

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2023.01.002

常减压装置含缺陷管道安全评定分析

石祥¹, 黄丽红², 龚凌诸¹, 苏宣机³, 黄耀波³, 朱猛¹

1. 福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350118;
2. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;
3. 福建省锅炉压力容器检验研究院, 福建 福州 350008)

摘要:以某常减压装置含缺陷管道为研究对象,采用超声相控阵检测方法对管道焊接接头进行无损检测,确定管道缺陷类型和尺寸,根据 GB/T 19624—2019 推荐的安全评定方法对管道缺陷进行安全评定,通过改变缺陷的大小和间距,探究缺陷类型、尺寸和相互位置对管道安全评定的影响,结果表明:裂纹缺陷单独存在时,缺陷高度对安全评定影响最大;未焊透缺陷单独存在时,缺陷长度对安全评定影响最大;两条缺陷共存时,随着缺陷间距 S 的增大,缺陷处应力先缓慢增大后快速减小并逐步趋于稳定,但是由于管道中缺陷数量增加,导致两条单独存在时均安全的缺陷在共存时可能造成管道不安全。

关键词:缺陷;常减压装置;管道;安全评定

中图分类号:TQ055.8

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2023)01-0006-08

Safety assessment analysis of pipes with defects in atmospheric and decompression devices

SHI Xiang¹, HUANG Lihong², GONG Lingzhu¹, SU Xuanji³, HUANG Yaobo³, ZHU Meng¹

- (1. School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, 350118, China;
3. Fujian Boiler and Pressure Vessel Inspection Institute, Fuzhou 350008, China)

Abstract: The defective pipes in an atmospheric and decompression device were selected as the research object. The ultrasonic phased array detection method was adopted to conduct nondestructive testing on welded joints of pipelines to determine the type and size of pipeline defects. The pipeline defects were assessed according to the safety assessment method recommended by GB/T 19624-2019. By changing the size and spacing of defects, the influence of defect type, size and mutual location on pipeline safety assessment was investigated. Results show that the height of flaw has the greatest influence on pipeline safety evaluation when the crack defect exists alone. The length of defect has the greatest influence on the safety evaluation when there is incomplete penetration defect alone. When the two defects coexist, with the increase of defect spacing S , the stress at the defect increases slowly first, then decreases rapidly and gradually becomes stable. However, due to the increase in the number of defects in the pipeline, the two defects that are both safe when they exist alone may cause pipeline insecurity when they coexist.

Keywords: defect; atmospheric and decompression pressure device; pipeline; safety assessment

管道焊接接头作为常减压装置管道最容易产生缺陷的部件^[1],是对常减压装置管道缺陷进行安全评定的重中之重。近年来,学者在管道焊接接头安全评定方面做了大量研究,方学锋^[2]等人

收稿日期:2022-12-05

基金项目:福建省科技计划项目(2020Y0055);福建工程学院横向科研项目(GY-H-20090)

第一作者简介:石祥(1997—),男,陕西安康人,硕士研究生,研究方向:承压设备管道的无损检测与安全评定分析。

通信作者:黄丽红(1983—),女,福建南平人,讲师,博士,研究方向:橡胶材料大变形,设备的结构分析。

通过有限元分析对高温蒸汽管道进行强度计算,并对超标缺陷进行安全评定;王海锋^[3]等人采用 CAESAR II 软件对一段含未焊透缺陷的工业管道进行了应力分析与安全评定;李建锋^[4]等人得到安全评价结果后还提出了安全使用管理的建议。目前有关管道焊接接头安全评定方面的研究主要都是针对已有缺陷数据进行安全评定分析,并未对管道焊接接头不同缺陷类型、尺寸和相互位置对安全状况及评定结果影响进行研究。本文以福建省某石化企业常减压装置含缺陷管道为研究对象,利用超声相控阵检测方法对该管道焊接接头进行无损检测,并探究管道焊接接头不同缺陷类型、尺寸和相互位置对管道安全状况及评定结果的影响。

