

# 不同热处理温度对 09CrCuSb 钢板焊缝组织和性能的影响

## Effect of Different Heat Treatment Temperatures on the Microstructure and Properties of 09CrCuSb Steel Plate Weld

供稿|臧伟<sup>1,2,3</sup>, 李鸿斌<sup>1,2,3</sup>, 袁雪婷<sup>1,2</sup>, 王维东<sup>1,2,3</sup>, 王维亮<sup>1,2,3</sup>, 王晓波<sup>2</sup>, 王泽宇<sup>2</sup>, 闫涛<sup>4</sup> / ZANG Wei<sup>1,2,3</sup>, LI Hongbin<sup>1,2,3</sup>, YUAN Xueting<sup>1,2</sup>, WANG Weidong<sup>1,2,3</sup>, WANG Weiliang<sup>1,2,3</sup>, WANG Xiaobo<sup>2</sup>, WANG Zeyu<sup>2</sup>, YAN Tao<sup>4</sup>

### 内容导读

09CrCuSb 钢是工业锅炉和油田酸化作业连续油管的关键材料,但其焊接后的性能易因残余应力和组织不均匀而下降。为解决这一问题,本研究采用等离子填丝焊接工艺对 5.2 mm 厚的 09CrCuSb 钢板进行对接,并分别在 880、900、920 和 940 °C 下进行焊后热处理。通过金相显微镜、硬度测试、拉伸试验、冲击试验及弯曲试验,系统分析了不同温度对焊缝微观组织和力学性能的影响。实验结果表明:未经热处理的焊缝因残余应力导致硬度显著升高,但塑性和抗拉强度较低;随着热处理温度提升至 920 °C,焊缝组织逐渐均匀化,形成弥散分布的铁素体+珠光体结构。此时,焊缝硬度达到峰值 (HV 215),抗拉强度 (633 MPa) 超过母材 (622 MPa),低温冲击功 (159 J) 和抗弯曲性能均显著改善。然而,当温度继续升高时,硬度和强度略有下降。综合来看,920 °C 热处理有效消除了焊接残余应力,优化了组织均匀性,使焊缝兼具高强度与良好韧性。

09CrCuSb 钢被广泛应用于工业锅炉的省煤器、空气预热器、蒸发器等设备,腐蚀对此类设备的使用寿命有很大的影响<sup>[1-3]</sup>。09CrCuSb 钢主要的抗腐蚀原理为在强酸(如 70 °C、质量分数为 50% 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液)环境中,材料表面发生钝化,形成一层富含 Cr、Cu、Sb 等合金元素的保护层<sup>[4-6]</sup>。在连续油管的酸化作业过程中,酸液通常为质量分数 10%~15% 的盐酸,连续油管需要长时间在酸性介质中服役,导

致材料性能劣化,管壁迅速减薄,引起服役寿命大幅缩短<sup>[7-9]</sup>。利用 09CrCuSb 钢的抗腐蚀原理,可将 09CrCuSb 材料用于生产油田酸化作业的连续油管。

连续油管钢带原料常常需要进行对接处理,国内通常对 09CrCuSb 使用手工电弧焊和钨极氩弧焊进行焊接,焊后不进行热处理,这类焊接方法焊后抗弯曲性能较差,不能抵抗连续油管生产过程中的弯曲变形<sup>[10-11]</sup>。本文通过等离子填丝焊对 09CrCuSb 进

作者单位: 1. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 陕西 西安 710018; 2. 中国石油集团宝石管业有限公司, 陕西 宝鸡 721008; 3. 陕西省高性能连续管重点实验室, 陕西 宝鸡 721008; 4. 宁夏特种设备检验检测院, 宁夏 银川 753099

