

连续管疲劳寿命试验研究

毕宗岳^{1,2}, 张晓峰^{1,2}, 张万鹏^{1,2}

(1. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008;

2. 宝鸡石油钢管有限责任公司 钢管研究院, 陕西 宝鸡 721008)

摘要: 针对油田连续管实际作业工况, 研制开发出了基于塑性变形下的连续管低周疲劳试验机。通过 CT80 钢级连续管疲劳试验表明, 随着连续管管径减小或壁厚增加, 疲劳寿命明显增加; 管内压力增加时, 疲劳寿命明显降低; 同钢级连续管屈服强度越高, 疲劳寿命越高。同时表明, 连续管表面缺陷和内部夹杂物会对其疲劳寿命产生极大影响, 缺陷和夹杂物尺寸越大, 疲劳寿命越低; 带有环焊缝对接接头的连续管疲劳寿命明显低于管体寿命。

关键词: 连续管; 疲劳寿命; 屈服强度; 表面缺陷

中图分类号: TG113.25

文献标志码: A

文章编号: 1001-3938(2012)06-0005-04

Experimental Study on Fatigue Life of Coiled Tubing (CT)

BI Zong-yue^{1,2}, ZHANG Xiao-feng^{1,2}, ZHANG Wan-peng^{1,2}

(1. National Engineering Technology Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008, Shaanxi, China; 2. Steel Pipe Research Institute of Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: According to the practical oilfield operation condition of coiled tubing, a low cycle fatigue testing machine based on plastic deformation was developed. The fatigue test result of CT80 coiled tubing indicated that with diameter decreasing or wall thickness increasing, the fatigue life is obviously increased, with internal pressure increasing, the fatigue life is obviously reduced; the higher the yield strength of coiled tubing with the same steel grade is, the longer fatigue life is. Meanwhile, it showed that surface defects on coiled tubing and inside inclusions will greatly affect its fatigue life, the bigger size of defect and inclusion is, the shorter fatigue life is. Moreover, the fatigue life of coiled tubing with circumferential butt welded joint is obviously lower than that of pipe body.

Key words: coiled tubing(CT); fatigue life; yield strength; surface defect

连续管(coiled tubing, CT)是一种由 HFW 生产工艺生产的长达几千米无螺纹接头的一种油管^[1], 直径 25.4~88.9 mm, 壁厚 1.91~6.35 mm, 产品缠绕在卷筒上便于现场作业。目前世界上最长的连续管长度已达到约 9.2 km, 主要用材为低碳微合金钢、调质钢、钛合金钢和纤维复合材料等。连续油管主要用于油田测井、修井、钻井等作业。由于其具有作业速度快、效率高、占地小、安全可靠、节约施工费用等优点, 已经在世界范围内得到了广泛应用, 成为当今石油天然气行业较为

前沿的高端技术之一。连续油管工作条件复杂, 在使用中需要承受拉、压、扭、弯、冲蚀、磨损和挤毁等复合载荷, 其中, 在内压作用下, 连续管在卷筒和导向拱上的重复弯曲是其最主要的变形形式, 并成为失效的主要原因。因此, 采用试验方式模拟连续管在作业服役现场的反复弯曲疲劳行为, 对预测分析连续管使用疲劳寿命意义重大^[2]。笔者通过实物管体的模拟试验, 研究分析了影响低周疲劳寿命的相关因素, 为连续油管的合理选择和正确使用提供一定的指导。

1 试验方法与材料

1.1 连续管疲劳模式

连续管的工作过程如图1所示。在下井时,连续管在牵引链条的作用下离开卷筒,并在卷筒液压马达的反向拉力下由弯变直(发生第1次塑性变形);进入导向拱后,连续管又由直变弯(发生第2次塑性变形);经过导向拱进入牵引链条总成后,又被再次拉直(发生第3次塑性变形)。连续管下井作业完成后需要起出并重新缠绕在卷筒上,这时发生同样的3次弯曲变形。因此,连续管在1次起下作业过程中,将至少发生6次弯曲动作^[3]。

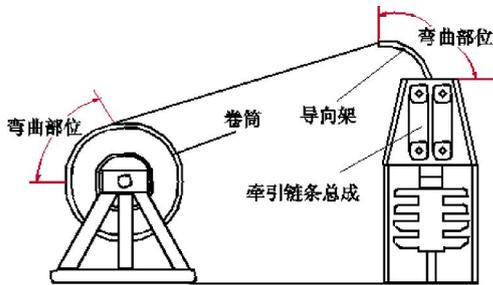


图1 连续管作业示意图

连续管在服役过程中主要承受内压、轴向力和反复弯曲疲劳,由于卷筒半径和导向架半径较小,这种弯曲过程使连续管已经发生了完全塑性变形,因此,弯曲过程是一种大应变下的低周疲劳行为。影响连续管工作寿命的因素包括连续管的尺寸、壁厚、内部压力、强度、滚筒直径、鹅颈管半径、工作条件(腐蚀)和对缝焊接的焊接质量(应力集中)等。

