

· 产品研发 ·



经济型高强度非开挖钻杆用无缝钢管研制与开发

赵波^{1,2}, 王善宝^{1,2}, 解德刚^{1,2}, 袁琴^{1,2}, 王熙翔^{1,2}

(1 海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室, 鞍山 114009; 2 鞍钢集团钢铁研究院, 鞍山 114009)

摘要: 利用光学显微镜、扫描电镜、透射电镜分析及力学试验, 分析了传统型非开挖钻杆用无缝钢管 26CrMo 和经济型高强度非开挖钻杆用无缝钢管 AGCY27 微观组织、疲劳断口形貌、力学性能和扭转疲劳寿命等。在成分设计上, 经济型钻杆与传统型钻杆相比去除了贵金属 Mo 并降低了 Cr 的含量, 适当增加了 Ti 合金, 并提高了 Si 含量。结果表明, 传统型钻杆的 A_{c3} 点为 803 °C, 经济型钻杆的 A_{c3} 点为 860 °C, 通过淬火+490 °C 回火的热处理工艺, 两者均达到 API 5D—2020 标准 135 ksi 级别钻杆要求。在本试验热处理工艺下, 与传统型钻杆相比, 经济型钻杆具有更优的冲击韧性和疲劳性能, 冲击功达到 109 J 以上, 平均疲劳循环次数为 36 107 次。显微组织中传统型钻杆为回火屈氏体, 经济型钻杆为回火索氏体。经济型钻杆小角度晶界占比为 21%, 传统型钻杆小角度晶界占比为 29%, 经济型钻杆具有更多的大角度晶界, 其组织形态有利于获得更好的综合力学性能。传统型钻杆析出相为 Cr 合金渗碳体, 有利于提高其力学性能, 经济型钻杆析出相以 TiCN、TiC、TiO 为主, 起到抑制奥氏体晶粒长大的作用, 提高了产品综合力学性能。

关键词: 经济型; 非开挖钻杆; 疲劳性能; 无缝钢管

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00089 **中图分类号:** TG335. 71

Research and Development of Seamless Steel Pipe for Economic High Strength Non-dig Drilling Pipe

Zhao Bo^{1,2}, Wang Shanbao^{1,2}, Xie Degang^{1,2}, Yuan Qin^{1,2}, Wang Xixiang^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, China; 2 Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, China)

Abstract: The microstructure, fatigue fracture morphology, mechanical properties, and torsional fatigue life of the traditional seamless steel pipe 26CrMo for non-dig drilling pipe and the economical high-strength seamless steel pipe AGCY27 for non-dig drilling pipe were analyzed using optical microscopy, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, and mechanical tests. In terms of composition design, compared with traditional drilling pipe, economical drilling pipe removes precious metal Mo and reduce Cr content, appropriately increases Ti alloy, and increases Si content. The results show that the A_{c3} point of the traditional drill pipe is 803 °C, and the A_{c3} point of the economical drilling pipe is 860 °C. Through the heat treatment process of quenching+490 °C tempering, both meet the requirements of API 5D-2020 standard for 135 ksi grade drilling pipe. Under the heat treatment process in this experiment, compared with traditional drill pipe, economical drilling pipe has better impact toughness and fatigue performance, with an impact energy of over 109 J and an average fatigue cycle of 36 107 times. The microstructure of traditional drilling pipe is tempered martensite, while the microstructure of economical drilling pipe is tempered sorbite. The proportion of small angle grain boundaries in economical drilling pipe is 21%, while that in traditional drill pipe is 29%. Economical drill pipe has more large angle grain boundaries, and their microstructure is conducive to obtaining better comprehensive mechanical properties. The precipitation phase of traditional drill pipe is Cr alloy cementite, which is beneficial for improving their mechanical properties. The precipitation phases of economical drilling pipe is mainly TiCN, TiC, and TiO, which play a role in constraining the growth of austenite grains and improving the comprehensive mechanical properties of the product.

Key Words: Economic; Non-dig Drilling Pipe; Fatigue Propertie; Seamless Steel Pipe

在工程建设过程中,经常要在地下铺设线缆及管道,这就需要开挖放置管道的地沟,铺设完毕后回填。但在特定条件下,大量挖掘地面的成本过高,或者由于某种原因实际上不被允许的。这就需要采用新型的铺设管道的技术方法,不破坏地面而直接在地下完成管线施工。非开挖钻探技术,顾名思义

就是不用整体开挖地面,直接在地下施工的现代化技术,通过钻进方式在地表小范围内开挖,实施地下管线工程^[1]。非开挖地下管线施工技术具有在不破坏地表情况下探测、修复、检查、更换和铺设地下公用设施的优点,在国内外均已开始大量应用。由无缝钢管加工制造而成的钻杆是非开挖钻