1 管道参数与缺陷尺寸

1.1 管道数据与参数

某常减压装置管道投入运行时间为 18 a,管道级别为 GC2,规格为 Φ159 mm×6 mm,坡口型式为 V 型,工作介质为柴油,材质为 20#/GB3087,最大工作压力为 1.05 MPa、工作温度为 176 ℃。为方便管道缺陷数据的采集,以焊缝中线为基准,截取焊接接头两侧各 250 mm(共计 500 mm)长管段,并对焊接接头表面进行打磨抛光处理,如图 1 所示。

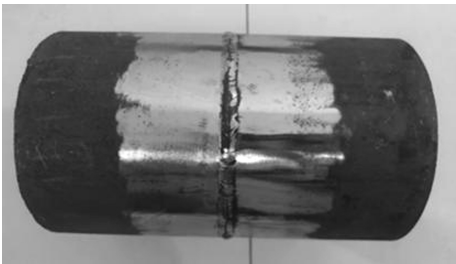


图 1 常减压装置管道焊接接头打磨抛光实物图
Fig.1 Picture of grinding and polishing of pipe welded joints of atmospheric and decompression devices

经过简单测量与力学拉伸试验,得知该管道焊缝外表面宽度为 12 mm,根部宽度 6 mm,外表面余高 1 mm,根部余高 1.5 mm。管道参数中屈服强度 σ_s 为 245 MPa,抗拉强度 σ_b 为 390 MPa,弹性模量 E 为 206 GPa,泊松比 μ 为 0.3。

1.2 缺陷尺寸

选用某公司生产的 ISONIC2009 相控阵检测仪对该管道焊接接头进行无损检测。为满足检测

覆盖和灵敏度的要求,本次试验选用探头型号为 7.5 MHz16P0.5-10 的自聚焦探头,该探头频率为 7.5 MHz,晶片间距 0.5 mm,晶片长 10 mm,晶片数量 16 个。检测结果见表 1。

表 1 管道焊接接头处缺陷数据
Tab.1 Defect data of welded joint of pipeline

编号	种类	长度 L/mm	高度 H/mm
1#	裂纹	34.7	3.0
2#	未焊透	30.8	3.1

2 管道安全评定的关键

根据 GB/T 19624-2019^[5] 和表 1 数据可知,1#裂纹缺陷属于平面型缺陷,2#未焊透缺陷属于体积型缺陷。缺陷处的应力是安全评定的关键^[6],只有正确计算缺陷处应力,才能保证安全评价的可靠性。

2.1 1#裂纹缺陷安全评定的关键

依据标准中附录 G 的内容可知,对于 1#裂纹缺陷,采用 U 因子评定法,利用(1)式中的判据进行评定:

$$\sigma_m + \sigma_B \leq \left(\frac{\sigma_s + \sigma_b}{2} \right) \frac{[\bar{\sigma}]}{U n_p}$$

(1)

式中, σ_m 为缺陷处的轴向薄膜应力,MPa; σ_B 为缺陷处的弯曲应力,MPa; σ_s 为管道材料的屈服强度,MPa; σ_b 为管道材料的抗拉强度,MPa; U 为 U 因子; $[\bar{\sigma}]$ 为许可流变应力比,查表 G.3 可得; n_p 为载荷安全系数,取 $n_p = 1.5$ 。

由上式可知,缺陷处的轴向膜应力和弯曲应力是 1#裂纹缺陷安全评定流程的关键。

2.2 2#未焊透缺陷安全评定的关键

依据标准中附录 H 的内容可知,对于 2#未焊透缺陷,利用(2)式中的判据进行评定:

$$\left(\frac{P}{P_{ls}} \right)^2 + \left(\frac{M}{M_{ls}} \right)^2 \leq 0.44$$

(2)

式中, P 为缺陷处承受的压力,MPa; M 为缺陷处承受的弯矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; P_{ls} 为含缺陷管道在纯内压下的塑性极限内压,MPa; M_{ls} 为含缺陷管道在纯内压下的塑性极限弯矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

由式(2)可知,缺陷处承受的压力和弯矩是 2#未焊透缺陷安全评定流程的关键。而弯矩又由

(3)式获得

$$M=\pi R^2 T \sigma \tag{3}$$

式中, R 为缺陷处管道半径, mm; T 为管道壁厚, mm; σ 为缺陷处最大应力, MPa。因此对于 2#未焊透缺陷, 缺陷处最大应力是安全评定的关键。

3 不同缺陷对安全评定结果的影响

3.1 实测缺陷的安全评定分析

利用 ANSYS 软件 Workbench 模块^[7]对该管道焊接接头缺陷处的应力进行模拟计算^[8]。取管道长度 500 mm, 分别将 1#裂纹缺陷和 2#未焊透缺陷简化为长 L 、高 H 、焊缝宽度 12 mm 的缺陷模型, 不考虑焊缝余高以及其他焊接缺陷的

