

文章编号:1008-1542(2020)05-0455-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# B+F 双相 X80 管线钢模拟海水环境中 慢应变拉伸各向异性研究

马 静<sup>1,2</sup>, 王申豪<sup>1,3</sup>, 张双杰<sup>1,4</sup>, 范利锋<sup>5</sup>

(1.河北科技大学材料科学与工程学院,河北石家庄 050018;2.河北省材料近净成形技术重点实验室,河北石家庄 050018;3.河北省高温合金熔模铸造技术创新中心,河北黄骅 061100;4.河北省球磨钢球工程技术研究中心,河北邯郸 056000;5.内蒙古大学交通学院,内蒙古呼和浩特 010021)

**摘 要:**为研究 B+F 双相 X80 管线钢各向异性对安全服役的影响,采用金相扫描电镜观察、慢应变拉伸法和电化学极化法,在模拟海水环境中,与轧制方向呈 0°,45°,90° 3 种不同角度试样的 B+F 双相 X80 管线钢的慢应变拉伸和极化行为进行了分析。结果表明:双相 X80 管线钢组织由多边形铁素体和板条状贝氏体组成,铁素体和贝氏体含量近似为 1:1;在模拟海水环境慢拉伸条件下, B+F 双相 X80 管线钢与轧制方向呈不同角度试样的屈服强度随取样角度的增大明显降低,说明海水对 B+F 双相 X80 管线钢具有明显的应力腐蚀作用;与轧制方向呈 0°试样的 X80 管线钢的慢应变拉伸应力与应变曲线呈圆顶状,屈服强度和抗拉强度均最高,屈强比为 0.81,均匀伸长率为 13.4%,可以满足使用要求;与轧制方向呈 90°试样的双相 X80 管线钢的自腐蚀电位最负,自腐蚀电流最大,耐海水腐蚀性能最差;与轧制方向呈 45°试样的双相 X80 管线钢的自腐蚀电位最正,耐蚀性最优。研究 B+F 双相 X80 管线钢在模拟海水中的慢应变拉伸各向异性,可提高其安全服役性,对大变形管线钢的实际生产具有一定的借鉴价值。

**关键词:**金属材料工程;双相管线钢;各向异性;慢应变拉伸;极化行为;海水腐蚀

中图分类号:TG142.1

文献标识码:A

doi:10.7535/hbkd.2020yx05009

## Study on anisotropy of B+F dual-phase X80 pipeline steel under slow strain tensile in simulated seawater

MA Jing<sup>1,2</sup>, WANG Shenhao<sup>1,3</sup>, ZHANG Shuangjie<sup>1,4</sup>, FAN Lifeng<sup>5</sup>

(1.School of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018,

收稿日期:2020-07-22;修回日期:2020-08-31;责任编辑:王淑霞

基金项目:国家自然科学基金(51761030,51701064);内蒙古自然科学基金(2019MS05081)

第一作者简介:马 静(1973—),女,河北深泽人,教授,博士,主要从事腐蚀与防护方面的研究。

通讯作者:范利锋副教授。E-mail:ysufanlifeng@foxmail.com

马静,王申豪,张双杰,等.B+F 双相 X80 管线钢模拟海水环境中慢应变拉伸各向异性研究[J].河北科技大学学报,2020,41(5):455-461.

MA Jing, WANG Shenhao, ZHANG Shuangjie, et al. Study on anisotropy of B+F dual-phase X80 pipeline steel under slow strain tensile in simulated seawater[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(5): 455-461.

China; 2. Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. Hebei Innovation Center for Superalloy Investment Casting Technology, Huanghua, Hebei 061100, China; 4. Steel Ball Technology Innovation Center of Hebei Province, Handan, Hebei 056000, China; 5. Transportation Institute of Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China)