探施工的重要工具之一^[2]。

由于其使用的特殊性,对于传统的非开挖钻杆用无缝钢管而言,合金体系中往往添加较高质量分数的钼来保证钻杆的力学性能, $w[\text{Mo}]$ 的添加量一般在 0.1%,然而因钼元素价格昂贵导致非开挖钻杆用无缝钢管成本增加,在一定程度上限制了非开挖钻杆的使用。因此,在保证非开挖钻杆的强度、冲击韧性以及疲劳性能等力学性能的基础上,研究者通过调控合金元素、去除贵金属元素钼,提高非开挖钻杆用钢的纯净度,降低钢管的 S、P 含量,减少夹杂物影响,辅以合适的冶炼、轧制和热处理工艺,研发了一种经济型高强度非开挖钻杆用无缝钢管,其力学性能均符合标准和使用要求,且成本相对低廉。本文通过疲劳断口分析、组织分析等将经济型非开挖钻杆用无缝钢管与传统型的金相组织及力学性能进行了对比研究。

1 试验材料及工艺

1.1 成分设计

目前,非开挖钻杆的材料选择大多数以美国标准 API 5D 中石油钻杆为基础,而非开挖钻杆柱与普通石油钻杆柱在施工过程中的起下钻方式和钻机的承受能力上都有着较大区别,更易产生扭转疲劳断裂^[3]。结合非开挖钻杆的实际工况,材料具有良好的力学性能及疲劳性能成为保证非开挖施工安全和提高材料寿命的关键因素。在成分设计过程中,研究者综合考虑了力学性能及疲劳性能的影响,为了与传统钻杆对比,采用两个成分的钢种对比试验,1[#]试验钢为传统的 26CrMo 钢,2[#]试验钢为经济型非开挖钻杆钢 AGCY27,该钢去除了 Mo 合金,降低了 Cr 含量,增加了 Ti 和 Si 含量。Ti 可以捕捉游离的 N,形成碳氮化合物颗粒,可以固定奥氏体晶界,起到阻碍奥氏体晶界迁移,约束奥氏体晶粒长大,细化钢管组织晶粒的作用^[4-6]。另一方面 Ti 又具有抑制奥氏体发生再结晶的特性,因而细化了铁素体晶粒,起到提高钻杆力学性能的作用。Si 的加入可以弥补去除 Mo 而造成的强度损失,对钢的弹性极限和屈服强度具有强化作用,并可以提高疲劳强度和疲劳比 (σ_1/σ_b) 等。具体成分见表 1。

1.2 工艺路线

生产工艺路线为:转炉冶炼→LF→VD 精炼→连铸(410 mm×340 mm)→铸坯加热→连轧成圆坯($\phi 210$ mm)→环形炉加热→穿孔→连轧→脱管→张减径→冷却→矫直→成品管探伤($\phi 114$ mm×

表 1 合金成分设计(质量分数)

Table 1 Design of chemical composition of alloy steel%

试验编号	钢牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Als	Ti
1 [#]	26CrMo	0.27	0.23	1.06	0.008	0.004	0.91	0.16	0.029	-
2 [#]	AGCY27	0.27	1.20	1.10	0.008	0.003	0.66	-	0.031	0.023

12 mm)等工艺流程制备钢管。在冶炼中主要采用铁水预处理、高碱度还原渣、钙处理等方式控制钢坯 P、S 含量,在连铸过程中采用长水口+氩气密封,覆盖剂+挡墙优化流场等保护浇注措施。从冶炼到制管整个过程中对成分优化、夹杂物控制、加热温度、轧制节奏、变形量、出脱管温度等关键性技术指标进行了严格把控,严格控制 P、S 含量,要求 $w[\text{P}] \leq 0.015\%$, $w[\text{S}] \leq 0.010\%$, 钢管各类夹杂物要求低于 1.5 级,圆坯加热温度为 1255~1265 °C,穿孔温度 1200~1260 °C,张减径温度控制在 760~820 °C,提高钢管变形量,轧制延伸系数控制在 6.8 以上{本研究钢管轧制延伸系数= $\phi 210$ mm 管坯截面积/ $(\phi 114$ mm×12 mm)钢管截面积}。

本研究钢管轧制规格为 $\phi 114$ mm×12 mm,为了改善非开挖钻杆用无缝管的性能,在钢管经过热轧后采用了淬火+回火的热处理方式。研究首先通过建立材料的 CCT 曲线(连续冷却转变曲线)获得 1[#]和 2[#]试验钢 A_{c3} 温度,如图 1 所示,1[#]试验钢 26CrMo 的 A_{c3} 点为 803 °C,2[#]试验钢 AGCY27 的 A_{c3} 点为 860 °C。因 1[#]试验钢加入了较高含量的 Cr、Mo 强碳化物形成元素,为保证碳化物的完全溶解,1[#]淬火工艺温度设定为 850 °C,根据生产经验,2[#]淬火工艺温度设定为 880 °C,该温度可以实现完全奥氏体化,且可抑制晶粒粗化的发生。并在此基础上,选定合适的淬火冷却速度,为获得马氏体组织,钢管淬火冷却速度要求大于 20 °C/s,采用内喷外淋的水冷方式,之后进回火炉,回火温度 1[#]、2[#]均为 490 °C,保温时间为 60 min,出回火炉空冷至室温。

