

试验与研究

国产耐蚀连续管性能分析*

汪海涛^{1,2,3}, 毕宗岳^{1,2,3}, 王维东^{1,2,3}, 鲜林云^{1,2,3}, 王泽宇²

(1. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 西安 710018; 2. 中国石油宝鸡石油钢管有限责任公司, 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)

摘 要: 针对低碳微合金钢连续管在含有 H_2S 、 CO_2 等腐蚀介质的油气田, 以及在CCUS作为 CO_2 注入管柱等工况条件下服役时连续管腐蚀严重、疲劳寿命低、易发生脆断等问题, 开发了国产耐蚀合金连续管。通过对BSGCT80-2205和BSGCT80-18Cr两种材质的国产耐蚀合金连续管开展力学性能、塑性、抗压、腐蚀等性能检测, 全面研究分析了两种连续管的各项性能。结果表明: BSGCT80-2205和BSGCT80-18Cr两种管材整体强度均满足80ksi钢级连续管要求; 压扁、扩口试验管材焊缝和母材均未出现开裂, 低周大应变疲劳寿命高于同规格90ksi钢级连续管寿命; 腐蚀试验证明两种管材适合在含腐蚀介质油气田或作为 CO_2 注入管柱长期服役。

关键词: 连续管; 耐蚀合金; 强度; 疲劳; 腐蚀

中图分类号: TG113.231; TE931.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.07.008

Performance Analysis of Domestic Corrosion Resistant Alloy Coiled Tubing

WANG Haitao^{1,2,3}, BI Zongyue^{1,2,3}, WANG Weidong^{1,2,3}, XIAN Linyun^{1,2,3}, WANG Zeyu²

(1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 2. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Province Key Laboratory of High Performance Coiled Tubing, Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: In view of serious corrosion, low fatigue life and brittle fracture of low carbon microalloyed steel coiled tubing in oil and gas fields containing H_2S , CO_2 and other corrosive media, or when CCUS is used as CO_2 injection string, domestic corrosion resistant alloy coiled tubing have been developed. By mechanical properties, plasticity, compression resistance, and corrosion performance tests on domestic corrosion resistant alloy coiled tubing made of BSGCT80-2205 and BSGCT80-18Cr materials, a comprehensive study was conducted to analyze the various properties of the two types of coiled tubing. The results show that the strength of both BSGCT80-2205 and BSGCT80-18Cr pipes meets the requirements of 80 ksi steel grade coiled tubing. There is no cracking in the weld seam and base material of the flattened and expanded test pipes, and the low cycle high strain fatigue life is higher than that of 90 ksi steel grade coiled tubing of the same specification. Through corrosion tests, it has been proven that the two types of pipes are suitable for long term service in oil and gas fields containing corrosive media or as CO_2 injection strings.

Key words: coiled tubing; corrosion resistant alloy; strength; fatigue; corrosion

0 前 言

随着油气资源勘探开发的不断深入, 连续管作业技术得到了飞速发展^[1-2]。连续管在油气田开发中可实现钻井、修井、储层改造等7大领域50类作

业^[3-6], 2020年以前主要为低碳微合金材质。但随着我国对石油天然气需求与日俱增, 油气开采逐渐转向含有 H_2S 、 CO_2 等腐蚀介质环境、地质条件复杂的区域以及海洋领域。低碳微合金连续管在 H_2S 、 CO_2 等腐蚀介质以及井下高温、高压的共同

*基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“二氧化碳规模化捕集、驱油与封存全产业链关键技术研究及示范”(项目编号2021ZZ01)。

作用下，或海洋腐蚀环境下，会造成严重的腐蚀破坏，导致穿孔、开裂等现象，以至管材会在受力远低于其本身屈服强度时发生脆断，造成油气井破坏，影响周围生态环境，严重制约着我国复杂苛刻油气资源的开发。因此，各大油田对具有高耐蚀性的连续管提出了迫切需求^[7-13]。

为了提高连续管在复杂苛刻油气环境下作业的使用寿命，防止事故发生，开发了80ksi钢级的BSGCT80-2205、BSGCT80-18Cr耐蚀合金连续管产品。BSGCT80-2205耐蚀合金连续管主要针对含CO₂和少量H₂S的油气井工况；BSGCT80-18Cr耐蚀合金连续管主要针对以CO₂腐蚀为主的油气井工况。本研究将对两种耐蚀合金连续管性能进行全面分析，为国产耐蚀合金连续管在油气田推广应用提供技术依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料是规格为 $\Phi 50.8$ mm×4 mm的BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管，以上两种国产耐蚀合金连续管是采用不锈钢热轧卷板经过精密成型、焊接制管等工艺后，再经过在线组织调控制成的长度可达数千米的连续管。