**Abstract:** In order to study the effect of anisotropy on the safe service of B+F dual-phase X80 pipeline steel, the slow strain tensile and polarization behaviors of hot rolled ferrite + bainite dual-phase X80 pipeline steel at three angles ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$ ) with rolling direction were analyzed by metallography, scanning electron microscopy, slow strain tensile test and electrochemical polarization method in simulated seawater. The result shows that the dual-phase X80 pipeline steel is composed of polygonal ferrite and lath bainite, and the content ratio of ferrite and bainite is about 1 : 1. The slow tension yield strength of X80 pipeline steel with different angles from rolling direction decreases significantly with the increase of sampling angle in simulated seawater environment, which indicates that seawater has obvious stress corrosion to X80 pipeline steel; the slow strain tensile stress-strain curve of B+F dual-phase X80 pipeline steel parallel to rolling direction ( $0^\circ$ ) shows dome shape, the yield strength and tensile strength are the highest, the yield strength ratio is 0.81, and the uniform elongation is 13.4%, which can meet the application requirement; the self-corrosion potential of B+F dual-phase X80 pipeline steel perpendicular to the rolling direction ( $90^\circ$ ) is the most negative and the self-corrosion current is the largest, which indicates the seawater corrosion resistance is the worst; the corrosion resistance of dual-phase pipeline steel in the direction of  $45^\circ$  from the rolling direction in simulated seawater is the best due to the most positive self-corrosion potential. The research on the slow strain tensile anisotropy of B+F dual-phase X80 pipeline steel in simulated seawater environment can improve its safe service, and has some reference value for the actual production of large deformation pipeline steel.

**Keywords:** metal materials and engineering; dual-phase pipeline steel; anisotropy; slow strain tensile; polarization behavior; seawater corrosion

X80 管线钢具有很高的强韧性,可以长效、安全、经济地长距离输送,近些年在油气运输中需求量不断增加<sup>[1-3]</sup>。油气输送管线在铺设以及服役过程中,不可避免地会穿越地震多发区、不连续冻土区和疏松黄土区等地质活动复杂地带,会因外部非正常载荷干扰而产生屈曲、拉裂和挤毁等大变形失效<sup>[4-5]</sup>。贝氏体+铁素体(B+F)双相大变形管线钢由软相铁素体(F)和硬相贝氏体(B)组成。软相 F 提供良好的塑性变形能力,而硬相 B 提供足够的强度,两相协调变形可使管线钢获得低屈强比和高均匀伸长率,满足大变形的要求<sup>[6-8]</sup>。

在管线钢生产过程中,与轧制方向呈不同角度方向的组织和性能存在差异,这就造成了各向异性。管线钢管有直管弯曲和螺旋弯曲 2 种弯管生产方式,弯管方式不同,管线钢的承受应力情况差异很大,一般油气输送管道内所受径向应力大于轴向应力,且在复杂环境下服役时往往承受着多个方向的应力与应变作用<sup>[9-12]</sup>。张海等<sup>[10]</sup>、宗焱等<sup>[13]</sup>研究了与轧制方向呈不同角度管线钢的各向异性,但所研究的管线钢显微组织为粒状贝氏体(针状铁素体),双相 B+F 大变形管线钢的各向异性研究未见报道,因此研究 B+F 双相管线钢的各向异性具有重要意义。中国具有辽阔的海水资源,石油和天然气储量丰富,生产油气过程中的设备和管道必然会受到海水的应力腐蚀。王灿<sup>[14]</sup>和 WU 等<sup>[15]</sup>分别研究了 X65 和 X70 管线钢在模拟海水环境下的应力腐蚀行为,而 X80 管线钢的应力腐蚀研究甚少。应力腐蚀的研究评定方法较多,其中常用方法为慢应变速率实验法,应变速率范围通常为  $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,可以快速确定延性材料在腐蚀环境中的应力腐蚀敏感性。本文拟采用热轧生产的 B+F 双相 X80 管线钢,研究与轧向呈不同角度方向的管线钢在模拟海水中的慢应力拉伸行为和极化行为。

## 1 材料与方法

选用热轧处理态的 B+F 双相 X80 管线钢板材,使用 HBKD-CL-009 直读光谱仪测定其成分,见表 1。分别选取与轧制方向呈  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $90^\circ$  进行组织观察和硬度测定。采用德国蔡司显微镜观察管线钢的组织,采用 TMVS-1 型维氏硬度计测量 X80 管线钢的硬度,载荷为 9.8 N,保持时间 10 s,每个试样测 9 点,取平均值。

