

2219 铝合金搅拌摩擦焊结构 ECA 评定

曹学敏¹ 田志杰² 熊林玉² 马核¹ 张彦华¹

(1 北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191)

(2 首都航天机械公司,北京 100076)

文 摘 基于含缺陷结构断裂评定的 COD 设计曲线与净截面屈服失效判据,对 2219 铝合金搅拌摩擦焊结构进行了工程临界评定(ECA)。分析了 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头焊核区、热机影响区、热影响区和母材区的临界裂纹尺寸,确定了不同载荷水平下 2219 铝合金搅拌摩擦焊结构的表面缺陷容限,并对特定内压下 2219 铝合金运载火箭贮箱筒段搅拌摩擦焊纵缝进行了 ECA 评定,为 2219 铝合金搅拌摩擦焊结构的断裂控制提供了参考。研究表明,纵向前进边热影响区为 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头断裂控制的关键区域,特定内压条件下给定的表面缺陷可以接受。

关键词 2219 铝合金,搅拌摩擦焊,ECA 评定,贮箱

中图分类号: TG4

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2019.02.013

Engineering Critical Assessment on Friction-Stir-Welded 2219 Aluminum Alloy Structure

CAO Xuemin¹ TIAN Zhijie² XIONG Linyu² MA He¹ ZHANG Yanhua¹

(1 School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

(2 Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract Based on the failure criteria including COD design curves and net section yield, engineering critical assessment (ECA) on 2219 aluminum alloy structure welded by friction stir welding (FSW) was carried out. Critical crack sizes of Nugget zone (NZ), thermo-mechanically affected zone (TMAZ), heat affected zone (HAZ) and base material (BM) of 2219 aluminum alloy FSW joint were calculated. The surface defect tolerances of friction-stir-welded 2219 aluminum alloy structure under different stress-level were obtained, and ECA on longitudinal FSW joint of launch vehicle tank under a certain pressure inside the cylinder was executed. ECA method in this study provides a reference for fracture control of friction-stir-welded aluminum alloy structure. Results show that HAZ at the longitudinal advancing side is the key area for the fracture control of the 2219 aluminum alloy FSW joint. The given surface defects are acceptable under specific internal pressure.

Key words 2219 aluminum alloy, Friction stir welding, Engineering critical assessment, Launch vehicle tank

0 引言

2219 铝合金是可热处理强化的 Al-Cu-Mn 系析出强化型合金,具有较高的室温强度及良好的高温和超低温性能^[1],是运载火箭贮箱的常用材料^[2]。搅拌摩擦焊工艺与传统熔焊方法相比,具有无烟尘、无

气孔、无飞溅、无需添加焊丝、焊接时不需使用保护气体、焊后接头焊缝晶粒细小、残余应力小以及变形小等优点,广泛用于铝合金材料的焊接^[3-4]。

2219 铝合金搅拌摩擦焊接头是贮箱结构的薄弱环节,接头的断裂直接导致贮箱结构的失效。为了保

收稿日期: 2018-05-11

基金项目: 国防基础科研资助(JCKY2014203A001); 民用航天预研资助(科工一司[2014]618号)

第一作者简介: 曹学敏, 1994 年出生, 硕士研究生, 研究方向为焊接结构完整性与断裂控制。E-mail: caoxueminxm@163.com

通信作者: 张彦华, 1956 年出生, 博士, 主要从事焊接结构断裂控制与完整性工程分析等方面的教学与科研工作。E-mail: zhangyh@buaa.edu.cn

障贮箱结构完整性,对 2219 铝合金搅拌摩擦焊结构进行工程临界评定(Engineering Critical Assessment, ECA)是断裂控制的重要环节。

焊接结构 ECA 评定是基于“合于使用”原则对缺陷容限进行分析,已建立的评定标准包括英国含缺陷结构完整性评定标准(R6)、欧洲工业结构完整性评定方法(SINTAP)、美国石油学会标准(API 579)、英国标准 BSI PD6493 的修改版—BS 7910 金属结构中缺陷验收评定方法导则等^[5-8]。BS 7910 借鉴了 R6 和 SINTAP 的研究成果,提供了包括 COD(Crack Opening Displacement, 裂纹张开位移)设计曲线法和失效评定图等多种评定方法, COD 设计曲线法仅需要材料性能、尺寸等基础的信息,评定过程简单,在工程实际中应用范围更广。本文以 BS 7910-2013 为参考,针对 2219 铝合金运载火箭贮箱筒段搅拌摩擦焊纵缝中可能存在的表面缺陷,综合考虑弹塑性断裂力学判据与净截面屈服判据,根据运载火箭贮箱的实际工况条件,获得了贮箱筒段纵焊缝在不同载荷水平下的临界穿透裂纹容限,进一步将临界穿透裂纹容限转化为表面缺陷容限,并对特定内压下的贮箱纵焊缝进行了 ECA 评定,为 2219 铝合金搅拌摩擦焊结构断裂控制提供了参考。

1 ECA 评定方法

工程临界评定技术(ECA)是指应用断裂力学的理论,分析计算结构裂纹临界尺寸。含缺陷焊接结构的断裂行为可采用弹塑性断裂力学理论来分析,常用的方法是 COD 设计曲线。COD 设计曲线是一种简化的图表方法,工程上可以直接采用图表的方式对缺陷进行评定。随着缺陷尺寸的改变,接头的有效承载面也发生改变,接头在发生断裂前可能先因屈服而发生塑性破坏,因此需要综合考虑弹塑性断裂与净截面屈服两种失效判据。

