

文章编号: 0253-2697(2007)06-0133-05

打孔管道焊接修复结构承压能力的全尺寸实验评价

帅 健¹ 王 晓 明¹ 卜 文 平²

(1 中国石油大学机电工程学院 北京 102249; 2 中国石化销售公司 北京 100110)

摘要: 将打孔管道的焊接修复结构区分为单开孔和密集开孔两种类型。完成了一组管道修复结构的全尺寸爆破与疲劳实验,测量了修复结构中的应变分布,分析了应力集中、屈服极限压力和爆破压力等因素。结果表明,修复结构的屈服极限压力和完好管道相比有所降低,最低值为完好管道屈服极限压力的 85%,而各种修复结构的爆破压力基本相同,约为完好管道爆破压力的 96%。单孔管道的破裂位置均远离焊接结构处,多孔管道的爆破发生在两管帽之间,说明多管帽修复结构不利于管道承压。修复结构存在一定程度的应力集中,环向应力集中系数最大为 1.65,轴向应力集中系数最大为 2.25。对于经过 5000 次循环载荷的修复结构,其屈服极限压力、爆破压力及爆破位置与未经过疲劳载荷的修复结构情况基本相同,表明修复结构有较好的抗疲劳破坏能力。通过试验验证了打孔管道修复结构的承压能力。

关键词: 输油管道; 缺陷修复; 焊接结构; 应力集中; 屈服极限; 爆破压力; 疲劳载荷; 实验评价

中图分类号: TE973

文献标识码: A

Full size experimental assessment on loading capability of welding-repaired pipelines with drilled holes

Shuai Jian¹ Wang Xiaoming¹ Bu Wenping²

(1. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Sinopec Sale Limited Corporation, Beijing 100110, China)

Abstract The welding-repaired pipelines are identified as two types of a single hole drilled on pipeline and several holes drilled in short span. A set of the full scale burst and fatigue experiments for the two kinds of repaired pipelines were conducted. The strain distributions were measured, and the stress concentration and yield limit load and burst pressure were analyzed. The results showed that the yield limit pressure of the repaired pipelines were lowered. The lowest yield limit pressure of repaired pipelines was 85% of that of the perfect pipelines while their burst pressure was up 96%. The burst of pipeline was a ductile fracture resulted from the maximal shear stress. On the pipelines with a single hole, the burst occurred far from the welding sites, while on the pipelines with several holes drilled in short span, the burst occurred between the two adjacent tube caps welded on the drilled holes. Multi-cap repair is disadvantageous to the normal loading capability. Welding repairing process could result in the stress concentration. The maximum concentration coefficient of the hoop stress was 1.65 and the maximum axial stress was 2.25. The yield limit pressure, burst pressure and location of the repaired pipelines subjected to 5000 cyclic loading tests in high stress level were same as those of the repaired pipeline that did not experience cyclic loading, which indicated that the repaired pipelines have good anti-fatigue capability. The full-size experiments demonstrated the loading capacity of the repaired pipelines.

Key words: petroleum pipeline; defect repairing; welding structure; stress concentration; yield limit; burst pressure; fatigue load; experiment assessment

现场修复打孔管道的方式有两种: ①在盗油阀不泄油的情况下, 在盗油管的外面焊接一小段管帽, 俗称“扣帽子”, 即将管道上的开孔连同一小段盗油支管及阀门一起封闭在里面。在管线不能停输的情况下, 采

用此种方法比较简单。②如果出现跑油停输的情况, 则将盗油支管从根部完全截去, 采用与管道材质和规格相同或相近的片状管材焊接在小孔部位, 并将其完全覆盖, 这种方法俗称“补板”。显然, 这种修复结构一

基金项目: 中石化科研课题“交变动载荷作用对在役输油管道的影响作用研究(304039)”的部分研究内容。

作者简介: 帅 健, 男, 1963 年 8 月生, 1982 年毕业于武汉化工学院化工机械专业, 现为中国石油大学(北京)教授, 博士生导师, 主要从事工程力学、油气储运系统安全工程的科研与教学工作。E-mail: shuaijian@cup.edu.cn

