

## 深海 Nb-Ti 微合金化 X65MO 管线板管强度和韧性研究

方磊<sup>1</sup> 左秀荣<sup>2</sup> 姜金星<sup>1</sup> 刘帅<sup>1</sup> 翟冬雨<sup>1</sup>

(1 南京钢铁股份有限公司, 南京 210035; 2 郑州大学物理工程学院材料物理教育部重点实验室, 郑州 450052)

**摘要** 对 X65MO 钢 22.2 mm 和 24.0 mm 钢板、 $\Phi 558.8$  mm 钢管及焊接接头进行了拉伸、冲击与低温落锤测试和组织性能分析。通过热机械控轧控冷技术, 待温坯厚度 88 mm, 压缩比大于 10, 二开温度设定为 870 ~ 880 °C, 终轧温度设定为 820 ~ 830 °C, 采用超快冷进行冷却, 入水温度设定为 750 ~ 760 °C, 终冷温度 460 ~ 500 °C, 获得铁素体、贝氏体的混合组织, 铁素体含量 50% ~ 60%, 满足了制管后的强韧性要求。

**关键词** Nb-Ti 微合金化 X65MO 深海管线钢 低温韧性 焊接性能

## Study on Strength and Toughness of Nb-Ti Microalloying X65MO Deep Sea Pipeline Steel Plate and Steel Tube

Fang Lei<sup>1</sup>, Zuo Xiurong<sup>2</sup>, Jiang Jinxing<sup>1</sup>, Liu Shuai<sup>1</sup> and Zhai Dongyu<sup>1</sup>

(1 Nanjing Iron and Steel Co Ltd, Nanjing 210035;

2 School of Physical Science & Technology, Key Laboratory of Material Physics Ministry of Education, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)

**Abstract** The test of tensile, impact and low temperature drop weight tests on X65MO steel 22.2 mm and 24.0 mm plates,  $\Phi 558.8$  mm pipes and welded joints and the analyzing on structure and performance have been carried out. Through thermomechanical controlled rolling and cooling technology, i. e. the thickness of the billet to be warmed is 88 mm, the reduction ratio is greater than 10, the second beginning rolling temperature is set to 870 ~ 880 °C, and the final rolling temperature is set to 820 ~ 830 °C, using ultra-fast cooling for cooling i. e. the inlet water temperature is set to 750 ~ 760 °C and the final cooling temperature is 460 ~ 500 °C, the mixed structure of ferrite and bainite is obtained, the ferrite content is 50% ~ 60%, and the strength and toughness of pipeline steel pipe meet the customer requirements.

**Material Index** Nb-Ti Microalloying X65MO Deep Sea Pipeline Steel, Low Temperature Toughness, Welding Performance

随着世界经济的高速发展, 各个国家对石油资源的依赖日益严重, 陆地石油天然气的长期开发应用<sup>[1-2]</sup>, 造成了资源的枯竭萎缩。为了满足经济发展的需求, 海洋石油资源越来越受到世界各国的关注。海底环境不但温度低并且具有一定的腐蚀性, 在性能要求上, 海底服役用管线用钢<sup>[3-6]</sup>比陆地服役用管线用钢更为严格, 需要提高钢板的厚径比保证钢板的抗压溃性能, 保证钢板轧向与横向的力学性能同时满足标准的要求, 保证钢板在横向与纵向上同时具有优异的抗形变能力, 同时在管道建设中还需要保证钢板具有良好的低温止裂性能, 满足 -20 °C 以上的低温落锤撕裂性能(DWTT)。

深海 X65MO 管线用钢制管过程中采用直缝埋弧焊接, 焊接处的材质主要为焊材, 在焊接过程中, 钢管焊接处容易产生氧化物与金相组织差异性, 这种差异性决定了管线钢焊接接头成了钢管的最薄弱处, 石油输送服役过程中容易造成管线钢的失效<sup>[7-9]</sup>。因此, 为了更好的开发管线用钢, 深入研究