1.3 试验方法

分别对 1[#]及 2[#]试验钢的冲击性能、拉伸性能、疲劳性能等检验分析。冲击试验执行标准为 GB/T 229—2020 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法,试验设备为 ZBC2602 全自动冲击试验机,试验方式为 KV₈,试验温度为室温,试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm。拉伸试验标准为 GB/T 228.1—2021 拉伸试验第 1 部分:室温试验方法,试验设备为 Z600 电子拉伸材料试验机,采用 R7 试样,横截面

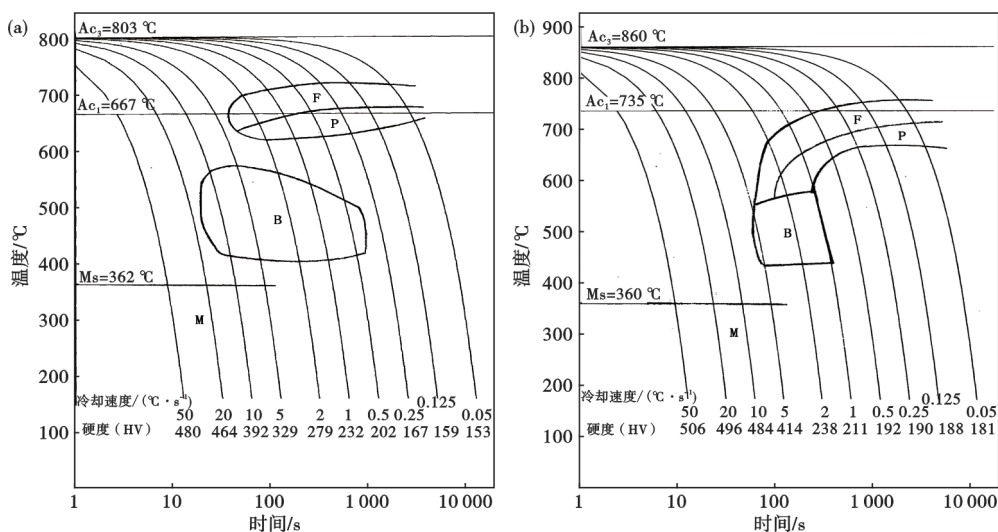


图 1 试验钢 CCT 曲线测定:(a)1# 试验钢 26CrMo,(b)2# 试验钢 AGCY27

Fig. 1 CCT curve of the tested steel :(a)No. 1 tested steel 26CrMo,(b)No. 2 tested steel AGCY27

直径为 $\phi 5$ mm,原始标距 $L_0=25$ mm。疲劳试验执行标准为 GB/T 12443—2017 扭矩控制疲劳试验方法,试验设备为 MTS370.02 疲劳试验机,疲劳试样尺寸如图 2 所示,疲劳试样为 $\phi 7$ mm 的圆棒。加载方式为轴向应力比 $R\sigma=-1$,切应力比 $R\tau=-1$,同相比例加载, $\tau_a/Sa=0.7$,相位角为 0° ,频率 $f=1$ Hz,轴向应力幅为 $500S_a/MPa$,扭转应力幅为 $350\tau_a/MPa$,在室温、空气中进行,取样方向为纵向。

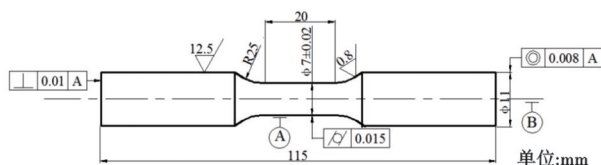


图 2 试验钢疲劳试样尺寸

Fig. 2 Fatigue specimen size of tested steel

分别对 1#试验钢和 2#试验钢疲劳断口进行了微观形貌分析及钢管 EBSD 形貌分析,试验设备为 SUPRA55 场发射扫描电镜。随后通过 OLYMPUS GX53F 显微镜观察其显微组织。再通过 FEI Tecnai G2 20 型高分辨透射电镜对试样进行了结构表征、

析出相成分、形貌观察等分析。

2 结果与分析

2.1 力学性能

1#和 2#力学性能结果见表 2。从表 2 可见,1#、2#试样力学性能相当,均完全满足 135ksi 钢级级别要求,且性能优良,在该热处理制度下,2#试样冲击性能更为优异。

