

文章编号:1673-5005(2006)03-0081-04

打孔管道焊接修复结构的残余应力测试

卜文平¹, 帅 健², 王晓明², 张劲军¹

(1. 中国石油大学 石油天然气工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学 机电工程学院, 北京 102249)

摘要:输油管道上的打孔盗油案件时有发生。对被打孔的管道,只能采用焊接方法抢修,而焊接产生的残余应力影响管道承压能力和剩余寿命。为了解管道修复中焊接残余应力对管道完整性的影响,用钻孔法分别测试了打孔管道的不同焊接修复结构的残余应力,并和管道螺旋焊缝处的残余应力进行了对比。测试结果表明,焊缝近处存在残余应力,且距焊缝越近,残余应力越大。管道修复结构中的残余应力的第一主应力多为拉应力,其最大值为管材屈服极限的70.94%;管道螺旋焊缝处的残余应力的第二主应力为压应力,其最大值约为管材屈服极限的74.66%。同时在焊接接管的根部存在较大的残余应力。

关键词:输油管道;焊接;残余应力;打孔;修理

中图分类号:TE 78;O 346.1 **文献标识码:**A

Residual stress test on welding repair structure of drilled pipeline

BU Wen-ping¹, SHUAI Jian², WANG Xiao-ming², ZHANG Jin-jun¹

(1. Faculty of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Some oil transmission pipelines are often drilled holes by oil stealers. These drilled pipelines must be repaired by welding way in time. The residual stress produced in welding process has effects on the loading capability and service life of pipelines. The residual stress tests were conducted on different weld structures of repaired pipelines by drill-hole method in order to investigate the influence of welding repair on pipeline integrity. The test results show that there exists the residual stress near a weld seam, and the closer distance from a weld seam is, the higher residual stress is. The first principal stresses of residual stresses on welding repair of the drilled pipeline are mostly tensile. The highest residual stress in tensile is about 70.94% of the yield limit of pipe material. Whereas the second principal stresses of residual stresses near a spiral weld seam are compressive. The highest residual stress in compression is about 74.66% of the yield limit of pipe material. In addition, the high residual stress occurs at the bottom of a tube welded on pipelines.

Key words: oil pipeline; welding; residual stress; drilling holes; repair

近年来,输油管道上的打孔盗油案件时有发生。对被打孔的管道,由于小孔已穿透管壁,只能采用焊接的方法抢修。现场焊接修复的方式有两种:一是在打孔的地方焊上一小截接管,将盗油分子非法焊接在管道上的一小截盗油支管封闭在里面,俗称“扣帽子”;二是在被打孔的管道外表面焊上一小块补板,这种方法需要将盗油分子焊接在管道上的盗油支管完全从根部处清除。由于焊接过程中的约束和

局部加热、冷却的收缩效应及金属组织的变化因素,使输油管必然产生残余应力。管道在运行过程中,工作应力和残余应力相叠加,使得管道实际受力水平提高,承载能力下降,尤其是在焊缝和热影响区等局部高应力区极易产生疲劳破坏、应力腐蚀开裂和氢致开裂^[1],严重影响管道的正常工作,缩短管道的服役寿命,甚至造成严重事故^[2]。国内已对螺旋焊缝管道的残余应力进行了测试^[3-5],取得了一些

收稿日期:2006-01-05

作者简介:卜文平(1964-),男(汉族),江苏丰县人,高级工程师,博士研究生,从事油气储运技术管理工作。

实际数据,然而,对打孔盗油管道的焊接结构的残余应力尚缺乏研究。为了解打孔盗油管道焊接修复中的残余应力,笔者用钻孔法对“扣帽子”和“补板”两种焊接结构进行测试,即在具有残余应力的构件上钻一小孔,使孔的周围区域由于应力释放而产生相反的位移和应变,借助于应变片记录这些位移和应变,经计算后得到钻孔处的残余应力,为打孔盗油管道修复措施的合理性评价及修复后管道的安全性评价提供依据。

1 试验

1.1 试件制作

为了取得可靠的数据,采用来自于某输油管线库存的 $\Phi 630 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 和 $\Phi 711 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的管道,材质为 16 Mn。在管道上钻孔,然后按打孔盗油管道抢修时的修复工艺,在管道打孔的地方焊接接管或“补板”。接管的尺寸为 $\Phi 159 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,高约 200 mm,材料为 Q235。“补板”是从相同尺寸和材料的管道上截取的,尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 8.4 \text{ mm}$ 。考虑到在打孔盗油活动频繁地区,存在密集开孔的情况,也制作了两个开孔较近的试件。