钢板与钢管的性能差异。通过性能检测分析钢管焊接处的性能稳定性, 得到板管性能匹配要求, 杜绝因焊接接头原因造成管道的失效<sup>[7-10]</sup>。

### 1 试验材料与方法

#### 1.1 试验材料

本试验用钢为深海服役用 X65MO 管线钢板, 采用 150 t 碱性顶底复吹转炉冶炼、经过 LF + RH 真空精炼处理和 260 mm × 1 810 mm 断面连铸机浇铸, 获得高洁净度铸坯。铸坯加热温度 1 180 ~ 1 190 °C, 运用热机械控轧控冷(TMCP)轧制技术及超快冷却, 待温坯厚度 88 mm, 压缩比大于 10, 二开温度设定为 870 ~ 880 °C, 终轧温度设定为 820 ~ 830 °C, 采用超快冷进行冷却, 入水温度设定为 750 ~ 760 °C, 终冷温度 460 ~ 500 °C; 用该钢板进行制管, 钢管规格为  $\Phi 558.8$  mm × 22.2 mm、 $\Phi 558.8$  mm × 24.0 mm, 钢板表检、探伤后进行铣边处理, 铣边要求上下坡口坡度一致, 铣边后进行预弯、成形操作, 然后进行埋弧焊接, 先进行内弧焊接, 内弧共 3 根焊丝进行

焊接,1 号丝采用直流电进行焊接,电流 580~620 A,电压 30~35 V,2 号丝采用交流电,电流 510~550 A,电压 35~38 V,3 号丝采用交流电,电流 420~460 A,电压 38~42 V,内弧焊接后降温至 700℃ 以下进行外弧焊接,外弧焊接共 3 根焊丝进行焊接,1 号丝采用直流电进行焊接,电流 810~830 A,电压 30~35 V,2 号丝采用交流电,电流 560~580 A,电压 36~40 V,3 号丝采用交流电,电流 410~450 A,电压 38~42 V。焊接过程线能量 21~25 kJ/cm,焊接后钢管进行探伤、扩径、水压试验,性能检测合格进行产品放行。试验的钢板化学成分如表 1 所示;钢管焊接焊丝成分如表 2 所示。

1.2 试验方法

采用扫描电子显微镜分析板管的显微组织,取样位置为钢板宽度 1/2 处,钢管取焊接接头及钢管的焊缝 90℃ 管体处,金相制样后,用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,在显微镜下进行观察。

拉伸取样位置:钢板拉伸在板宽 1/2 处取横纵向试样,试样尺寸长度 500 mm,宽度 100 mm;钢管拉伸在焊缝 90℃ 处取钢管母材纵向拉伸(如图 1 所示),焊缝 180℃ 处钢管母材横向拉伸(如图 1 所示),焊缝处取焊缝横纵向拉伸(如图 1 所示),试样尺寸长度 500 mm,宽度 100 mm,取样后使用压平机对试样压平后加工试验。

冲击取样位置:钢板冲击在板宽 1/4 处垂直于轧制方向取样,试样尺寸(mm)10×10×55;钢管取样位置为钢管本体在焊缝 90℃ 处取样,钢管焊接处、钢管焊接热影响区、钢管焊接热影响区+2 mm 位置处取样(如图 1 所示),试样尺寸(mm)10×10×55。

落锤取样位置:钢板落锤在板宽 1/4 处垂直于轧制方向取样,试样尺寸长度 300 mm,宽度 75 mm,厚度采用全壁厚;钢管取样位置为钢管焊缝 90℃ 管体处取横向落锤试样(如图 1 所示),试样尺寸长度 300 mm,宽度 75 mm,厚度采用全壁厚。

维氏硬度(HV10)取样位置:在钢管上进行取样,外焊边缘 1.5 mm 处、热影响区、管体基体。

2 试验结果

2.1 钢板力学性能

为了满足深海管线的使用要求,对钢板进行了横纵向拉伸试验检测,-20℃ 低温韧性检测,-20℃ 钢板时效后冲击功检测,同时检验了钢板的系列点温度冲击功、落锤性能检测。

表 1 试验钢化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of specimen steel /%

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	N
0.049	1.54	0.20	0.008	0.001 2	0.10	0.12	0.03	0.038	0.011	0.003 5

