



## 二次调质对165ksi管端加厚钢管组织及性能的影响

周家祥<sup>1</sup>, 史彬<sup>1</sup>, 王亚男<sup>1</sup>, 孙卓男<sup>1</sup>, 丁炜<sup>1</sup>, 姚勇<sup>2</sup>  
(1 天津钢管制造有限公司, 天津300301; 2 靖江特殊钢有限公司, 靖江214500)

**摘要:** 钻杆的管端墩粗加厚是钻杆生产过程中非常重要的工序, 管端墩粗以后, 管体和管端壁厚尺寸不一样, 在调质热处理时很难保证管体和管端力学性能的均匀性。这导致材料屈服强度、冲击韧性、硬度、晶粒度等存在较大差异, 不利于高强高韧性钻杆的安全作业。天津钢管制造有限公司采用两次调质热处理, 900 °C×30 min 淬火+650 °C×60 min 回火+900 °C×30 min 淬火+650 °C×60 min 回火, 充分细化晶粒度, 提高强度和韧性, 缩小管体管端性能均匀性。最终管体和管端屈服强度1 140~1 300 MPa, 抗拉强度≥1 200 MPa, 管体-20 °C纵向冲击功≥100 J, 加厚区室温纵向冲击功≥80 J。实现了较好的强度韧性匹配, 以及管体管端均匀性的良好效果。为超高强度高韧性钻杆在9 000m以上特深井开采安全服役, 提供了良好的材料性能保证。

**关键词:** 165ksi; 钢管; 钻杆; 管端墩粗加厚; 高强度; 高韧性

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00275 **中图分类号:** TG156. 31

## Effect of Secondary Q&T Procedure on Microstructure and Property for 165ksi Pipe with Upsetting at Pipe-end

Zhou Jiexiang<sup>1</sup>, Shi Bin<sup>1</sup>, Wang Yanan<sup>1</sup>, Sun Zhuonan<sup>1</sup>, Ding Wei<sup>1</sup>, Yao Yong<sup>2</sup>  
(1 Tianjin Pipe Corporation, Tianjin 300301, China; 2 Jingjiang Special Steel Corporation, Jingjiang 214500, China)

**Abstract:** The upsetting and thickening of the pipe-end of the drill pipe is a very important process in the production process of the drill pipe. After upsetting at the pipe-end, the wall thickness of pipe body and pipe-end are different, which will cause the mechanical property deviation of pipe body and pipe-end during quench and temper heat treatment. This leads to large differences in the yield strength, impact toughness, hardness and grain size of the material, which is not conducive to the safe operation of high strength and high toughness drill pipe. Tianjin Pipe Corporation has developed secondary Q&T procedure, by 900 °C for 30 min quenching + 650 °C for 60 min tempering + 900 °C for 30 min quenching + 650 °C for 60 min tempering to fully refine the grain size, improve the strength and toughness, and reduce the uniformity of pipe body and pipe-end. Final the yield strength of both pipe body and pipe-end are 1 140 MPa-1 300 MPa, tensile strength beyond 1 200 MPa. The CVN at -20 °C impact energy reached to 100 J for longitudinal pipe body and 80 J for longitudinal upset end at room temperature. The excellent strength and toughness character, and the uniform property of pipe body and upset assures the drill pipe can be used safely. It provides good material performance guarantee for the safety of ultra-high strength and high toughness drill pipe in the ultra-deep wells which more than 9 000 meters.

**Key Words:** 165ksi; Steel Pipe; Drill Pipe; Pipe-end Upsetting; High Strength; High Toughness

管端墩粗加厚是钢管生产过程中一个重要加工工序, 石油天然气开采的很多工具, 如油管、套管、钻杆等都需要管端加厚墩粗, 以满足管端力学性能和加工要求。管端加厚墩粗的好处有: 其一, 提供更加厚实的外径和壁厚等几何尺寸, 便于车螺纹、摩擦焊接等后续管端加工; 其二, 加厚以后管端横截面积增大, 在管端和管体材料性能相当的情况下, 可以保证管端接头具有更好的连接强度、压缩性能、螺纹密封性、高扭矩等接头性能, 保障接头部位的使用安全性<sup>[1-4]</sup>。