行焊接，并对焊缝进行不同温度的热处理，研究了不同热处理温度对 09CrCuSb 钢等离子焊接焊缝的微观组织和力学性能的影响。

## 实验材料和方法

### 实验材料

采用马鞍山钢铁股份有限公司生产的 10 片

5.2 mm×125 mm×350 mm 高强度 09CrCuSb 钢板作为原料，其强度值为 622 MPa，高于标准值 390~550 MPa（参考标准为宝钢企业标准 Q/BQB 340—2018）。选择与其化学成分相近的四川大西洋焊丝制品有限公司生产的 CHW-40CrCuSb φ1.2 mm 焊丝作为焊缝金属的填充材料，母材及焊丝的化学成分及力学性能分别见表 1、表 2。

表 1 09CrCuSb 钢板及 CHW-40CrCuSb 焊丝化学成分（质量分数）

| 试样 | 项目   | C     | Si        | Mn        | P      | S      | Cr        | Cu        | Sb        | Als   | Ni    | Ti    |
|----|------|-------|-----------|-----------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|
| 钢板 | 标准*  | ≤0.12 | 0.20~0.40 | 0.35~0.65 | ≤0.030 | ≤0.020 | 0.70~1.10 | 0.25~0.45 | 0.04~0.10 |       |       |       |
|    | 实测   | 0.07  | 0.25      | 0.60      | 0.003  | 0.003  | 0.86      | 0.33      | 0.095     | 0.033 | 0.21  | 0.028 |
| 焊丝 | 标准** | ≤0.12 | ≤0.60     | 0.30~0.70 | ≤0.025 | ≤0.025 | 0.75~1.20 | ≤0.50     | 0.04~0.10 |       | ≤0.30 |       |
|    | 实测   | 0.065 | 0.31      | 0.56      | 0.0069 | 0.0021 | 0.96      | 0.32      | 0.067     |       | 0.18  |       |

注：\*参考标准为宝钢企业标准Q/BQB 340—2018；\*\*参考标准为GB/T 8110—2020。

表 2 09CrCuSb 钢板及 CHW-40CrCuSb 焊丝的常温力学性能

| 试样 | 项目   | 抗拉强度, $R_m$ /MPa | 屈服强度, $R_{eL}$ /MPa | 断后伸长率, $A/\%$ |
|----|------|------------------|---------------------|---------------|
| 钢板 | 标准*  | 390~550          | ≥245                | ≥25           |
|    | 实测   | 622              | 554                 | 27.5          |
| 焊丝 | 标准** | 430~600          | ≥330                | ≥20           |
|    | 实测   | 549              | 454                 | 24.5          |

注：\*参考标准为宝钢企业标准Q/BQB 340—2018；\*\*参考标准为GB/T 8110—2020。

### 可焊性

国际焊接学会碳当量和焊后最大硬度值计算公式如式 (1) 和式 (2) 所示，

$$C_{eq} = w(C) + w(Mn)/6 + w(Cr)/5 + w(Mo)/4 + w(V)/14 + w(Ni)/40 + w(Si)/24 \quad (1)$$

$$HV_{max} = 1200 \times C_{eq} - 200 \quad (2)$$

式中， $C_{eq}$  为该材料的碳当量， $HV_{max}$  为该材料焊后最大维氏硬度值。

由式 (1)~(2) 计算出 09CrCuSb 钢的碳当量  $C_{eq} = 0.3577\% < 0.4\%$ ，最大维氏硬度值为  $HV 229.2 < 350$ ，表明 09CrCuSb 钢无淬硬倾向，对冷裂纹不敏感。即钢材的焊接性能良好，不需要进行预热处理<sup>[12]</sup>。

### 实验方法

采用 I 型坡口的等离子填丝焊接工艺，将每 2 片材料进行板-板对接后采用单面焊双面成型焊接方法，并对焊缝进行热处理，焊接工艺参数如表 3 所示。焊接前对钢板进行刮边，保证无毛刺，并用