注:P<sub>cm</sub>为裂纹敏感系数,P<sub>cm</sub>=0.19。

表 2 钢管焊丝化学成分 /%

Table 2 Chemical composition of welding wire for steel pipe /%

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	N	B
0.07	1.60	0.18	0.009	0.005	0.015	0.012	0.33	0.03	0.06	0.005	0.003 5

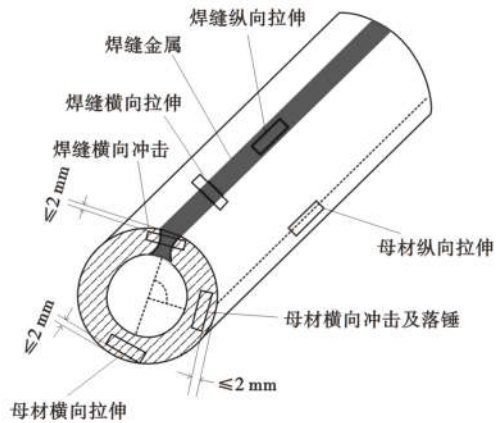


图 1 焊管取样位置

Fig. 1 Welded pipe sample position

2.1.1 钢板拉伸性能分析

钢板的拉伸性能分析见表 3。由表 3 可见,24 mm 规格钢板强度略高于 22.2 mm,同时,延伸率有所下降。两规格钢板的横纵屈强比相近,且满足标准要求,屈强比均≤0.83。由于制管时冷变形会造成钢板屈服强度上升,因此钢板的低屈强比有利于制管后拉伸性能稳定。

2.1.2 钢板低温韧性分析

由表 4 可见,两种钢板的 -20℃ 冲击功大于 380 J,剪切面积为 100%,DWTT 剪切面积大于 86%。钢板冲击韧性和 DWTT 性能富裕量较大,低温韧性优异。

2.1.3 钢板时效后冲击功分析

由表 5 可见,两规格钢板在进行了 5% 应变后

表 3 钢板拉伸性能

Table 3 Tensile properties of steel plate

规格/ mm	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		延伸率/%		屈强比	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
22.2	450	430	595	585	54	56	0.76	0.74
24.0	460	450	620	610	49	50	0.74	0.74

再经过 250 °C 条件下 1 h 时效处理后,其冲击功均在 300 J 以上且数值稳定。表明了经过时效后,钢板在 -20 °C 时仍然具有良好的冲击韧性,能够满足客户要求。

2.1.4 钢板冲击功、低温落锤系列温度性能分析

图 2 为 22.2 mm 与 24.0 mm 钢板 0 °C 到 -70 °C 的系列温度检测结果。通过试验发现,钢板在 -70 °C 时仍然能保持较高的冲击功,没有发生韧性转变,表明钢板的低温韧性良好。

图 3 为钢板系列温度落锤撕裂试验 DWTT 值。随着温度的降低,DWTT 剪切面积减小,但变化范围不是很大,两种规格钢板 -30 °C DWTT 均值在 85% 以上,在 -50 °C 时,22.2 mm 钢板的剪切面积达到 86%,24.0 mm 钢板的剪切面积达到 92%。综上所述,钢板表现了优异的低温韧性。

2.2 钢管与焊接位置力学性能

2.2.1 拉伸性能

表 6 为  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$  和  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 24.0 \text{ mm}$  深海管线钢管本体的轧向和横向以及焊接热影响区与焊缝处的拉伸检测。通过试验可见,钢管本体的轧向、横向以及焊接热影响区与焊缝处的拉伸检测满足深海管线的标准要求。横纵向具有较好强度匹配值,并且横向拉伸强度和屈服强度要略高于轧向,两个方向的拉伸性能都具有较低的屈强比,钢管具有较好的抗应变能力,其中焊缝处的力学拉伸强度高于管体,满足了产品的设计要求。

2.2.2 冲击韧性

表 7 为  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$  和  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 24.0 \text{ mm}$  钢管的本体、焊接处、热影响区、热影响区 +2 mm 位置冲击韧性检测。-20 °C 检测,本体冲击功不低于 481 J,试样剪切面积全部为 100%;热影响区及热影响区 +2 mm 位置上冲击功不低于 360 J,试样剪切面积不低于 90%;焊接处冲击韧性冲击功不低于 156 J,试样剪切面积不低于 68%,冲击检测表现出较好低温韧性性能,满足了深海服役要求。