表 1 X80 管线钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of X80 pipeline steel

成分	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Cu	Ti
质量分数/%	0.093 1	0.250 0	1.500 0	0.136 0	0.159 0	0.518 0	0.120 0	0.013 8

慢应变拉伸试样按 GBT 228—2002 进行线切割,试样尺寸如图 1 所示。将线切割好的板状 B+F 双相 X80 管线钢试样两面用 SiC 砂纸打磨至 1.7 μm,然后抛光至镜面。采用 YYF-50 型慢应变速率应力腐蚀实验机对试样进行拉伸,应变速率为  $1.33 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ,模拟海水溶液成分如下:NaCl 27 g/L,MgSO<sub>4</sub> 3 g/L,MgCl<sub>2</sub> 2 g/L,CaCl<sub>2</sub> 1 g/L。拉伸后的试样采用 TESCAN VEGA3 钨丝扫描电子显微镜进行断口观察。

将试样打磨抛光后采用聚四氟乙烯包裹露出 1 cm<sup>2</sup> 的面积进行极化曲线测量。极化曲线测试采用北京中腐防蚀工程技术有限公司生产的 PS-268A 型电化学分析仪,电解液与慢应变拉伸模拟海水溶液相同,辅助电极采用石墨电极,参比电极采用饱和甘汞电极。

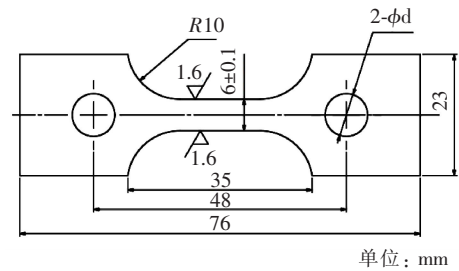


图 1 慢应变拉伸试样尺寸

Fig.1 Size of slow strain tensile specimen

## 2 实验结果与分析

由 B+F 双相 X80 管线钢的化学成分可知 X80 为低碳微合金钢,Nb 含量为 0.518%(质量分数,下同),微量 Nb 的加入有助于增强钢的固溶强化和碳化物强化;Si 的存在可以明显提高钢的弹性极限和屈服极限;Mn 含量为 1.5%,可以提高钢的淬透性。

### 2.1 金相组织分析

与轧制方向呈不同角度的 B+F 双相 X80 管线钢的金相组织如图 2 所示。由图 2 可知:X80 管线钢的金相组织由白色铁素体和黑色贝氏体组成,铁素体呈多边形,贝氏体呈板条状。与轧制方向平行(0°)方向性最为明显,铁素体和贝氏体被拉成长条状,晶粒较为粗大;与轧制方向垂直(90°)方向铁素体晶粒细小,近似呈等轴状,贝氏体板条更细。经图像分析可得,铁素体含量为 46.7%~55.2%,铁素体和贝氏体含量近似为 1:1。B+F 双相 X80 管线钢试样 0°方向维氏硬度稍高,为 228.4 HV;45°方向维氏硬度居中,为 220.4 HV;90°方向维氏硬度略低,为 207.7 HV。各方向硬度的差异与相分布、相含量的波动有关,铁素体含量较高的方向其硬度相对较低,贝氏体含量较高的方向其硬度较高。

