

L80-1 级高抗挤毁石油套管用钢 29MnCr6 的开发

程 凯¹ 冯 莹^{1,2} 邓叙燕^{1,2} 刘 珂^{1,2} 李英真^{1,2}

(1 达力普石油专用管有限公司技术中心 沧州 061000; 2 河北省石油专用管工程技术研究中心 沧州 061000)

摘 要 达力普石油专用管有限公司成功开发出用于生产 $\Phi 244.5 \text{ mm} \times 10.03 \text{ mm}$ 规格 L80-1 钢级抗挤毁石油套管的经济性材质-29MnCr6。与常规 25CrMo 材质相比,29MnCr6 材质冶炼成本低,热处理能耗小,可降低生产成本。经性能检测,29MnCr6 材质与常规 25CrMo 材质相比,轧制出的 L80-1 钢级石油套管拉伸性能相当,冲击韧性符合 API 5CT 标准要求,而且抗挤毁值相差不大,均具有高出 API Bull 5C2 标准抗挤毁值 60% 的高抗挤毁水平,因此,29MnCr6 材质完全可代替 25CrMo 材质。

关键词 经济型 石油套管 高抗挤毁 L80 级

Development of 29MnCr6 Steel for L80-1 Grade High Anti-Crushing Oil Casing Tube

Cheng kai¹, Feng Ying^{1,2}, Deng Xuyan^{1,2}, Liu Ke^{1,2} and Li Yingzhen^{1,2}

(1 R&D Center, Dalipal Pipe Co, Cangzhou 061000; 2 HeBei OCTG Engineering Technology Research Center, Cangzhou 061000)

Abstract The economy material of 29MnCr6 was developed successfully by dalipia pipe company, which to product collapse resistance oil casing tube of $\Phi 244.5 \text{ mm} \times 10.03 \text{ mm}$ specification L80-1 grade. Compare with the conventional 25CrMo material, 29MnCr6 material has the characteristics of low smelting cost and low heat treatment energy consumption, which can reduce production cost. By actual performance testing, compared with the conventional 25CrMo material, the L80-1 steel grade oil casing that 29MnCr6 material produced has same tensile properties basically, the impact toughness meets APT 5CT standard requirement, and the collapse resistance values are similar, bese have high level of collapse higher that higher API Bull 5C2 collapse resistance standard value 60%, but meets the requirements of API 5CT standard fully. So 29MnCr6 material can instead of 25CrMo material completely.

Material Index Economy, Oil Casing Tube, High Resistance to Collapse, L80 Grade

随着油田开采进入中后期,油气勘探和开采不断向岩层纵深方向发展,套管需要承受的外压力越来越大,在高温高压、地质条件复杂等苛刻工况条件下,套管被挤毁现象时有发生,严重时造成整个油气井井眼破坏,导致全井报废,带来巨大的经济损失^[1]。面对这种情况,使用 API 套管只能依靠提高壁厚和钢级来满足抗挤毁性能要求,这会导致套管柱重量增大,井眼直径减小。高抗挤毁石油套管比 API 同钢级同壁厚套管的临界抗挤毁强度高,可以在不增加钢级和壁厚的情况下提高抗挤毁强度,减轻套管柱重量,降低油气井成本^[2]。

1 抗挤毁性能的影响因素

1.1 壁厚不均度和椭圆度

提高钢管的壁厚是提高钢管抗挤毁水平的一种有效方法,但特殊通径的要求限制了壁厚的增加。据研究,对于壁厚而言,钢管的挤毁强度主要取决于

圆周上最薄处的壁厚^[3],因此在无法提高整体壁厚的情况下只能通过降低壁厚不均度来提高抗挤毁水平。此外挤毁强度与椭圆度之间基本呈线性关系^[3],钢管椭圆度的增大也会使抗挤毁性能下降。因此在轧制过程中应最大限度降低钢管的椭圆度和壁厚不均度,严格控制钢管的最小壁厚。

1.2 屈服强度

屈服强度是影响抗挤毁性能的主要因素。244.5 mm \times 10.03 mm 规格的外径与壁厚比值为 24.37,依据 API 5C3 标准,挤毁形式为弹塑性挤毁,其弹塑性挤毁压力公式为:

$$P_T = Y_p \left[\frac{F}{D/t} - G \right] \quad (1)$$

式中: P_T -弹塑性挤毁压力, Y_p -屈服强度, D/t -钢管外径与壁厚比, F 、 G -均为公式因子。通过公式(1)可以看出,弹塑性挤毁压力与屈服强度成正比,屈服强度越高,抗挤毁强度越高。但该公式只考虑了钢