表 4 -20 °C 钢板低温韧性

Table 4 Low temperature toughness of steel plate at -20 °C

规格/ mm	试验温度/ °C	冲击功 /J				剪切面积 / %				DWTT 剪切面积 / %		
		1	2	3	均值	1	2	3	均值	1	2	均值
22.2	-20	490	460	450	467	100	100	100	100	89	90	90
24.0	-20	390	380	422	397	100	100	100	100	95	90	93

表 5 钢板 250 °C 1 h 时效后 -20 °C 冲击功

Table 5 Impact energy at -20 °C of steel plate after aging at 250 °C for 1 h

规格/ mm	冲击功 /J				剪切面积 / %			
	1	2	3	平均值	1	2	3	平均值
22.2	367	343	306	339	100	100	100	100
22.2	322	321	392	345	100	100	100	100
24.0	385	387	373	382	100	100	100	100
24.0	395	377	393	388	100	100	100	100

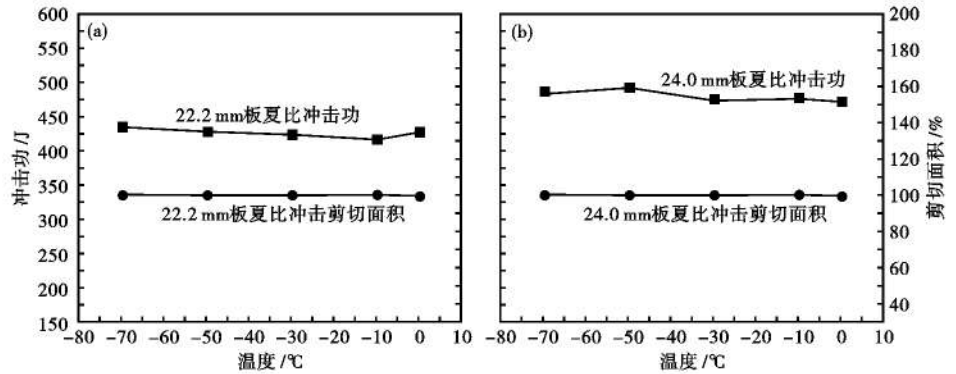


图 2 22.2 mm (a) 和 24.0 mm (b) 钢板 -70 ~ 0 °C 冲击试验  
Fig. 2 Impact test of 22.2 mm (a) and 24.0 mm (b) at -70 ~ 0 °C

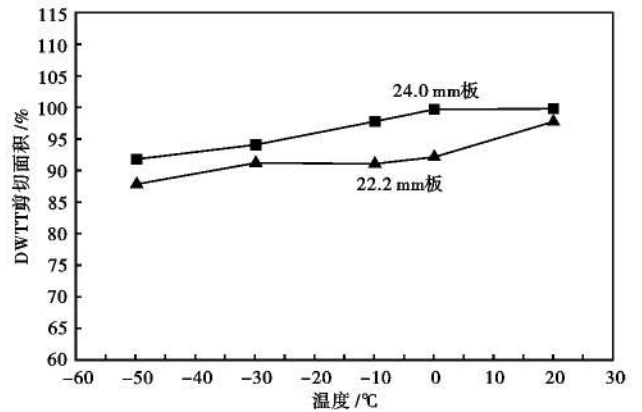


图 3 钢板 -50 ~ 20 °C DWTT 试验  
Fig. 3 Steel plate DWTT test at -50 ~ 20 °C

两规格管体均具有优异的冲击性能,试样剪切面积均为 100%,24 mm 规格冲击功略低,均值也达到了 480 J。两规格焊管熔合线及熔合线 +2 mm 处剪切面积均在 90% 以上,冲击功数值接近且单个试样冲击功  $\geq 357 \text{ J}$ 。24 mm 规格焊管焊缝冲击功均值为 176 J,略好于 22.2 mm 规格的 160 J,两者剪切