针对连续管的实际服役情况和受力分析,采用如图2所示的连续管超低周疲劳模拟试验装置。

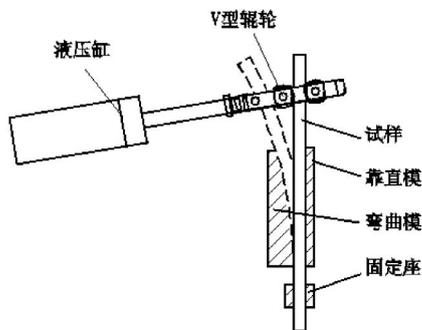


图2 连续管超低周疲劳模拟试验装置

试验时,通过改变弯曲模尺寸与管内压力,可模拟连续管在起下过程中的反复弯曲塑性变

形,直至疲劳失效。通过记录弯曲次数、管内压力和管径变化情况检测连续管的弯曲疲劳寿命。

1.2 试验方法

如图2所示,试验采用低周疲劳试验机,对连续管试样施加不同的水压,在稳压状态下通过液压缸的推动,使得试样在靠直模和弯曲模之间进行反复弯曲和矫直,直至试样开裂失效。通过检测疲劳循环次数、管内压力变化和管径变化情况以及疲劳断口分析,研究连续油管的低周疲劳性能和寿命。其中,弯曲模半径与现场作业车导向拱半径以及连续管卷筒半径相同,均为1 219 mm;管内压力可选取0~34.5 MPa(0~5 000 psi)不等。

连续管在弯曲过程中不同部位的受力状态和变形量不同,因而将试样受力状态分为中性面、拉伸面与压缩面3部分,本试验焊缝处于中性面。同时采用应变仪测量表明,在一个循环周期内,连续管试样压缩面变形量最大,达到了1.15%,其中第一个循环周期中,最大拉伸变形为0.95%,最大压缩变形为0.2%,随着弯曲循环次数的增加,压缩方向变形量逐渐减小,拉伸方向变形量逐渐增大,但总幅度基本固定在1.15%。

试样磨抛之后,用Lepear试剂(1%偏重亚硫酸钠水溶液+4%苦味酸酒精溶液,按体积1:1混合)腐蚀,利用OLYMPUS PMG3金相显微镜对连续管管体和焊缝金相组织进行观察。利用日立S-3700N扫描电镜和Thermo 7型能谱分析仪对疲劳断口进行断口分析及能谱分析。

1.3 试验材料

本试验选用材料为国产CT80钢级连续管,规格为 $\phi 31.8 \text{ mm} \times 3.18 \text{ mm}$ 、 $\phi 38.1 \text{ mm} \times 3.18 \text{ mm}$ 和 $\phi 31.8 \text{ mm} \times 2.77 \text{ mm}$,疲劳试样长度为1 524 mm。

2 试验结果与分析

2.1 管径和壁厚对疲劳寿命的影响

对上述3种规格的连续管试样分别在弯曲半径为1 219 mm、管内压力为34.5 MPa(5 000 psi)的条件下进行弯曲疲劳试验,试验结果如图3、图4所示。可以看出,在相同弯曲半径和内压下,同壁厚的连续管,管径增大,疲劳寿命明显降低;而相同管径下,壁厚增加,疲劳寿命增加。

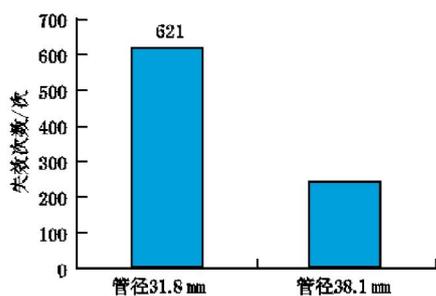


图 3 不同管径 (壁厚 3.18 mm) 不同管径疲劳性能

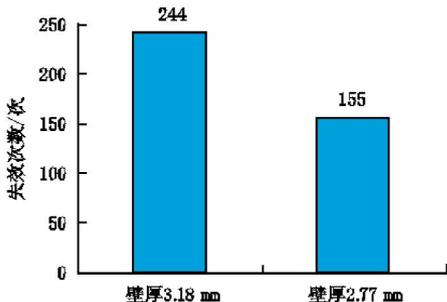


图 4 同管径 (管径 31.8 mm) 不同壁厚疲劳性能

2.2 内压对疲劳寿命的影响

选取规格 $\phi 38.1 \text{ mm} \times 3.18 \text{ mm}$ 的连续管试样, 弯曲半径为 1219.2 mm, 管内试验压力分别为 0 MPa, 20.7 MPa (3000 psi) 和 34.5 MPa (5000 psi)。3 种不同内压下的连续管疲劳性能如图 5 所示。试验结果表明, 在相同弯曲半径、管径及壁厚下, 随着连续油管内部压力的增加, 疲劳寿命降低。