无水乙醇对坡口两侧 50 mm 范围内进行擦拭，以清除油污、水渍、浮灰等。

表 3 等离子填丝焊接工艺参数

| 焊接电压/V | 焊接电流/A | 速度/(cm/min) |     | 流量/(L/min) |     |
|--------|--------|-------------|-----|------------|-----|
|        |        | 焊接          | 送丝  | 离子气        | 保护气 |
| 24     | 200    | 24          | 120 | 3.0        | 15  |

为保证焊后性能，根据碳钢的相变转变温度 ( $A_{c3}$ ) 经验公式 (见式 (3))，计算出 09CrCuSb 的  $A_{c3}$  为 909 °C，根据  $A_{c3}$  温度选择 880、900、920、940 °C 进行焊后热处理，保温时间 20 min，冷却方式为空冷。

$$A_{c3} = 955 - 350w(C) - 25w(Mn) + 51w(Si) + 106w(Nb) + 100w(Ti) + 68w(Al) - 11w(Cr) - 33w(Ni) - 16w(Cu) + 67w(Mo) \quad (3)$$

### 焊后检测

对焊接后的焊缝进行渗透和 X 射线探伤，检验

焊缝表面和内部是否存在缺陷,参考标准分别为 ASTM E433—71(2018)(进行实验时最新标准暂未更新,故参考该标准进行测试)和 ASTM E1032—2019。采用 DMI5000 M 金相显微镜观察不同热处理温度下焊缝的微观组织,选用腐蚀剂为质量分数 4% 的硝酸酒精溶液,参考标准为 GB/T 13298—2015。

采用 DuraScan-70 硬度计观察不同热处理温度下焊缝、热影响区(HAZ)及母材的显微硬度,试验在常温下进行,加载力为 10 N,参考标准为 GB/T 4340.1—2009。

采用 MTS 高性能疲劳试验机(250 kN)检测焊缝处的抗拉强度,参考标准为 GB/T 228.1—2021。

采用 ZWICK PSW750 示波冲击试验机检测焊缝处在 $-20^{\circ}\text{C}$ 的冲击值,参考标准为 ASTM A370—22。

采用 WE-30B 型万能试验机检测弯曲性能,弯

曲直径为  $2T$  ( $T$  为板材的厚度),弯曲角度为  $180^{\circ}$ ,方式分别为正弯和背弯,检测标准为 GB/T 232—2010。

## 结果与讨论

### 宏观形貌观察

对壁厚为 5.2 mm 09CrCuSb 进行对接焊接实验,对接后试样尺寸为 5.2 mm $\times$ 250 mm $\times$ 350 mm,宏观形貌如图 1 所示。各热处理工艺下的焊缝表面光滑均匀、无明显的裂纹、孔洞等缺陷。对焊缝进行渗透检查,表面均无裂纹和细小孔洞缺陷,对整个焊缝进行 X 射线探伤,发现内部无气孔缺陷,符合 ASTM E1032—2019 I 级合格标准。