影响, 简化后含缺陷有限元模型如图 2 所示。未焊透缺陷在管道内壁, 为显示出缺陷位置将管道部分模型进行隐藏。选用四面体网格, 对缺陷附近焊缝影响区和缺陷处网格进行局部细化, 细化后焊缝影响区单元格尺寸为 1 mm, 缺陷处单元格尺寸为 0.1 mm, 其余部位单元格尺寸为 10 mm。约束与载荷方面, 仅考虑该管道在受 1.05 MPa 内压下缺陷处应力的大小变化规律, 不考虑重力和其他载荷的影响。由于管道环向截断面形状规则且完全对称, 因此, 在管道的左右端面上设置对称约束; 同时, 为防止管道转动, 在管道左端面上选择一点施加 $x=0$ mm、 $y=0$ mm 和 $z=0$ mm 的位移约束。

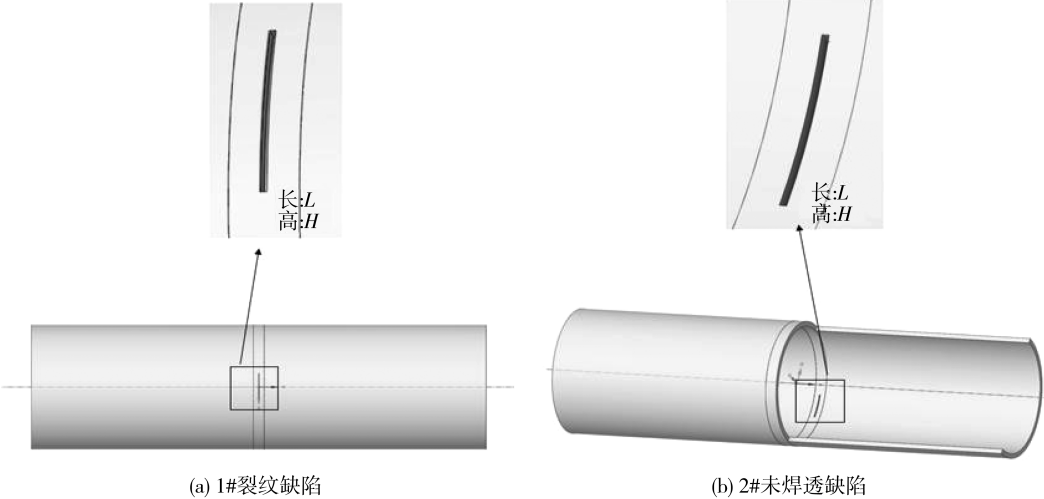


图 2 管道模型与缺陷简化
Fig.2 Pipeline model and defect simplification

对于 1#裂纹缺陷, 由标准中判定依据及评定要求可知, 对该缺陷进行评定需要获取轴向薄膜应力 σ_m 和弯曲应力 σ_B 之和(以下简称合应力)。为得到裂纹缺陷的合应力, 沿着缺陷的壁厚从内壁向外壁分别在缺陷的 4 条边上设立 4 条路径^[9], 并对路径上的应力进行线性应力化^[10]处理便可得到缺陷 4 条路径上的薄膜应力、合应力以及峰值应力, 由于峰值应力不会引起管道结构任何明显变化, 因此, 仅对路径上的合应力进行分析, 线性应力化处理结果见表 2。本文重点分析常减压装置含缺陷管道的安全情况, 因此选择 4 条路径上最大的合应力进行分析, 最大合应力云图见图 3(a)。

表 2 1#缺陷路径下的线性应力化处理
Tab.2 Linear stress treatment under defect path 1#
MPa

路径	薄膜应力	合应力	峰值应力
1	67.858	144.467	48.827 6
2	67.858	143.616	49.377 7
3	67.858	145.302	49.135 2
4	67.858	145.229	51.206 1