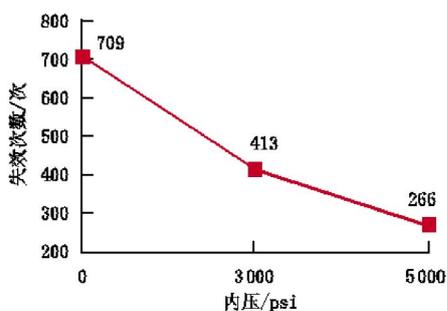


图 5 不同内压下的连续管疲劳性能

2.3 不同屈服强度连续管的疲劳寿命

选取规格为 $\phi 38.1 \text{ mm} \times 3.18 \text{ mm}$ 、具有不同屈服强度的连续油管试样, 在弯曲半径为 1219 mm, 不同内压下进行疲劳试验。结果显示, 尽管试验内压不同, 但屈服强度较高的连续油管, 其疲劳次数均高于屈服强度较低的连续油管, 如图 6 所示。

2.4 表面缺陷和焊接对疲劳寿命影响

对试验 CT80 钢级 $\phi 31.8 \text{ mm} \times 3.18 \text{ mm}$ 连续管试样表面人工预置一个长 6.44 mm、宽 0.62 mm、

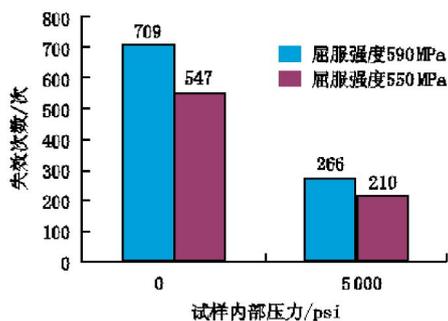


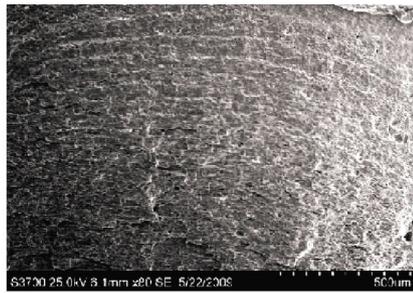
图 6 不同屈服强度连续管的疲劳性能

深 0.2 mm 的椭圆形缺陷, 在弯曲半径为 1219 mm、管内压力为 34.5 MPa (5000 psi) 下与无缺陷样管进行对比, 其中无缺陷试样疲劳寿命 530 次, 带有缺陷的试样疲劳寿命降低至 222 次, 降低了 58%, 且断口位于预制的缺陷处。缺陷处的应力集中, 在循环应力与内压作用下很容易萌生裂纹。这也说明连续管疲劳寿命主要由裂纹萌生期所决定。不同形式的表面缺陷对连续管疲劳寿命的影响程度有一定差别, 但可以肯定的是, 表面缺陷对连续管寿命的影响是致命的, 因此, 在使用过程中要尽可能减少管体表面损伤^[5]。

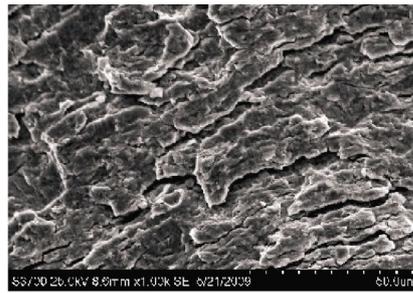
对于带有环焊缝接头的管-管对接试样, 循环疲劳寿命也大大降低, 只达到 273 次, 相当于管体疲劳寿命的 48% 左右, 断口位于热影响区。焊接热影响区组织粗大, 魏氏体或粗大的马氏体组织的存在, 导致材料强度低、塑韧性差, 在循环应力作用下很容易形成微裂纹。另外, 如果对焊接缝中存在夹杂物或不良组织, 在循环应力作用下, 缺陷处很容易起裂并扩展, 最终形成主裂纹而断裂。国外大量试验研究提出, 通过严格控制环焊缝焊接程序和提高焊接技能, 可以提高焊接管的疲劳寿命, 但焊接操作对低碳微合金钢连续管疲劳寿命的负面影响是难以根除的^[6]。