方面破坏了管道原有的应力状态,导致应力集中;另一方面,由于难以保证现场焊接质量,易产生焊接缺陷及残余应力等^[1-3]。全尺寸管道的压力试验是研究管道应力/应变状态和验证管道剩余强度的可靠方法^[3-5]。为了评价打孔管道修复后的安全性,笔者对管道修复结构进行了全尺寸爆破与疲劳试验。

1 试验方法

用某管线库存的 $\phi 711 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 钢管做试件,其材质为X60。试验确定了此管材的实际屈服极限为553 MPa,拉伸极限为653 MPa,有很好的延展性。根据管道环向应力的公式^[6],可以确定:完好管道的屈服极限压力为15 56 MPa,爆破压力为18.37 MPa。

在管道上钻一个直径为24 mm的圆孔,然后按照现场抢修管道时的修复工艺,在管道打孔的地方焊接“帽子”或“补板”。“帽子”为一 $\phi 159 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的短管,高为200 mm,材质为Q235。“补板”是从相同尺寸和材料的管道上截取的,尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 8.4 \text{ mm}$ 。试件参数如表1所示。

表1 管道全尺寸试验试件

Table 1 Specimens in full size experiments

| 编号 | 试件长度/mm | 试验类型 | 结构型式 |
|-----|---------|------|------|
| 1-1 | 6000 | 爆破 | 1个管帽 |
| 1-2 | 6000 | 爆破 | 1个补板 |
| 2-1 | 6000 | 爆破 | 2个管帽 |
| 2-2 | 7200 | 爆破 | 5个管帽 |
| 3-1 | 6000 | 疲劳 | 1个管帽 |
| 3-2 | 7200 | 疲劳 | 5个管帽 |

首先在试验管道上布置好应变片,然后向管道内注水以排空管道内的空气。待管道注满水后启动泵,开始向管道内加压进行爆破或疲劳载荷试验。主要试验设备有:JXZ三柱塞高压泵,其额定压力为35 MPa,流量为65 L/min;HP 3 852应变仪;BE120-6A A应变片,其电阻值为120 Ω ,灵敏度系数为2.2。

全尺寸水压试验包括两种试验程序:①直接爆破试验程序。压力从0 MPa升至10 MPa,每升压2 MPa保压后测量一次应变;从10 MPa升至14 MPa期间,每升压1 MPa保压后测量一次应变,从14 MPa升至试件破裂,每升压0.5 MPa测量一次应变。②先疲劳后爆破试验程序。先进行规定循环次数的疲劳载荷试验,中断后再进行爆破试验。疲劳载荷的循环次数为5 000次,试件3-1的疲劳载荷变化为10~12 MPa,试件3-2的疲劳载荷变化为6~8 MPa,疲劳载荷的最大压力高出该管线的设计压力6.2 MPa。

2 试验结果

2.1 断裂情况

6个试件的爆破断裂情况如图1所示,其中试件3-1和试件3-2经历了5 000次疲劳载荷试验,均未发生损坏,断裂是在疲劳载荷试验后爆破试验的结果。

在管道发生爆破前,由于管道有很大的塑性变形,因而加压缓慢。单孔试件1-1、试件1-2和试件3-1发生破裂的部位均远离焊接的管帽或补板处[图1(a)、图1(b)和图1(e)],断口呈典型延性断裂特征,裂纹两端偏转约 45° 后迅速止裂。从组织形貌及晶粒来看,管道母材的晶粒较细,材质正常。有5个管帽的试件2-2和试件3-2的断裂发生在2个管帽之间,裂口撕裂了3个管帽后发生偏转止裂[图1(d)和图1(f)]。而有2个管帽试件2-1的管体未发生破裂,但发现明显的鼓胀现象[图1(c)],鼓胀段长约0.67 m,鼓胀最大处距离试件中心约为1.95 m,鼓胀段的最大周长为2.47 m,比试验前增加了76 mm,增加量约为管道周长的10.69%。试件2-1的断裂发生在封头环焊缝处,原因是封头焊接质量可能有问题。

2.2 应变测量

所有试验均在管道的修复部位及其附近布置了应变片,进行了应变测量。图2给出试件3-1的测点位置和方向。以管帽为中心,分别沿管道的轴向、圆周方向排列应变片5~12和应变片23~34,距管帽外侧轴向距离510 mm处沿管道圆周上也均匀布置了应变片13~22。应变片编号奇数表示轴向应变,偶数表示环向应变。此外,在试件3-1的管帽上还布置有应变片1、2、3、4、35、36、37和38。对于其余试件,根据其结构不同,应变片的布置有所变化。

