

重复使用火箭贮箱焊接接头失效准则及高风险失效危险区确定研究

王晓博¹ 焦好军² 晋会锦³ 刘德博¹ 刘希敏¹

(1 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

(2 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(3 北京航空航天大学, 北京 102206)

文 摘 贮箱是重复使用火箭的关键部件之一,焊缝的完整性评定是重复使用火箭贮箱设计制造的难题。本文根据断裂力学弹塑性原理及双参数2A级失效评估方法,对重复使用火箭贮箱焊缝裂纹进行定量评估。基于贮箱焊缝完整性评定流程,给出求解贮箱箱底焊缝剩余强度和临界裂纹尺寸的方法,结合实例确定了典型贮箱高风险失效危险部位。计算结果表明,结构临界裂纹尺寸随外加应力增加而减小,剩余强度随临界裂纹长度增加而减小;在相同外加应力下,临界裂纹尺寸随结构外径的降低而减小;在一定临界裂纹尺寸下,剩余强度随结构外径增加而增加。

关键词 贮箱,焊接,风险,准则

中图分类号:V252

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.02.008

Study on Failure Criteria of Welded Joint and Determination of High Risk Failure Hazard Area of Reusable Launch Vehicle Tank

WANG Xiaobo¹ JIAO Haojun² JIN Huijin³ LIU Debo¹ LIU Ximin¹

(1 Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(3 Beihang University, Beijing 102206)

Abstract Tank is one of the key components of the reusable rocket, and the integrity evaluation of the weld is difficult for designing and manufacturing of the reusable rocket tank. According to the elastic-plastic principle of fracture mechanics and the two-parameter 2A failure evaluation method, the weld crack of reusable rocket tank is quantitatively evaluated. Based on the evaluation process of tank weld integrity, the method of solving residual strength and critical crack size of tank bottom weld is given. The results show that the critical crack size decreases with the increase of applied stress, and the residual strength decreases with the increasing of critical crack length. Under the same applied stress, the critical crack size decreases with the decrease of the external diameter of the structure. Under a certain critical crack size, the residual strength increases with the increase of the external diameter of the structure. In this study, the failure criteria of welded joints with welding defects for reusable storage tanks are established, which is of great significance to guide the analysis and determination of high-risk failure hazard areas for reusable storage tanks.

Key words Tank, Weld, Risk, Criterion

0 引言

一次性使用运载火箭发射费用昂贵,是制约世

界航天技术快速发展的因素之一。对于一次性运载火箭贮箱,为保证单次任务的成功,在设计时通常会

收稿日期:2023-11-13

基金项目:氢能源支线飞机总体设计与技术验证项目

第一作者简介:王晓博,1983年出生,硕士,主要从事贮箱设计研究工作。E-mail:wxb8311@126.com

使用预留裕度,应用高精强度安全系数来保证单次任务的成功。但对于重复使用火箭,贮箱重复使用次数从数次增加到数十次甚至上百次,静强度安全系数法无法保证重复使用火箭贮箱轻量化设计需求^[1]。作为一种大型焊接压力容器,由于材料、焊接缺陷以及在飞行过程中产生损伤,贮箱焊缝易出现裂纹。大量试验数据表明,焊缝是贮箱的薄弱环节,焊缝裂纹是贮箱失效的主要原因。因此,无论是设计制造中的质量控制,还是重复使用过程中的安全监督^[2],都必须针对重复使用火箭贮箱焊接接头建立失效准则,确定出高风险失效危险区,考虑到贮箱重复使用的要求,有必要研究焊缝裂纹疲劳扩展速率,计算结构剩余寿命,对重复使用火箭贮箱焊接接头失效准则及高风险失效危险区确定进行研究是急需的。

压力容器的失效准则实际上是一种设计准则,即设计者将容器应力限制在一定水平上,从而保证该容器能够在准则所要求的限度内安全运行。而设计准则又可分为“按规则(规范)设计”的设计准则和“按分析设计”的设计准则。根据传统的强度设计观点,当工作应力达到屈服强度时发生屈服,当工作应力达到极限时发生断裂。从贮箱失效的实际情况(低应力下的脆性断裂)考虑,水压试验或操作过程中就有可能在工作应力低于材料屈服强度甚至低于许用应力的情况下发生脆性断裂,显然传统的强度设计观点已不能满足实际需要,而这种低应力破坏失效现象可以从断裂失效准则解释。

