研究了高强度无缝钢管 S770QL 钢(质量分数) %: 0.15C, 0.28Si, 1.30Mn, 0.009P, 0.003S, 0.20Cr, 0.02Ni, 0.47Mo, 0.025Al, 0.08V 经 A_{c_3} 以上不同的淬火和回火工艺处理后的力学性能的变化规律, 并对显微组织进行分析, 结果表明, 钢管在 880 °C~940 °C 淬火后, 奥氏体晶粒尺寸较为细小, 均未超过 20 μm , 组织全部转变为马氏体, 且随着淬火温度的升高, 奥氏体平均晶粒尺寸逐渐增大, 在回火工艺相同的情况下, 屈强比随淬火温度的升高而减小; 经高温回火后, 组织全部转变为回火索氏体, 随着回火温度的升高, 在析出强化和细晶强化的共同作用下, 屈强比先增大, 回火温度超过 660 °C 后又减小。综合考虑, 采用 920 °C×60 min 淬火(水冷)+600 °C~630 °C×120 min 回火(空冷)工艺, 钢管的屈强比可保持在 0.89~0.90, 综合性能最优。

关键词: 屈强比; 淬火; 回火; 无缝钢管

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2024-00177 **中图分类号:** TG156

Effects of Quenching and Tempering Process on Yield to Tensile Strength Ratio of S770QL High Strength Seamless Tube

Du Kun^{1,2}, Fei Xingang^{1,2}, Ma Jinhui^{1,2}, Pan Xianming^{1,2}, Li Fuhua^{1,2}

(1 Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China; 2 Hubei Provincial Key Laboratory of High-quality Special Steel, Huangshi 435001, China)

Abstract: The yield to tensile strength ratio is the important performance index of seamless steel tube for high strength structures. Studied the change law of mechanical properties of S770QL steel (mass fraction) %: 0.15C, 0.28Si, 1.30Mn, 0.009P, 0.003S, 0.20Cr, 0.02Ni, 0.47Mo, 0.025Al, 0.08V, after different quenching and tempering processes above A_{c_3} , and the microstructure was analysed. The results show that after the quenching temperature of the steel pipe from 880 °C to 940 °C, the grain size of austenite grain is relatively small, not exceeding 20 μm , and all the microstructure are transformed into martensite. With the increase of the quenching temperature, the average grain size of austenite gradually increases. Under the condition of the same tempering process, the bending strength ratio decreases with the increase of the quenching temperature. After high temperature tempering, under the combined action of precipitation enhancement and fine crystal reinforcement, the bending strength ratio increases first, and decreases again after the tempering temperature exceeds 660 °C. In comprehensive consideration, 920 °C 60 min quenching (water cooling) + 600 °C -630 °C 120 min tempering (air cooling) process is adopted, and the yield strength ratio of steel pipe can be maintained between 0.89 and 0.90, and the comprehensive performance is optimal.

Key Words: Yield to Tensile Strength Ratio; Quenching; Tempering; Seamless Tube

S770QL 是一种典型的 770 MPa 钢级高强度无缝钢管, 在服役时作为主要的承力结构件, 广泛应用于工程机械领域或大型装备, 如履带式起重机的臂架, 泵车的液压缸缸体, 煤矿开采平台的液压支柱等。欧洲标准化委员会(CEN)发布的《EN 10210-3: 2020 Hot finished steel structural hollow sections-Part 3: Technical delivery conditions for high strength and weather resistant steels》标准^[1]和中国国家标准

化管理委员会发布的《GB 30584—2014 起重机臂架用无缝钢管》标准^[2]都对 770 MPa 钢级高强度无缝钢管的机械性能有明确规定。在此基础上, 一些行业知名用户为确保工程机械装备安全可靠, 在选材设计上预留充分的裕度, 对一些力学指标做了调整, 形成如下共识: 屈服强度 $\geq 770\text{MPa}$, 抗拉强度 820~1 000 MPa, 断后伸长率 $\geq 15\%$, -40 °C 纵向冲击功 $\geq 45\text{J}$, 同时, 也对材料的屈强比提出了隐性的要

求,即越低越好,一般将屈服比 ≤ 0.92 作为目标值来控制。屈服比是安全方面的重要考量因素,其意义在于:在发生塑性变形时,屈服比相对较低的材料,从屈服点至材料发生颈缩现象的均匀塑性变形阶段相对较长,有利于安全事故的预防。