试件3-1管帽周围的一些测点的轴向应变和环向应变分别见图3和图4,距管帽510 mm处沿管道圆周上的环向应变见图5。试验结果表明,管道爆破前应变值急剧增大,说明管道产生了大量塑性变形。在图5中,各点的应变值相当接近,表明焊接管帽引起的不均匀应变仅分布于管帽附近一定范围。

2.3 应力集中系数

修复结构破坏了管道原有的应力分布,与管体结构不连续处以及形状突变处都会产生应力集中。根据实测结果可以确定应力集中系数。

由于应力集中主要是在弹性范围内产生,一旦进入塑性变形范围,应力集中程度将会降低。因此,在不同内压下,应力集中程度也不相同。由图3~图5可知,当压力较低时,管道基本处于弹性变形阶段,各点



图 1 试件断裂与鼓胀情况

Fig 1 Fracture and bulging of specimens

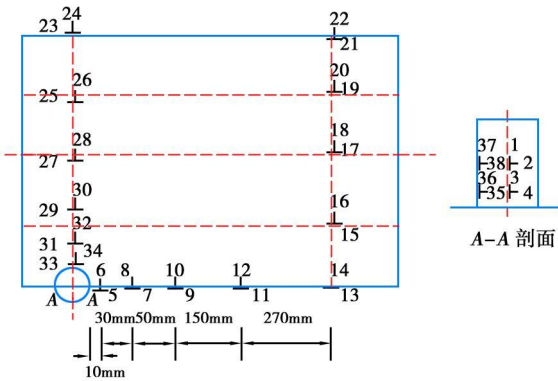


图 2 试件 3-1 布置的应变片

Fig 2 Sketch of strain gauges arranged in specimen 3-1

的压力-应变均呈线性关系; 随着压力的增高, 各点的压力-应变呈非线性关系, 这是由于产生了塑性变形。因此在非线性转变压力下计算应力集中系数是合理的选择。

图 3 ~ 图 5 中非线性转变压力约为 13 MPa。根据图 4、图 5 中环向应变, 确定了环向应力集中系数 (表 2), 根据图 3 的轴向应变, 确定了内压力为 13 MPa 时的轴向应力集中系数 (表 3)。从表 3 中可见, 最大环向应力集中系数为 1.05, 最大轴向应力集中系数为 1.93。

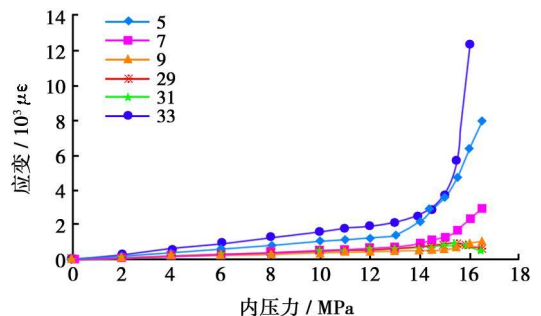


图 3 试件 3-1 中的轴向应变

Fig. 3 Axial strains of specimen 3-1

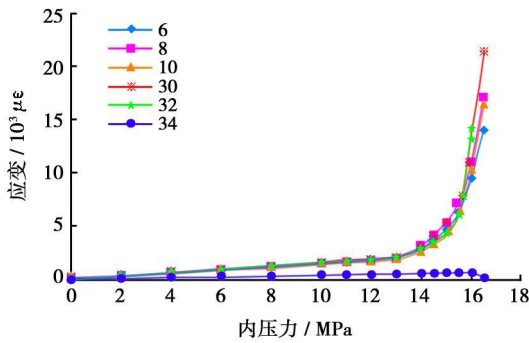


图4 试件3-1管帽附近的环向应变

Fig 4 Circumferential strains near the tube cap in specimen 3-1

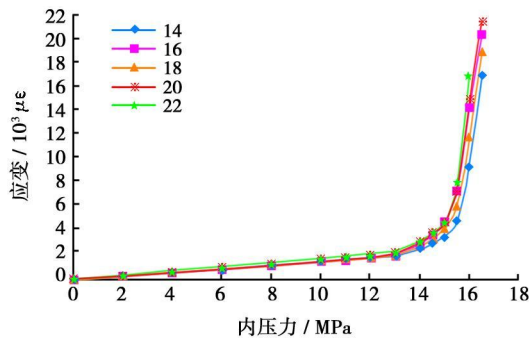


图5 试件3-1管道圆周上的环向应变

Fig 5 Circumferential strains of some points aligned in the circle of specimen 3-1