### 微观组织

对 09CrCuSb 未经焊接板材和经过不同热处理工

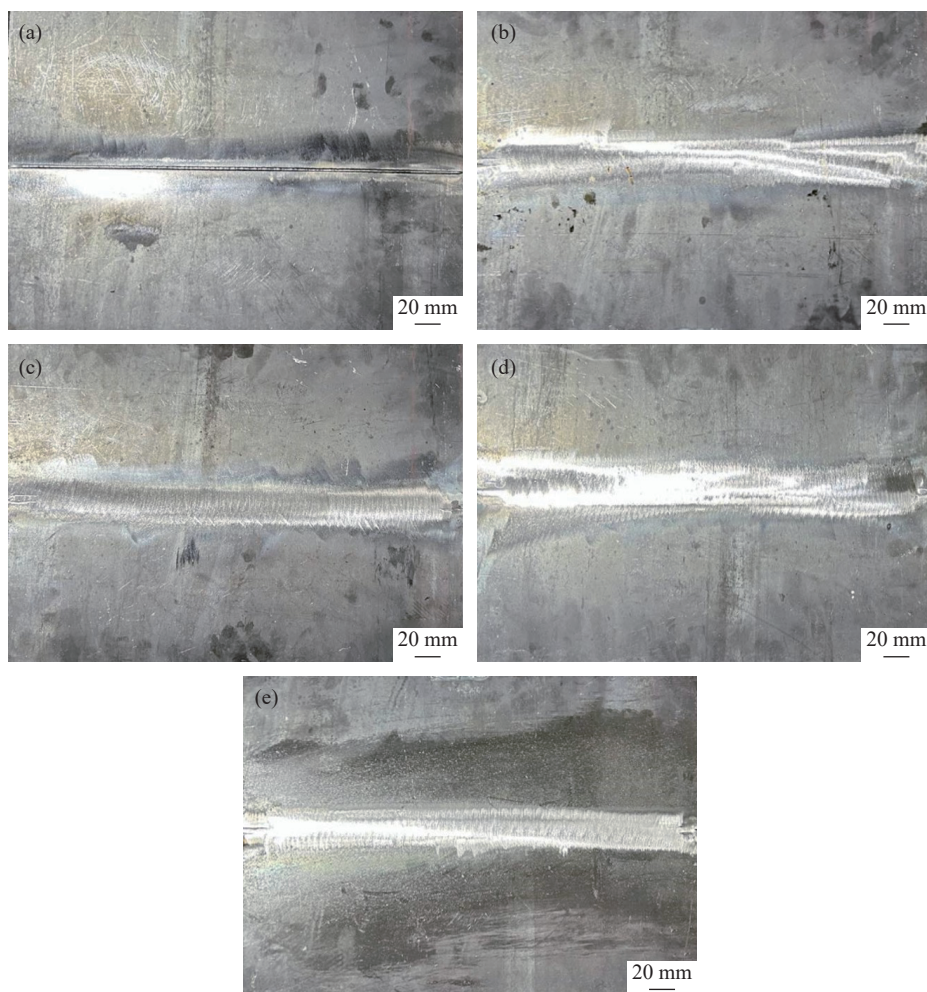


图 1 不同温度热处理后焊缝宏观形貌: (a) 未处理; (b) 880 °C; (c) 900 °C; (d) 920 °C; (e) 940 °C

艺的对接焊缝进行取样，观察金相组织，结果如图 2 所示。未经焊接的板材及焊缝显微组织均为铁素体+珠光体组织，其中未经过热处理的焊缝铁素

体含量较多，经过热处理的焊缝铁素体组织弥散分布在珠光体组织上，当热处理温度为 920 °C 时，组织更加均匀。

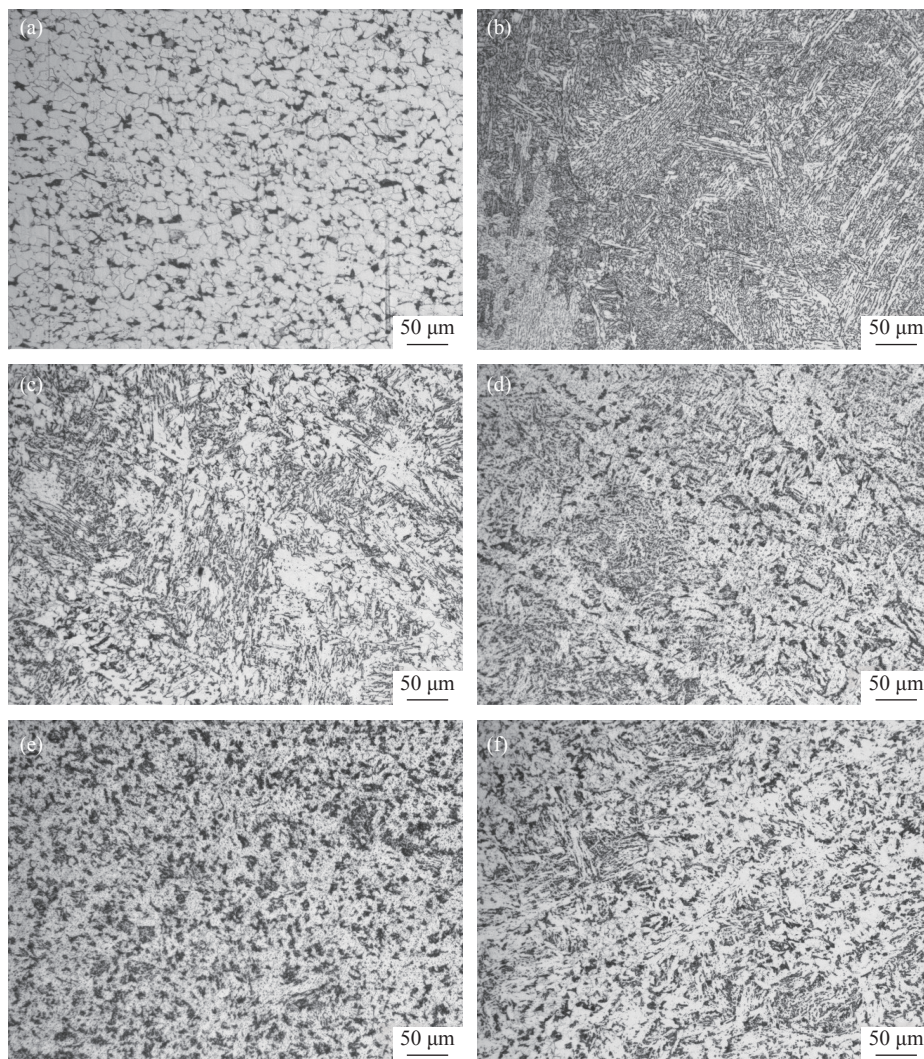


图 2 未经焊接板材及不同温度热处理后焊缝的金相组织图: (a) 未经焊接板材; (b) 未经热处理; (c) 880 °C; (d) 900 °C; (e) 920 °C; (f) 940 °C

### 微观硬度

对 09CrCuSb 未经焊接板材和经过不同热处理工艺的对接焊缝进行取样，检测其微观硬度（每个试样进行 3 次测试，取其平均值）。未经焊接板材硬度为 HV 204，经过不同热处理工艺的对接焊缝硬度值如表 4 所示。对比发现，未经过热处理的焊缝硬度值远远超过母材的硬度值，这是焊接过程中产生的残余应力造成的。在焊接过程中，由于热输入的影响，焊接区域会出现残余应力，导致热影响区硬