研究表明,通过亚温淬火+回火或轧后冷却控制来获得软相和硬相的混合微观组织,其中,软相起到降低屈服强度的作用,硬相确保材料保持较高的抗拉强度,从而得到较低的屈服比^[3-6]。在此基础上,也有学者研究了将控轧空冷工艺与亚温淬火+回火相结合的方法来获取较低的屈服比^[7]。上述方法虽然可以有效降低材料的屈服比,但是,材料的软相和硬相间必定存在着组织应力,这种内应力在无缝钢管加工时可能造内径或外径的微小变形,使得成品零件的精度无法满足使用要求,同时,组织不均匀也会对高强度无缝钢管的疲劳寿命产生不利影响。因此,通过对完全淬火+回火的热处理工艺的研究,获得均匀的相组织和较低的屈服比,对于S770QL高强度无缝钢管的生产和应用具有重要意义。

1 试验材料和方法

试验材料为热轧状态的S770QL高强度无缝钢管,生产工艺流程为:70 t电弧炉+LF+VD→连铸圆坯 $\phi 195$ mm→环形炉加热→斜轧穿孔→CPE顶管机轧制→步进炉再加热→除磷→减径→冷床冷却→锯切,钢管的名义外径为 $\phi 139.7$ mm,名义壁厚为15 mm。试验材料采用低碳低合金的成分设计,化学成分见表1。在DIL805L型静态相变仪上通过热膨胀法测得实验材料的 A_{c1} 为755 °C, A_{c3} 为830 °C。

将试验钢管分为4组,分别加热到880、900、920、940 °C后保温60 min,再水冷淬火,每组分别按600、630、660、690 °C进行回火处理,回火保温时间均为120 min,即一共16种调质工艺见表2,每种调质工艺均处理3个样管,力学性能的结果取其平均

表1 试验材料S770QL高强度无缝钢管的化学成分(质量分数)

%									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V
0.15	0.28	1.30	0.009	0.003	0.20	0.02	0.47	0.025	0.08

值。力学性能试样和显微组织试样均在钢管的壁厚中心处取得,利用Z400E电子万能试验机、JB-500摆锤式冲击试验机、金相显微镜和Apreo 2 s扫描电镜分别检验试验钢管的室温纵向拉伸性能、-40 °C纵向冲击功和显微组织,其中,拉伸试样为 $\phi 8$ mm的圆棒试样,-40 °C冲击功试样尺寸为10 mm \times 10 mm \times 55 mm,V型缺口,显微组织试样尺寸10 mm \times 10 mm \times 10 mm。

2 试验结果与分析

2.1 力学性能

试验材料按表2的试验工艺热处理后,其屈服强度、抗拉强度、断后伸长率的平均值如图1所示。回火温度相同时,屈服强度、抗拉强度随淬火温度的升高有下降的趋势,断后伸长率随淬火温度的升高有上升的趋势;淬火温度相同时,材料的屈服强度和抗拉强度随回火温度的升高也呈明显下降的趋势,断后伸长率随回火温度的升高变化不明显。试验材料采用880 °C淬火+660 °C或690 °C回火、900 °C淬火+630 °C或660 °C回火、920 °C淬火+600 °C或630 °C回火、940 °C淬火+600 °C或630 °C回火均能满足770 MPa钢级无缝钢管的拉伸性能要求。

S770QL高强度无缝钢管在不同试验工艺下屈服比的平均值如图2(a)所示,回火温度相同时,屈服比随淬火温度的升高而降低,且当淬火温度升高到920 °C及以上时,屈服比基本都处于0.91以下;试验材料在各种淬火温度下,屈服比随回火温度的升高而先上升,回火温度超过660 °C后,屈服比又呈下降趋势。试验材料在不同试验工艺下的-40 °C纵向冲击功的平均值如图2(b)所示,S770QL高强度无

表2 S770QL高强度无缝钢管的试验工艺及编号规定

Table 2 Experiment technology and number specification of S770QL high strength seamless tube