本文根据含缺陷结构双参数法 2A 级失效评估技术判断结构是否出现断裂失效,从而建立相应的失效准则。

1 基本原理与计算

1.1 损伤容限评定方法

损伤容限是指结构在规定的、未经维修的使用周期内,抵抗由于存在瑕疵、裂纹或其他损伤而导致破坏的能力。损伤容限设计承认结构中存在未被发现的初始缺陷,要求在使用过程的重复载荷作用下,缺陷的增长应控制在一定范围内,在规定的检查间隔内,结构满足规定的剩余强度要求,以便能通过有效的检查和维修保证结构在使用寿命期内不发生灾难性的破坏^[4]。损伤容限评价主要包括两个部分:临界裂纹尺寸和剩余强度。前者是指构件在服役过程中,可接受的最大裂纹尺寸;后者是含一定尺寸缺陷构件可以承受的最大载荷。

损伤容限分析计算经历了由单参数法向双参数

法的发展过程。单参数法仅考虑材料的断裂韧性数据,为断裂模式,当裂纹尖端应力强度因子超过断裂韧性值时,发生断裂。双参数法增加了塑性失稳的模式,使用失效评估图(FAD)进行评定,当评估点位于危险评估区域内,构件破坏。文献[5]对含缺陷金属结构进行缺陷断裂评定以及疲劳缺陷扩展计算。文献[6]介绍了 2A 级失效评估图目前成为国际含缺陷结构安全性评估关键技术之一,采用失效评定图法对含缺陷结构继续使用的可接受性进行分析,该方法考虑的失效机理:

- (a)用线弹性断裂力学来描述脆性断裂;
- (b)弹塑性断裂力学,在达到极限载荷之前出现塑性缺陷扩展;
- (c)当由延性材料来保证的极限载荷,由缺陷面积使结构界面减小所引起的极限载荷失效。

重复使用火箭贮箱也可以看成是一类特殊的压力容器,根据英标 BS7910—2005(金属结构缺陷验收评定方法导则)将 2A 级失效评估图引入推进剂贮箱焊缝表面裂纹的失效评定,建立其评定流程,如图 1 所示。

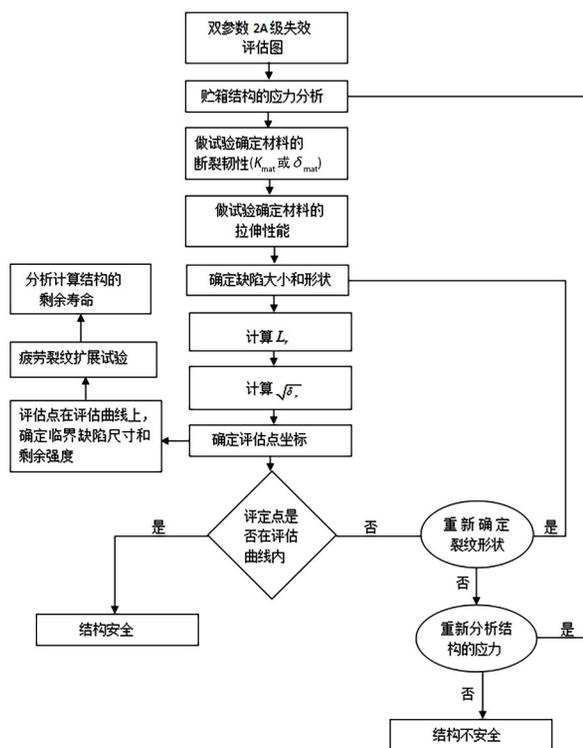


图 1 贮箱结构失效评定流程

Fig. 1 Failure assessment flow chart of tank structure

含缺陷结构的失效形式有三种可能,即脆性断裂、塑性失稳和弹塑性断裂。英标 BS7910—2005(金属结构缺陷验收评定方法导则)失效评估图(FAD)可以很好地将这三种失效方式结合起来。评定思路