面积均在 70% 以上。综上,两种规格焊管焊接位置的冲击韧性较好的满足 X65MO 标准要求。

2.2.3 硬度分析

图 4 为  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$  钢管埋弧焊接边缘 1.5 mm 处、熔合线处、钢板本体的硬度检测试验。通过检测分析发现,钢管埋弧焊接处及熔合线区域硬度情况大致相同。钢管埋弧焊接处硬度最高,熔合线区的硬度值随着靠近钢管的本体深入而

表 6  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$  和  $558.8 \text{ mm} \times 24.0 \text{ mm}$  管体和焊缝的拉伸性能

Table 6 Tensile properties of  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$  and  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 24.0 \text{ mm}$  pipe body and weld seam

性能	$\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$ 管				$\Phi 558.8 \text{ mm} \times 24.0 \text{ mm}$ 管			
	管体 (纵向)	管体 (横向)	焊缝 (纵向)	焊缝 (横向)	管体 (纵向)	管体 (横向)	焊缝 (纵向)	焊缝 (横向)
屈服强度/MPa	479	498	-	-	501	522	-	-
抗拉强度/MPa	590	598	683	620	576	599	622	628
延伸率/%	55	55	-	-	55	56	-	-
屈强比	0.81	0.83	-	-	0.87	0.87	-	-

表 7  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$  和  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 24.0 \text{ mm}$  管冲击韧性  
Table 7 Impact toughness of  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$  and  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 24.0 \text{ mm}$  pipe

位置	$\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$ 管					$\Phi 558.8 \text{ mm} \times 24.0 \text{ mm}$ 管												
	冲击功(-20°C) /J					剪切面积(-20°C) /%				冲击功(-20°C) /J				剪切面积(-20°C) /%				
	1	2	3	平均值	标准差	1	2	3	平均值	1	2	3	平均值	标准差	1	2	3	平均值
管体	502	497	506	502	3.7	100	100	100	100	482	481	490	484	2.6	100	100	100	100
熔合线	483	465	365	436	67.1	90	90	90	90	445	428	420	430	11.7	96	95	93	95
熔合线+2mm	449	463	456	456	6.6	95	95	95	95	405	431	439	427	19.1	96	95	97	96
焊缝	156	161	179	160	19.7	68	68	68	68	193	176	158	176	17.5	73	73	75	76

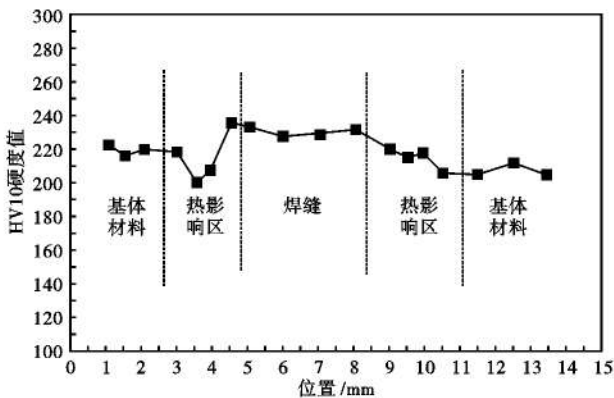


图 4  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$  焊接接头硬度分布

Fig. 4 Hardness distribution of  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$  welded joint

逐渐降低。

3 讨论

图 5 为  $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$  钢管外焊缝边缘 1.5 mm 处的焊缝至热影响区显微形貌。如图 5 (a) 所示,大量短小的铁素体板条在晶粒内部形成,焊缝区呈现晶内形核铁素体特征。其形成过程为,针状铁素体首先以夹杂物为形核点在奥氏体内部形核,随着针状铁素体的长大,奥氏体被分割成若干细小区域。这些区域最终细化了焊缝区晶粒,是其具有良好的强韧性的根本。靠近焊缝的热影响区由粗大粒状贝氏体组成(图 5b 所示),该区域在焊接时具有较高的峰值分度(约为 1 350 °C),高温下该区域发生完全奥氏体化及碳化物溶解,随后快冷形成粗大的粒贝。远离焊缝一侧的热影响区呈现出细晶

特征(图 5c 所示),该区域温度大约在  $Ac_3 \sim 1\ 000$  °C,组织相当于受到了正火处理。但是由于晶内有铁素体出现,致使该区域的硬度减小。热影响区重结晶区域由贝氏体 + 多边形铁素体组成(图 5d 所示),此结构由焊接过程中部分奥氏体化组织(形成温度约为  $Ac_1 \sim Ac_3$ )快冷得到。