2.4 屈服极限载荷

屈服极限载荷是结构承载能力的一个重要指标。

表5 打孔管道修复结构全尺寸爆破实验结果

Table 5 The results of full size experiment

| 试件 | 单开孔试件 | | 密集开孔试件 | | 疲劳爆破试验试件 | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|
| | 试件 1-1 | 试件 1-2 | 试件 2-1 | 试件 2-2 | 试件 3-1 | 试件 3-2 |
| 结构 | 1个管帽 | 补板 | 2个管帽 | 5个管帽 | 1个管帽 | 5个管帽 |
| 爆破压力/MPa | 17.5 | 17.6 | 17.8 | 17.8 | 17.6 | 17.6 |
| 爆破位置 | 管体 | 管体 | 管体鼓胀 | 2个管帽之间 | 管体 | 2个管帽之间 |
| 屈服极限压力/MPa | 13.18 | 13.65 | 14.82 | 13.4 | 14.45 | 13.35 |
| 非线性转变压力/MPa | 11 | 11 | 10 | 10 | 13 | 10 |
| 环向应力集中系数 | 1.33 | 1.65 | 1.46 | 1.29 | 1.05 | 1.06 |
| 轴向应力集中系数 | 2.25 | < 1 | 2.12 | 1.53 | 1.93 | 1.34 |

尽管6个试件的结构不同,且其中2个试件经历了高应力水平的疲劳载荷,但各试件的爆破压力相差不大,约为完好管道爆破压力的96%,且爆破断裂断面呈典型延性断裂特征。各个试件爆破压力相同的原因是试验管材的延展性好,在管道爆破前已经处于大面积的屈服状态,管道上的应力分布趋于均匀。

屈服极限压力是管道强度设计的依据。从表5可见,各种修复结构的屈服极限压力明显低于完好管道

表2 试件3-1的环向应力集中系数

Table 2 Circumferential stress concentration factor of specimen 3-1

| 测点 | 6 | 8 | 10 | 20 | 30 | 32 | 34 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| 应力集中系数 | 0.82 | 0.89 | 0.87 | 1.05 | 0.90 | 0.98 | 0.21 |

表3 试件3-1的轴向应力集中系数

Table 3 Axial stress concentration factor of specimen 3-1

| 测点 | 5 | 7 | 9 | 29 | 31 | 33 |
|--------|------|------|------|------|------|------|
| 应力集中系数 | 1.25 | 0.66 | 0.45 | 0.56 | 0.56 | 1.93 |

由试验获得了打孔管道修复结构关键点的应变与压力的关系数据,因此可以通过试验结果确定打孔管道修复结构的屈服极限压力。采用2倍弹性斜率的方法^[7-8],确定了试件3-1的屈服极限压力(表4)。由表中最小值可确定屈服极限压力为14.45 MPa。

表4 试件3-1的屈服极限压力

Table 4 Yield limit pressure of specimen 3-1

| 测点 | 6 | 8 | 10 | 30 | 32 | 34 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 屈服极限压力/MPa | 14.60 | 14.45 | 14.87 | 15.02 | 15.09 | — |

3 实验结果分析

对记录的所有应变测量数据进行了分析计算,确定了各个试件的应力集中系数、屈服极限压力等(表5)。

的屈服极限压力,最低值为完好管道屈服极限压力的85%,最高值为完好管道屈服极限的90%,说明管道修复后的安全承压能力降低。

从表5中还可以看出,修复结构存在一定程度的应力集中。在非线性转变压力下,最大环向应力集中系数为1.65,而最大轴向应力集中系数为2.25。由于应力集中对位置十分敏感,试验中的应变片不一定布置在应力集中最大的位置,因而测量分析得到的应力

集中系数可能偏低。

从爆破位置来看, 单孔和双孔结构的破裂不在修复部位附近, 而是在远离修复部位处, 而5个管帽试件结构的破裂发生在2个管帽之间, 说明多管帽结构不利于管道承压, 应考虑改变修复方式。