钻杆在不同服役过程中,会承受扭矩、弯矩、内外压应力和轴向力的不同作用,由于受到复合载荷的影响,且其中部分是变动载荷,材料往往会发生早期断裂^[7-9]。据统计,由疲劳失效引起的钻杆失效占据了失效事故中的 80% 以上^[10]。针对钻杆疲劳问题的研究主要集中在油气钻井用钻杆上^[11-13],对于非开挖用钻杆在弯扭受力状态下的疲劳破坏的研究相对有限。非开挖钻杆在孔内呈“麻花状”,并且在管线回拖的时候钻杆需要承受较大的拉应力。因此,非开挖钻杆疲劳特性与常规钻杆存在较大不同^[14]。非开挖地下管线施工过程中,钻杆在三维空间承受复杂交变的压拉、扭转、弯曲、震动等载荷,在经过一定时间的使用后,在应力集中(如划痕、腐

表 2 试验钢试样力学性能

Table 2 Mechanical properties of the tested steel

试样编号	冲击 KV _g (PSL-1-试验温度为 21 °C±3 °C)/J,				屈服强度 R _{0.2} /MPa	抗拉强度 R _m /MPa	伸长率 A/%
	值 1	值 2	值 3	平均值			
1#	103	106	108	106	1 107	1 207	14
2#	111	109	113	111	1 089	1 240	15
标准要求	≥47				≥54	930 ~ 1 140	≥10

蚀坑、管体加厚过渡区等)或薄弱环节部位(公、母螺纹最后旋合部位)发生疲劳断裂。因此,根据非开挖钻杆使用中的服役特性,对试验钢取4根试样进行扭应力疲劳试验,1#样编号为1-1、1-2、1-3、1-4,2#试样编号为2-1、2-2、2-3、2-4,材料按标准进行试验,疲劳循环次数如图3所示。由图3可知,2#试样的平均疲劳循环次数为36 107次,相比1#试样的平均疲劳循环次数28 285次更多,其疲劳寿命更长。

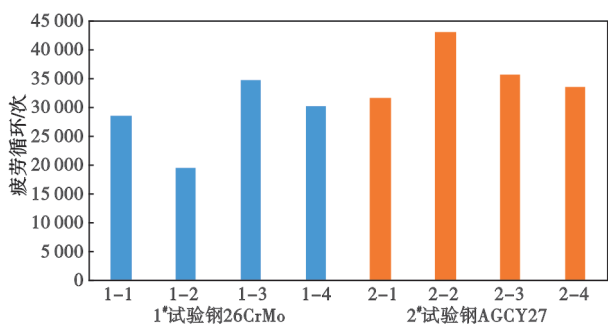


图3 试验钢疲劳试验循环次数

Fig. 3 Number of fatigue test cycles of the tested steel

2.2 疲劳断口分析

疲劳断口选择接近于平均疲劳循环次数的试样断口,分别1#的1-1和2#样的2-3试样。由图4(a)和图5(a)可见,试验钢疲劳断口均由疲劳源区、裂纹稳定扩展区和瞬断区三个部分组,1#、2#试样裂纹

源起源于试样表面,如图4(b)和图5(b)所示,疲劳源在复合载荷作用下承受反复的拉压及扭转而呈现灰黑色,裂纹从断口的萌生点开始,扩展过程呈河流状花样,裂纹因受到阻力不同而偏离原扩展方向。之后裂纹在多个平面上不断扩展,相交后形成台阶并构成了放射状射线,由于扭矩产生的剪切应力作用,试样轴向与断面形成约45°角,产生“房脊”状特征。疲劳扩展区疲劳条带的方向与疲劳裂纹延伸的方向垂直于,一条疲劳条带代表的是经过一次应力循环后裂纹延伸的距离,由于裂纹表面受到摩擦,导致扩展区表面更为平坦。裂纹扩展区以疲劳条带和解理混合为主要特征,如图4(c)和图5(c)所示,1#和2#试样疲劳裂纹条带平均宽度分别约为26.25、22.5 μm,2#试样相比1#试样疲劳条带更细密且更为明显。裂纹扩展达到临界尺寸后,材料发生失稳断裂,快速断裂形成了瞬断区。与疲劳源区和扩展区相比,瞬断区的断口更加粗糙,这是由瞬断过程中产生了大量韧窝所引起的,如图4(d)和图5(d)所示,1#和2#试样较大韧窝尺寸分别约为17.5、12.5 μm,2#试样相比1#试样韧窝更加深密。