度升高，残余应力过大会导致材料的形变和裂纹等缺陷，从而降低其韧性和抗拉强度。通过热处理可减少或消除残余应力<sup>[13-14]</sup>。经过热处理的焊缝，随

表 4 母材及焊缝硬度, HV

| 热处理温度/°C | 母材  | 热影响区 | 焊缝  |
|----------|-----|------|-----|
| 未经热处理    | 205 | 234  | 234 |
| 880      | 200 | 207  | 211 |
| 900      | 202 | 210  | 212 |
| 920      | 200 | 214  | 215 |
| 940      | 195 | 205  | 210 |

着温度的升高焊缝硬度值呈先增大后减小趋势,当热处理温度为 920 °C 时,焊缝硬度达到最大值,当温度增加至 940 °C 时,硬度值有小幅下降。

### 拉伸试验

对焊缝进行拉伸试验,抗拉强度如图 3 所示。随着热处理温度升高,焊缝拉伸强度呈先上升再下降的趋势,当热处理温度为 920 °C 时焊缝抗拉强度最高(633 MPa),高于母材的抗拉强度(622 MPa),随后逐渐降低。

### 冲击试验

对不同热处理温度的焊缝取样,在-20 °C 进行冲击试验(进行 3 次实验取平均值),试验结果如表 5 所示。对比发现,随着热处理温度升高,焊缝的耐低温冲击性能有小幅提升。