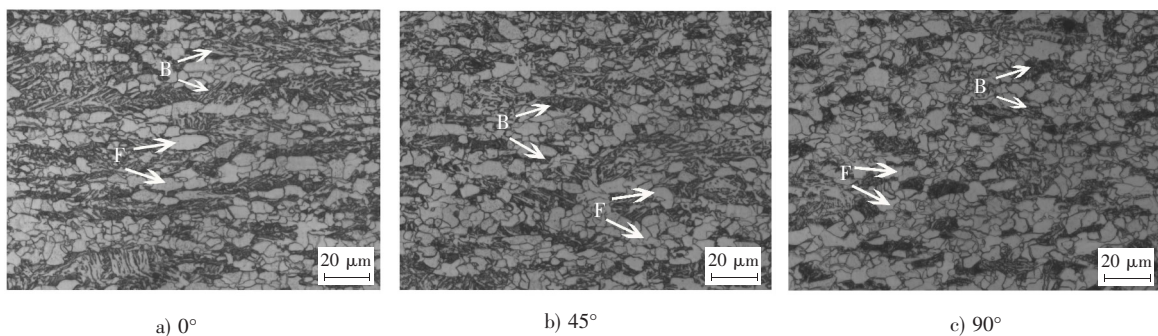


图 2 与轧制方向呈不同角度的 X80 管线钢的金相组织

Fig.2 Microstructure at different angles from the rolling direction

### 2.2 力学性能分析

与轧制方向呈不同角度试样的 X80 管线钢在模拟海水中的慢应变-应力曲线如图 3 所示。在慢应变拉伸下,平行于轧制方向试样应力-应变曲线呈现圆顶状,没有明显的屈服点;而与轧制方向呈 45°和 90°试样呈现出明显的屈服平台,上屈服点和下屈服点较为接近。屈服现象是低碳钢所特有的力学性能特点。这是由

于钢中的 C, N 原子形成的柯氏气团对位错的钉扎作用, 当位错挣脱了柯氏气团的钉扎时, 可以在较小的应力作用下维持进一步的塑性变形。X80 管线钢的屈服对其在海水使用环境中的应用是不利的, 在受到一定应力的情况下, 持续的塑性变形不利于尺寸稳定。X80 管线钢化学成分中本身的含碳量较低, 只有 0.093%, 加入一定含量强碳化物形成元素 Ti, Nb, Mo 等合金元素, 其主要作用在于这些元素与 C 和 N 的亲合力较强, 可以形成碳氮化物, 将 C 和 N 固定下来, 从而消除屈服现象。

与轧制方向呈不同角度的 X80 管线钢强度对比如图 4 所示。在慢拉伸应力作用下, X80 管线钢的屈服强度相对于 X80 级别对应的 552 MPa 明显降低, 与轧制方向呈 0° 试样的屈服强度最高, 为 531 MPa, 45° 试样其次, 90° 试样的屈服强度最低, 为 491 MPa。与轧制方向呈 0° 试样的抗拉强度最高, 45° 与 90° 试样的抗拉强度较低, 非常相近。

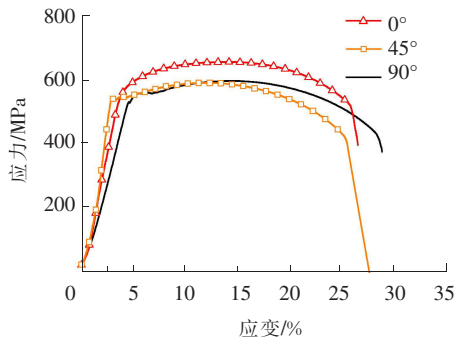


图 3 X80 管线钢在模拟海水中的慢应变-应力曲线

Fig.3 Stress-strain curve of X80 pipeline steel under slow strain rate in simulated seawater

与轧制方向不同角度的 X80 管线钢塑性对比如图 5 所示。0° 试样的断后延伸率最低为 24%, 90° 试样的延伸率最高为 26.5%, 45° 试样的延伸率略低于 90° 试样的断后延伸率, 这与强度结果是一致的。不同方向的均匀伸长率在 12%~14.5% 之间, 均大于大变形 8% 的最低要求。总体而言, X80 管线钢各方向塑性均较高。

通常认为, 在基于应变设计的大变形管道中, 纵向拉伸性能很大程度上决定着管道的形变能力。抗大变形管线钢在满足高强度的同时还应具备应变-应力曲线为无屈服平台型(圆屋顶状)、低屈强比( $\leq 0.85$ )、高均匀伸长率( $\geq 8\%$ )等特点<sup>[16-18]</sup>。因此在海水环境下, 平行于轧制方向应力-应变曲线符合圆屋顶状特征, 屈强比为 0.81, 均匀伸长率为 13.4%, 可以满足使用要求。