2.3 组织分析

图6为1#、2#试验钢的组织形貌,1#试验钢金相组织以片状为主形态,碳化物较为细小、弥散,为回火屈氏体。2#试验钢金相组织更加均匀细小,碳化

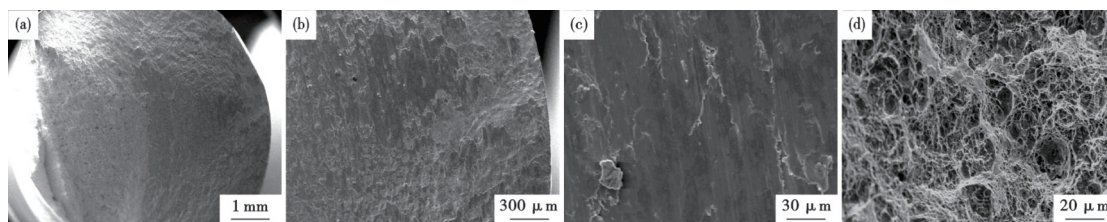


图4 1#试验钢26CrMo疲劳断口形貌:(a)低倍形貌,(b)裂纹源,(c)扩展区,(d)瞬断区

Fig. 4 Fatigue fracture morphology of the No. 1 tested steel 26CrMo : (a) macrostructure morphology, (b) crack source, (c) expansion zone, (d) instantaneous fracture zone

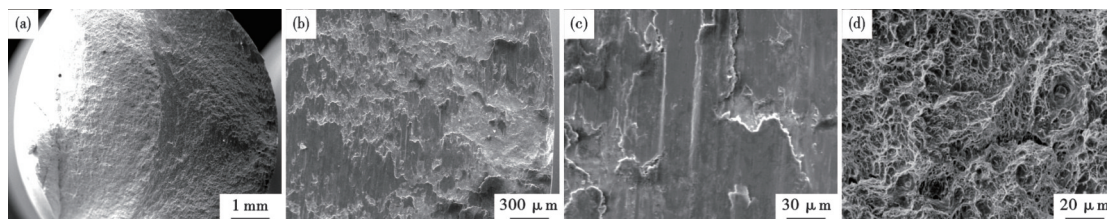


图5 2#试验钢AGCY27疲劳断口形貌:(a)低倍形貌,(b)裂纹源,(c)扩展区,(d)瞬断区

Fig. 5 Fatigue fracture morphology of the No. 2 tested steel AGCY27 : (a) macrostructure morphology, (b) crack source, (c) expansion zone, (d) instantaneous fracture zone

物为相对更为明显的颗粒状,为回火索氏体。

1[#]和2[#]试样的EBSD界面如图7所示,图7(a)、(b)分别为1[#]试验钢及2[#]试验钢的晶粒界面,图7中荧光蓝色代表取向差为2°~15°的小角度晶界,试验钢晶粒直径分布图如图8所示。经统计,1[#]试样与2[#]试样的有效晶粒尺寸分别为2.55、2.29 μm,2[#]试样晶粒尺寸更小。试验钢晶粒晶界取向差分布如图9所示,取向差较大的相邻晶界对改变裂纹扩展方向起到显著作用,提升材料的裂纹扩展阈值,进而改善材料冲击性能和疲劳性能。裂纹在通过不同大小的晶界时,其在小角度晶界范围内(即在2°~15°

的范围内),随着晶界角度的增加裂纹穿越晶界所需的界面能是增加的^[15-16]。当晶界角度达到15°时,裂纹扩展所需的界面能出现极大值。超过该临界角度后,界面能不再随晶界角度变化。这表明15°及以上的晶界对裂纹扩展具有最强的阻碍作用,因其需要消耗最多的能量来穿越晶界。经统计,1[#]和2[#]试样小角度晶界占比分别为29%、21%,可见,2[#]试样大角度晶界更多。