### 弯曲试验

对焊缝取样,使用  $\phi 10$  mm (2 倍厚度) 弯头进行正反弯曲试验,试验结果如图 5 所示(各图中前

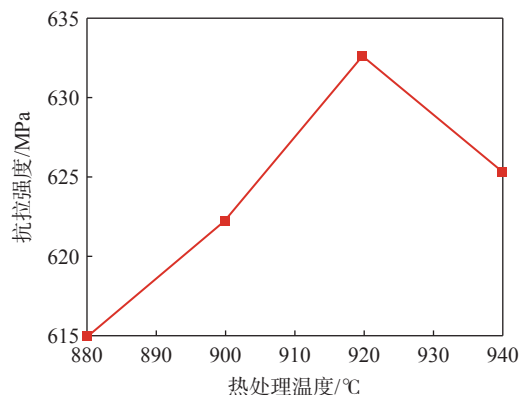


图 3 不同热处理温度下的焊缝抗拉强度

表 5 -20 °C 下不同热处理温度下焊缝的抗冲击性能 J

| 880 °C | 900 °C | 920 °C | 940 °C |
|--------|--------|--------|--------|
| 125    | 132    | 159    | 162    |

2 个试样为正弯,后 2 个为反弯)。通过对比发现,经过热处理的试样正、反弯曲后试样表面均未出现裂纹,表明经过热处理的焊缝具有良好的塑性;未经过热处理的试样正反弯曲后试样表面均出现裂纹,表明未经过热处理的焊缝塑性较差。