### 2.3 断口形貌分析

X80 管线钢慢应力拉伸后的断口形貌如图 6 所示。X80 管线钢的 0°, 45°, 90° 拉伸试样在慢应力拉伸状态仍表现为韧性断裂, 相对于原始试样断面, 宏观断口均发生了明显颈缩, 断口分纤维区、放射区和剪切唇 3 个区域。纤维区位于板面的中心, 是断裂裂纹萌生和慢速扩展区域, 与主应力垂直。与轧向呈 0° 试样断口纤维区存在较大较深的裂纹, 说明该方向铁素体和贝氏体较为粗大, 且分布不均匀, 在承受应力发生变形时变形程度不同从而形成裂纹然后发生扩展; 与轧向呈 45° 试样纤维区存在较多的孔洞, 该方向的晶粒较为细小, 在应力的作用下受力均匀, 发生了更为均匀的变形; 90° 试样纤维区最小。

放射区是裂纹快速扩展的区域, 是脆性断裂的表现。与轧制方向呈不同角度的 X80 管线钢试样放射区均呈“八”字形, 放射方向与板面平行, 表明裂纹沿板面平行方向扩展。0° 试样放射区最大, 说明该方向强度较高, 塑性较差; 90° 试样放射区最小, 因此该方向强度较低, 塑性最好。剪切唇与放射区相毗邻, 表面光滑,

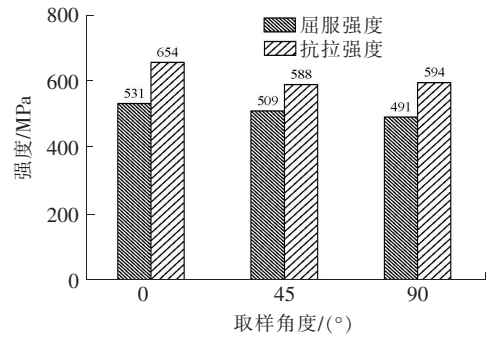


图 4 与轧制方向呈不同角度试样慢应变拉伸强度对比

Fig.4 Strength of specimens at different angles from the rolling direction

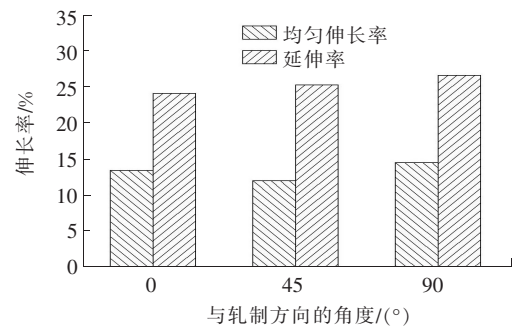


图 5 与轧制方向不同角度试样的均匀伸长率和延伸率

Fig.5 Uniform elongation and elongation of specimens at different angles from rolling direction



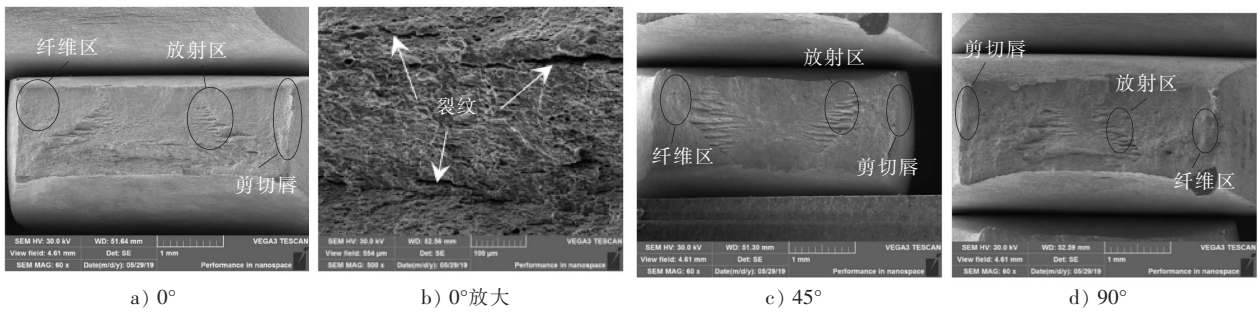


图 6 与轧制方向呈不同角度 X80 管线钢慢应变拉伸断口形貌

Fig.6 Slow strain tensile fracture morphologies of X80 pipeline steel at different angles from rolling direction