通过等效应力理论, 对 2#未焊透缺陷的应力进行分析, 得出缺陷处的最大应力, 应力变化云图见图 3(b)。

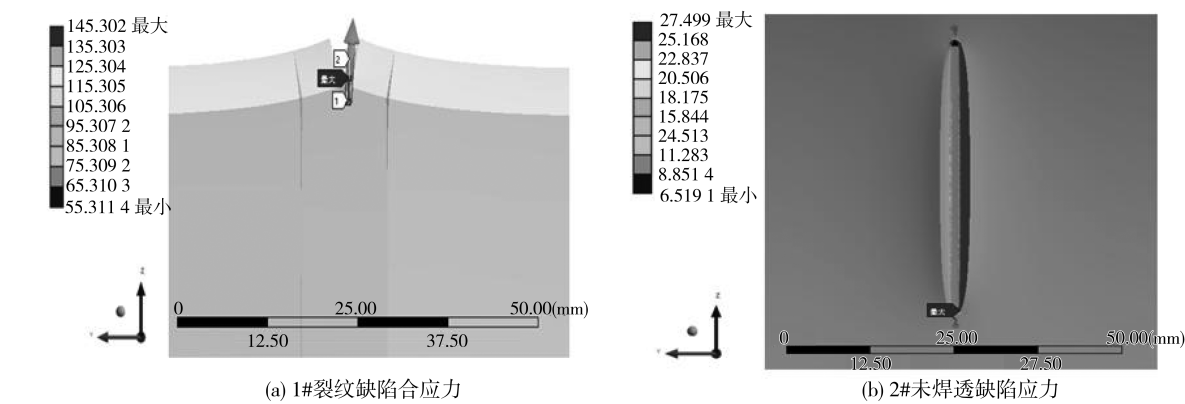


图 3 缺陷应力云图

Fig.3 Stress nephogram of defect

由图 3(a)与表 2 数据可知,1#裂纹缺陷合应力最大为 145.302 MPa; 由图 3(b)可知,2#未焊透缺陷最大应力为 27.499 MPa。将表 2 数据与管道材料参数分别带入判据中可知, $\left(\frac{\sigma_s + \sigma_b}{2}\right) \frac{[\bar{\sigma}]}{Un_p} = 171.343 \text{ MPa}, \left(\frac{P}{P_{LS}}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_{LS}}\right)^2 = 0.47$ 。因此,在操作工况下,该管道实测出的 1#裂纹缺陷在单独存在时安全,而 2#未焊透缺陷在单独存在时不安全。

3.2 不同尺寸裂纹缺陷的评定与分析

以文中检测数据为基础,分别改变裂纹缺陷的高度和长度,分析裂纹缺陷单独存在时缺陷处的应力变化以及不同裂纹缺陷尺寸对安全评定的影响。保持裂纹缺陷长度 34.7 mm 不变,改变裂纹缺陷高度(管道壁厚 6 mm)分别为 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mm,合应力变化数据见图 4(a);保持

裂纹缺陷高度 3.0 mm 不变,改变裂纹缺陷长度分别为 34.7、54.7、74.7、94.7、114.7 mm,合应力变化数据见图 4(b)。将(1)式判据不等式左侧合应力定义为 $A = \sigma_m + \sigma_B$,将(1)式判据不等式右侧定义为 $B = \left(\frac{\sigma_s + \sigma_b}{2}\right) \frac{[\bar{\sigma}]}{Un_p}$,最后将合应力数据带入(1)式判据中对其安全性进行分析,安全评定判据与结果见表 3。

由图 4 可知,裂纹缺陷单独存在时,随着缺陷高度和长度的增加,缺陷处合应力逐步增大。由表 3 数据可知,当裂纹缺陷长度维持 34.7 mm 不变的情况下,缺陷高度低于 3.0 mm 时,管道安全,缺陷高度高于 3.0 mm 时,管道不安全;当裂纹缺陷高度维持 3.0 mm 不变的情况下,缺陷长度小于 114.7 mm 时,管道安全,缺陷长度大于 114.7 mm 时,管道不安全。