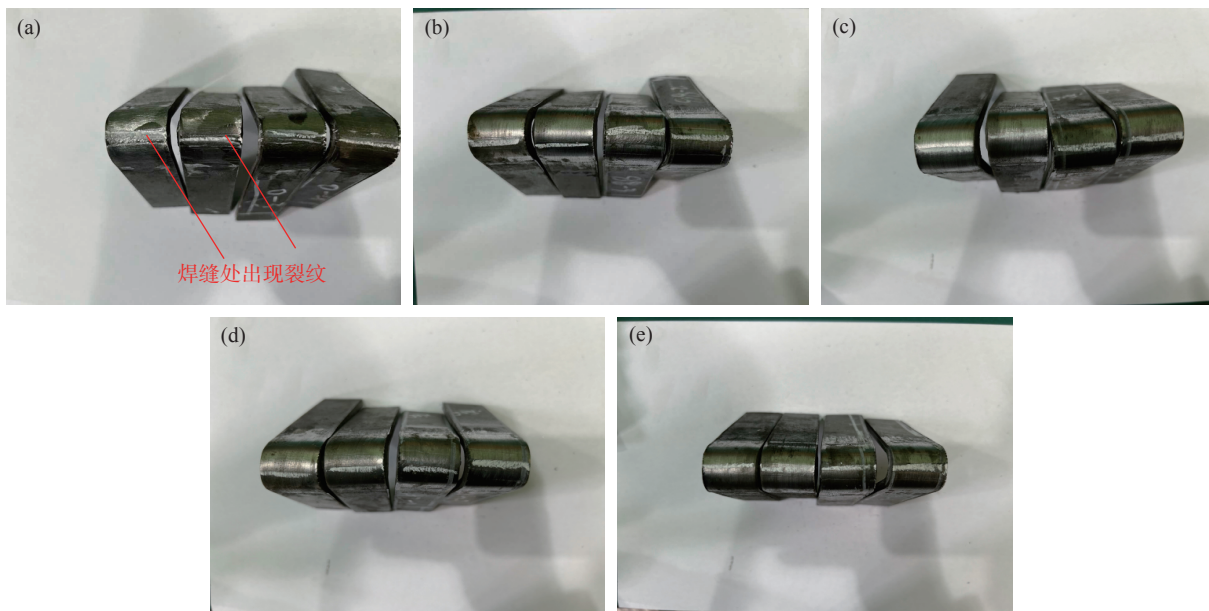


图 5 不同热处理温度后弯曲试样形貌: (a) 未处理; (b) 880 °C; (c) 900 °C; (d) 920 °C; (e) 940 °C

### 结束语

(1) 各热处理工艺下的焊缝表面光滑均匀、无明显的裂纹、孔洞等缺陷。

(2) 各试样显微组织为铁素体+珠光体组织,

经过热处理的焊缝,铁素体组织弥散分布在珠光体组织上,当热处理温度为 920 °C 时,组织更加均匀。

(3) 经过热处理的焊缝,随着温度升高,焊缝硬度值呈先增加后减小趋势,在 920 °C 时焊缝硬度

值达到最大。

(4) 各试样随着热处理温度的升高, 焊缝抗拉强度有小幅的上升, 经过 920 °C 热处理的焊缝抗拉强度最高, 高于母材的抗拉强度。

(5) 热处理后的试样经过正反弯曲后, 试样表面均未出现裂纹, 表明经过热处理的焊缝具有良好的塑性。

综上所述, 经过等离子填丝焊的 09CrCuSb 钢在 920 °C 下热处理拥有更加均匀的组织 and 更好的综合性能。

#### 参考文献

- [1] 蔡昊. 09CrCuSb 钢在锅炉制造中的应用. 工业锅炉, 2005(5): 22
- [2] 顾丕雄, 朱锦美. 耐蚀钢 09CrCuSb 在锅炉省煤器承压部件上的应用. 金属加工 (热加工), 2015(18): 44
- [3] 谢建府, 隋亚飞, 邓之勋, 等. 09CrCuSb 热轧卷边部缺陷的成因分析. 连铸, 2022(3): 89
- [4] 郑健, 彭志贤, 袁渊, 等. Cu/Sb/Sn/Mo/W 对新国标 09CrCuSb 钢组织及力学性能的影响. 特殊钢, 2023, 44(2): 84
- [5] Wang X X, Gao Y M, Li Y F, et al. Effect of yttrium on the corrosion behavior of 09CrCuSb alloy in NaCl solution. *Corros Sci*, 2014, 87: 211
- [6] Lu S H, He Y, Xu R C, et al. Inhibition of microbial extracellular electron transfer corrosion of marine structural steel with multiple alloy elements. *Bioelectrochemistry*, 2023, 151: Art No. 108377
- [7] 杨普国. 浅谈水平井连续油管酸化及效果评价. 石化技术, 2017, 24(8): 119
- [8] 王治富. 连续油管在增产技术中的应用. 延安大学学报 (自然科学版), 2011, 30(4): 63
- [9] 张倩, 李年银, 李长燕, 等. 中国海相碳酸盐岩储层酸化压裂改造技术现状及发展趋势. 特种油气藏, 2020, 27(2): 1
- [10] 王磊. 耐硫酸露点腐蚀 09CrCuSb 钢管焊接工艺研究. 锅炉制造, 2019(1): 47
- [11] 黄荣杰, 杨朝瑞, 常治平, 等. 09CrCuSb 钢 TIG 焊热裂纹探究. 工业锅炉, 2012(5): 37
- [12] 罗晓军. 耐硫酸露点腐蚀用 ND 钢板的焊接. 石油工程建设, 2000(4): 28
- [13] 臧伟, 张杭永, 袁雪婷, 等. 焊接参数对 Gr1 钛板焊缝组织和性能的影响. 钢铁钎焊, 2017, 38(3): 63
- [14] 臧伟, 袁雪婷, 郭龙创, 等. 爆炸焊接法制备的 SNAI 和 TU1-Cu 靶材组织及性能. 金属世界, 2022(1): 78

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发资助项目 (2022ZS26)。

作者简介: 臧伟 (1988—), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事连续油管的新产品研究与开发工作。  
通信地址: 陕西省宝鸡市姜谭路 10 号钢管研究院;  
E-mail: chrvin@126.com。