图 6 为不同倍数下基体及近热影响区附近基体显微形貌图。由图 6 可知,各位置组织均由 PF、AF、B 等多相组成。图 6(b) 可见,热影响区附近的基体中贝氏体出现了分解和球化现象,同时,有大量碳化物析出。原因在于,热循环过程中,此位置的峰值温度约为 600 °C,该温度下有利于贝氏体组织发生回复再结晶及碳化物的析出,最终导致此区域硬度低于基体组织。

通过组织分析可见,X65MO 深海管线钢钢板晶粒度与洁净度对制管后焊接融合性能非常关键,制管后钢管焊缝及熔合线是产品的薄弱点。X65MO 钢管焊缝处由晶内形核铁素体组成,是其具有良好强韧性的根本原因。力学性能测试结果显示,焊缝处具有高于基体的抗拉强度及优良的低温韧性,满足过匹配要求。熔合线区域的力学性能并未受焊接热循环影响而急剧下降,且熔合线 + 2 mm 处冲击均匀性即得到改善。热影响区粗晶区由粗大的高硬度粒状贝氏体组成,由高温下奥氏体获得。而细晶区受焊接热循环的影响其组织中出现低硬度铁素体,达到了正火处理的效果。靠近热影响区附近的基体中贝氏体出现了分解和球化现象,硬度较低,随着与

热影响区距离的增加,硬度逐渐恢复。提高焊缝区域的强韧性可以有效地减小钢板基体与焊缝区域的性能差异,是确保钢管内应力均匀的最好办法,同时保证了钢管整体性能稳定,避免起裂点造成服役事故的发生。

#### 4 结论

(1) 厚规格深海管线用 X65MO 管线钢板横向和纵向屈服强度满足标准要求,屈强比 $\leq 0.83$ 。-20℃冲击功 $>380$  J,剪切面积为 100%,DWTT 剪切面积 $>86\%$ 。时效后冲击功 $>306$  J,剪切面积为 100%。随着温度降低,冲击值并未下降,在-70℃时冲击功 $>436$  J,剪切面积均为 100%。随着温度的降低,DWTT 剪切面积减小,在-50℃时 $>82\%$ 。钢板强度、冲击韧性和 DWTT 均满足相应技术要求,强度波动较小,屈强比较低,低温韧性优异。

(2) 钢管本体横向和轧向力学检测延伸率高、屈强比低,钢管本体的横向抗拉强度和屈服强度要略高于轧向;钢管本在低温系列温度检测、250℃条件下 5%应变经过 1 h 加热处理低温冲击韧性及低温系列温度落锤撕裂试验检测,表现了良好低温韧性,满足了 X65MO 深海管线用钢的设计要求。

(3) 显微组织检测可见,基体组织较高的铁素体含量有利焊缝组织与基体的熔合,焊缝强度明显高于钢管本体要求,焊缝晶内铁素体形核,保证了焊缝良好的强度和韧性,满足了深海管线良好的低温服役要求。

#### 参考文献

- [1] 牛辉,牛爱军,刘海璋,等. 深海用 X70 高强度厚壁管线钢及焊管的开发[J]. 焊管,2018,41(2):1-6.
- [2] 牛爱军,毕宗岳,张高兰. 海底管线用管线钢及钢管的研发与应用[J]. 焊管,2019,42(6):1-6.
- [3] 李亚东,唐晓,李焰. 焊接接头局部腐蚀的研究进展[J]. 材料导报,2017,31(11):158-165.
- [4] 方娜,陈国明,朱红卫. 海底管道泄漏事故统计分析[J]. 油气