管的屈服强度、外径与壁厚的因素,对钢管的残余应力未做考虑。

1.3 残余应力

残余应力对抗挤毁性能有很大影响,残余应力的存在将明显降低材料的弹性极限,从而使钢管抗挤毁性能降低^[4]。钢管的残余应力主要来源于热矫直产生的矫直抗力^[5],矫直时套管温度越低,矫直抗力越大,从而造成残余应力也越大。钢管的矫直温度直接取决于回火温度,因此要降低钢管残余应力,就必须提高钢管的回火温度。

2 高抗挤毁套管试制

2.1 材质设计

提高钢管的屈服强度以及性能稳定性可显著提高钢管的抗挤毁能力^[6]。Cr-Mo 钢具有很好的淬透性^[7],经调质处理后,在较高的强度下具有良好的综合机械性能,普遍用于抗挤毁套管生产,但因添加了钼金属,冶炼成本高,导致市场竞争力弱。C-Mn-Cr 钢中 Cr 元素可提高钢的淬透性, Mn 元素可使调质钢组织均匀、细化,在不过多降低冲击韧性的同时提高屈服强度,因此 C-Mn-Cr 钢同样具有 Cr-Mo 钢淬透性好,综合性能优良的特点,而且因是用提高 Mn 元素含量的方式来代替 Mo 元素,冶炼成本低,为此,公司开发了 29MnCr6 材质,其化学成分见表 1。

2.2 工艺设计

2.2.1 冶炼工艺流程

圆铸坯生产流程:优质废钢→80 t 超高功率电弧炉冶炼→LF 精炼处理→Φ210 mm 圆坯连铸→缓冷。

电弧炉出钢到 15 t 时,加入铝锭、复合脱氧剂、增碳剂;出钢到 30 t 时,加入预熔精炼渣、萤石和合金;添加完合金后,加入石灰。在出钢过程中,控制好氩气压力和流量,确保搅拌效果,以保证合金和渣料熔化良好。精炼炉中用铝粒、复合脱氧剂和碳化硅进行扩散脱氧,快速形成白渣,白渣精炼时间≥20 min,出钢温度(1 605±10)℃。

表 1 试验钢化学成分要求/%

Table 1 Requirements of chemical composition of test steel/%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
25CrMo	0.24~0.30	0.15~0.37	0.40~0.68	≤0.015	≤0.005	0.75~1.00	0.10~0.32	≤0.25
29MnCr6	0.28~0.33	0.14~0.35	1.25~1.55	≤0.020	≤0.010	0.10~0.50		≤0.25

连铸时液相线温度 1 502℃,因此中间包钢水温度 1 570~1 595℃,钢包浇注一半时从中间包中取样进行化学成分检测,每炉批及炉批间的 Cr、Ni 含量的差值分别不得超过 0.05%,严格控制五害元素含量,As≤0.02%、Sn≤0.02%、Pb≤0.01%、Sb≤0.01%、Bi≤0.01%,且(Sn+As+Pb+Sb+Bi)≤0.035%。

2.2.2 钢管尺寸精度控制

钢管生产流程:管坯环形炉加热→斜轧穿孔机穿孔→220 mm 限动芯棒斜轧机轧制→微张力减径机定径→冷床冷却→矫直→切管→成品钢管。

为提高钢管尺寸精度,现场对芯棒进行了严格分组,各组芯棒外径偏差不超过 0.2 mm,以在轧制过程中降低壁厚不均匀度;对定径成品机架数量进行添加,在定径时进一步降低钢管椭圆度。29MnCr6 材质生产 L80-1 钢级抗挤毁石油套管的尺寸控制范围与 25CrMo 材质生产时相同,管体的尺寸精度控制范围见表 2。

2.2.3 热处理工艺设计

通过对 29MnCr6 材质的相变曲线分析,其 Ac3 点为 819℃,因此均选用与 25CrMo 材质相同的温度进行淬火。对于回火温度的选择,综合考虑屈服强度和残余应力两方面因素,可将套管的平均屈服强度控制在 API 标准的中上限水平,热矫直温度≥400℃。通过做小样实验,回火温度应该控制在 650~670℃,根据经验,最终确定 29MnCr6 材质套管在现场的回火温度应控制在 660~680℃,具体热处理工艺控制如表 3。