1.2 试验方法

对BSGCT80-2205和BSGCT80-18Cr国产耐蚀合金连续管开展性能分析。依据GB/T 228.1—2021标准进行整管拉伸试验，在室温下测定管材屈服强度、抗拉强度和断后延伸率；依据GB/T 246—2017标准中规定的压扁试验方法和GB/T 242—2007标准中规定的扩口试验方法，判断国产耐蚀合金连续管焊缝及母材的塑韧性性能；采用自制的疲劳试验机对长度为1 524 mm的耐蚀合金连续管开展低周大应变疲劳试验，检测管柱疲劳寿命，试验时弯曲模半径为1 828 mm，管材内压

为34.47 MPa；依据API 5C3标准要求对国产耐蚀合金连续管进行抗压性能检测，测量管柱在无载荷情况下最大抗内、外压的能力。

依据GB/T 4334—2020标准中E方法对两种国产耐蚀合金连续管焊缝和母材试样进行晶间腐蚀行为检测，试验后对试样在直径5 mm的压模下进行180°弯曲，弯曲后在10倍放大镜下观察弯曲试样外表面有无晶间腐蚀而产生的裂纹；依据GB/T 8650—2015标准中A溶液的方法进行抗氢致开裂试验及判定；依据GB/T 4157—2017标准四点弯曲方法进行抗应力腐蚀试验及评价；开展实际工况条件下腐蚀速率测试，将试样放入实际工况条件下一定周期后，按照公式（1）计算试样的腐蚀速率，即

$$v = \frac{g \times 365\,000}{r \times s \times t} \quad (1)$$

式中： g ——失重，g；

r ——材料密度，g/cm³；

s ——试样暴露在腐蚀介质中的表面积，mm²；

t ——腐蚀周期，d；

v ——平均腐蚀速率，mm/a。

2 结果与分析

2.1 管材力学性能

表1为BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管拉伸性能试验结果。由表1可知，BSGCT80-2205连续管平均屈服强度为641 MPa，平均抗拉强度为781 MPa，平均延伸率为34.4%；BSGCT80-18Cr连续管平均屈服强度为634 MPa，平均抗拉强度为769 MPa，平均延伸率为53.0%，两种国产耐蚀合金连续管力学性能均满足CT80钢级连续管要求。两种国产耐蚀合金连续管屈服强度和抗拉强度基本一致，表明两种管材都具有良好的承重和提拉性能。BSGCT80-18Cr连续管延伸

表1 BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管的拉伸性能

试样	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		延伸率/%	
	单值	均值	单值	均值	单值	均值
BSGCT80-2205	641、638、645	641	785、782、778	781	34.5、33.4、35.3	34.4
BSGCT80-18Cr	639、631、632	634	767、770、772	769	53.7、52.5、52.9	53.0
API SPEC 5ST标准要求	≥552		≥607		≥19	

率略高于BSGCT80-2205连续管,但两种管材在满足强度要求的前提下,延伸率均远高于API SPEC 5ST标准要求,且大于30%以上,说明两种国产耐蚀合金连续管在兼顾强度的同时具备较高的延展性。

2.2 塑性

依据GB/T 242—2007和GB/T 246—2017标准进行了两种国产耐蚀合金连续管扩口试验和压扁试验。扩口试验采用60°锥头,扩口率

为25%,扩口试验后两种管材母材及焊缝均未出现裂纹。压扁试验将管材激光焊缝分别处于0点钟和9点钟位置先压至两板间距离为10.6 mm(管材外径的1/3)处,最后压至管壁贴合(2倍壁厚),试验结果分别如图1、图2所示。两种国产耐蚀合金连续管焊缝和母材均未出现裂纹或裂缝,表明BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管沿周向具有良好的塑性。