试验工艺	880 °C \times 60 min 淬火 (水冷)	900 °C \times 60 min 淬火 (水冷)	920 °C \times 60 min 淬火 (水冷)	940 °C \times 60 min 淬火 (水冷)
600 °C \times 120 min 回火(空冷)	a1	b1	c1	d1
630 °C \times 120 min 回火(空冷)	a2	b2	c2	d2
660 °C \times 120 min 回火(空冷)	a3	b3	c3	d3
690 °C \times 120 min 回火(空冷)	a4	b4	c4	d4

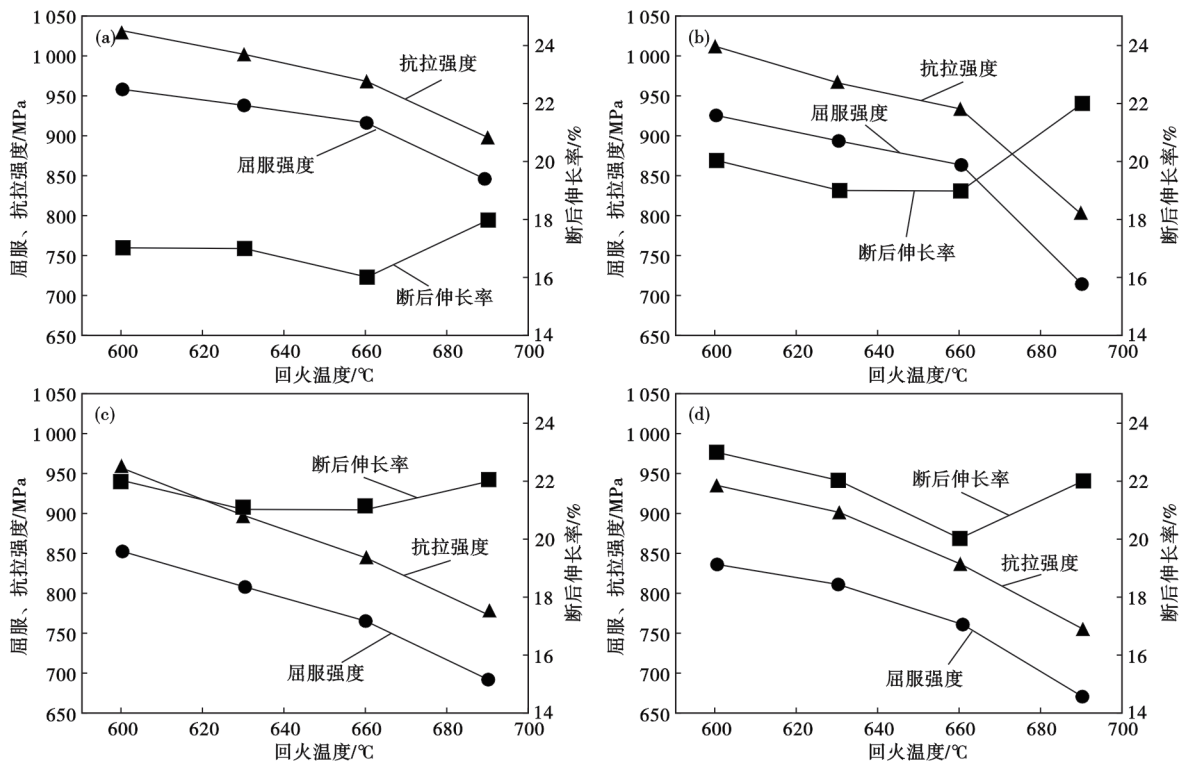


图1 S770QL高强度无缝钢管在不同试验工艺下的拉伸性能:(a)试验工艺 a1~a4, (b)试验工艺 b1~b4, (c)试验工艺 c1~c4, (d)试验工艺 d1~d4

Fig. 1 Tensile property of S770QL high strength seamless tube under different experiment technology : (a) experiment technology a1~a4, (b) experiment technology b1~b4, (c) experiment technology c1~c4, (d) experiment technology d1~d4

缝钢管经淬火+高温回火后,具有优异的低温冲击韧性,-40 °C纵向冲击功基本处于150 J以上。

2.2 不同淬火温度下的显微组织

试验材料分别经880、900、920、940 °C淬火处理后,其奥氏体晶粒的平均尺寸见表3。一方面,由于钢中添加了合金元素(质量分数)为0.2%Cr、0.47%Mo、0.08%V、0.025%Al等,晶粒细化作用明显,奥氏体晶粒平均尺寸较为细小,均未超过20 μm;另