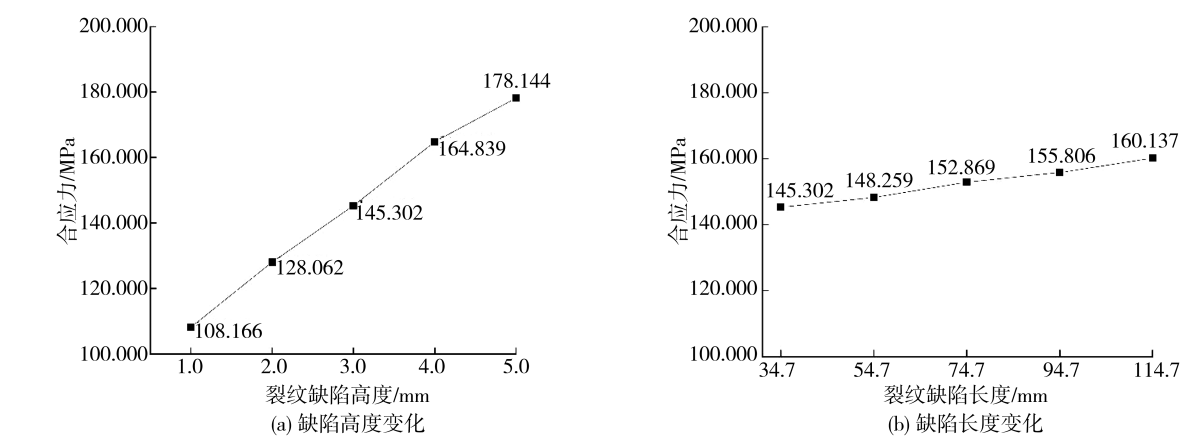


图 4 裂纹缺陷不同尺寸合应力

Fig.4 Combined stress of crack defects of different sizes

表 3 裂纹缺陷不同尺寸的评定数据

Tab.3 Assessment data of crack defects of different sizes

缺陷长度/mm	缺陷高度/mm	A/MPa	B/MPa	判断依据	是否安全
34.7	1.0	108.166	206.329	$A<B$	安全
34.7	2.0	128.062	185.152	$A<B$	安全
34.7	3.0	145.302	171.343	$A<B$	安全
34.7	4.0	164.839	158.539	$A>B$	不安全
34.7	5.0	178.144	158.539	$A>B$	不安全
34.7	3.0	145.302	171.343	$A<B$	安全
54.7	3.0	148.259	165.717	$A<B$	安全
74.7	3.0	152.867	165.717	$A<B$	安全
94.7	3.0	155.806	161.473	$A<B$	安全
114.7	3.0	160.137	156.421	$A>B$	不安全

结合图 4 和表 3 可知,裂纹缺陷单独存在时,缺陷高度对裂纹缺陷合应力影响最大,合应力呈逐步上升趋势,当缺陷高度为 4.0~5.0 mm 时,由于接近管道内壁,受管道内压的影响,裂纹缺陷路径上合应力增大速率减缓,但此时对管道安全评定影响最大。而缺陷长度变化对合应力影响较小,合应力增长速度缓慢,且缺陷长度变化得到的合应力数值相对较小,对管道安全评定影响也较小。

3.3 不同尺寸未焊透缺陷的评定与分析

以文中检测数据为基础,分别改变未焊透缺陷的高度和长度,分析未焊透缺陷单独存在时,缺陷处的最大应力变化以及不同未焊透缺

陷尺寸对安全评定的影响。保持未焊透缺陷长度 30.8 mm 不变,改变未焊透缺陷高度(管道壁厚 6 mm)分别为 1.1、2.1、3.1、4.1、5.1 mm,最大应力变化数据见图 5(a);保持未焊透缺陷高度 3.1 mm 不变,改变未焊透缺陷长度分别为 10.8、20.8、30.8、40.8、50.8 mm,最大应力变化数据见图 5(b)。将(2)式判据不等式左侧定义为 $C = \left(\frac{P}{P_{ls}}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_{ls}}\right)^2$,将最大应力数据带入(3)式判据中,得到弯矩 M ,结合管道在纯内压下的塑性极限内压和弯矩数据对其安全性进行分析,安全评定判据与结果见表 4。

