



TP170P 大口径高钢级射孔枪管开发

周家祥, 吴亮亮, 张旭, 吴永超, 安盛岳
(天津钢管制造有限公司技术中心, 天津 300301)

摘要:随着油层套管的口径越来越大,下井深度越来越深,对大口径射孔枪管的强韧性要求也越高,为保证射孔作业安全并提高射孔枪管抗外挤能力,必须提高枪管强度并匹配较高的冲击韧性。天津钢管制造有限公司开发了 TP170P, $\Phi 244.48 \text{ mm} \times 11.99 \text{ mm}$ 大口径高强度射孔枪管,热处理后屈服强度 $\geq 1\ 200 \text{ MPa}$, 0°C 夏比冲击功纵向达到 110 J 、横向在 85 J 左右。同时具备良好的高温拉伸性能和优良的低温冲击韧性。在 300°C 高温条件下屈服强度仍然达到 $1\ 056 \text{ MPa}$,低温冲击韧脆转变温度小于 -40°C ,可以保证枪管在高温超深井服役,并在寒冷地区具有低温韧性,扩大了产品的使用范围。同时,具有良好的抗硫化氢应力腐蚀能力、抗氢致开裂能力及轧制热变形能力。

关键词: TP170P; 大口径; 高强度; 抗挤毁; 射孔枪管

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2022-00134

Development of TP170P Big Size High-grade Steel Gun Pipe

Zhou Jiexiang, Wu Liangliang, Zhang Xu, Wu Yongchao, An Shengyue
(Technology Center, Tianjin Pipe Corporation, Tianjin 300301)

Abstract: As the diameter of the casing in the reservoir becomes larger and larger, and the well go deeper and deeper, the demand for strength and toughness of large-diameter perforating barrel becomes stronger. In order to ensure the safety of the perforating operation and improve the ability of the perforating barrel to resist external extrusion, it is necessary to improve the strength of the barrel and match higher impact toughness. Tianjin Pipe Corporation has developed big size $\Phi 244.48 \text{ mm} \times 11.99 \text{ mm}$ high strength TP170P grade gun pipe. After heat treatment, the yield strength is over $1\ 200 \text{ MPa}$, and CVN 0°C impact energy reaches to 110 J for longitudinal and 85 J for transversal. The gun pipe has good high temperature tensile performance and excellent low temperature impact toughness. At the high temperature condition of 300°C , the yield strength still reaches $1\ 056 \text{ MPa}$, and the low temperature impact toughness and brittle transition temperature is less than -40°C , this character assures the gun pipe can be used safely in the high temperature and ultra-deep well, it has cold toughness in cold areas, expanding the use range of the products. In addition, the steel grade has good resistance to hydrogen sulfide stress corrosion, hydrogen cracking ability and rolling thermal deformation ability.

Key Words: TP170P; Big Size; High Strength; Anti-Collapse; Gun Pipe

随着石油开采技术的发展,深井及海上油田不断被开发,油层套管口径越来越大。套管口径的增加对大口径射孔枪管也提出更多需求,目前 $\Phi 244.48 \text{ mm} \times 11.99 \text{ mm}$ 大口径射孔枪管市场需求迫切。为了保证射孔作业安全,必须提高枪管强度并匹配较高的冲击韧性。此外,深层井常常伴有高温、高压、硫化氢腐蚀等恶劣因素。因此,对射孔枪管也提出耐高温、抗挤毁、耐腐蚀等特殊要求^[1-3]。提高钢级强度可以提高钢管抗外挤的能力^[4-5],但是钢级强度提高将严重降低钢材的耐腐蚀能力^[6-7],对抗硫化氢腐蚀不利。为此,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来开发 $\Phi 244.48 \text{ mm} \times 11.99 \text{ mm}$ 大口径 TP170P 高钢级抗挤毁耐腐蚀射孔枪管。

1 技术思路与措施

钢管的抗挤毁值受其屈服强度、壁厚、尺寸精度、残余应力等因素影响较大,理论计算和实践检验均已证明:提高屈服强度、降低残余应力、提高圆度和壁厚尺寸均匀度,以及在条件允许下尽量提高管体的壁厚,都能够提高管体的抗挤毁值^[8-10]。