1[#]试样中析出主要为Cr合金渗碳体,当合金元素很少时,合金元素将不能自己形成特有的碳化物,便占据原本属于Fe的晶格位置,形成具有渗碳

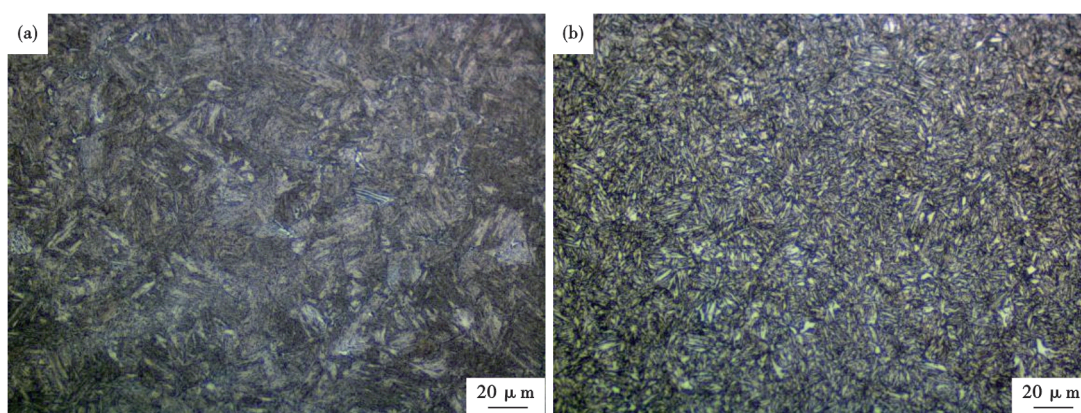


图6 试验钢组织形貌:(a)1[#]试验钢26CrMo,(b)2[#]试验钢AGCY27

Fig. 6 Morphology of structures of the tested steel : (a)No. 1 tested steel 26CrMo,(b)No. 2 tested steel AGCY27

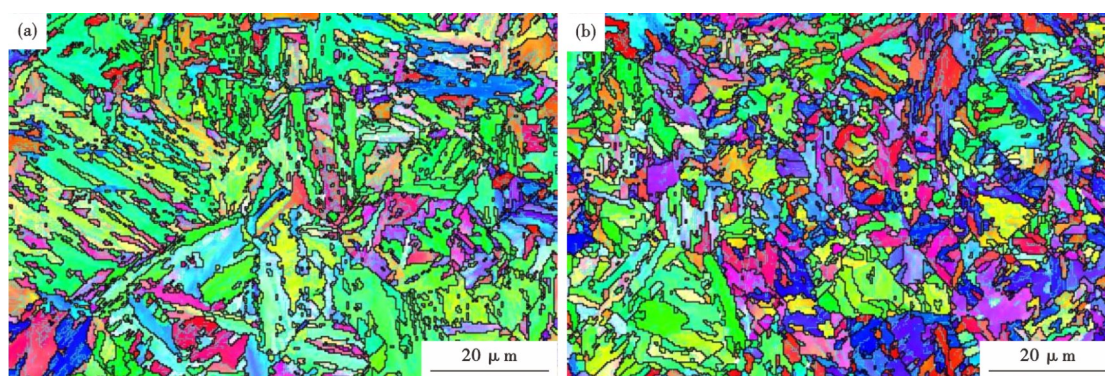


图7 试验钢EBSD取向表征:(a)1[#]试验钢26CrMo,(b)2[#]试验钢AGCY27

Fig. 7 EBSD image of the tested steel (a)No. 1 tested steel 26CrMo,(b)No. 2 tested steel AGCY27

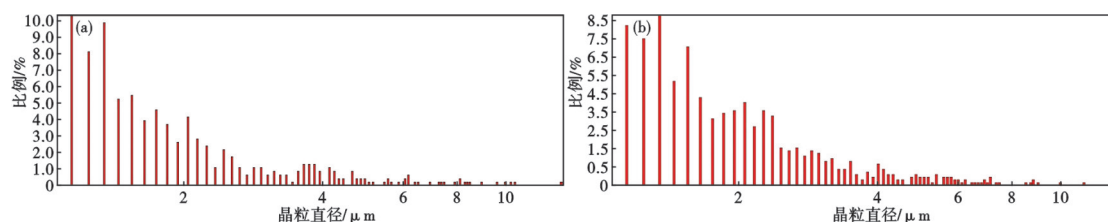


图8 试制钢晶粒直径分布图:(a)1[#]试验钢26CrMo,(b)2[#]试验钢AGCY27

Fig. 8 Grain diameter distribution diagram of the tested steel : (a)No. 1 tested steel 26CrMo,(b)No. 2 tested steel AGCY27

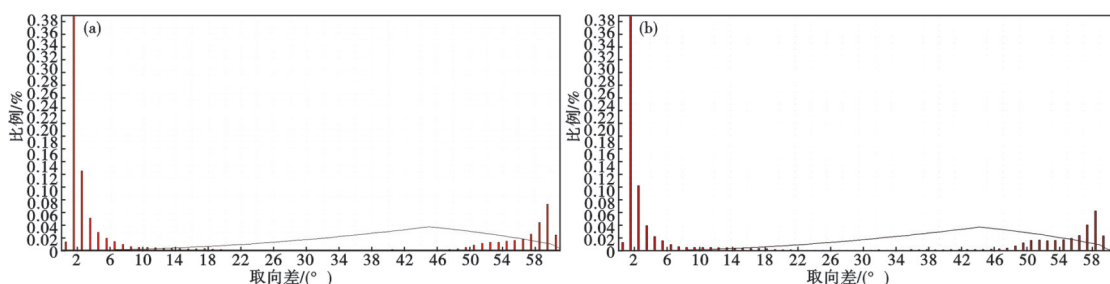


图9 试制钢晶粒晶界取向差分布图:(a)1#试验钢 26CrMo, (b)2#试验钢 AGCY27

Fig. 9 Distribution map of grain boundary orientation difference in the tested steel : (a)No. 1 tested steel 26CrMo, (b)No. 2 tested steel AGCY27