2.5 疲劳断口分析

图 7(a) 为正常试样疲劳断口宏观形貌。可以看出, 在疲劳断口上疲劳源区无夹杂物等缺陷存在; 在循环应力作用下裂纹一般首先起源于管体内表面, 并向管体外表面扩展, 当扩展到剩余壁厚很小时, 在内压的作用下发生剪切断裂; 疲劳断口表面虽然由于磨损而相对平坦, 但仍可看到明显的疲劳条纹, 疲劳条纹的间距较大。由于管体在弯曲与内压作用下发生了反复塑性变形, 已经起裂的断口在后续的疲劳过程中, 表面原有



(a) 疲劳断口宏观形貌



(b) 疲劳断口表面特征

图7 连续管疲劳断口形貌

的尖锐状形貌被不断压磨,形成扁平状,同时产生许多微裂纹,且微裂纹的方向与扩展方向成较大角度,如图7(b)所示。

从断口可推测,强塑性变形下疲劳寿命受材料强度和延性控制,决定因素是材料的强韧性。因而若要获得好的低周疲劳性能,应着眼于提高材料的强韧性,减少局部硬化,使各晶粒和组织间协调变形,降低裂纹早期萌生的几率,提高材料裂纹萌生和扩展阻力,避免因局部萌生和扩展抗力减少而加速裂纹扩展失稳。

对个别疲劳寿命较低的断口分析发现,断口处存在块状夹杂物,如图8所示,这是加快连续管疲劳试验中裂纹萌生扩展并最终导致失效的主要因素。图9所示能谱分析表明,这些夹杂物主要是氧化物。因而,如果能对材料中的夹杂物进行有效控制,将会大大提高连续管的疲劳寿命。

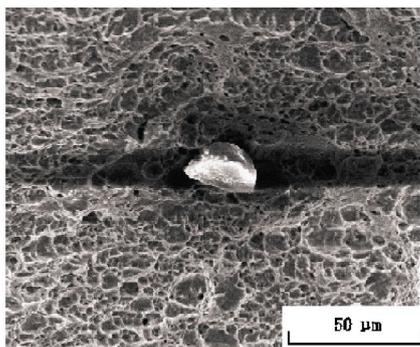


图8 断口上的块状夹杂物

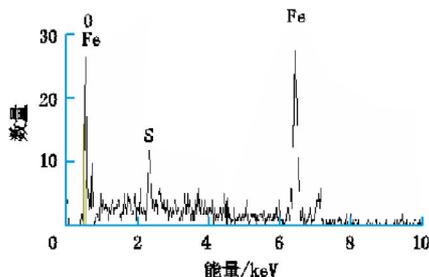


图9 断口氧化物夹杂能谱分析图谱

3 结论

(1) 对于 CT80 级连续油管,管径减小时,疲劳寿命增加;壁厚减小,疲劳寿命减小;连续油管工作压力提高,其疲劳寿命明显降低。

(2) 对同一钢级的连续油管,在规格相同的情况下,随着管体屈服强度的提高,其疲劳寿命有增大的趋势。

(3) 连续油管表面缺陷及焊缝母材中的夹杂物会对其疲劳寿命产生极大影响,夹杂物和缺陷尺寸越大,疲劳寿命越低。另外,带有环焊缝对接接头的连续管疲劳寿命也明显低于无接头连续管。

参考文献:

- [1] 李宗田.连续管技术手册[M].北京:石油工业出版社,2003:2-3.
- [2] 毕宗岳,井晓天,金时麟,等.连续管性能研究与产品开发[J].石油矿场机械,2010,39(06):16-20.
- [3] 张运翹.连续管的应力和寿命分析[J].石油矿场机械,1995,24(01):21-25.
- [4] 毕宗岳,付宏强.高强度连续油管[J].焊管,2007,35(06):85-86.
- [5] VAN ARNAM W D,Smith D.Good Coiled Tubing Welds, Properly Managed, Do Not Break[C]// 2000 SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston:Society of Petroleum Engineers Inc.,2000:272-277.
- [6] TIPTON S M, MORAN D W, CHINSETHAGID C, et al. Quantifying the Influence of Surface Defects on Coiled Tubing Fatigue Resistance[C]// 2000 SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston: Society of Petroleum Engineers Inc.,2002:221-226.

作者简介:毕宗岳(1962—),男,高级工程师,工学博士,主要从事油气管材及焊接技术研究工作。

收稿日期:2011-12-09

编辑:黄蔚莉