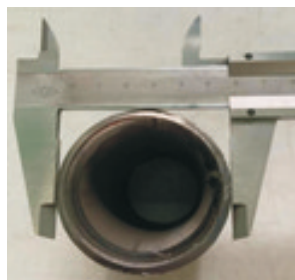


(a) 扩口试验



(b) 压扁试验

图1 BSGCT80-2205连续管塑性试验结果



(a) 扩口试验



(b) 压扁试验

图2 BSGCT80-18Cr连续管塑性试验结果

2.3 抗外压(挤毁)性能

对规格为 $\Phi 50.8$ mm \times 4 mm的BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管在CPT-1外压挤毁试验系统上进行试验。试样有效长度为3 m,压力介质为水,压力加载速度低于35 MPa/min,试验依据API 5C5标准进行。

管材挤毁失效试样如图3所示。挤毁试验结果显示,规格 $\Phi 50.8$ mm \times 4 mm的BSGCT80-2205连续管的抗挤毁强度为101.3 MPa,较CT80钢级连续管标准计算值76.33 MPa,提高了33%;BSGCT80-18Cr连续管抗挤毁强度为95.8 MPa,较CT80钢级连续管标准计算值76.33 MPa,提高了26%;两种



(a) BSGCT80-2205



(b) BSGCT80-18Cr

图3 耐蚀合金连续管挤毁试验失效后试样形貌

管材焊缝、母材均未开裂，表明两种国产耐蚀合金连续管都具有优异的抗外压挤毁性能。

2.4 抗内压（爆破）性能

图4所示为 $\Phi 50.8\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管抗内压爆破试验试样失效形貌。试验结果显示，BSGCT80-

2205连续管的爆破压力为144.5 MPa，较CT80钢级连续管标准计算值95.6 MPa提高51.2%；BSGCT80-18Cr连续管的爆破压力为128.4 MPa，较CT80钢级连续管标准计算值95.6 MPa提高34.31%。表明两种耐蚀合金连续管具备承受较高内压的能力，抗内压性能优异。



(a) BSGCT80-2205



(b) BSGCT80-18Cr

图4 耐蚀合金连续管爆破试验失效后试样形貌

2.5 低周疲劳性能

连续管在作业过程中反复发生低周大应变变形易引起疲劳损伤，这是连续管失效的主要原因之一。因此，对两种耐蚀合金连续管开展疲劳寿命评价研究至关重要。

对规格为 $\Phi 50.8\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的两种耐蚀合金连续管在内压为34.47 MPa、弯曲半径为1 828 mm（此弯曲半径为该规格连续管作业车卷筒最小内径，也是连续管作业过程中承受的最小弯曲半径）条件下进行了实物弯曲疲劳试验。结果表明，BSGCT80-2205连续管平均疲劳寿命为1 152次；BSGCT80-18Cr连续管的平均疲劳寿命为631次。CT90钢级 $\Phi 50.8\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 规格的低碳微合金钢连续管平均疲劳寿命为158次，两种耐蚀合金连续管与其相比，疲劳寿命大幅度提高，说明BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管均具有较好的抗大变形弯曲的能力。疲劳寿命对比如图5所示。

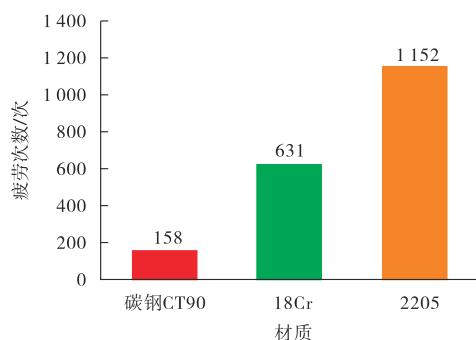


图5 不同材质连续管疲劳试验结果对比

在实际油田工况服役时，低碳微合金钢连续管易被井下介质腐蚀，在管材表面形成坑蚀、点蚀等腐蚀形态；在现场反复弯曲作业过程中，坑蚀、点蚀处管材发生应力集中，导致低碳微合金钢连续管疲劳性能大幅降低。耐蚀合金连续管具有良好的抗油气介质腐蚀能力，在油田井下服役时管材表面不易发生腐蚀，现场反复弯曲作业时疲劳寿命比低碳微合金钢连续管具有更加明显优势。