对于提高韧性和抗腐蚀能力,必须通过优化合金配比,在添加 C-Mn-Cr-Mo 等合金提高强度的同时,采用 V-Nb-Ti 等微合金化进一步细化晶粒、增加弥散析出物、改善微观组织以提高韧性和抗腐蚀能力。在调质热处理过程中,根据钢种成分和钢管规格,利用二次调质 Q-T-Q-T (Quench-Temper-Quench-Temper) 技术,第一次高温淬火低温回火,第二次低温淬火高温回火。最大限度的发挥合金化

作用和晶粒度细化效果^[11],最终实现“晶粒度细小、微观组织均匀的回火索氏体上弥散分布的纳米级析出颗粒”,从而达到高强度、高韧性、耐低温、抗腐蚀的综合效果。

2 产品设计指标

根据油田射孔需求,设计射孔枪管外径244.48 mm,壁厚11.99 mm,屈服强度 $\geq 1\ 172$ MPa,0℃夏比冲击功纵向 ≥ 100 J、横向 ≥ 70 J,钢管抗挤毁值 ≥ 60 MPa,硫化氢致损伤冲击功下降不超过20%。TP170P射孔枪管力学性能要求见表1、表2。

3 技术方案实施

(1)以目前使用广泛的高强度油井管材料C-Mn-Cr-Mo-V系为基础进行优化改进,考虑轧管成材率并最终在热模拟上检验钢的热塑性。

(2)C含量0.25%~0.35%。C元素是提高淬硬度和强度最为有效和经济的手段。但C含量太高会导致钢材冲击韧性下降,对高强韧性材料不利。

(3)Cr含量控制在1%~1.5%,能保证钢的淬透性,同时又能避免粗大碳化物析出。

(4)适当增加Mo元素含量和添加微量V。提高回火温度,钢材的冲击韧性会显著改善和提高,但同时钢材的屈服强度和硬度会大幅降低。增加Mo含量,以及添加微量V能够在高温回火过程中大量析出合金碳化物,产生“二次硬化”的沉淀强化效果,有助于缓解回火导致的强度衰减。

(5)优化调整Mn含量。较高的Mn可提高合金的固溶度,增强钢的淬透性,但是Mn元素也会促进偏聚,对钢材冲击韧性不利。减少Mn含量还可以降低连铸坯中的成分偏析以及减轻调质热处理后钢中的带状组织。控制钢中Mn含量在1.25%以下。

(6)提高钢水洁净度、降低夹杂物。增加铁水比例60%以上,减少废钢料加入;采用真空脱气,降

低钢中气体含量;真空脱气后进行喂钙丝处理,促进夹杂物球化,加快夹杂物上浮;控制钢中酸溶铝含量,真空脱气后补喂铝丝,保证酸溶铝占全铝比例在0.9以上,降低B类夹杂物。

(7)控制轧制。直径310 mm断面的连铸圆坯在MPM(Multi-Stand Pipe Mill)限动芯棒连轧管机组轧制。环形炉温度1 260℃,穿孔温度1 100℃,控制最终张力减径温度950℃以上,随后空冷至室温。

(8)精准热处理技术。调质热处理,奥氏体高温炉保温,外淋内喷方式淬火。回火炉温度600~650℃,出回火炉以后快速入矫直机高温矫直,尽可能降低残余应力。

4 生产工艺流程

4.1 炼钢

电弧炉(150 t)→精炼→真空脱气(100 psi真空15 min)→喂丝(铝丝和钙丝)→连续浇注(弧形连铸机)→实心圆坯($\Phi 310$ mm)→圆坯切割(6.5 m定尺)

4.2 轧管

环形炉加热(1 260℃)→圆坯穿孔(1 100℃)→热连轧→张力减径(>950 ℃)→空冷(自然空冷至室温)→矫直→切定尺(10.5 m)→电磁探伤(F2级别)→成品尺寸测量($\Phi 244.48$ mm \times 11.99 mm)

4.3 热处理

高温淬火(920~960℃)→低温回火(500~560℃)→低温淬火(870~880℃)→高温回火(600~650℃)→定径→热矫直(500℃)→冷却(自然空冷至室温)→超声波探伤(U2级别)→管端探伤→通径→水压试验(69 MPa)→测长称重→喷印油漆→烘干→检验→入库

5 材料实物检验

在生产过程中分别对TP170P材料的化学成分、力学性能、微观组织等进行分析,结果见表3、表4

表1 TP170P射孔枪管的力学性能设计指标
Table 1 Design criterion of mechanical properties for TP170P gun pipe

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	硬度(HRC)	0℃冲击功/J		抗挤毁值/MPa
				纵向	横向	
1 172~1 350	$\geq 1\ 230$	≥ 15	38~45	≥ 100	≥ 70	≥ 60