但是, 管端墩粗加厚以后给热处理带来的难题

是, 很难保证整管热处理过程中管体管端的性能均匀性<sup>[5-8]</sup>。由于管端部位壁厚更厚, 导致水冷淬透性以及回火韧性改善等效果都不如管体好, 如何缩小热处理过程中管体管端性能差异性, 是加厚钢管热处理面临的重大难题<sup>[9-11]</sup>。

细化晶粒度是改善强度和韧性最有效方法, 也是缩小管体管端性能差异性的最好途径。因此, 对于管端墩粗加厚的高强度高韧性钢管产品, 合金成分仍然沿用C-Mn-Cr-Mo为主合金, 适当添加V-Nb-Ti等微合金, 来保证调质钢的强韧性能。此外在热处理过程中, 采用二次调质Q+T+Q+T(Quench+Tem-

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3711700)

**作者简介:** 周家祥(1979—), 男, 硕士, 高级工程师; **E-mail:** zhoujiexiang@citicsteel.com; **收稿日期:** 2024-12-05

per+Quench+Temper), 可以充分细化管体的晶粒度, 最大程度减少管体管端力学性能差异性和微观组织差异性。

## 1 试验材料与方案

设计超深井钻杆管体外径 139.7 mm, 壁厚 12.7 mm, 管端镢粗外径 151 mm, 壁厚 21.5 mm。屈服强度 1 140~1 300 MPa, 抗拉强度 $\geq$ 1 200 MPa, 管体-20 °C 纵向冲击功 $\geq$ 100 J, 加厚区室温纵向冲击功 $\geq$ 80 J。力学性能要求见表 1、尺寸精度要求见表 2。

设计钢管管体及镢粗端初步方案如下:

(1) 采用电弧炉冶炼, 真空脱气, 连续浇注最终到直径 $\phi$ 210 mm 连铸圆坯。

(2) 连铸圆坯热连轧, 在 PQF (Premium Quality Finishing) 连轧管机组轧制, 最终得 $\phi$ 139.7 mm $\times$ 12.7 mm 规格热轧态钢管。

(3) 管端感应加热到 1 250 °C, 然后镢粗加厚, 加厚尺寸为 $\phi$ 151 mm $\times$ 21.5 mm。

(4) 采用两次调质热处理 900 °C $\times$ 30 min 淬火+650 °C $\times$ 60 min 回火+900 °C $\times$ 30 min 淬火+650 °C $\times$ 60 min 回火, 奥氏体高温炉保温 800~900 °C, 外淋内喷方式淬火。回火炉温度 500~650 °C, 出回火炉后空冷至室温。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 炼钢与连铸

采用电弧炉 (EAF) 冶炼, 连铸 $\phi$ 210 mm 圆坯。钢坯化学成分见表 3。

### 2.2 无缝管热连轧

铸坯加热温度 1 250~1 300 °C, 保温时间 2.5~3.5 h; 穿孔温度 1 100~1 170 °C, 穿孔后温度 1 230~1 300 °C, PQF 三辊轧机开轧温度 1 080~1 130 °C, 出脱管机温度 1 030~1 100 °C; 出脱管机后进入张力减径机在 980~1 050 °C 下定径成最终的成品管, 出机架后再空冷至室温; 最终轧管成品规格尺寸 $\phi$ 139.7 mm $\times$ 12.7 mm。

### 2.3 整管全长热处理

#### 2.3.1 热处理工艺

整管全长热处理, 采用步进式加热炉加热, 分段控制加热温度, 钢管步进式加热炉示意图如图 1 所示。

钢管在炉内分成预热段、加热段、保温段三个温度段加热。预热段、加热段、保温段的温度设置: 淬火炉 (800 °C+860 °C+900 °C), 回火炉 (500 °C+600 °C+650 °C)。

步进梁移动节拍时间设置, 淬火炉 85s/步, 回火

表 1 165ksi 加厚钻杆料的力学性能设计指标

Table 1 Design criterion of mechanical properties for 165ksi thickened drill pipe material

检验项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度(HRC)	平均晶粒度/级	纵向冲击功/J
检验标准	ASTM A370—2023	ASTM A370—2023	ASTM A370—2023	ASTM A370—2023	ASTM E112—2013	ASTM A370—2023
管体	1 140~1 300	$\geq$ 1 200	$\geq$ 15	38~45	$\geq$ 8	$\geq$ 100(-20 °C)
管端	1 140~1 300	$\geq$ 1 200	$\geq$ 15	38~45	$\geq$ 8	$\geq$ 80(20 °C)