体结构特征的(Cr,Fe)₃C型碳化物,尺寸为50 nm,如图10(a)所示,具有高强度、高耐磨性、高韧性等优良性能,有利于提高1#试样的力学性能。1#试样中有针状铁素体存在,在针状铁素体基体中,短棒状碳化物第二相呈特定取向分布,其长轴方向与针状铁素体主晶轴形成固定角度。如图10(b)所示,且1#试样内位错密度较高,如图10(c)所示,高密度的位错相互缠绕增加其强度。2#试样由于加入了Ti元素,因此,其析出相以TiCN、TiC、TiO为主,如图11(a)、(b)所示,图11(a)为TiCN析出,其固溶温度较高、稳定性好,TiCN粒子能有效钉扎晶界或亚晶界使其难以运动,阻碍奥氏体晶粒长大,奥氏体粗化温度进而提高。在钢液凝固过程中形成的TiCN析出温度很高,导致富Ti的析出相尺寸相对较大,测量其尺寸为170 nm。而TiC相对较小约为20 nm左右,如图11(b)所示。2#试样位错密度较1#试样明显降低,且析出相沿原板条界排列析出,说明2#试样回火程度较1#试样更为充分,如图11(c)、(d)所示。综合分析可知,1#试样主要为Cr合金渗碳体,尺寸适中(50 nm),具有高强度和高耐磨性,而2#试样主要为TiCN、TiC和TiO,其中TiCN尺寸较大

(170 nm),TiC尺寸较小(20 nm),具有更高的高温稳定性和抗晶粒长大能力。1#试样位错密度高,强度高但韧性可能稍差,而2#试样位错密度低,回火程度更充分,韧性更好。1#试样的析出相沿针状铁素体长轴呈一定角度分布,而2#试样的析出相沿原板条界排列。

3 结论

1)研究的经济型高强度非开挖钻杆用无缝钢管AGCY27与传统型非开挖钻杆26CrMo相比,去除了贵金属Mo,并降低了Cr的含量,适当增加了Ti合金,并提高了Si含量。通过优化的生产工艺使其在达到API 5D—2020标准135ksi级别钻杆要求前提下,更具有经济性,在本试验热处理工艺下,与传统型非开挖钻杆相比具有更优的冲击韧性和疲劳性能。

2)传统型非开挖钻杆26CrMo的Ac₃点为803℃,淬火工艺温度设定为850℃,经济型非开挖钻杆AGCY27的Ac₃点为860℃,淬火工艺温度设定为880℃,两者回火温度均为490℃。

3)经济型非开挖钻杆具有良好的疲劳性能,试

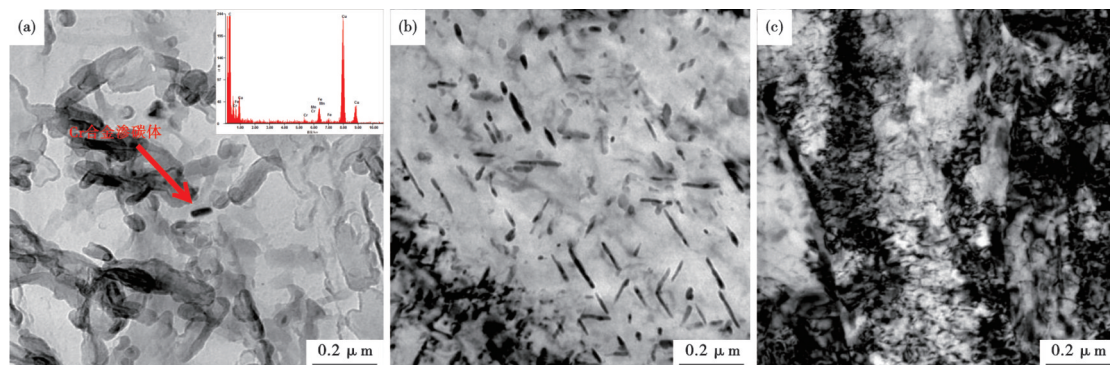


图10 1#试验钢26CrMo的透射电镜(TEM)分析:(a)Cr合金渗碳体,(b)棒状碳化物析出相,(c)位错结构

Fig. 10 Transmission Electron microscopy (TEM) analysis of 1# test steel 26CrMo: (a) Cr alloy cementite, (b) rod-shaped carbide precipitated phase, (c) dislocation structure