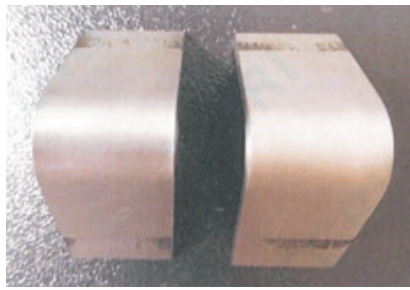
2.6 晶间腐蚀试验

在管材制造过程的焊接、热处理等加热循环制造工艺中，管材的焊缝、母材晶界处易富集 $M_{23}C_6$ 、 Cr_2N 等析出物，沿晶界形成贫铬区，使贫铬区处连续管的耐蚀性、塑韧性降低，导致在含有 H_2S 、 CO_2 的酸性油气田使用过程中造成管材脆性开裂。

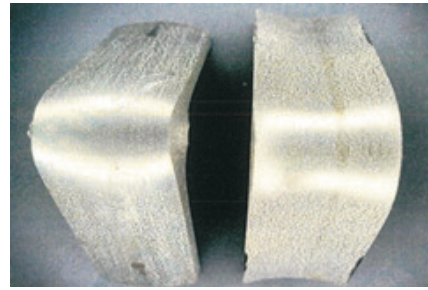
对两种耐蚀合金连续管开展晶间腐蚀评价。将管材制成 $20\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的焊缝、母材试样，在微沸状态的 $CuSO_4$ 溶液中连续煮沸浸泡16 h后观察试样形貌。结果显示，在10倍放大镜下弯曲试样外表面均无明显裂纹产生，如图6所示，表明BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管焊缝、母材均未发生由金属间析出物引起的脆性开裂，管材对晶间腐蚀不敏感。

2.7 抗氢致开裂试验（HIC）

将两种耐蚀合金连续管按照GB/T 8650制样并开展试验。结果表明，BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管焊缝和母材试样



(a) BSGCT80-2205

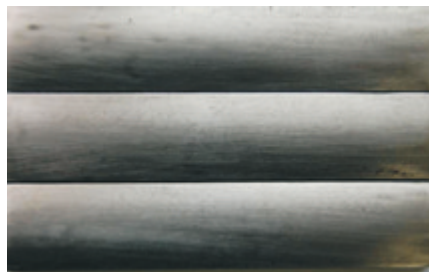


(b) BSGCT80-18Cr

图6 晶间腐蚀试验结果

在饱和硫化氢+0.5%醋酸+5%NaCl混合溶液中浸泡96 h后,所有试样的纵向、横向表面及截面均无裂纹产生,即裂纹长度率(CLR)、裂

纹厚度率(CTR)和裂纹敏感率(CSR)均为0。试验结果如图7所示,表明两种耐蚀合金连续管对HIC不敏感。



(a) BSGCT80-2205母材



(b) BSGCT80-2205焊缝



(c) BSGCT80-18Cr母材



(d) BSGCT80-18Cr焊缝

图7 抗氢至开裂(HIC)试验结果

2.8 工况腐蚀试验

针对以CO₂腐蚀为主的国内某油田气井工况条件,开展了两种耐蚀合金连续管168 h的模拟工况腐蚀试验,CO₂腐蚀试验工况条件见表2。试验后按照公式(1)计算试样腐蚀速率,

BSGCT80-2205连续管腐蚀速率为0.006 1 mm/a,BSGCT80-18Cr连续管腐蚀速率为0.010 5 mm/a,均小于NACE SP 0775—2013标准中对轻度腐蚀的规定(<0.025 mm/a),更加适合在以CO₂腐蚀为主的气井长期服役。

表2 以CO₂腐蚀为主的某油田气井工况条件

Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Fe ²⁺	总矿化度
5 391 mg/L	6 553 mg/L	239 mg/L	225 mg/L	719 mg/L	19 794 mg/L	0	32 921 mg/L
总压	CO ₂ 分压	流速	温度	试验时间	水型	pH值	
20 MPa	0.164 MPa	3 m/s	105 ℃	168 h	CaCl ₂	6.27	

针对某油田CCUS-EOR技术中CO₂注入管材服役工况环境,开展了两种耐蚀合金连续管的

168 h的模拟工况腐蚀试验,试验工况条件见表3。试验后按照公式(1)计算试样腐蚀速率,

BSGCT80-2205连续管腐蚀速率为0.035 4 mm/a, BSGCT80-18Cr连续管腐蚀速率为0.039 6 mm/a, 两种耐蚀连续管的腐蚀速率基本一致, 均小于油