是将结构的抗裂能力和在实际承载条件下裂纹的启裂能力加以比较。横坐标为应力参数 L_r ,表示有裂纹的结构接近塑性屈服程度的度量,其定义为所评定的载荷条件与引起结构塑性屈服的载荷之比^[5],靠近横坐标部分代表塑性失稳的发生;纵坐标为断裂韧度参数的平方根 $\sqrt{\delta_r}$,表示接近断裂失效程度的度量,其定义为应力强度因子与材料断裂韧度的比值,靠近纵坐标部分代表脆性断裂的发生;中间过渡区域代表弹塑性断裂。BS7910—2005失效评估图的评价线方程为:

$$\sqrt{\delta_r} = f(L_r) = (1 - 0.14L_r^2)(0.3 + 0.7\exp(-0.65L_r^6)), L_r \leq L_{r,max} \quad (1)$$

$$\sqrt{\delta_r} = 0, L_r > L_{r,max} \quad (2)$$

$L_{r,max}$ 表示当缺陷的尺寸很小时,结构塑性荷载与屈服荷载之比,当 L_r 大于 $L_{r,max}$ 时,有 $\sqrt{\delta_r} = 0$ 。评估图中的评价线将整体分为两个区域,评价线内为缺陷可接受区(安全区),评价线外为缺陷不可接受区(非安全区),当评价点位于评价线内部,缺陷可接受;否则缺陷不可接受。对于确定的结构来说,材料的屈服强度和断裂韧度固定,评价点的位置仅与缺陷尺寸与外加载荷有关。随着缺陷尺寸或载荷的增加,评价点由安全区向非安全区移动,当评价点位于评价线时,构件的安全处于临界位置,此时的缺陷尺寸即为特定载荷下的损伤容限,此时的载荷即为特定缺陷尺寸下的剩余强度(贮箱失效评定流程见图1)。对含缺陷构件进行安全评定的实质是将含缺陷构件的评价点与评价线做比较,如评价点位于评价线内部,则缺陷可接受,否则不可接受,构件必须进行检修或替换。评价点坐标位置与缺陷尺寸、缺陷周围远场应力、材料的性能(屈服强度、断裂韧度)指标有关。评价点坐标计算公式如式(3)~(5)所示。

$$L_r = \frac{p}{p_0} \quad (3)$$

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\delta_1/\delta_{mat}} \quad (4)$$

$$\delta_1 = \frac{K_I^2}{\sigma_Y E} \quad (5)$$

式中, p 为施加载荷, p_0 为结构塑性屈服载荷。 δ_{mat} 为材料的断裂韧度,由材料性能决定,需通过实验确定,其测试方法可参考GB7732—2008(金属材料表面裂纹拉伸试样断裂韧度试验方法)或英标BS7448—1991(断裂韧度测试方法), σ_Y 为材料的屈服强度, K_I 为裂纹尖端应力强度因子, E 为弹性模量。应力强度因子 K_I 则可由下式得到:

$$K_I = F\sigma\sqrt{\pi a} \quad (6)$$

F 与表面裂纹的深度、长度及板材厚度有关,其值可由GB7732—2008附录3查得, a 为裂纹深度, σ 为裂纹截面垂直方向所受的远端拉力,当评定点位于贮箱前后底上时, σ 计算很复杂,可借助数值计算工具得到裂纹截面垂直方向所受的远端拉力^[7]。

1.2 损伤容限计算

针对某贮箱箱底环形焊缝进行损伤容限计算,而且以表面裂纹为研究对象,计算焊缝的临界缺陷尺寸和剩余强度。表面裂纹结构示意图如图2所示。

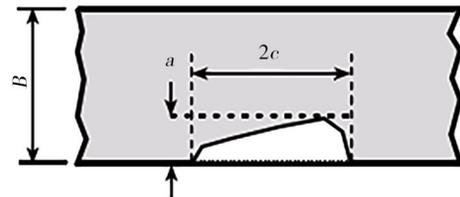


图2 表面裂纹形状尺寸

Fig. 2 Surface crack shape size

1.3 含表面裂纹的箱底环形焊缝损伤容限计算

表面裂纹是贮箱结构最为常见的,箱底壁厚 $B=6$ mm,半径 $R=690$ mm,为了使评定结果偏于保守,根据拉伸性能试验结果,CTOD(裂纹尖端张开位移)值采用热影响区和焊缝中心的最小断裂韧度数据进行评定,其中断裂韧度测试试验遵照英标BS7448—1991(断裂韧度测试方法)进行,以三点弯曲形式进行加载。