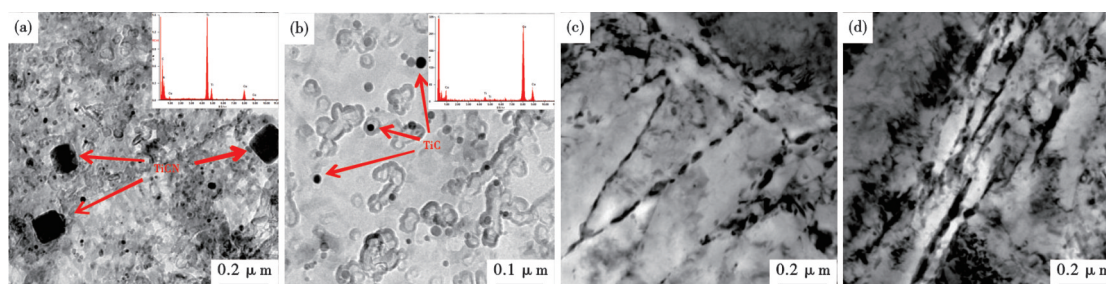


图11 2#试验钢AGCY27的透射电镜(TEM)分析:(a)TiCN析出相,(b)TiC析出相,(c)碳化物,(d)位错结构

Fig. 11 Transmission electron microscopy (TEM) analysis of 2# test steel AGCY27: (a) TiCN precipitated phase, (b) TiC precipitated phase, (c) carbides, (d) dislocation structure

样的平均疲劳循环次数为36107次,相比传统型非开挖钻杆平均疲劳循环次数28285次更多,其疲劳寿命更长。

4)经济型非开挖钻杆相比传统型非开挖钻杆具有更多的大角度晶界,有利于提高其冲击韧性。

5)经济型非开挖钻杆金相组织为回火索氏体,传统型非开挖钻杆金相组织为回火屈氏体,经济型

非开挖钻杆相比传统型,其组织形态有利于获得更好的综合力学性能。

6)传统型非开挖钻杆析出相为Cr合金渗碳体,有利于提高其力学性能,特别是强度,经济型非开挖钻杆析出相以TiCN、TiC、TiO为主,起到阻止奥氏体晶粒长大的作用,提高产品综合性能,且贵合金含量较低,更具有成本和应用优势。

参考文献

- [1] 钟彬,陈义庆,孟凡磊,等. 40CrMnMo钢钻杆料的裂纹缺陷分析[J]. 金属热处理, 2021, 46(2): 228-231.
- [2] 马燕楠,孙文. BG27CrMoV地质钻探管横向开裂原因分析[J]. 钢管, 2023, 52(4): 50-53.
- [3] 李长江,周井玲,许波兵. 基于ANSYS与nCode的损伤钻杆疲劳寿命分析[J]. 现代制造工程, 2023, (5): 85-90.
- [4] 王帅,胡锋,李德发,等. TiN对高强度耐磨钢韧性的影响及其机制分析[J]. 中国冶金, 2021, 31(7): 38-45.
- [5] 孟静,常帅,陈嘉宇,等. 热轧含Ti微合金钢拉伸性能及冲击韧性的改善[J]. 中国冶金, 2023, 33(2): 106-113.
- [6] 潘胡江,杨新明,李光强,等. Ti微合金化对高锰钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(2): 74-78.
- [7] Lu S L, Feng Y R, Luo F Q, et al. Failure analysis of IEU drill pipe wash out[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(10-12): 1360-1365.
- [8] Dale B A. An experimental investigation of fatigue-crack growth in drillstring tubulars [J]. SPE Drilling Engineering, 1988, 3(4): 356-362.
- [9] Baryshnikov A, Calderoni A, Ligrone A, et al. A new approach to the analysis of drillstring fatigue behavior [J]. SPE Drilling & Completion, 1997, 12(2): 77-84.
- [10] 费根胜,王从奎,曾宪林,等. 复合载荷下S135钻杆管体裂纹扩展与结构改进[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(10): 1638-1647.
- [11] 李兴,李乾,雷磊,等. 东海某大位移井钻具断裂原因分析与建议[J]. 热加工工艺, 2022, 51(14): 158-162.
- [12] 罗军,白马,张悦,等. 西北油田钻杆腐蚀疲劳敏感性模拟研究[J]. 材料保护, 2021, 54(4): 53-57.
- [13] 董珍,米永峰,姜海龙,等. 850 MPa旋挖机钻杆用管的材料特性分析[J]. 包钢科技, 2022, 48(3): 55-58.
- [14] Zhu X, Dong L, Tong H. Failure analysis and solution studies on drill pipe thread gluing at the exit side of horizontal directional drilling [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 33(5): 251-264.
- [15] 朱丽敏,文九巴. 控轧控冷对高镍钢连续冷却相变的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(2): 106-110.
- [16] Shen J C, Luo Z J, Yang C F, et al. Effective grain size affecting low temperature toughness in lath structure of HSLA steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2014, 26: 70-76.