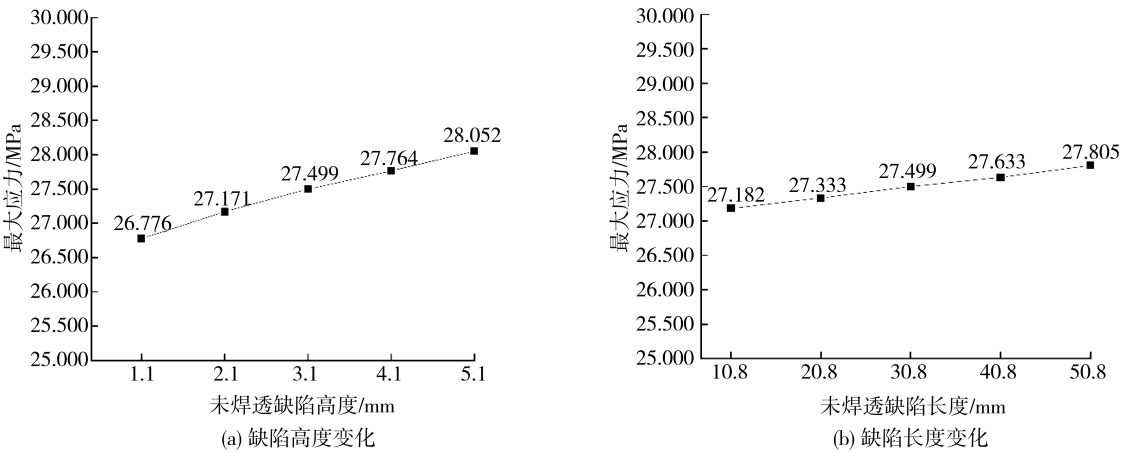


图 5 未焊透缺陷不同尺寸最大应力

Fig.5 Maximum stress of different sizes of imperfect penetration defects

表 4 未焊透缺陷不同尺寸的评定数据

Tab.4 Assessment data of imperfect penetration defects of different dimensions

缺陷长度/mm	缺陷高度/mm	最大应力 σ /MPa	弯矩 $M/(N \cdot m)$	C	判断依据	是否安全
30.8	1.1	26.776	28.088	0.40	$C<0.44$	安全
30.8	2.1	27.171	29.272	0.43	$C<0.44$	安全
30.8	3.1	27.499	30.414	0.47	$C>0.44$	不安全
30.8	4.1	27.764	31.514	0.50	$C>0.44$	不安全
30.8	5.1	28.052	32.667	0.54	$C>0.44$	不安全
10.8	3.1	27.182	30.064	0.44	$C=0.44$	安全
20.8	3.1	27.333	30.231	0.46	$C>0.44$	不安全
30.8	3.1	27.499	30.414	0.47	$C>0.44$	不安全
40.8	3.1	27.633	30.562	0.47	$C>0.44$	不安全
50.8	3.1	27.805	30.753	0.48	$C>0.44$	不安全

由图 5 可知,未焊透缺陷单独存在时,随着缺陷高度和长度的增加,缺陷处最大应力也逐步增大。由表 4 数据可知,当未焊透缺陷在长度维持 30.8 mm 不变的情况下,缺陷高度小于 2.1 mm 时,管道安全;缺陷高度大于 2.1 mm 时,管道不安全。当未焊透缺陷在高度维持 3.1 mm 不变的情况下,缺陷长度小于 10.8 mm 时,管道安全;缺陷长度大于 10.8 mm 时,管道不安全。

结合图 5 和表 4 可看出,未焊透缺陷单独存在时,虽然缺陷处最大应力数值较小,增幅较慢,

但管道安全受缺陷的高度和长度变化的影响,其中缺陷长度变化对管道安全评定影响最大。

3.4 缺陷共存时相互位置对安全评定的影响

分别选择两条裂纹缺陷和两条未焊透缺陷,通过改变两条缺陷的相互位置,分析两条缺陷共存时相互位置对安全评定的影响。缺陷相互位置示意图见图 6,缺陷数据见表 5,为方便后续说明,此处将缺陷①定义为短缺陷,缺陷②定义为长缺陷。