表 2 165ksi 加厚钻杆尺寸精度设计指标

Table 2 Design criterion of dimensional accuracy for 165ksi thickened drill pipe

尺寸精度	外径		壁厚		钢管不圆度/%	壁厚不均度/%
	公称值/mm	允许偏差/%	公称值/mm	允许偏差/%		
管体	139.7	-0.5~+1	12.7	-8~+15	$\leq$ 0.5	$\leq$ 14
管端	151	-1~+1	21.5	-8~+15	$\leq$ 0.5	$\leq$ 14

表 3 钢坯 165ksi 化学成分 (质量分数)

Table 3 Chemical content of billet 165ksi

											%
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Al	Als	V	Nb
0.30	0.28	0.63	1.15	0.75	0.04	0.008	0.001	0.030	0.027	0.10	0.01
As	Sn	Pb	Sb	Bi	Ca	O	N	H	-	-	-
0.005 4	0.002 3	0.001 3	0.002 0	0.001 2	0.001 9	0.001 1	0.004 5	0.000 1	-	-	-

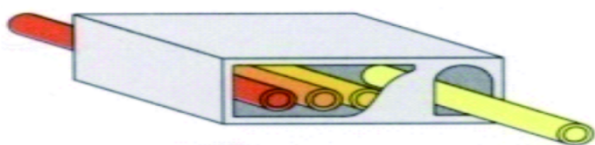


图 1 钢管步进式加热示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steel pipe stepping-type heating

炉 105 s/步。以保证预设的热处理工艺淬火 900 °C×30 min,回火 650 °C×60 min。

热处理工艺制定的基本原理和试验工艺如下:

(1)根据 165ksi 钢种连续冷却转变曲线(CCT)制定热处理温度参数,根据钢管壁厚尺寸和力学性能制定保温时间参数。

(2)淬火温度,一般高温加热奥氏体化,相比  $A_{c3}$  温度增加 30~50 °C,本钢种  $A_{c3}$  温度 861 °C,因此,制定淬火温度 900 °C。

(3)淬火炉保温时间,到目标温度后保温 30 min,既充分奥氏体均匀化,又不造成晶粒度长大。

(4)淬火冷却速度,要完全淬透成马氏体,根据 CCT 曲线,马氏体转变临界冷却速度 15 °C/s,因此,采用水冷淬火冷却。

(5)回火温度和时间,根据钢管壁厚和力学性能要求,壁厚 21.5 mm,屈服强度 1 140 MPa,制定回火工艺 650 °C×60 min,出炉空冷。

165ksi 钢种连续冷却转变曲线如图 2 所示。

### 2. 3. 2 热处理性能对比

从管体和管端力学性能和金相组织检测结果

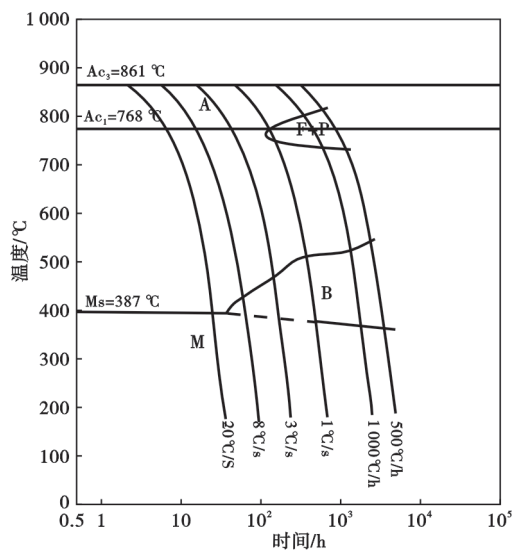


图 2 钢种 165ksi 连续冷却转变曲线

Fig. 2 Continuous cooling transformation curve of 165ksi steel

可知,两次调质热处理后,钢管材料力学性能更加优异,见表 4。可以看出,两次调质热处理后,强度韧性效果更好,管体和管端差异性更加缩小。最终管体和管端屈服强度 1 140~1 300 MPa,抗拉强度  $\geq$  1 200 MPa,管体-20 °C 纵向冲击功  $\geq$  100 J,加厚区室温纵向冲击功  $\geq$  80 J。实现了较好的强度韧性匹配,以及管体管端均匀性的良好效果。