一方面,奥氏体化加热温度及保温时间均对奥氏体晶粒的长大有着较大的影响^[8],奥氏体晶粒随加热温度的升高而逐渐增大^[9],当淬火加热温度为880 °C时,奥氏体平均晶粒尺寸为11.4 μm,随着淬火加热温度升高,合金元素在钢中的溶解度加大,当淬火加热温度上升到940 °C时,奥氏体平均晶粒尺寸增加到16.5 μm。

通过扫描电镜观察到的S770QL高强度无缝钢

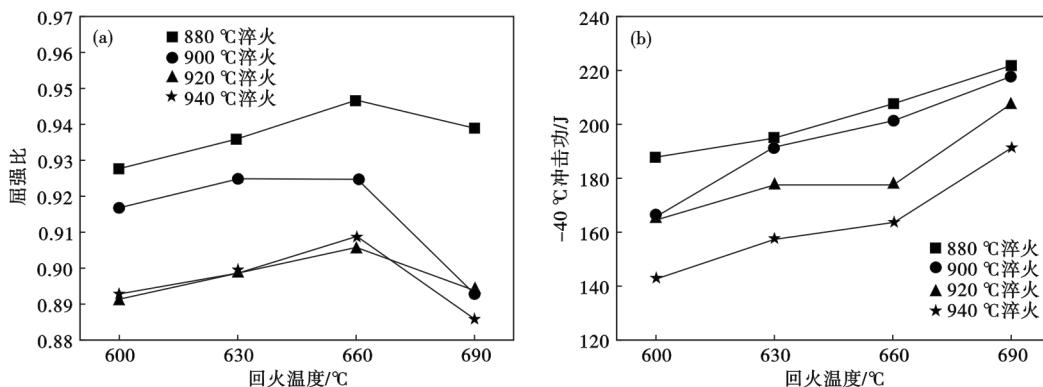


图2 S770QL高强度无缝钢管在不同试验工艺下的屈强比和-40 °C纵向冲击功:(a)屈强比,(b)-40 °C冲击功

Fig. 2 Yield to tensile strength ratio and -40 °C low temperature impact property of S770QL high strength seamless tube under different experiment technology : (a) yield to tensile strength ratio, (b) -40 °C low temperature impact

表3 不同淬火温度下的奥氏体晶粒尺寸

Table 3 Average grain size of austenite under different quenching temperatures

淬火温度/°C	880	900	920	940
平均晶粒尺寸/ μm	11.4	12.2	14.7	16.5

管经不同加热温度淬火后的显微组织如图3所示。由于淬火温度均高于 A_{c3} 温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上,使得奥氏体转变充分,且钢中Cr、Mo、V增加淬透性元素的存在,确保了壁厚为 15 mm 的试验钢管淬火后得到单一的板条马氏体组织。当淬火加热温度为 $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,奥氏体转变成的马氏体较为细小,随着淬火加热温度升高,原奥氏体晶粒逐渐长大,转变后的马氏体板条宽度增加,当淬火加热温度上升到 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,存在粗大的马氏体板条束贯穿整个奥氏体晶粒的情况,一些奥氏体晶粒内还存在多个不同位向的马氏体板条。