田用户规定的腐蚀速率要求 (<0.076 mm/a), 可见两种耐蚀合金连续管均能在CCUS-EOR技术中作为CO₂注入管材长期服役。

表3 CO₂注入管材服役工况

Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Fe ²⁺	总矿化度
5 467 mg/L	122.6 mg/L	4.6 mg/L	1 587 mg/L	478 mg/L	7 385 mg/L	0.07 mg/L	15 051 mg/L
总压	CO ₂ 分压	流速	温度	试验时间	水型	pH值	
20 MPa	20 MPa	1.5 m/s	95 ℃	168 h	NaHCO ₃	7.0	

3 应用情况

目前BSGCT80-2205连续管作为连续速度管柱、完井管柱、CO₂注入管柱在多个油田批量化应用, BSGCT80-18Cr连续管作为CO₂注入管柱在某油田规模化应用。同时, 国产耐蚀连续管正向煤炭地下气化用注气管柱、分层注气管柱等多个应用领域扩展。随着钛合金、铁镍基合金、铝合金等材质连续管相继开发与应用, 将形成系列化耐蚀合金连续管产品, 可全面实现国产连续管在高腐蚀介质、复杂油气环境、海洋油气资源开发等领域的应用。

4 结 论

(1) BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管整体力学性能良好, 可以满足80ksi钢级连续管要求; 压扁、扩口试验均未出现裂纹, 管材周向具有较高的塑韧性能。

(2) BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管的抗挤毁、爆破、疲劳寿命等性能研究表明, 两种国产耐蚀合金连续管具有良好的抗内、外压性能, 可承受较高压力作业; 同时管材在低周大应变变形中具有较高的使用寿命, 疲劳寿命比同规格低碳微合金钢连续管大幅提高。

(3) 通过晶间腐蚀试验可知, BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管制造工艺合理, 在焊缝、母材晶界处未出现明显造成管材耐蚀性、塑韧性降低的M₂₃C₆、Cr₂N等金属间析出物。

(4) 针对油田气井实际腐蚀工况, 开展了BSGCT80-2205连续管和BSGCT80-18Cr连续管腐蚀试验, 结果表明两种国产耐蚀合金连续管适用于

含腐蚀介质油气井或可作为CO₂注入管柱长期服役。

参考文献:

- [1] 毕宗岳, 鲜林云, 汪海涛, 等. 国产超高强度CT110连续管组织与性能[J]. 焊管, 2017, 40(3): 24-27, 31.
- [2] 汪海涛, 张晓峰, 鲜林云, 等. 连续管[J]. 石油科技论坛, 2017, 36(S1): 108-112, 197-198.
- [3] 胡强法, 付悦, 盖志亮, 等. 连续管作业技术与装备研发及应用推广[J]. 石油科技论坛, 2017, 36(5): 7-11.
- [4] 蔡孟哲. 浅谈连续油管井下作业技术应用及前景展望[J]. 中国设备工程, 2021(12): 211-212.
- [5] 鲁明春, 姜方林, 章志轩. 我国连续管技术的发展与展望[J]. 焊管, 2019, 42(12): 1-5.
- [6] 陈金科. 复杂结构井连续油管作业技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [7] 艾芳芳, 陈义庆, 钟彬, 等. T95油井管在酸性油气田环境中的应力腐蚀开裂行为及机制[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(5): 469-473.
- [8] 徐孝轩, 朱原原, 付安庆, 等. 酸性油气田C110套管断裂失效分析[J]. 材料保护, 2019, 52(3): 138-141.
- [9] 冯兆阳. 套管钢在CO₂/H₂S环境中的腐蚀速率预测研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [10] 祝成龙. 连续油管在含CO₂/H₂S环境中的腐蚀行为研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- [11] 王军, 毕宗岳, 张劲楠, 等. 油套管腐蚀与防护技术发展现状[J]. 焊管, 2013, 36(7): 57-62.
- [12] 崔璐, 李臻, 王建才. 油井管的腐蚀疲劳研究进展[J]. 石油机械, 2015, 43(1): 78-83.
- [13] 黄洪春, 沈忠厚, 高德利. 三高气田套管应力腐蚀与防腐设计研究[J]. 石油机械, 2015, 43(3): 6-11.

作者简介: 汪海涛 (1984—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事连续管新产品研发工作。

收稿日期: 2022-09-08

修改返回日期: 2022-11-12

编辑: 罗 刚