

某成品油管道岩石挤压段顶部应力响应

赖少川¹, 张平², 何勇君¹, 王焱¹

(1. 中国石化销售有限公司 华南分公司, 广州 510000; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029)

摘要:利用X射线应力测试原理,对某成品油管道岩石挤压段顶部位置的轴向应力和环向应力进行测试,并计算对应的Mises等效应力。将移除岩石前后挤压管段的各种应力进行对比,结果表明:岩石挤压管段顶部的轴向应力为拉应力,环向应力为压应力,相同位置的轴向应力值大于环向应力值;轴向应力和Mises等效应力在管道轴向呈“W”状分布,环向应力在管道轴向呈“V”状分布;移除岩石后,轴向应力、环向应力以及Mises等效应力均有不同程度减小,其中轴向应力和Mises等效应力减小值曲线呈“倒V”状,环向应力减小值曲线则呈“V”状。

关键词:应力测试;岩石挤压;轴向应力;环向应力;Mises等效应力

中图分类号:TE832 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2020)06-0134-04

石油天然气管道在运行过程中,由于敷设条件、地质运动等原因,会在管道底部发生岩石挤压变形,往往工程上只关心和处理管道底部的挤压位置,忽略挤压管段顶部的受力情况,如果挤压管段顶部的应力超过管材的抗拉强度,管道仍会出现裂纹、发生破裂失效,引发泄漏事故^[1-3]。因此,准确掌握岩石挤压管段顶部的应力状态同样十分必要,便于评估管段整体的健康状态,及时采取应急措施。

在国内,蒋宏业等^[4]针对采空塌陷引起的管道变形进行了受力分析,最大Mises应力和最大竖向应变位置位于塌陷区内边缘且靠近塌陷区中间,最大轴向应力和最大轴向应变位置在塌陷区中间两侧;林森等^[5]为了得到海底管道由于海床崎岖所产生的变形和应力状态,采用有限元法验证了不同张力条件下海底凹陷和隆起地形对管道应力的影响。在国外,Jeng DS等^[6]研究了波浪荷载作用下埋地管道的应力与变形,计算表明管内角向有效应力和剪应力远大于波浪引起的孔隙压力;Mirzaee-Sisan A等^[7]对环焊缝发生塑性变形的残余应力进行了试验测量和有限元对比分析,结果表明有限元模型可以预测焊缝变形的残余应力分布,但是在厚度方面与测量值存在一些差异。目前,国内外对压力管道变形部位应力状态的研究主要通过两种技术手段:一是仿真模拟^[8-10],二是

应变间接测试^[11];并且对于岩石挤压变形管道的应力分布状况还没有开展相关研究。因此采用最先进的X射线应力测试技术,直接获取岩石挤压段的各个应力值,了解其分布规律,可以为管道的安全评估和失效预测提供依据。

1 挤压段基本情况

某成品油长输管道,规格为 $\Phi 323.9 \times 6.4$ mm, 3PE+环氧粉末防腐层,设计压力6.4 MPa,运行压力4.6 MPa,材质为L360。由于岩石挤压在管道底部出现凹陷变形,经内变形检测器检测,凹陷绝对深度为41.4 mm,相对变形深度为12.8%,轴向长度242 mm,环向长度206 mm,凹陷类型为平滑型,如图1所示。



图1 岩石挤压管段

收稿日期:2020-02-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFF0215000);中国石油化工股份有限公司技术开发项目(30251731-17-ZC0607-0004)。

作者简介:赖少川(1968—),男,广东揭阳人,中国石化销售有限公司华南分公司,副总经理,高级工程师,大学本科,从事管道管理、完整性管理等工作;通讯作者:张平(1987—),男,河北张家口人,硕士,工程师。

2 应力检测

2.1 检测原理

利用 X 射线应力测试仪进行应力检测,检测原理基于 X 射线衍射理论^[12],该方法是目前国内外测量结构应力最先进、最直接和最可靠的方法。X 射线衍射现象:当一束具有一定波长 λ 的 X 射线照射到多晶体上时,会在一定的角度 2θ 范围内接收到反射的 X 射线强度极大值,即衍射峰。X 射线的波长 λ 、衍射晶面间距 d 和衍射角 2θ 之间满足布拉格定律:

$$2d\sin\theta = n\lambda (n = 1, 2, 3, \dots)$$
 (1)