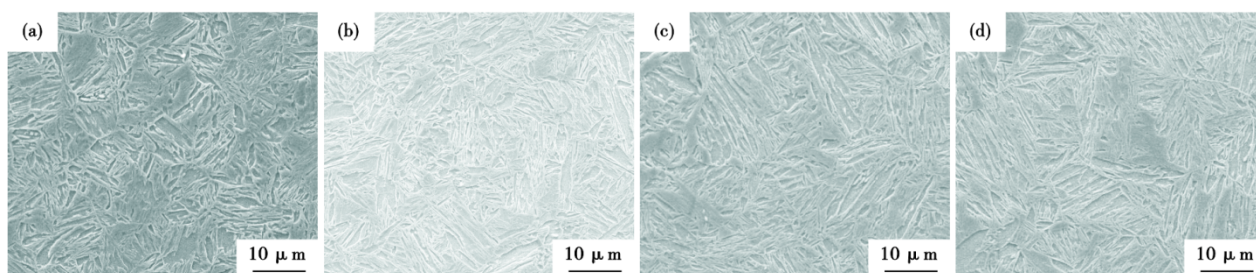
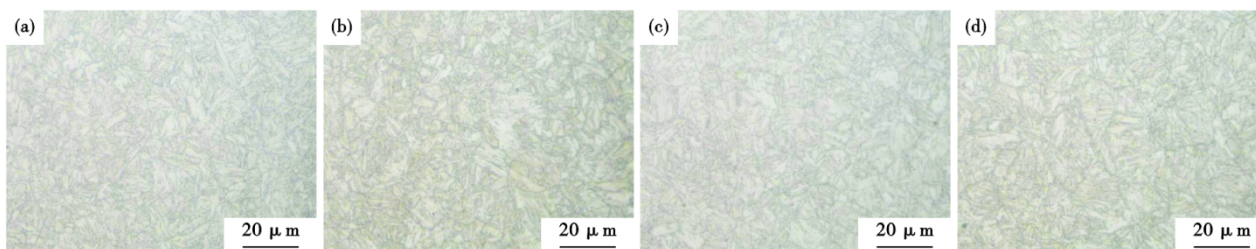
相关研究表明,细晶强化对屈服强度的强化作用大于对抗拉强度的强化作用^[10],换言之,晶粒粗化对降低屈服强度的作用要大于对降低抗拉强度的作用。因此,适当提高淬火温度,使奥氏体晶粒粗化,有利于降低屈强比。从的试验结果可以看出,相比 $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火工艺,试验材料的屈强比基本处于 $0.91\sim 0.95$ 之间,而采用 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$

淬火工艺,试验材料的屈强比均处于 $0.88\sim 0.91$ 之间,整体上有明显的下降,而塑性和低温冲击韧性仍能保持较优的状态。

2.3 不同回火温度下的显微组织

试验材料经 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火后,分别按 600 、 630 、 660 、 $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火的金相组织如图4所示。金相组织试样取自试验钢管壁厚的中心处,经过高温回火后,马氏体转变为索氏体,回火温度在 $600\sim 660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时晶粒长大趋势较缓,这主要是由于Cr、Mo、V回火稳定性元素的存在,随着回火温度进一步提高,达到 $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,晶粒长大相对较明显。通过扫描电镜观察组织,如图5所示, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火时,基体析出的碳化物较少,且尺寸较为细小,呈粒状; $630\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火时,基体析出的碳化物数量增多; $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火时,基体上析出的碳化物数量进一步增多,且伴随着长大和聚集; $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火时,视场中可观察到大量短杆状碳化物。

在 $600\sim 690\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温回火阶段,C原子在钢中的扩散能力较强,在回火温度升高的过程中,C原子固溶强化作用减弱甚至消失,材料的强度会有所下降。虽然合金元素在钢中的固溶强化作用减弱,但是析出强化和细晶强化的作用突显了出来。一方面,由于强碳化物形成元素Mo、V也会快速扩散,形

图3 S770QL高强度无缝钢管经不同温度保温60 min水淬后的SEM图:(a) $880\text{ }^{\circ}\text{C}$,(b) $900\text{ }^{\circ}\text{C}$,(c) $920\text{ }^{\circ}\text{C}$,(d) $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ Fig. 3 SEM diagram of S770QL high-strength seamless steel pipe after water quenching at different temperatures for 60 min : (a) $880\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) $920\text{ }^{\circ}\text{C}$, (d) $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 图4 S770QL高强度无缝钢管在不同回火温度下的显微组织:(a) $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,(b) $630\text{ }^{\circ}\text{C}$,(c) $660\text{ }^{\circ}\text{C}$,(d) $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ Fig. 4 Microstructure of S770QL high strength seamless tube tempered at different tempering temperatures : (a) $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $630\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) $660\text{ }^{\circ}\text{C}$, (d) $690\text{ }^{\circ}\text{C}$