根据箱底的应力分析,计算了裂纹深度 a 与半裂纹长度 c 比值在 $[0.1, 1]$ 的变化情况,即 $a/c=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1$ 。当 $R=690$ mm时,计算工作应力 σ 为150~290 MPa(间隔10 MPa)时的表面裂纹的临界裂纹深度 a_c 和临界裂纹长度 $2c$,计算结果如图3所示。从图3可以看出,当应力 σ 较小时,环形焊缝的失效模式主要以弹塑性断裂失效为主,随着应力的增大,评估线右移,塑性失稳在失效模式中所占比例增加,当应力很大时,超过材料的屈服强度时,失效模式主要以塑性失稳为主。利用断裂韧度试验和双参数法2A级失效评估理论计算不同临界缺陷尺寸下箱底环形焊缝不同半径含表面裂纹的剩余强度,裂纹深度 a 与半裂纹长度 c 的比值在 $[0.1, 1]$ 变化,即 $a/c=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1$,计算结果如图4所示。从图4可以看出,随着临界裂纹深度 a_c 的增加,构件的剩余强度下降,并且在一定的临界裂纹深度下,剩余强度随着 $a/2c$ 值的减小而降低。

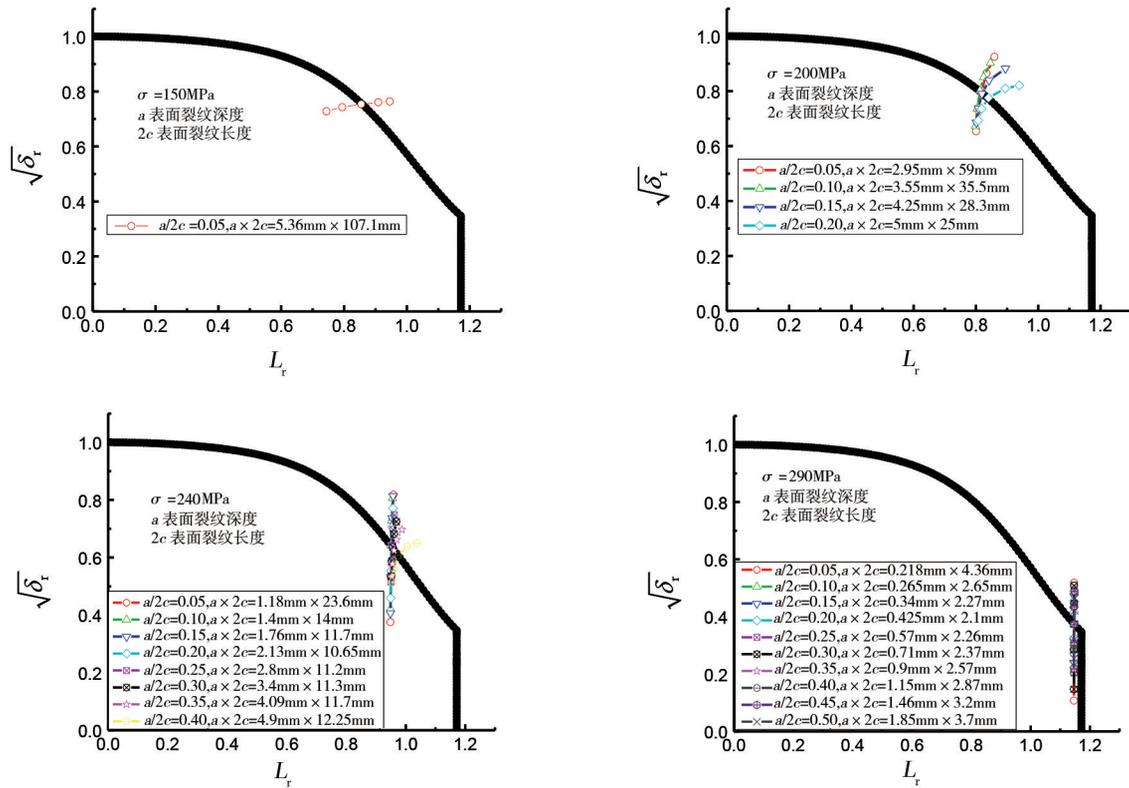


图3 不同应力水平下环形焊缝含表面裂纹的临界裂纹深度 a_c 和临界裂纹长度 $2c$ ($R=690$ mm)