由表 3 可以看出,29MnCr6 材质与 25CrMo 材质相比,回火温度降低 50℃左右,而且淬火及保温时间共可减少 8~9 min,因此采用 29MnCr6 材质生产 L80-1 钢级抗挤毁套管可降低能耗,节省成本,提高

表 2 管体尺寸精度控制范围

Table 2 Range of tube size accuracy control

外径范围/mm	外径目标值/mm	不圆度/%	壁厚范围/mm	壁厚目标值/mm	壁厚不均匀度/%
245.00~246.92	246.0	≤0.5	9.03~11.03	10.13	≤10

注:壁厚按正公差轧制

表 3 试验钢的热处理工艺

Table 3 Heat treatment process of test steel

钢种	淬火温度/℃	淬火保温时间/min	回火温度/℃	回火保温时间/min	热矫直温度/℃
25CrMo	870~890	45~50	710~730	75~80	550~570
29MnCr6	870~890	41~46	660~680	70~75	500~520

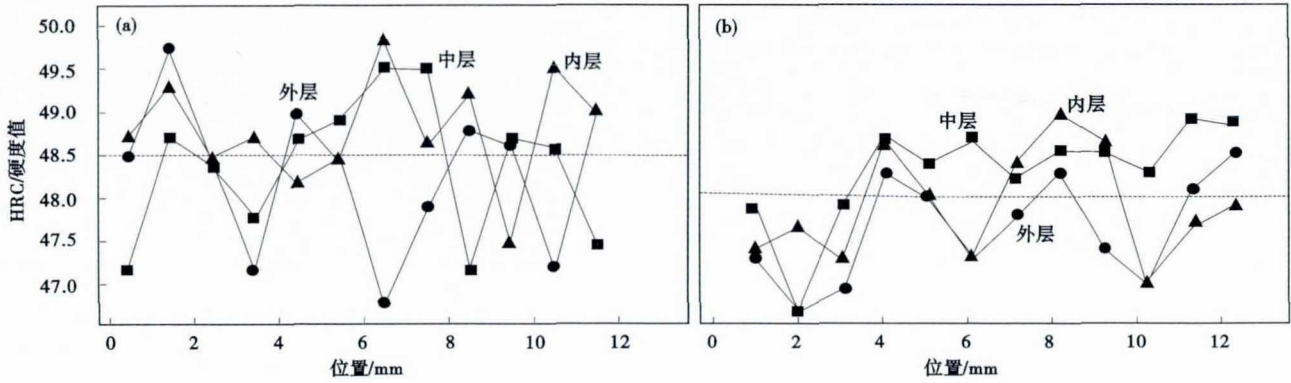


图 1 29MnCr6 钢套管(a)和 25CrMo 细管(b)HRC 硬度值的分布

Fig.1 Distribution of HRC hardness value on casing tube of 29MnCr6 steel (a) and 25CrMo steel (b)

生产效率。

3 试验结果及分析

3.1 淬透性试验

从淬火后的 29MnCr6 材质套管上取宽度如 25 mm 的环状试样,按逆时针方向做硬度测试,并与 25CrMo 材质钢管硬度进行对比,测试结果见图 1。

API 5CT 标准中对 L80 钢级的淬透性要求为:平均硬度值应大于等于对应于 50% 马氏体的硬度值,硬度值公式为:

$$HRC_{min} = 25 \times (\% C) + 21 \quad (2)$$

通过公式(2)得出满足 25CrMo 和 29MnCr6 材质 L80 钢级淬透性要求的最小硬度分别为 36.6 HRC和 38.2 HRC。由图 1 可知,两材质相比,硬度平均值相差不大,均高出淬透性最小 HRC 硬度值要求的 12 ,达到对应于 90% 马氏体的硬度值水平,硬度值都比较均匀,不存在淬火不充分的软带,均可保证套管圆周方向的力学性能均匀性,提高抗挤毁性能。