经历5000次疲劳载荷循环后, 试件3-1和试件3-2与未经历疲劳载荷的相同结构的试件1-1和试件2-2的屈服极限压力、爆破压力及破裂位置基本相同, 表明修复结构有较好的抗疲劳破坏能力。但试件3-1的非线性转变压力和屈服极限压力略高于试件1-1, 其原因是由于试件3-1采用了高达10~12 MPa的循环载荷, 使管道修复结构的高应力区产生较大范围的塑性变形。按照塑性力学的材料硬化原理^[9], 在经历了塑性变形后, 材料的屈服极限升高, 因而试件整体的屈服极限也升高。由于全尺寸疲劳试验的代价太大, 应考虑结合管材的疲劳性能测试来评价修复结构的疲劳寿命。

在试验中, 修复部位的焊接处均未发生破坏, 表明只要管道修复结构的焊接质量良好, 管道修复结构就能够满足管道正常运行的要求。

4 结 论

(1) 打孔管道修复后的屈服极限压力相对于完好管道有所降低, 最低为完好管道屈服极限压力的85%。

(2) 管道爆破是由于最大剪应力的韧性过载引起的韧性破坏, 各种修复结构的爆破压力基本相同, 约为完好管道爆破压力的96%。

(3) 单孔管道修复结构的爆破位置均远离焊接的管帽或补板处, 有5个管帽的修复结构的爆破发生在2个管帽之间, 说明多管帽结构不利于管道承压。

(4) 修复结构存在一定程度的应力集中, 最大环向应力集中系数为1.65, 最大轴向应力集中系数为2.25。

(5) 经过5000次循环载荷的管道, 其修复结构的屈服极限压力、爆破压力及爆破位置和未经过疲劳载荷的修复结构情况基本相同, 表明修复结构有较好的抗疲劳能力。

(6) 通过试验验证了打孔管道修复结构的承压能

力, 为打孔管道修复结构应力状态的详细分析提供了基础数据。

参 考 文 献

- [1] Otegui J L, Rivas A, Manfredi C, et al. Weld failures in sleeve reinforcements of pipelines [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2001, 8(1): 57-73.
- [2] 卜文平, 帅健, 王晓明, 等. 打孔管道焊接修复结构的残余应力测试[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(3): 81-84.
Bu Wenping, Shuai Jian, Wang Xiaoming, et al. Residual stress test on welding repair structure of drilled pipeline[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2006, 30(3): 81-84.
- [3] Chapetti M D, Otegui J L, Manfredi C, et al. Full scale experimental analysis of stress states in sleeve repairs of gas pipelines [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2001, 78(5): 379-387.
- [4] Bjornoy O H, Sigurdson G. Residual strength of corroded pipelines, DNV test results; Proceedings of the Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference Seattle, May 28-June 2, 2000[C]. California: ISOPE, 2000: 189-196.
- [5] Bjornoy O H, Rengard O, Fredheim S, et al. Residual strength of dented pipelines, DNV test results; Proceedings of the Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference Seattle, May 28-June 2, 2000[C]. California: ISOPE, 2000: 182-188.
- [6] 帅健, 于桂杰. 管道及储罐强度设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 2-9.
Shuai Jian, Yu Guijie. Strength design of pipeline and oil tank [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 2-9.
- [7] 全国压力容器标准化技术委员会. JB4732—1995 钢制压力容器分析设计标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels. JB4732—1995 Steel-made pressure vessel-analysis and design standard[S]. Beijing: Standard Press of China, 1995.
- [8] 金志江, 曹明, 谢涛. 带椭圆形接管球形容器极限载荷的试验研究[J]. *工程设计学报*, 2004, 11(5): 256-259.
Jin Zhijiang, Cao Ming, Xie Tao. Test research on limit load of spherical vessel with elliptical nozzle[J]. *Journal of Engineering Design*, 2004, 11(5): 256-259.
- [9] 王仁, 熊祝华, 黄文斌. 塑性力学基础[M]. 北京: 科技出版社, 1998: 2-9.
Wang Ren, Xiong Zhuhua, Huang Wenbin. Fundamental plastic mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1998: 2-9.

(收稿日期 2006-11-18 改回日期 2006-12-12 编辑 仇学艳)