与拉应力方向成 45°角,是典型的剪切断裂。90°试样的剪切唇面积最大,0°试样剪切唇面积最小。

纤维区和剪切唇的面积占比越大,材料的塑性和韧性越好。90°试样断口的纤维区和剪切唇面积最大,代表材料脆性大小的放射区面积比较小,说明垂直于轧制方向的 X80 管线钢韧性和塑性最好;0°试样的断口放射区面积最大,剪切唇和纤维区面积最小,说明平行于轧制方向的 X80 管线钢强度最大,延伸率最小,韧性塑性最低。

韧窝越大代表材料韧性塑性越好,微观断口如图 7 所示。由图 7 可知,0°试样的微观断口较为平坦,韧窝小而多,大韧窝很少,尺寸均匀,小韧窝平均直径约为 3.57 μm,表明塑性、韧性最差,延伸率最小;45°试样韧窝大而深,大韧窝平均直径为 10.29 μm,小韧窝较少,表明韧性、塑性和断后延伸率较 0°试样有所提高;90°试样的微观断口形貌中韧窝尺寸最大,平均直径为 16.01 μm,表明韧性和塑性最高,延伸率较大。这与拉伸性能和断口的宏观形貌分析<sup>[19-21]</sup>是一致的。

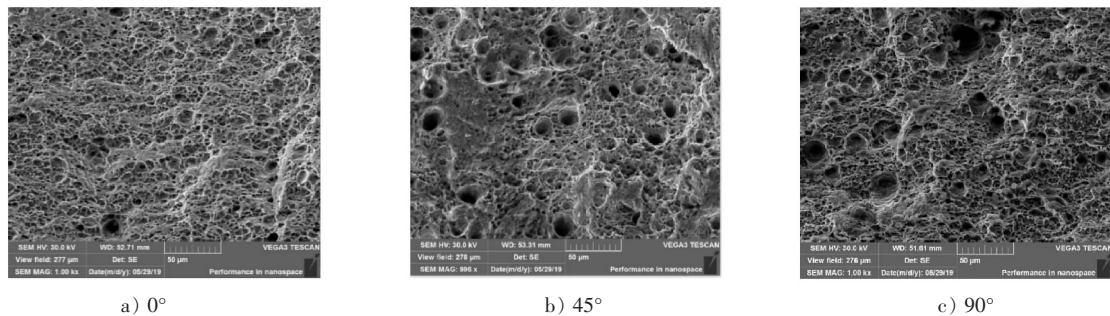


图 7 与轧制方向呈不同角度的 X80 管线钢慢应变拉伸断口韧窝形貌

Fig.7 Slow strain tensile fracture dimple morphologies of X80 pipeline steel at different angles from rolling direction

### 2.4 极化曲线分析

与轧制方向呈不同角度的 X80 管线钢在模拟海水中的极化曲线如图 8 所示,对曲线进行塔菲尔直线拟合,得到自腐蚀电位和自腐蚀电流密度,见表 2。

3 个角度的 X80 管线钢的自腐蚀电流较为接近,均在  $1 \times 10^{-3}$  数量级,自腐蚀电位差别较大,与轧制方向呈 45°试样的自腐蚀电位最正,该方向最不易发生腐蚀;90°试样的自腐蚀电位最负,腐蚀电流最大,说明垂直于轧制方向腐蚀倾向较高,更容易发生腐蚀。其原因在于该方向晶粒更为细小,铁素体和贝氏体的电极电位不同,形成了数量众多的腐蚀微电池,因此耐蚀性较差。

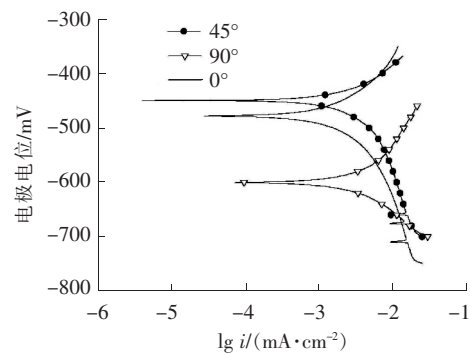


图 8 海水中不同取样角度 X80 管线钢极化曲线分析

Fig.8 Polarization curves of X80 pipeline steel at different sampling angles in seawater