表2 TP170P射孔枪管尺寸精度设计指标
Table 2 Design criterion of dimensional accuracy for TP170P gun pipe

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/%		
244.48	0~+1	11.99	-7.5~+12.5	≤ 0.5	≤ 14

和如图 1、图 2 所示。

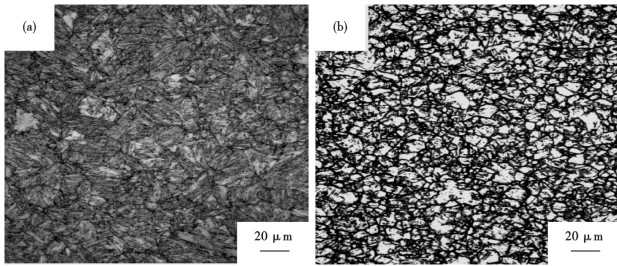


图 1 钢管金相组织:(a)微观组织和(b)晶粒度

Fig. 1 Metallographic structure of steel pipe: (a) microstructure and (b) grain size

5.1 化学成分

表 3 分析表明钢中有害元素含量低,残留 P 元素只有 0.008%,S 含量 0.001%。酸溶铝占全铝比重 90%,保证脱氧效果的同时减少了氧化铝夹杂。 $[O] \leq 20 \times 10^{-6}$, $[N] \leq 80 \times 10^{-6}$, $[H] \leq 1 \times 10^{-6}$ 。

5.2 微观组织

钢管材料微观金相组织和晶粒度如图 1 所示,

组织为马氏体高温回火后的索氏体,晶粒细小,晶粒度尺寸在 10 μm 内,晶粒度评级为 9.5 级。晶粒细小,组织均匀,保证了高强高韧的材料特性。

5.3 力学性能

从检测结果看,两次调质热处理后,钢管材料力学性能优异,见表 4。钢管材料经过两次调质热处理(高温淬火—低温回火—低温淬火—高温回火),屈服强度 $\geq 1\ 200$ MPa,同时具备良好的冲击韧性:0 °C 冲击功纵向 ≥ 107 J,横向 84~89 J,洛氏硬度(HRC) ≥ 41 。强度及硬度稳定,纵向及横向冲击性能优良,达到了最初设计效果。

5.4 低温冲击功实验

热处理后钢管材料的低温冲击功实验,从图 2 可以看出,韧-脆断口形貌转变温度(FATT)在-40 °C 时脆性面积低于 50%,钢材具有良好的低温韧性。相同温度下横向与纵向冲击功比值在 0.8 左右,横纵向冲击功非常接近,说明材料具有很好的各向同性。

5.5 高温拉伸强度

该钢种高温强度良好,300 °C 高温条件下屈服

表 3 TP170P 钢的化学成分(质量分数)

Table 3 Chemical composition of TP170P steel

												%
C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Al	Als	V	O	N	H
0.30	0.25	0.65	1.35	0.70	0.008	0.001	0.030	0.027	0.10	0.001 2	0.005 6	0.000 1

表 4 热处理力学性能

Table 4 Mechanical properties of heat treatment pipe

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	0 °C 冲击功/J						平均硬度(HRC)
			纵向		横向				
1 216	1 276	25	112	109	108	89	86	87	41.4
1 223	1 284	26	108	111	107	84	88	85	41.1

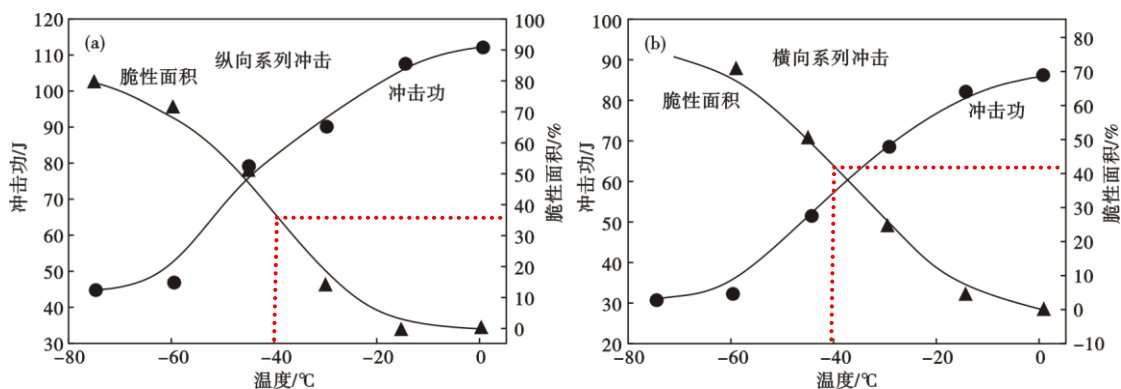


图 2 低温冲击功实验:(a)纵向;(b)横向

Fig. 2 Low temperature impact energy experiment: (a) longitudinal; (b) transversal