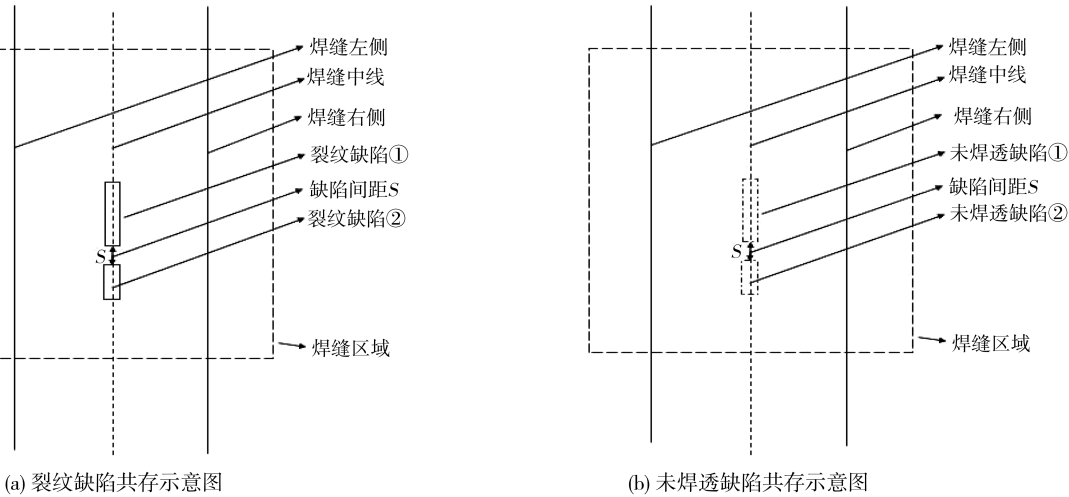


图 6 缺陷共存时相互位置示意图

Fig.6 Diagram of mutual position of defects in coexistence

表 5 两条缺陷尺寸参数

Tab.5 Size parameters of two defects

编号	度量单位	裂纹尺寸/mm	未焊透尺寸/mm
①	缺陷长度 L_1	54.7	5.8
	缺陷高度 H_1	3.0	3.1
②	缺陷长度 L_2	74.7	10.8
	缺陷高度 H_2	3.0	3.1

结合表 3 和表 4 数据可知,表 5 中单独存在的裂纹缺陷和单独存在的未焊透缺陷均安全。通过改变不同的缺陷间距 S 来控制缺陷的相互位置,对于两条裂纹缺陷,改变量分别为 30、40、50、60、70 mm,缺陷处合应力变化数据见图 7(a);对于两条未焊透缺陷,改变量分别为 3、4、5、6、7 mm,缺陷处最大应力变化数据见图 7(b),安全评定判据与结果见表 6。

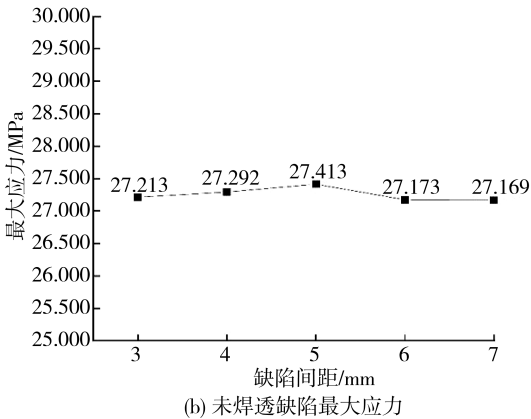
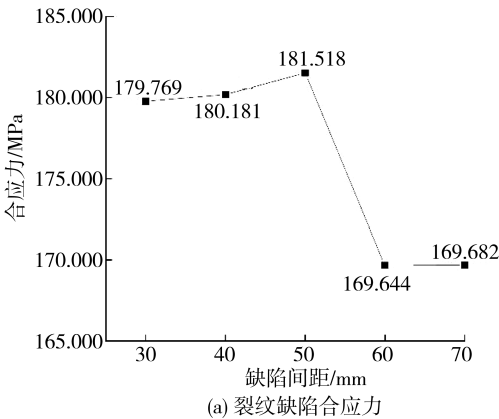