### 3 结 论

1)本研究对 B+F 双相 X80 管线钢在模拟海水环境中慢应变拉伸的各向异性进行了研究,对其安全服役性能具有一定的指导作用。

2)热轧态 B+F 双相 X80 管线钢由多边形铁素体和板条贝氏体组成,铁素体和贝氏体含量近似为 1:1,维氏硬度为 207.7~228.4 HV。

3)在模拟海水慢拉伸条件下,与轧制方向呈不同角度的 B+F 双相 X80 管线钢随着取样角度的增大,屈服强度显著下降,说明海水对 B+F 双相 X80 管线钢具有明显的应力腐蚀作用。

4)在慢应力拉伸条件下,与轧制方向平行方向(0°)的双相管线钢应力-应变曲线呈现出圆屋顶状,屈服强度和抗拉强度最高,屈强比为 0.81,均匀伸长率为 13.4%,可以满足使用要求。

5)在模拟海水中,B+F 双相 X80 管线钢垂直于轧制方向(90°)的自腐蚀电位最负,自腐蚀电流最大,耐海水腐蚀性能最差;与轧制方向呈 45°方向的自腐蚀电位最正,耐蚀性最优。

6)本研究结果针对的是  $1.33 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  应变速率下的慢应变拉伸,与具体使用状态有所差异。未来可对更多应变速率下慢应变拉伸行为的各向异性进行深入研究,尽可能真实地模拟管线钢的服役状态。

表 2 X80 管线钢在模拟海水溶液中的自腐蚀电位和自腐蚀电流密度

Tab.2 Self-corrosion potential and self-corrosion current of X80 pipeline steel in simulated seawater solution

项 目	指 标		
取样角度/(°)	0	45	90
自腐蚀电位/mV	-480	-449	-602
自腐蚀电流密度/(mA·cm <sup>-2</sup> )	$1.12 \times 10^{-3}$	$1.13 \times 10^{-3}$	$1.26 \times 10^{-3}$

### 参考文献/References:

- [1] LIANG P, DU C W, LI X G, et al. Effect of hydrogen on the stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel in Ku'erle soil simulated solution[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2009, 16(4): 407-413.
- [2] 谢飞, 李雪, 高四方, 等. X80 管线钢在含硫酸盐还原菌的土壤环境中的应力腐蚀开裂行为研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(7): 69-77.  
XIE Fei, LI Xue, GAO Sifang, et al. Stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel in soil environment containing sulfate-reducing bacteria: An overview[J]. Materials Review, 2017, 31(7): 69-77.
- [3] 李鹤林, 吉玲康, 谢丽华. 中国石油钢管的发展前景展望[J]. 河北科技大学学报, 2006, 27(2): 97-102.  
LI Helin, JI Ling kang, XIE Lihua. Prospect of oil steel pipe in China[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2006, 27(2): 97-102.
- [4] 高惠临, 张骁勇. 大变形管线钢的研究和开发[J]. 焊管, 2014, 37(4): 14-21.  
GAO Huilin, ZHANG Xiaoyong. Research and development of large deformability pipeline steels[J]. Welded Pipe and Tube, 2014, 37(4): 14-21.
- [5] 张鹤松, 康永林, 孟德亮, 等. X80 抗大变形管线钢的生产工艺与组织性能研究[J]. 中国冶金, 2012, 22(9): 10-14.  
ZHANG Hesong, KANG Yonglin, MENG Deliang, et al. Research on processing, microstructure and properties of X80 high-deformability pipeline steel[J]. China Metallurgy, 2012, 22(9): 10-14.
- [6] 刘文月, 任毅, 高红, 等. F-B 型大变形管线钢的研究进展及发展方向[J]. 宽厚板, 2016, 22(5): 25-28.  
LIU Wenyue, REN Yi, GAO Hong, et al. Research progress and development trend of F-B type high deformability pipeline steel[J]. Wide and Heavy Plate, 2016, 22(5): 25-28.
- [7] ZHAO Z P, QIAO G Y, TANG L, et al. Fatigue properties of X80 pipeline steels with ferrite/bainite dual-phase microstructure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 657: 96-103.
- [8] ZHANG Xiaoyong, GAO Huilin, ZHANG Xueqin, et al. Effect of volume fraction of bainite on microstructure and mechanical properties of X80 pipeline steel with excellent deformability[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 531: 84-90.
- [9] 郑茂盛, 李金波, 李海军, 等. X80 级管线钢的各向异性特征[J]. 焊管, 2005, 28(3): 13-16.  
ZHENG Maosheng, LI Jinbo, LI Haijun, et al. Anisotropy Characteristic of Grade X80 Pipeline Steel[J]. Welded Pipe and Tube, 2005, 28(3): 13-16.
- [10] 张海, 李少坡, 丁文华, 等. 显微组织与晶体学结构对 X80 管线钢拉伸强度各向异性的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(2): 68-71.  
ZHANG Hai, LI Shaopo, DING Wenhua, et al. Effects of microstructure and crystallographic texture on anisotropy of tensile strength of X80 pipeline steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(2): 68-71.
- [11] 端强, 阎军, 朱国辉, 等. 晶粒尺寸与晶界取向差对 X80 管线钢各向异性的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(24): 107-109.  
DUAN Qiang, YAN Jun, ZHU Guohui, et al. Effects of grain size and misorientation on anisotropy of X80 pipeline steel[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(24): 107-109.
- [12] 陈文. 管线钢的热轧织构与钢板各向异性的研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2010.