对这种管道材料进行了拉伸试验^[6],以便得到管道材料的准确机械性能数据。拉伸试验得到的管材的应力-应变曲线见图 1。材料的屈服极限为 553 MPa,拉伸极限为 653 MPa。

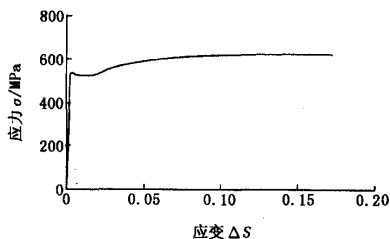


图 1 实测的管道应力-应变曲线

1.2 试验步骤

(1)打磨。输油管道由于生锈、腐蚀等原因,其表面会出现蚀坑,要将应变花贴牢于管道表面,必须进行打磨,直至看不到表面有细小划痕为止。

(2)清洗表面。打磨后的表面会留下一些细小的粉末及其他杂质,用棉花蘸取丙酮溶液仔细擦拭,去除表面的这些杂质,直至棉花上不再有污迹。

(3)贴应变花。表面清洗完毕后,先将测点定位,再将应变花贴于清洗后的表面。

(4)连线并调零。用导线将应变花与预调平衡箱相连接,注意各导线的绝缘情况,待线路都接通后

对应变仪进行调零。

(5)钻孔。用钻头对准应变花上的钻孔点进行钻孔,所用钻头直径为 2 mm,孔深至少为 2.4 mm。

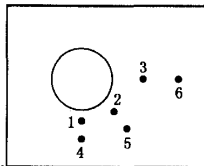
(6)记录结果。钻孔完毕后,待应变仪上的读数较稳定时,即可读数并记录。

2 试验数据及结果分析

对 $\Phi 630 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 和 $\Phi 711 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 两种规格管道的不同焊接修复结构进行了多组残余应力测试,并对所有应变测试进行了温度补偿。

2.1 $\Phi 630 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 管道接管

测点位置如图 2 所示。考虑到问题的对称性,仅选取结构的 1/4 布置测点,测点分别是在 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° 的方向上,测点 1~6 到焊缝根部的径向距离分别为 10, 11, 28, 29, 29, 59 mm。钻孔法测得的应变见表 1。其中 ϵ_1, ϵ_2 和 ϵ_3 分别为 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° 方向的应变。从表 1 可以看出,近焊缝点 1~3



的残余应力明显大于离焊缝较远的 4~6 点。最大拉应力在 3 点,最大压应力在 4 点。

表 1 $\Phi 630 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 接管应变测试结果

测点	测量应变(微应变)			残余应力 / MPa		$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} / \%$	
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	$\frac{\sigma_1}{\sigma_s}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_s}$
1	250	172	117	-170.05	-224.68	-30.75	-40.63
2	-85	-75	-130	131.62	99.62	23.80	18.01
3	-494	-61	-3	392.32	142.23	70.94	25.72
4	116	187	290	-182.53	-254.15	-33.01	-45.96
5	-238	-45	-5	187.10	74.26	33.83	13.43
6	-180	-110	69	114.71	4.68	20.74	0.85

注: σ_1 为第一主应力, σ_2 为第二主应力。

2.2 管道补板

管道补板分 $\Phi 630 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 和 $\Phi 711 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 两种。测点位置见图 3,测试结果见表 2,3。

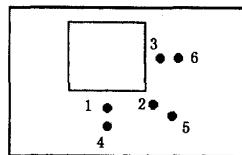


图 3 补板试件测点布置

$\Phi 630 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 补板试件中测点 1~6 到焊缝根部的距离分别为 10, 12, 9, 30, 30, 32 mm,残余应力中最大拉应力为 337.85 MPa,是屈服极限的 61.09%,最大压应力为 398.88 MPa,是屈服极限的

72.13%; $\Phi 711\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 补板试件中测点 1~6 到焊缝根部的距离分别为 9,9,12,27,30,29 mm。 $\Phi 711\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 补板结构的残余应力数值上总体低于 $\Phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 补板中的残余应力。

表 2 $\Phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 补板周围的残余应力

测点	测量应变(微应变)			残余应力/MPa		$\frac{\sigma_1}{\sigma_s}/\%$	
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	σ_s	σ_s
1	-78	156	455	-94.07	-311.42	-17.01	-56.31
2	-205	-265	200	136.89	-131.51	24.75	-23.78
3	-186	-48	18	134.13	46.56	24.25	8.42
4	192	100	25	-82.72	-150.67	-14.96	-27.25
5	-65	95	550	-122.77	-398.88	-22.20	-72.13
6	-364	-178	-165	337.85	231.12	61.09	41.79