在已知 X 射线波长 λ 的条件下,布拉格定律把宏观上可以测量的衍射角 2θ 与微观的晶面间距 d 建立起确定的关系。当材料中应力 σ 存在时,其晶面间距 d 必然随晶面与应力相对取向的不同而有所变化,按照布拉格定律,衍射角 2θ 也会相应改变。因此,可以通过测量衍射角 2θ 随晶面取向不同而发生的变化来求应力 σ 。

2.2 检测步骤

选取凹陷管段顶部的 5 个位置进行应力测试,如图 2 所示。其中位置 1 和位置 5 对应凹陷边缘位置,位置 3 对应凹陷底部,位置 2 和位置 4 对应凹陷底部与边缘的中间位置;5 个测试位置等距离分布,相邻两个位置间距 60 mm。

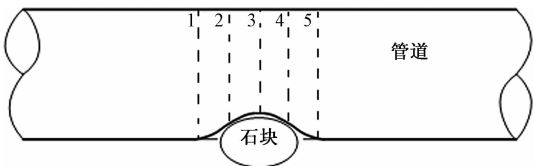


图 2 应力测试位置示意图

用角磨机 and 钢丝轮去除凹陷部位的 3PE+环氧粉末防腐层,露出金属本体,然后用不同粒度的百叶轮、砂纸多次打磨,得到光滑、平整、干净的测试面;将打好圆孔的绝缘胶纸粘贴在打磨好的测点表面,使测试点为位于圆孔中心,保证电解液可以覆盖抛光点所在圆孔的整体,且不会从其他圆孔或其他部位与测试管道接触,然后利用电解抛光仪对测试点进行电解抛光,当肉眼观察表面由打磨的光亮面变成较暗的腐蚀形貌并且不见打磨造成的划痕,停止电解抛光;然后,将表面擦拭干净,利用 X 射线应力测试仪进行应力测试,每个测试点进行轴向和环向两个方向的应力测试;为更好地反应某一点整体应力状态,引入 Mises 等效应力 σ_{Mises} 作为评价依据,计算公式如下:

$$\sigma_{Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_h)^2 + \sigma_z^2 + \sigma_h^2}$$
 (2)

式中, σ_z 和 σ_h 为测得的轴向应力和环向应力。

为了对比研究,将挤压岩石移除,使管道充分卸载,按上步骤再次测试凹陷部位应力。

3 应力响应

为了方便分析,以测试位置 3 为零点,以管道轴向为坐标轴,因此位置 1 坐标为 -120 mm,位置 2 坐标为 -60 mm,位置 4 坐标为 60 mm,位置 5 坐标为 120 mm。移除岩石前后轴向应力值见表 1,移除岩石前后轴向应力对比曲线见图 3。从表 1 和图 3 可以看出,该岩石挤压管道顶部的轴向应力为拉应力(正值),最大轴向应力出现在凹陷底部对应位置,移除岩石前为 302.9 MPa,移除岩石后为 225.4 MPa;凹陷边缘对应位置轴向应力次之,移除岩石前为 260 MPa 左右,移除岩石后为 220 MPa 左右;底部和边缘中间的对对应位置轴向应力较小,移除岩石前位置 2 和位置 4 的应力分别为 221.6 MPa 和 236.7 MPa,移除岩石后位置 2 和位置 4 的应力为 165.9 MPa 和 176 MPa;岩石移除后的轴向应力明显小于岩石移除前的轴向应力,减小大约 40~80 MPa 左右,其中凹陷底部对应位置减小值最大,为 77.5 MPa,凹陷边缘对应位置减小值较小,底部和边缘中间的对对应位置减小值次之。

表 1 移除岩石前后轴向应力值

测试位置	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
距离标注/mm	-120	-60	0	60	120
移除岩石前/MPa	263.1	221.6	302.9	236.7	264.4
移除岩石后/MPa	222.2	165.9	225.4	176	216.4
减小值/MPa	40.9	55.7	77.5	60.7	48