Fig. 3 The critical crack depth a and critical crack length $2c$ of annular welds with surface cracks under different stress levels ($R=690$ mm)

2 失效准则的建立

断裂失效准则以断裂力学为基础,在安全设计时不仅要限制含一定缺陷结构的工作应力必须小于剩余强度($\sigma \leq \sigma_{res}$),而且还要限制缺陷尺寸小于结构的临界裂纹尺寸($a \leq a_c$),也就是结构必须兼顾强度与韧性要求。根据含缺陷结构双参数法2A级失效评估技术判断结构是否出现断裂失效,进而建立相应的失效准则。

于其剩余强度(σ_{res})时,构件会断裂,从而建立剩余强度失效准则。

(2)利用试验获得的断裂性能数据和双参数失效评估理论和技术方法建立临界缺陷尺寸失效准则。在给定的工作应力下,当结构的缺陷尺寸(a)大于或等于其临界裂纹尺寸(a_c)时,构件发生断裂,从而建立临界裂纹尺寸失效准则。

3 高风险失效危险区的确定

3.1 剩余强度失效准则确定失效危险区

根据建立的断裂失效准则中的剩余强度失效准则和箱底焊缝的应力测试结果,确定箱底焊缝为高风险失效危险部位。根据应力测试结果,焊缝外表面的测试应力普遍大于内表面,因此,外表面失效的危险性大于内表面。

图5为某箱底应力测点图,对于 $R=690$ mm的环形焊缝,测试点在焊缝外表面上的有8、9、19、20、21和22。假设缺陷形式以箱体结构最为常见的表面裂纹存在于焊缝上,在工程应用上表面裂纹深度 a 与半裂纹长度 c 的比值一般取0.3或0.4,本文取 $a/c=0.4$ 进行环形焊缝剩余强度的计算,利用断裂试验和双参数法2A级失效评估理论计算了当表面裂纹深度 $a=1$ mm和4 mm时环形焊缝的剩余强度分别为264.5 MPa和210.1 MPa,然后将剩余强度与该点所测试的应力相比较,差距越小,表明该部位相对就越危险,

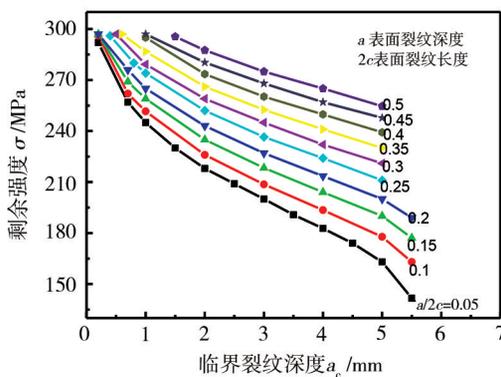


图4 不同临界缺陷尺寸下某箱底环形焊缝不同半径含表面裂纹的剩余强度: $R=690$ mm

Fig. 4 Residual strength of annular welds with surface cracks in different radii under different critical defect sizes: $R=690$ mm

(1)利用试验获得的断裂性能数据和双参数失效评估理论和技术方法建立剩余强度失效准则。在给定的缺陷情况下,当结构的工作应力(σ)大于或等

比较的结果如图6所示,为箱底环形焊缝剩余强度与测试部位应力比较结果。

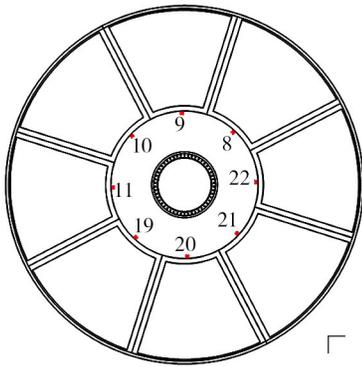


图5 箱底应力测点

Fig. 5 Diagram of stress measuring point at bottom of case

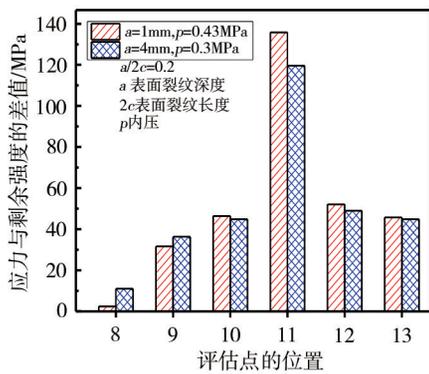


图6 箱底环形焊缝($R=690$ mm)剩余强度与测试部位应力比较结果

Fig. 6 Comparison of residual strength of annular weld at bottom of case and stress at test site($R=690$ mm)