- [13] 宗鑫, 毛卫民, 朱国辉. 晶体学织构与晶粒形状对管线钢屈服强度各向异性的影响[J]. 金属热处理, 2012, 37(11): 1-5.  
ZONG Cui, MAO Weimin, ZHU Guohui. The effect of crystallography texture and grain shape on the yield strength anisotropy of pipeline steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(11): 1-5.
- [14] 王灿. 模拟海洋环境应力对管线钢腐蚀行为的影响研究[D]. 天津:天津大学, 2016.  
WANG Can. The Study on the Effect of Stress on Corrosion Behavior of Pipeline Steel under Simulated Sea Water Environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [15] WU Wei, LIU Zhiyong, LI Xiaogang, et al. Electrochemical characteristic and stress corrosion behavior of API X70 high-strength pipeline steel under a simulated disbanded coating in an artificial seawater environment[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2019, 845: 92-105.
- [16] 樊学华, 李向阳, 董磊, 等. 国内抗大变形管线钢研究及应用进展[J]. 油气储运, 2015, 34(3): 237-243.  
FAN Xuehua, LI Xiangyang, DONG Lei, et al. Progress in research and application of pipeline steels with high deformation resistance in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(3): 237-243.
- [17] 鲁修宇, 王贞, 蒋跃东, 等. 高级别管线钢的显微组织研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(10): 101-104.  
LU Xiuyu, WANG Zhen, JIANG Yuedong, et al. Study on microstructure of high-grade pipeline steel[J]. Thermal Processing Technology, 2014, 43(10): 101-104.
- [18] NAZMUL H, ABDEKBASET R H M, JAMES G, et al. Influence of martensite-austenite(MA) on impact toughness of X80 line pipe steels[J]. Materials Science & Engineering: A, 2016, 662: 481-491.
- [19] 端强. X80 管线钢塑性变形行为与损伤断裂机理研究[D]. 北京:北京科技大学, 2016.  
DUAN Qiang. Study on Plastic-steel Deformation Behavior and Damage Fracture Mechanism of X80 Pipeline[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [20] 张骁勇, 高惠临, 徐学利, 等. X80 大变形管线钢的变形与断裂行为[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(2): 75-81.  
ZHANG Xiaoyong, GAO Huilin, XU Xueli, et al. Deformation and fracture behavior of X80 large deformation pipeline steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(2): 75-81.
- [21] 邓伟, 高秀华, 秦小梅, 等. X80 管线钢的冲击断裂行为[J]. 金属学报, 2010, 46(5): 533-540.  
DENG Wei, GAO Xiuhua, QIN Xiaomei, et al. Impact fracture behavior of X80 pipeline steel[J]. Acta Metalica Sinica, 2010, 46(5): 533-540.