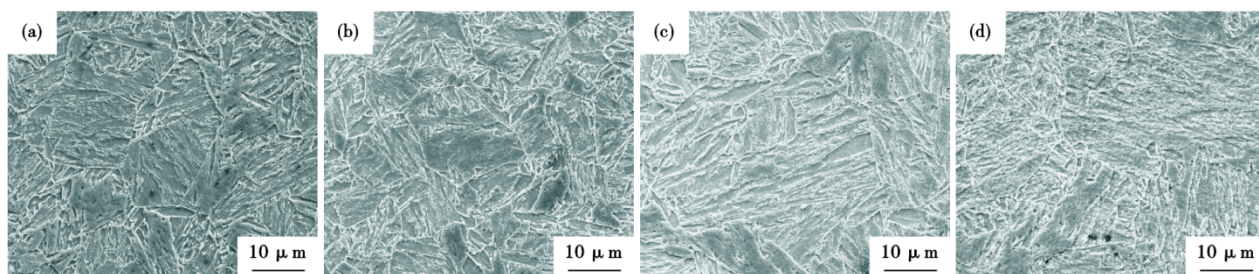


图5 S770QL高强度无缝钢管在不同回火温度的SEM图:(a)600 °C,(b)630 °C,(c)660 °C,(d)690 °C

Fig. 5 SEM photos of S770QL high strength seamless tube tempered at different tempering temperatures : (a)600 °C, (b)630 °C, (c)660 °C, (d)690 °C

成合金碳化物弥散析出,钉扎位错运动,起到弥散强化作用^[11],因此,可对材料强度的下降起到一定的抑制作用。当回火温度在600~660 °C时,随着析出的碳化物逐渐增多,强度的下降相对缓慢,当回火温度高于660 °C后,长大并聚集的合金碳化物失去了对位错阻碍作用,材料的强度下降相对较快。另一方面,当回火温度在600~660 °C时,回火索氏体晶粒尺寸随回火温度的升高增长趋缓,对屈服强度的下降起到了抑制作用,当回火温度在690 °C时,回火索氏体晶粒尺寸长大明显,屈服强度下降较快,因此,在固溶强化、析出强化和细晶强化的共同作用下,试验材料的屈强比随回火温度的升高先增大

而后减小。

3 结论

1)S770QL高强度无缝钢管材料采用 A_{c3} 温度以上淬火,组织全部转变为马氏体,奥氏体晶粒尺寸随淬火温度的升高而逐渐增大,在相同回火工艺的情况下,屈强比随淬火温度的升高而减小。

2)经高温回火后,组织转变为回火索氏体,屈强比随回火温度的升高先增大而后减小。采用920 °C×60 min 淬火(水冷)+600~630 °C×120 min 回火(空冷)工艺,S770QL高强度无缝钢管的屈强比可保持在0.89~0.90,综合性能最优。

参考文献

- [1] CEN/TC 459/SC 3 Allgemeine Baustahle. EN 10210-3:2020, Hot finished steel structural hollow sections-Part 3: Technical delivery conditions for high strength and weather resistant steels[S]. CEN, 2020.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. 起重机臂架用无缝钢管: GB/T 30584—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [3] 秦玉荣, 崔强, 陈林恒, 等. 热处理工艺对690 MPa级高强度钢屈强比的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(10): 145-147.
- [4] 张雨源, 杨刚, 范俊明, 等. 热处理工艺对高压气瓶用34CrMo4钢屈强比的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(2): 125-129.
- [5] 贾军军, 李秋琴, 杨刚. 回火温度对高压气瓶用34CrMo4钢屈强比的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(24): 129-133.
- [6] 武凤娟, 杨浩, 邵伟, 等. 热轧后的冷却方式对Q500qE桥梁钢板屈强比的影响[J]. 上海金属, 2020, 42(4): 11-17.
- [7] 赵喜伟, 龙杰, 庞辉勇, 等. 低屈强比超高强EH690钢板的研发[J]. 轧钢, 2022, 39(3): 103-107.
- [8] 唐郑磊, 王福明, 于乔木, 等. 热处理工艺对水电站用钢SXQ500/500DZ35奥氏体晶粒的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 104-108.
- [9] Qiao Z X, Zhang D T, Liu Y C, et al. Effect of austenization temperature on the martensitic transformation in a low-alloy ultra-high-strength steel [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 66-68: 1797-1801.
- [10] 高惠临. 管线钢屈强比分析与评述[J]. 焊管, 2010, 33(6): 10-14.
- [11] 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.