3.2 残余应力检测

在调质后 29MnCr6 材质套管中,随机取一支钢

管检测其残余应力、拉伸冲击性能和抗挤毁性能,取样位置如图 2 所示。采用环切法测量样管的残余应力,25CrMo 和 29MnCr6 材质套管锯切后的环向增加量分别为 6.095 mm 和 6.825 mm,使用公式 3 计算其残余应力值。

残余应力计算公式:

$$\sigma_r = \frac{ETC}{\pi D^2} \quad (3)$$

式中: σ_r -残余应力/MPa; E-弹性模量, 2.1×10^5 MPa; T-名义壁厚/mm; C-沿轴向切开后环向增加量/mm; D-钢管锯切前外径/mm。

根据公式(3)计算得出 29MnCr6 材质样管的残余应力为 76 MPa,比 25CrMo 材质 68 MPa 的残余应力值只高 8 MPa,两者相差不大。

3.3 样管几何尺寸测量

从生产的两材质 L80-1 钢级抗挤毁石油套管中分别取 5 支进行尺寸检测,测量结果见表 4 和表 5。

表 4 25CrMo 钢套管试样尺寸

Table 4 Dimensions of 25CrMo steel case tube sample

位置编号	椭圆度/%	平均外径/mm	壁厚不均度/%	平均壁厚/mm
1	0.22	245.86	3.38	10.02
2	0.33	246.11	4.34	9.95
3	0.24	245.71	4.83	9.98
4	0.27	245.77	5.69	10.12
5	0.25	245.86	5.98	10.11
平均	0.26	245.86	4.84	10.03

表 5 29MnCr6 钢套管试样尺寸

Table 5 Dimensions of 29MnCr6 steel case tube sample

位置编号	椭圆度/%	平均外径/mm	壁厚不均度/%	平均壁厚/mm
1	0.33	246.18	3.35	10.07
2	0.25	245.55	4.80	10.07
3	0.25	245.80	4.83	10.05
4	0.33	245.88	3.90	10.10
5	0.35	246.07	5.19	10.05
平均	0.30	245.90	4.41	10.07

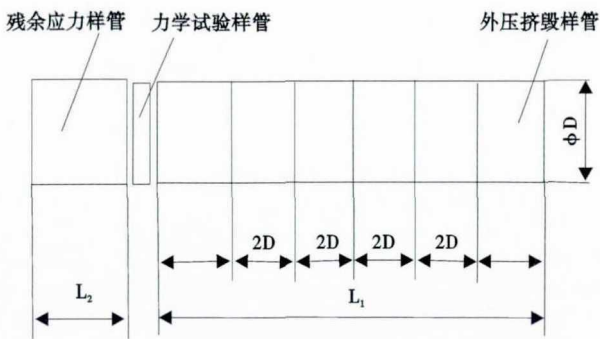


图 2 取样位置

Fig.2 Position of sampling

表 6 25CrMo 钢套管的力学性能

Table 6 Mechanical properties of 25CrMo steel case tube

编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	冲击功/J LV10 × 7.5
1#	635	754	29.5	158
2#	625	742	29.5	156
3#	621	738	29.0	157
均值	627	745	29	157
API 5CT	552 ~ 655	≥655	≥19	≥22

表 7 29MnCr6 钢套管的力学性能

Table 7 Mechanical properties of 29MnCr6 steel case tube

编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	冲击功/J LV10 × 7.5
1#	633	746	31.0	119
2#	630	744	31.0	124
3#	641	746	31.5	109
均值	635	745	31.2	117
API 5CT	552 ~ 655	≥655	≥19	≥22