一次调质处理和两次调质处理的晶粒度和金相组织对比如图 3 和图 4 所示,可以看出,两次调质热处理后,无论管体还是管端,晶粒度都变得更加细小,金相组织更加均匀。一次调质热处理,平均

表 4 热处理钢管的力学性能

Table 4 Mechanical properties of heat treatment pipe

热处理次数	性能检验	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度(HRC)	纵向冲击功/J
一次调质	管体	1 145	1 215	23	40.5	101(-20 °C)
	管端	1 195	1 262	22	41.2	56(20 °C)
两次调质	管体	1 226	1 282	26	41.3	122(-20 °C)
	管端	1 238	1 296	25	41.4	105(20 °C)

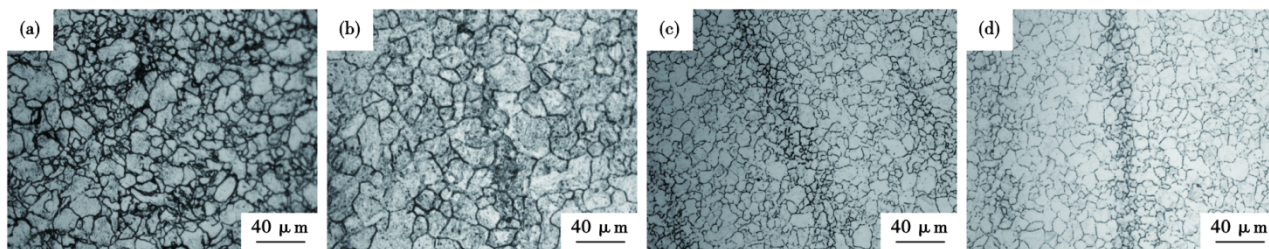


图 3 165ksi 钢管  $\phi$ 139.7 mm×12.7 mm 晶粒度:(a)管体一次调质,(b)管端一次调质,(c)管体两次调质,(d)管端两次调质

Fig. 3 Grain size of 165ksi pipe  $\phi$ 139.7 mm×12.7 mm : (a) once Q&T of pipe body, (b) once Q&T of pipe end, (c) secondary Q&T of pipe body, (d) secondary Q&T of pipe-end

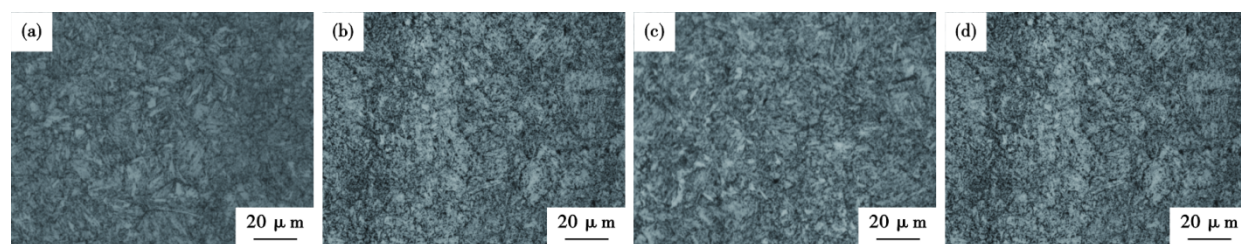


图4 165ksi钢管 $\phi 139.7\text{ mm}\times 12.7\text{ mm}$ 金相组织:(a)管体一次调质,(b)管端一次调质,(c)管体两次调质,(d)管端两次调质  
Fig. 4 Metallographic structure of 165ksi pipe  $\phi 139.7\text{ mm}\times 12.7\text{ mm}$ : (a) once Q&T of pipe body, (b) once Q&T of pipe end, (c) secondary Q&T of pipe body, (d) secondary Q&T of pipe-end

晶粒尺寸管体  $20\ \mu\text{m}$ ,管端  $25\ \mu\text{m}$ 左右。两次调质热处理后,管体和管端平均晶粒尺寸都在  $10\ \mu\text{m}$ 左右,金相组织也更加细小而均匀,屈服强度和冲击韧性显著改善,管体和管端差异性更加缩小。