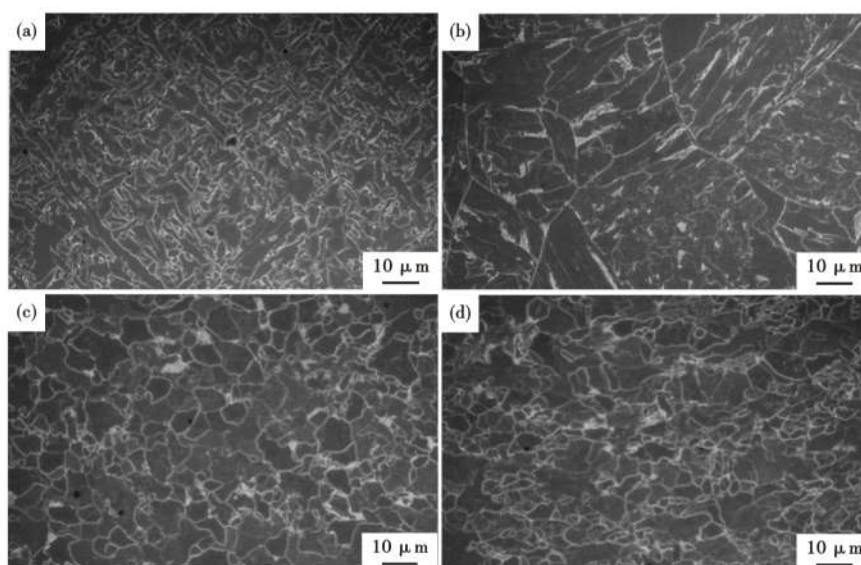


图 5  $\Phi 558.8$  mm  $\times$  22.2 mm 焊接接头的微观组织:(a) 焊缝;热影响区-(b) 粗晶区;(c) 细晶区;(d) 部分重结晶区

Fig. 5 Microstructure of  $\Phi 558.8$  mm  $\times$  22.2 mm welded joint: (a) weld seam; HAZ- (b) coarse-grain region; (c) fine-grain region and (d) part mixed grain region

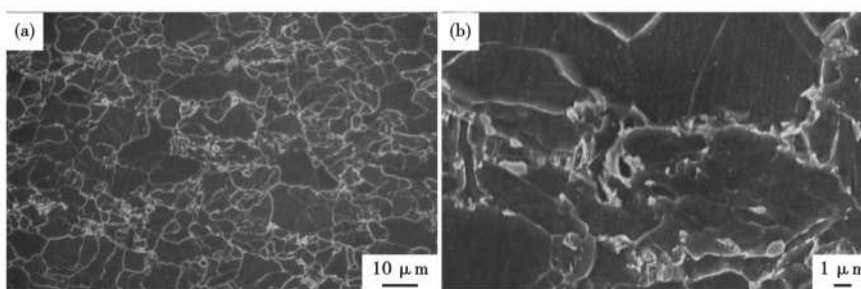


图 6  $\Phi 558.8$  mm  $\times$  22.2 mm 管本体(a)和靠近热影响区基体(b)微观组织

Fig. 6 Matrix microstructure of body (a) and close to heat affected zone area (b) of  $\Phi 558.8$  mm  $\times$  22.2 mm pipe

储运,2014,33(1):99-103.

- [5] Zhang H, Wang D and Xue P, et al. Microstructural Evolution and Pitting Corrosion Behavior of Friction Stir Welded Joint of High Nitrogen Stainless Steel[J]. Materials & Design,2016,110:802-810.
- [6] 牛爱军,殷立洪,毕宗岳,等. 深海用高强厚壁直缝埋弧焊管开发技术难点分析[J]. 焊管,2015,38(11):15-19.
- [7] Niu Y L, Jia S J and Liu QY, et al. Influence of Effective Grain Size on Low Temperature Toughness of High-Strength Pipeline Steel [J]. Materials, 2019(12):1-15.
- [8] 张河健,李烈军,高吉祥,等. 深海用 X70 管线钢焊接粗晶热影响区组织和性能研究[J]. 热加工工艺,2017,46(1):57-60.
- [9] 丁文华,张海,李少坡,等. 深海大壁厚 X65MOS 海底管线钢关键技术研究:第十一届中国钢铁年会[Z]. 北京:2017:4.
- [10] 刘清友,贾书君,任毅. 高钢级厚壁管线钢低温断裂韧性控制技术[J]. 焊管,2019,42(7):39-54.

方磊(1982-),男,博士,高级工程师,2010年东北大学毕业,冶金工艺研究。E-mail:niscofl@163.com

收稿日期:2020-08-04