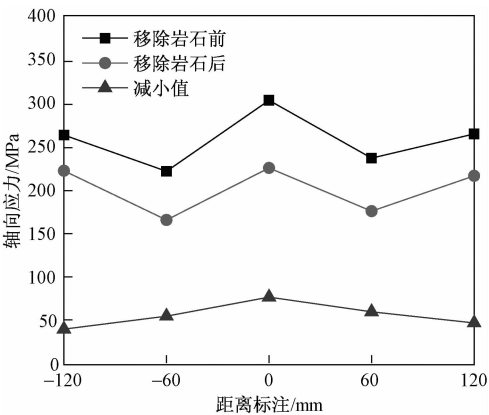


图 3 移除岩石前后轴向应力对比曲线

移除岩石前后环向应力值见表 2,移除岩石前后环向应力对比曲线见图 4。从表 2 和图 2 可以发现,移除岩石前后,挤压管道顶部的环向应力均为压应力(负值),与同位置的轴向应力相比,数值较小;凹陷底部对应位置环向应力最小,岩石移除前为-32.3 MPa,岩石除后为-26.6 MPa;底部和边缘中间的对应位置环向应力次之,岩石移除前为-50 MPa左右,岩石移除后为-30 MPa 左右;凹陷边缘对应位置环向应力相对较大,岩石移除前位置 1 和位置 5 的环向应力为-65.5 MPa 和-82 MPa,岩石移除后位置 1 和位置 5 的环向应力为-39.3 MPa 和-58.1 MPa;岩石移除后的环向应力也小于岩石移除前的环向应力,但环向应力减小值曲线与轴向应力减小值曲线相反,其中凹陷底部对应位置减小值最小,仅 5.7 MPa,底部和边缘中间的对应位置减小值次之,凹陷边缘对应位置减小值较大,最多减小 26.2 MPa。

表 2 移除岩石前后环向应力值

测试位置	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
距离标注/mm	-120	-60	0	60	120
移除岩石前/MPa	-65.5	-51.2	-32.3	-45.7	-82
移除岩石后/MPa	-39.3	-30.1	-26.6	-28.4	-58.1
减小值/MPa	-26.2	-21.1	-5.7	-17.3	-23.9

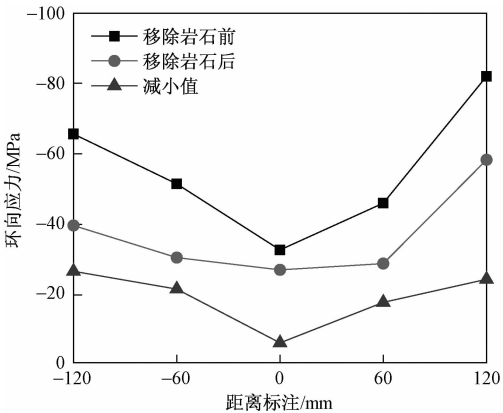


图 4 移除岩石前后环向应力对比曲线

移除岩石前后 Mises 等效应力值见表 3,移除岩石前后 Mises 等效应力对比曲线见图 5。从表 3 和图 5 中可以看出,移除岩石前后,挤压管段顶部的 Mises 等效应力与轴向应力在管道轴向的分布趋势基本一致,凹陷底部、凹陷边缘对应位置 Mises 等效较大,这是因为轴向应力值较大,在合成 Mises 等效应力时其主要作用;岩石移除前,凹陷底部对应位置的 Mises 等效应力最大,为 320.3 MPa,岩石移除后,

凹陷边缘对应位置 5 的 Mises 等效应力最大,为 250.6 MPa;同样,Mises 等效应力减小值曲线与轴向应力减小值曲线也类似,但相对平缓,减小值为 60~80 MPa,凹陷底部对应位置减小值最大,为 80.5 MPa,底部和边缘中间的对应位置减小值次之,为 70 MPa 左右,凹陷边缘对应位置减小值较小,大约为 60 MPa 左右。

表 3 移除岩石前后 Mises 等效应力值

测试位置	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
距离标注/mm	-120	-60	0	60	120
移除岩石前/MPa	301.2	251.1	320.3	262.6	313.5
移除岩石后/MPa	244.2	182.8	239.8	191.8	250.6
减小值/MPa	57.0	68.3	80.5	70.8	63.0

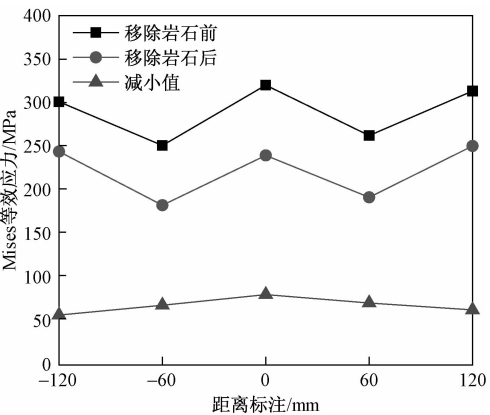


图 5 移除岩石前后 Mises 等效应力对比曲线

4 结论

通过对比移除岩石前后挤压管段顶部的轴向应力、环向应力以及 Mises 等效应力,可以得到以下结论:

- 1)岩石挤压管段顶部的轴向应力为拉应力,环向应力为压应力,相同位置的轴向应力值大于环向应力值;
- 2)无论是否移除岩石,挤压管段顶部的轴向应力和 Mises 等效应力在管道轴向呈“W”状分布,凹陷底部、凹陷边缘对应位置应力值较大,底部和边缘中间的对应位置应力值较小;环向应力在管道轴向呈“V”状分布,从凹陷底部对应位置到凹陷边缘对应位置逐渐增大;
- 3)移除岩石后,挤压管段顶部的轴向应力、环向应力以及 Mises 等效应力均有不同程度减小,其中轴向应力和 Mises 等效应力减小值曲线呈“倒 V”状,从凹陷底部对应位置到凹陷边缘对应位置逐渐变小;而环向应力减小值曲线则呈“V”状,从凹陷底部对应位

置到凹陷边缘对应位置逐渐增大。

参考文献

- [1] WU Y, SHENG Y, WANG Y, et al. Stresses and deformations in a buried oil pipeline subject to differential frost heave in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 64(3): 256—261.
- [2] 李茂华, 石磊彬, 钟威, 等. 内外压热应力影响下西气东输二线长输管道变形的有限元分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(8): 119—124.
- [3] 李佳骏, 初飞雪, 唐道林. 地震带穿越河流管道应力分析研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(22): 17—22.
- [4] 蒋宏业, 王慧, 徐涛龙. 采空塌陷区埋地输气管道的变形及受力分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(2): 45—51.
- [5] 林森, 李昕. 崎岖海床上管道变形和应力研究[J]. 石油工程建设, 2014, 40(2): 1—5.
- [6] JENG D S, POSTMA P F, LIN Y S. Stresses and deformation of buried pipeline under wave loading[J]. Journal of Transportation Engineering-ASCE, 2001, 127(5): 398—407.
- [7] MIRZAII-SISAN A, BASTOLA A. Redistribution of welding residual stress following high plastic deformation in seamless pipes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2017, 158: 37—50.
- [8] 赵福兴, 周鹏飞, 钱英豪. 基于 ANSYS 的管道变形应力分析[J]. 化工装备技术, 2016, 37(2): 47—49, 52.
- [9] 邓道明, 李育光. 埋地柔性管道的应力和变形分析[J]. 油气储运, 1998, 17(6): 11—14, 57.
- [10] 刘仕鳌, 蒲红宇, 刘书文, 等. 埋地管道应力分析方法[J]. 油气储运, 2012, 31(4): 274—278, 327, 328.
- [11] 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.
- [12] 姚海盛, 汪凡, 张勇. N08825 复合管焊接残余应力的 X 射线衍射测试[J]. 石油工程建设, 2016, 42(6): 19—21.

Stress Response at the Top of Rock Extrusion Section of a Product Oil Pipeline

LAI Shao-chuan¹, ZHANG Ping², HE Yong-jun¹, WANG Gui¹

(1. Sinopec Sales Co., Ltd. South China Branch, Guangzhou 510000, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the principle of X-ray stress measurement, the axial stress and the circumferential stress at the top of rock extrusion section of a product pipeline are measured, and the Mises equivalent stress is calculated. Comparing the various stresses of extruded pipe section before and after removing the rock, the results show that the axial stress at 0 o'clock of the rock extrusion section is tensile stress, the circumferential stress at the top of the rock extrusion section is compressive stress, and the axial stress value at the same position is larger than the circumferential stress value; the axial stress and the Mises equivalent stress are distributed in the "W" shape in the pipeline axis, and the circumferential stress is distributed in the "V" shape in the pipeline axis; after removing the rock, the axial stress, the circumferential stress and the Mises equivalent stress all decrease in varying degrees, the reduction curve of the axial stress and the Mises equivalent stress show an "inverted V" shape, while the reduction curve of the circumferential stress shows a "V" shape.

Key words: stress measurement; rock extrusion; axial stress; circumferential stress; Mises equivalent stress