表 3 $\Phi 711\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 补板周围的残余应力

测点	测量应变(微应变)			残余应力/MPa		$\frac{\sigma_1}{\sigma_s}/\%$	
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	σ_s	σ_s
1	-57	4	-18	58.89	21.77	10.65	3.94
2	-405	-27	220	228.74	-29.76	41.36	-5.38
3	-147	-300	147	135.23	-135.23	24.45	-24.45
4	-170	30	108	94.79	-28.10	17.14	-5.08
5	-355	-45	75	245.73	55.43	44.44	10.02
6	-178	8	45	125.81	17.24	22.75	3.12

2.3 $\Phi 711\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 管道两接管

测点位置见图 4。测点 1~9 到焊缝根部的距离分别为 29,11,10,77,53,60,30,30,95 mm。测试结果见表 4。

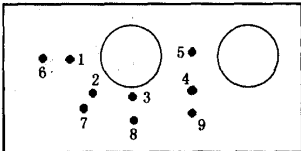


图 4 两接管试件测点布置

表 4 $\Phi 711\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 两接管周围的残余应力

测点	测量应变(微应变)			残余应力/MPa		$\frac{\sigma_1}{\sigma_s}/\%$	
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	σ_s	σ_s
1	—	79.5	200	—	—	—	—
2	81	-47.5	302	-99.38	-312.55	-17.97	-56.52
3	-653	—	—	—	—	—	—
4	-74	-76	-30	69.11	42.75	12.50	7.73
5	-25	215	—	—	—	—	—
6	16	-14.5	170	-46.50	-153.55	-8.41	-27.77
7	21	28	98	-43.86	-84.13	-7.93	-15.21
8	-28	-34	14	21.37	-6.32	3.87	-1.14
9	-151	36.5	260	24.89	-142.12	4.50	-25.70

2.4 $\Phi 711\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, $\Phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 管道上的接管

测点位置如图 5 所示,即测量接管底部的残余应力。 $\Phi 711\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 上接管测点 1~3 到焊缝根部的垂直距离分别为 32,17,10 mm; $\Phi 630\text{ mm}\times$

8 mm 上接管测点 1~3 到焊缝根部的垂直距离分别为 12,9,12 mm。测试结果如表 5,6 所示。测试结果表明焊接接管的根部存在残余应力。

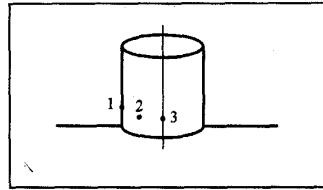


图 5 接管上的测点布置

表 5 $\Phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 管道上接管的残余应力

测点	测量应变(微应变)			残余应力/MPa		$\frac{\sigma_1}{\sigma_s}/\%$	
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	σ_s	σ_s
1	160	86	-228	128.91	-55.77	23.31	-10.08
2	70	20	100	-64.42	-118.43	-11.65	-21.42
3	-190	-132	-260	282.22	201.78	51.04	36.49

表 6 $\Phi 711\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 管道上接管的残余应力

测点	测量应变(微应变)			残余应力/MPa		$\frac{\sigma_1}{\sigma_s}/\%$	
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	σ_s	σ_s
1	393	93	-128	-35.86	-249.17	-6.48	-45.06
2	-45	-32	470	-84.82	-372.29	-15.34	-67.32
3	-173	-50	-143	214.08	125.80	38.71	22.75

2.5 $\Phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 管道螺旋焊缝

测量了 $\Phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 管道螺旋焊缝处的残余应力,测点位置见图 6。测点 1~6 到管道螺旋焊缝根部的距离分别为 0,0,0,30,0,28 mm。

测试结果见表 7。第二主应力都为负值,即压应力。

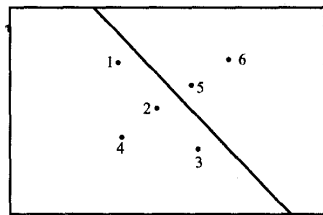


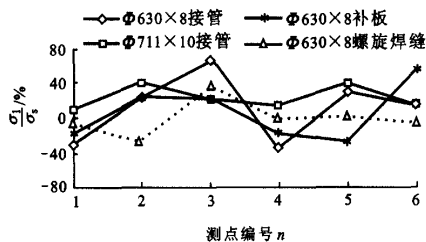
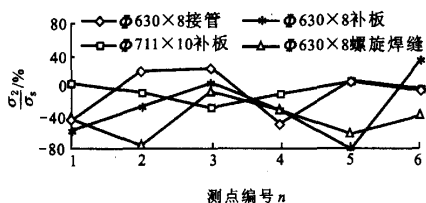
图 6 $\Phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 焊缝处的测点布置