强度仍然达到常温屈服强度的82%,300℃高温屈服强度(1056 MPa)仍能达到150 ksi钢级强度(1034 MPa),该钢种作为耐热钢在高温热采井等苛刻环境下也可以使用。高温拉伸强度见表5,高温强度曲线如图3所示。

表5 高温拉伸强度

Table 5 Tensile strength of high temperature

试验温度/℃	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	断缩率/%	强度比例/%
20	1285	1314	19	67	100
100	1220	1289	23	67	95.3
200	1121	1252	23	66	87.2
250	1065	1221	19	67	82.8
300	1056	1219	26	68	82.1
400	965	1108	23	74	75.1
450	929	1053	25	76	72.3
500	913	991	21	77	71.1

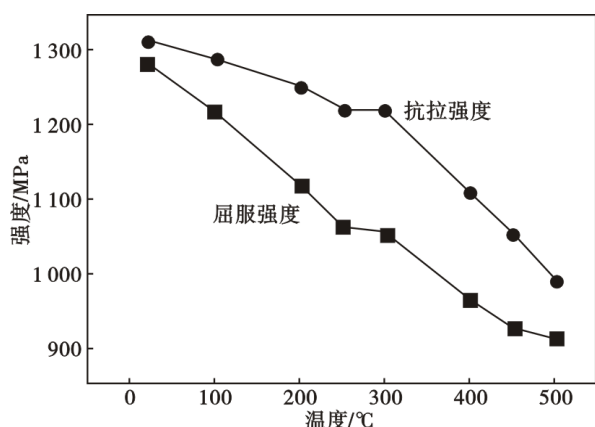


图3 高温强度曲线

Fig. 3 Strength curve of high temperature

5.6 热模拟实验

在Gleeble 3500热模拟试验机上做热模拟高温拉伸试验,模拟钢管热连轧过程中钢的热塑性:(1)以10℃/s速度升温到1250℃;(2)在1250℃保温1min;(3)以3℃/s降温到750~1300℃;(4)到温后再保温30s;(5)以0.1/s的变形速率拉伸到断裂,如图4。

实际热塑性曲线如图5所示,该材料的热塑性较好,在900~1200℃之间钢材的断面收缩率均在90%以上,优良的热塑性有利于管材的高温轧制和表面质量。

5.7 尺寸精度

对钢管外径和壁厚进行测量,实际外径平均值246mm,外径偏差0.3%;实际壁厚平均值12.5mm,

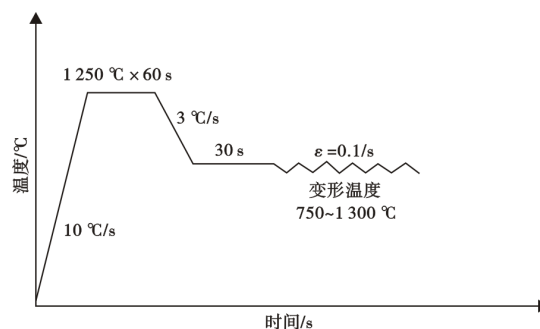


图4 热塑性实验工艺图

Fig. 4 Procedure diagram of thermal plasticity test

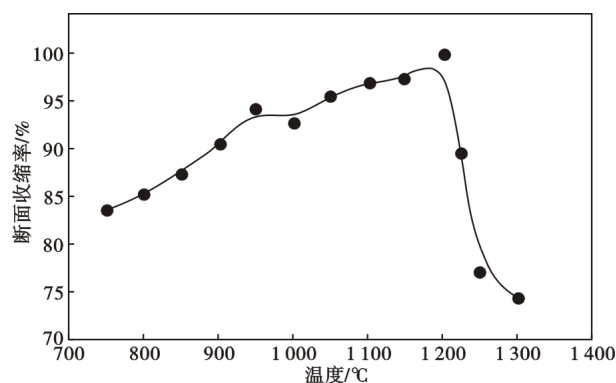


图5 高温热塑性曲线

Fig. 5 Curve of high-temperature thermal plasticity

壁厚偏差10%。外径壁厚均按公差上限控制,同时满足外径0~+1%,壁厚-7.5%~+12.5%的设计要求。外径按上限控制有利于通畅,壁厚按上限控制有利于射孔和使用安全性。