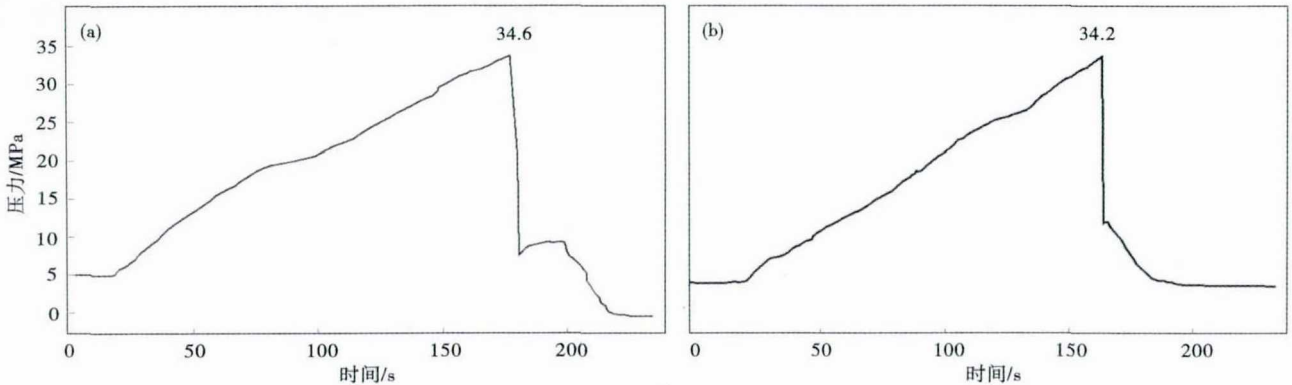


图 3 25CrMo 钢套管(a)和 29MnCr6 钢套管(b)的外压失效试验曲线

Fig. 3 Curves of external pressure failure test of 25CrMe steel case tube (a) and 29MnCr6 steel case tube (b)

从表 3 和表 4 中数据可以看出,两材质套管尺寸均在控制要求范围内,且尺寸均匀性良好,有利于抗挤毁性能的提高。

3.4 力学性能测试

从两材质 L80-1 钢级套管上分别取 3 组试样进行拉伸和冲击试验,试验结果如表 6 和表 7。

由表 6 和表 7 可以看出,两材质钢管的屈服强度均达到 API 5CT 标准的中上限水平,抗拉强度和冲击功均满足 API 5CT 标准要求,力学性能均匀性良好。29MnCr6 材质与 25CrMo 材质力学性能相比,抗拉强度相等,屈服强度相差不大,但冲击功降低 40 J,说明 25CrMo 材质综合力学性能稍高于 29MnCr6 材质。

3.5 抗挤毁实验

将两材质外压挤毁样管送往国家石油装备产品质量监督检测中心进行抗挤毁试验,外压失效试验曲线如图 3。

经检测 29MnCr6 材质套管的抗挤毁值为 34.6 MPa,与 25CrMo 材质套管的抗挤毁值 34.2 MPa 相比抗挤毁性能水平相当,均高出 API Bull 5C2 规定值(21.3 Mpa)60% 以上,达到高抗挤毁要求。

4 结论

(1) 29MnCr6 材质与 25CrMo 材质相比,生产出

的 L80-1 钢级套管拉伸性能相当,冲击韧性稍低但完全符合 API 5CT 标准要求,抗挤毁值相差不大,均具有高出 API Bull 5C2 标准抗挤毁值 60% 的高抗挤毁水平,因此 29MnCr6 材质完全可代替 25CrMo 材质生产 L80-1 钢级抗挤毁套管。

(2) 与 25CrMo 材质相比,29MnCr6 材质冶炼成本低,调质处理时回火温度低,保温时间短,可节省能耗,提高生产效率,因此 29MnCr6 材质是生产 L80-1 钢级抗挤毁套管的经济型材质。

参考文献

- [1] 郑洋,薛超,邓宽海,等.非均匀载荷作用下套管弹塑性变形分析[J].科学技术与工程,2014,14(20):210-214.
- [2] 贺景春,井溢农,李晓. BT-110T 高抗挤毁石油套管的研制[J].包钢科技,2008,56(04):45-48.
- [3] 张建军,刘歆,吕祥鸿,等.套管尺寸偏差与挤毁强度关系的新认识[J].石油钻探技术,2010,38(03):70-74.
- [4] 李连进.套管的残余应力对抗挤毁强度的影响[J].钢铁研究,2005,45(05):23-26.
- [5] 江勇,吴永莉,焦丽峰.石油套管抗挤毁解决方案及发展[J].钢管,2016,45(02):59-66.
- [6] 李勤,张传友,肖功业.高抗挤毁石油套管的试制[J].钢管,2004,41(04):28-31.
- [7] 王惠斌,魏学志,徐尚义,等.抗挤毁套管 TP80T 研究[J].天津冶金,2001,21(S1):13-15.

程凯(1991-)男,硕士(2017年河北工程大学),助理工程师,2014年河北工程大学(本科)毕业,无缝钢管轧制工艺设计。E-mail:1297204715@qq.com

收稿日期:2018-09-15