综上所述,天津钢管制造有限公司利用现有装备,通过技术创新和工艺优化,采用两次调质热处理  $900\ ^\circ\text{C}\times 30\ \text{min}$  淬火 +  $650\ ^\circ\text{C}\times 60\ \text{min}$  回火 +  $900\ ^\circ\text{C}\times 30\ \text{min}$  淬火 +  $650\ ^\circ\text{C}\times 60\ \text{min}$  回火,细化晶粒度,提高强度和韧性,缩小管体和管端性能均匀性。最终管体和管端屈服强度  $1\ 140\sim 1\ 300\ \text{MPa}$ ,抗拉强度  $\geq 1\ 200\ \text{MPa}$ ,管体  $-20\ ^\circ\text{C}$ 纵向冲击功  $\geq 100\ \text{J}$ ,加厚区室温纵向冲击功  $\geq 80\ \text{J}$ 。实现了较好的强度韧性匹配,以及管体管端均匀性的良好效果。为超高强度高韧性钻杆在  $9\ 000\ \text{m}$ 以上特深井开采安全服

役,提供了良好的材料性能保证。

### 3 结论

1)采用两次调质热处理工艺  $900\ ^\circ\text{C}\times 30\ \text{min}$  淬火 +  $650\ ^\circ\text{C}\times 60\ \text{min}$  回火 +  $900\ ^\circ\text{C}\times 30\ \text{min}$  淬火 +  $650\ ^\circ\text{C}\times 60\ \text{min}$  回火,生产 165ksi 加厚钢管,强度韧性更加改善,管体管端差异性缩小。

2)两次调质热处理后,屈服强度差异从  $50\ \text{MPa}$  缩小到  $12\ \text{MPa}$ ,冲击功大幅改善,一次调质热处理管体冲击功勉强满足  $100\ \text{J}$ ,管端冲击功  $\leq 80\ \text{J}$ 。两次调质热处理后,管体冲击功  $122\ \text{J}$ ,管端冲击功  $105\ \text{J}$ 。

3)一次调质热处理管体晶粒度在 8.5 级,管端晶粒度 8.0 级,两次调质热处理后管体和管端晶粒度都在 10.5 级左右,平均晶粒尺寸在  $10\ \mu\text{m}$ 。

### 参考文献

- [1] 舒志强,袁鹏斌,欧阳志英,等. 回火温度对 26CrMo 钻杆钢显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(6): 669-676.
- [2] 李方坡,丁一明,许天早,等. U165 超高强度钻杆钢显微结构分析及低温拉伸性能研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(4): 29-33.
- [3] 许天早,林宏,丁一明. 超高强度钻杆钢级显微组织与拉伸性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(4): 66-71.
- [4] 李永灯,彭俊,唐科,等. 110SS 级别抗硫化氢应力腐蚀厚壁无缝钢管的开发[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 78-81.
- [5] 唐鹏,于凤洋,赵艳君,等. 固溶和时效处理对高锰低镍不锈钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(10): 74-80.
- [6] 侯志远,刘威峰,徐斌,等. M50 轴承钢热变形过程中孔洞形成及演化机制[J]. 金属学报, 2024, 60(1): 57-68.
- [7] 李娜,白政民,葛新峰. 锻造及热处理对 4Cr5MoSiV1 模具钢组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(15): 87-89.
- [8] 王兆英,吴畏,赵振,等. 紧固件用 SA-540 合金钢的强韧化工艺研究[J]. 特殊钢, 2022, 45(6): 89-93.
- [9] Qingfeng Wang, Chuanyou Zhang, Ruixin Li, et al. Characterization of the microstructures and mechanical properties of 25CrMo48V martensitic steel tempered at different times[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 559(2): 130-134.
- [10] Zhang Chuanyou, Wang Qingfeng, Kong jinli, et al. Effect of Martensite Morphology on Impact Toughness of Ultra-High Strength 25CrMo48V Steel Seamless Tube Quenched at Different Temperatures[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 20(2): 62-67.
- [11] 孙立国,周健,马党参. 锻后固溶处理对 H13 钢退火组织和冲击性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(2): 130-135.