5.8 抗硫化氢腐蚀实验

(1) 高温B法试验

按照NACE 0177(美国腐蚀协会标准)进行高温B法试验,试验条件:D溶液,PH4.5,130℃(模拟井下温度),B法试样80%应力四点弯加载,H₂S浓度10%,90%N₂,总压力5MPa。实验时长240h。经过试验后,试样未发生裂纹及断裂,评价试验通过。

(2) 氢致损伤实验

氢致损伤实验,是为了评估钢材在腐蚀介质中抵抗冲击载荷的能力。目前国内外尚无统一的标准。本论文采用实验条件:D溶液,PH4.5,130℃,H₂S浓度10%,90%N₂,总压力5MPa,240h浸泡,考察冲击功下降的幅度,内控评判标准为:0℃冲击功下降不超过40%为合格。

表6显示,经过240h氢致开裂浸泡后,冲击韧性良好,冲击功下降比例仅仅4.37%。说明硫化氢对该钢材氢脆影响较小。该材料的抗氢致开裂能

表 6 0 °C 冲击韧性试验前后对比

Table 6 Comparison before and after the impact toughness test at 0 °C temperature

氢损伤实验	0 °C 纵向冲击功/J				剪切比/%			
浸泡前	115	112	110	112	100	100	100	100
	115	118	117	117	100	100	100	100
240 h 浸泡后	112	111	115	113	100	100	100	100
	103	106	109	106	100	100	100	100

冲击功下降比例: $[(112+117)-(113+106)]/(112+117)=4.37\%$

力较好。

5.9 抗挤毁实验

Φ244.48 mm×11.99 mm TP170P 射孔枪管进行

抗挤毁实验,实际抗挤毁值远超 API(美国石油协会)规定的抗挤毁计算要求值。试验结果见表 7。

6 结论

(1)成功开发了 TP170P 大口径高强度射孔枪管。屈服强度 $\geq 1\ 200$ MPa,0 °C 夏比冲击功纵向 ≥ 110 J,横向冲击功在 85 J 左右。

(2)钢管材质具有良好的耐高低温能力。300 °C 高温屈服强度 1 056 MPa,是常温屈服强度的 82%,低温脆性转变温度小于-40 °C。

(3)钢管材质具有良好的耐腐蚀能力。硫化氢腐蚀溶液 240 h 浸泡,冲击功下降幅度为 4.37%。

表 7 抗挤毁实验结果

Table 7 Results of anti-collapse testing

钢管规格/mm	API 要求值/MPa	内控要求值/MPa	实测值/MPa	超 API 比例/%
Φ244.48×11.99	≥ 42.2	≥ 56.6	63.1	49.5

参考文献

- [1] 金玮玮,张 昭. 射孔枪射流形成的数值模拟与弹壳设计[J]. 塑性工程学报,2010,17(6):121-126.
- [2] 张 昭,胡海飞,亢 战. 基于 Taguchi 方法的射孔枪多目标优化设计[J]. 测井技术,2009,33(2):181-188.
- [3] 王和琴,赵开良. 酸性气田长井段射孔配套技术[J]. 油气井测试,2011,20(2):52-54.
- [4] 王福祥,杨宝银,王 华,等. TP150TT 高强度高韧性抗挤毁套管研制开发[J]. 天津冶金,2011,163(1):17-19.
- [5] 陈 凯,冯 莹,邓叙燕,等. L80-1 级高抗挤毁石油套管用钢 29MnCr6 的开发[J]. 特殊钢,2019,40(2):31-34.
- [6] 王亚男,周晓锋. Cr-Ni-Cu 系 1a 钢级低合金耐候钢管耐蚀性能研究[J]. 钢管,2018,47(2):26-29.
- [7] 李永灯,彭 俊,唐 科,等. 110SS 级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.
- [8] 张传友,章华明,刘江成,等. 9 3/4 特殊通径高抗挤毁套管的开发[J]. 天津冶金,2008,149(5):21-24.
- [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] 方 剑,黄 彦,唐应波. 热处理对 Φ245 mm×12 mm V150 高抗挤毁套管用钢 27CrMnMoV 组织和性能的影响[J]. 特殊钢,2018,39(3):54-58.