从图6可以看出箱底环形焊缝 $R=690$ mm含表面裂纹深度为 $a=1$ mm、表面裂纹长度 $2c=5$ mm和表面裂纹深度为 $a=4$ mm、表面裂纹长度 $2c=20$ mm这两种情况下,都是8点所处部位的应力越接近于剩余强度,说明该部位相对于9、19、20、21、22所处的部位较危险。

3.2 临界缺陷失效准则确定结构危险性

根据3.1节确定的箱底焊缝的高风险失效危险部位。首先对被评估部位进行应力分析,利用断裂韧性试验结果和双参数法2A级失效评估图(FAD),计算出在一定应力水平下的临界裂纹尺寸,然后将该部位所含缺陷尺寸与临界裂纹尺寸相比较,如果所含缺陷尺寸大于临界裂纹尺寸,那么认为该结构失效;如果所含缺陷尺寸小于临界裂纹尺寸,则认为该结构是安全的。假设结构处于安全,根据缺陷形状以及大小等分布特征,如裂纹的深度和裂纹的长度等,计算含缺陷结构的评定点坐标,从而判断该结构处于安全的安全裕度,或者其潜在危险性大小。

经检测,某箱底环形焊缝上有一环向表面裂纹,

裂纹深度 $a=2$ mm,裂纹长度 $2c=8$ mm,贮箱半径 $R=690$ mm,筒段焊缝壁厚 $t=6$ mm。试验测得该焊缝结构的性能: $\delta_{mat}=0.0364$ mm, $\sigma_b=340$ mm, $\sigma_s=253$ MPa。贮箱承受内压值 $p=0.58$ MPa。判定该贮箱的焊缝表面裂纹是否安全。

首先根据箱底环形焊缝的应力测试结果,内压 $p=0.58$ MPa时,应力 $\sigma=229.3$ MPa。裂纹形状参数 $a/c=0.5$,然后根据性能测试结果和双参数2A级失效评估图计算出在229.3 MPa应力下的临界裂纹深度为3.6 mm和临界裂纹长度为14.4 mm,而实际检测的裂纹深度为2 mm(<3.6 mm),而且裂纹长度为8 mm(<14.4 mm),表明该结构在应力 $\sigma=229.3$ MPa的情况下是安全的。

然后判断该结构在应力 $\sigma=229.3$ MPa时,且含裂纹深度 $a=2$ mm和裂纹长度 $2c=8$ mm时处于安全的安全系数,根据性能测试结果和前述的计算公式,计算结构的评定点坐标 L_r 和 $\sqrt{\delta_r}$ 分别为0.9086和0.5122,即(0.9086,0.5122),然后将该评定点坐标标在评估图上,如图7所示。从图7可以看出评定点处于失效评定曲线内,而且安全系数为 $ob/oa=1.154/1.043=1.106$,表明该结构是安全的。

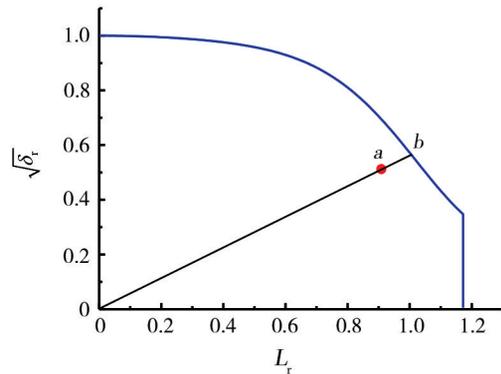


图7 失效评定曲线

Fig. 7 Failure assessment diagram

4 结论

研究表明,双参数2A级失效评估方法在重复使用火箭贮箱焊缝裂纹的评定方面有工程运用价值。主要结论如下:

(1)临界裂纹尺寸的计算方法:在工作载荷下,以微小增量逐渐增加裂纹尺寸,使评价点的坐标由内部靠近评价线,当评价点落在评价曲线上时,可以认为对应的缺陷尺寸为结构在当前载荷下的临界裂纹尺寸;