图 7 不同位置应力数据变化

Fig.7 Changes of stress data at different positions

表 6 不同位置评定数据

Tab.6 Assessment data of different locations

缺陷种类	缺陷间距/mm	A/MPa	B/MPa	最大应力 σ /MPa	弯矩 $M/(N \cdot m)$	C	判断依据	是否安全
裂纹	30	179.769	165.717	/	/	/	$A > B$	不安全
	40	180.181	165.717	/	/	/	$A > B$	不安全
	50	181.518	165.717	/	/	/	$A > B$	不安全
	60	169.644	165.717	/	/	/	$A > B$	不安全
	70	169.682	165.717	/	/	/	$A > B$	不安全
未焊透	3	/	/	27.213	30.098	0.46	$C > 0.44$	不安全
	4	/	/	27.292	30.186	0.46	$C > 0.44$	不安全
	5	/	/	27.413	30.319	0.46	$C > 0.44$	不安全
	6	/	/	27.173	30.536	0.46	$C > 0.44$	不安全
	7	/	/	27.169	30.492	0.46	$C > 0.44$	不安全

由图 7 可知,当两条缺陷共存时,随着两条缺陷间距的增加,缺陷处应力整体趋势为先缓慢增大后快速减小,最后趋于稳定。由表 6 可知,两条单独存在时均安全的缺陷共存时有可能造成管道不安全。

结合图 7 和表 6 可知,两条缺陷共存时,当缺陷间距 S 小于短缺陷长度时,标准 GB/T 19624-2019 规定需将两条缺陷合并为一条长 $L=L_1+S+L_2$ 的缺陷,随着间距 S 增大,合并后的缺陷变长,应力缓慢增加。当缺陷间距 S 大于短缺陷的长度

时,根据 GB/T 19624—2019 中的规定,两条缺陷的间距已经不足以影响到对方,因此缺陷处应力快速减小,最后趋于稳定。但是由于管道中缺陷数量增加,导致两条单独存在时均安全的缺陷在共存时可能造成管道不安全。

4 结论

1)当 1#裂纹缺陷单独存在时,缺陷高度变化对管道安全评定影响最大,不同高度下,缺陷处合应力变化显著。缺陷长度变化对管道安全评定影响较小,不同长度下,缺陷处合应力变化微小;当 2#未焊透缺陷单独存在时,缺陷高度变化对缺陷

处最大应力影响较大,但对管道安全评定影响较小,而缺陷长度变化对缺陷处最大应力影响较小,但对管道安全评定影响最大。

2)两条缺陷共存时,随着缺陷间距 S 的增大,缺陷处应力先缓慢增大后快速减小,最后趋于稳定。这是因为当缺陷间距 S 较小时,需将两条缺陷合并为一条长 $L=L_1+S+L_2$ 的缺陷,合并后的缺陷变长,缺陷处应力缓慢增加。而当缺陷间距 S 大到一定程度时,由于两条缺陷的间距已经不足以影响到对方,因此缺陷处应力快速减小并逐步趋于稳定。

参考文献:

[1] 张华. 压力管道焊接接头裂纹原因分析[J]. 中国设备工程,2022(13):164-166.

[2] 方学锋,张伯君,梁斌,等. 高温蒸汽管道焊接接头缺陷分析与安全评定[J]. 炼油与化工,2020,31(4):53-55.

[3] 王海锋,郭涛,周海彦. 在用含未焊透缺陷工业管道的安全评定[J]. 管道技术与设备,2021(1):6-8.

[4] 李建锋,周昌宗. 含未熔合缺陷压力管道安全评定[J]. 石化技术,2022,29(8):27-29.

[5] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 在用含缺陷压力容器安全评定:GB/T 19624—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.

[6] 张皓,郑朋刚. 压力管道的分析、评定和检测[J]. 化工管理,2018(27):216-217.

[7] 北京兆迪科技有限公司. ANSYS Workbench 19.0 结构分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2019:326.

[8] 程新宇,冯晓伟,李治贵,等. 基于 ANSYS/WORKBENCH 的压力容器接管应力分析[J]. 石油和化工设备,2011,14(2):5-8.

[9] 铁摩辛柯,古地尔.弹性理论[M]. 徐芝纶,译. 北京:高等教育出版社,2013:523.

[10] 黄昆. 在用含缺陷压力管道的安全性分析[J]. 机电技术,2013,36(4):149-153.

(责任编辑:陈雯)