表 7 $\Phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 管道螺旋焊缝的残余应力

测点	测量应变(微应变)			残余应力/MPa		$\frac{\sigma_1}{\sigma_s}/\%$	
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	σ_s	σ_s
1	325	114	-120	-20.06	-200.43	-3.63	-36.24
2	145	-25	386	-158.25	-412.87	-28.62	-74.66
3	-380	-15	190	222.00	-17.65	40.15	-3.19
4	250	78	-143	22.62	-137.70	4.09	-24.90
5	-285	-24	546	39.08	-319.80	7.07	-57.83
6	-133	120	297	0.18	-176.58	0.03	-31.93

图 7,8 分别是 $\Phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 管道接管、

$\Phi 630 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 管道补板以及 $\Phi 711 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 管道补板周围的残余第一主应力和第二主应力与管道螺旋焊缝附近残余应力的比较。由图看出,3种焊接结构的第一主应力多为拉应力,明显大于螺旋焊缝的第一主应力,最大拉应力为屈服极限的70.94%。螺旋焊缝处的第二主应力为压应力,其最大值为屈服极限的-74.66%。其余结构中的第二主应力中既有拉应力,也有压应力。

图7 σ_1 残余应力对比图8 σ_2 残余应力对比

3 结 论

(1) 焊缝近处存在残余应力,且距焊缝越近,残余应力的数值越大。

(2) 焊接修复结构残余应力的第一主应力多为

拉应力,最大拉应力为屈服极限的70.94%;管道螺旋焊缝处残余应力的第二主应力为压应力,最大压应力为屈服极限的74.66%。

(3) 在“扣帽子”修复结构上,接管根部存在较大的残余应力。

参考文献:

- [1] 霍立兴. 焊接结构工程强度[M]. 北京:机械工业出版社,1995:23-45.
- [2] 杨树贵. 关于焊接钢管残余应力的思考[J]. 焊管, 1998,21(2):10-14.
YANG Shu-gui. The residual stress in welded pipes[J]. Welded Pipe and Tube, 1998,21(2):10-14.
- [3] 颜峰,吉玲康,冯耀荣,等. 油气输送焊管残余应力测试方法的研究[J]. 石油机械,1999,27(4):18-20.
YAN Feng, JI Ling-kang, FENG Yao-rong, et al. Test method for residual stress in oil and gas line pipe[J]. China Petroleum Machinery, 1999,27(4):18-20.
- [4] 月兰,李学彤,田汝珉. 输油管道螺旋焊缝残余应力的测定[J]. 油气田地面工程,1995,14(1):46-48.
YUE lan, LI Xue-tong, TIAN Ru-min. Measurement of residual stress in spiral weld of oil transmission pipeline [J]. Oil & Gas Field Engineering, 1995,14(1):46-48.
- [5] 吉玲康,颜峰,霍春勇,等. 螺旋缝埋弧焊管的水压和稳压试验及残余应力[J]. 石油机械,2000,28(3):15-17.
JI Ling-kang, YAN Feng, HUO Chun-yong, et al. Hydraulic test of spiral submerged-arc welding pipes[J]. China Petroleum Machinery, 2000,28(3):15-17.
- [6] GB228—1987 金属拉伸试验方法[S].

(编辑 沈玉英)

“泡沫酸选择性酸化油层工艺技术研究”应用前景广阔

由中国石油大学(华东)泡沫流体研究中心主任、博士生导师李兆敏教授主持完成的中石化中原油田分公司重大科研项目“充气泡沫酸解堵技术研究与应用”中的“泡沫酸选择性酸化油层工艺技术研究”在中原油田现场应用13井次,工艺成功率100%,施工井有效率90%,已累积增油2220 t,增气116万立方,创效339万元,取得显著的经济效益。由中国科学院院士郭尚平等专家、教授组成的鉴定委员会一致认为,“泡沫酸选择性酸化油层工艺技术研究”达到国际先进水平。

科研人员针对中原油田地层渗透率较低、层间渗透率级差较大的实际情况,在分析各种因素对泡沫酸性能影响的基础上,确定了泡沫酸的配方,研制出性能稳定、耐油、耐温、对地层条件适应的泡沫酸;结合地层酸化工程实际进行泡沫酸流体的流变性研究,确定了泡沫酸流体的流变模式,同时考虑了含气率、温度和压力对其的影响,确定了流入参数和残酸返排助排参数;提供了泡沫酸流体用于酸化油层技术的工艺参数,为油田现场进行非均质性油层酸化提供了技术指导。

(摘编自中国石油大学(华东)新闻网)