(2)剩余强度的计算方法:在给定裂纹尺寸下,以微小增量逐渐增加外加载荷,使评价点坐标由内部靠近评价线,当评价点落在评价曲线上时,可以认为当前缺陷尺寸对应的外加载荷是结构的剩余

强度;

(3)结构的临界裂纹尺寸随着外加应力的增加逐渐减小,剩余强度随着临界裂纹长度的增加逐渐减小;

(4)在相同外加应力情况下,临界缺陷尺寸随着结构的外径的降低而减小;

(5)在一定的临界裂纹尺寸条件下,剩余强度随着结构的外径增加而增加,因为对于相同的裂纹尺寸,外径的增加,使得参考应力值和应力强度因子降低,所以剩余强度增加;

(6)随着外加应力的增大,评估线结构的失效模式从脆性断裂→弹塑性断裂→塑性失稳过渡。当外加应力较小时,箱底焊缝的失效模式主要以脆性断裂失效为主,随着应力的增大,评估线右移,塑性失稳在失效模式中所占比例增加,当应力很大时,失效模式主要以塑性失稳为主。

参考文献

[1] 顾孟奇,郭万林. 可重复使用运载火箭结构疲劳耐久性与可靠性展望[J]. 航空学报,2023,12(1):25-29.

GU Mengqi, GUO Wanlin. Structural fatigue durability and reliability of reusable launch vehicles [J]. Acta Astronautica ET Astronautica Sinica, 2023, 12(1): 25-29.

[2] 胡宽,常新龙,杨海生. 推进剂贮存容器J积分安全评定与寿命预测[J]. 机械设计与研究,2010,26(1):15-18.

HU Kuan, CHANG Xinlong, YANG Haisheng. J-integral safety evaluation and life prediction of propellant storage vessel [J]. Machine Design & Research, 2010, 26(1): 15-18.

[3] 袁杰红,唐国金,周建平,等. 断裂力学在推进剂贮箱安全评定中的应用[J]. 强度与环境,1999(1):30-36.

YUAN Jiehong, TANG Guojin, ZHOU Jianping, et al. Application of fracture mechanics to the safety assessment of propellant tanks [J]. Structure & Environment Engineering, 1999 (1): 30-36.

[4] 孙忠绍,刘宪力,刘欣. 航天低温贮箱箱底焊接工艺[J]. 航天工艺,1999(6):1-3.

SUN Zhongshao, LIU Xianli, LIU Xin. Welding process of aerospace low temperature storage tank bottom [J]. Aerospace Technology, 1999(6): 1-3.

[5] 陈印,刘宝玉,陈琳琳. 基于R6失效曲线管道的完整性评定[J]. 当代化工,2013,42(5):689-691.

CHEN Yin, LIU Baoyu, CHEN Binbin. Integrity evaluation of pipelines based on R6 failure curves [J]. Contemporary Chemical Industry, 2013, 42(5): 689-691.

[6] 刘应华,陈钢,徐秉业. 结构的塑性分析与含体积型缺陷压力容器和管道的失效评定[J]. 固体力学学报,2010,31(6):643-662.

LIU Yinghua, CHEN Gang, XU Bingye. Plastic analysis of structures and failure assessment of pressure vessels and pipelines with volumetric defects [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(6): 643-662.

[7] 张敏,史跃武,张建勋. 焊接接头失效评定曲线的数值研究[J]. 石油化工设备,1997,26(2):6-11.

ZHANG Min, SHI Yuewu, ZHANG Jianxun. Numerical study on failure assessment curves of welded joints [J]. Petrochemical Equipment, 1997, 26(2): 6-11.

[8] 郝桂芳,檀雪峰,程珩. 基于断裂理论的焊接结构缺陷失效评定分析[J]. 太原理工大学学报,2012,43(5):580-582.

HAO Guifang, TAN Xuefeng, CHENG Heng. Failure assessment analysis of welded structural defects based on fracture theory [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43 (5): 580-582.

[9] JATA K V, SEMIATIN S L. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys [J]. SeriPta Mater., 2000, 43(9): 743-749.

[10] NEWMAN J C, JAMES M A, ZERBST U. A review of the CTOA/CTOD fracture criterion [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70: 371-385.