1.1 COD 设计曲线

COD 设计曲线采用弹塑性断裂准则作为失效判据:将裂纹张开位移作为断裂韧性的参量,若缺陷处的裂纹张开位移 δ 小于极限值 δ_c (材料的裂纹扩展抗力,可通过标准试验方法测定),即 $\delta < \delta_c$,则缺陷对结构的影响较小,反之则比较危险^[9]。

在 COD 准则的基础上, A. A. WELLS^[10] 率先创立了 COD 设计曲线的理论。COD 设计曲线建立了含缺陷结构的无量纲裂纹张开位移 $\varphi = \delta / 2\pi\bar{a}\varepsilon_y$ 与无量纲应变 $\varepsilon / \varepsilon_y$ 之间的关系,图 1 为 Wells 给出的 COD 设计曲线,其关系式为:

$$\frac{\delta}{2\pi\bar{a}\varepsilon_y} = \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}\right)^2 & \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \leq 1\right) \\ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} & \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} > 1\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, \bar{a} 为临界裂纹尺寸(穿透裂纹临界长度); ε 为整体应变; ε_y 为屈服应变, $\varepsilon_y = R_{p0.2} / E$, $R_{p0.2}$ 为规定非比例延伸率 0.2% 时的材料延伸强度, E 为弹性模量。

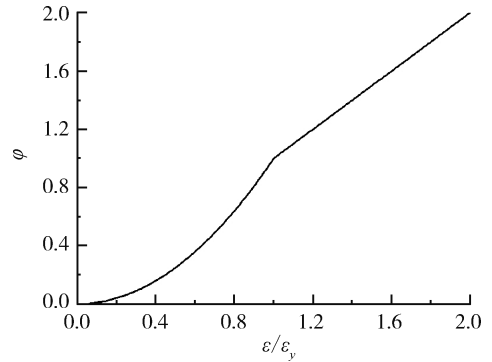


图 1 COD 设计曲线

Fig.1 COD design curves

一般而言,焊接结构的设计应力 R 不超过 $R_{p0.2}$, 即 $\varepsilon / \varepsilon_y < 1$ 且 $\varepsilon = R / E$, 由式(1)可知,临界裂纹尺寸的计算公式为:

$$\bar{a} = \frac{\delta_c}{2\pi\varepsilon_y (\varepsilon / \varepsilon_y)^2} = \frac{E\delta_c}{2\pi R_{p0.2} (R / R_{p0.2})^2} \quad (2)$$

1.2 净截面屈服

对于含缺陷焊接结构,随着缺陷尺寸的改变,接头的有效承载面(净截面)也发生改变,结构上的应力会高到使整个净截面在断裂前先发生屈服,最后导致结构破坏。对于这种净截面屈服破坏,可以直接用截面上的净应力与材料的屈服强度关系建立破坏判据^[11]。将接头简化为宽为 W 的平板,含有长度为 $2a$ 的中心裂纹,如图 2 所示。在远场应力 R 的作用下,接头发生净截面屈服破坏的临界裂纹尺寸为:

$$\bar{a} = \left(1 - \frac{R}{R_{p0.2}}\right) \cdot \frac{W}{2} \quad (3)$$

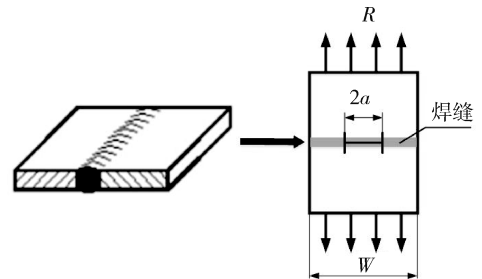


图 2 焊接接头简化

Fig.2 Welded joint simplification

2219 铝合金搅拌摩擦焊结构设计应力 R 与临界裂纹长度 \bar{a} 的关系如图 3 所示,阴影区域为结构安全区,净截面屈服塑性断裂线[式(3)]与弹塑性断裂线[式(2)]相交于 A、B 两点, R_1 、 R_2 分别为 A 点和 B 点的应力。对于同种铝合金搅拌摩擦焊结构, A、B 两点的位置受板宽 W 控制, A、B 两点对应的 R 值与 W 的关系见式(4),随 W 增大, R_1 减小, R_2 增大。当 $R <$

R_1 或 $R > R_2$ 时结构的失效受净截面屈服判据控制, $R_1 < R < R_2$ 时结构的失效受弹塑性断裂判据控制, 即以式 (2) 与式 (3) 得到的临界裂纹尺寸的较小值作为整个结构的临界裂纹尺寸。

$$\pi WR^3 - \pi WR_{p0.2}R^2 + E\delta_c R_{p0.2}^2 = 0 \quad (4)$$

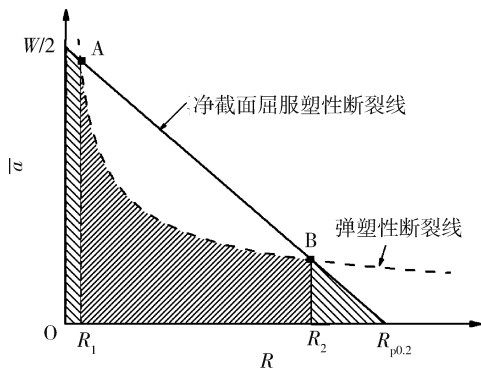


图3 R 与 \bar{a} 的关系

Fig.3 Relationship between R and \bar{a}

1.3 临界裂纹尺寸与表面缺陷尺寸转化

COD 设计曲线与净截面屈服判据中的临界裂纹尺寸 \bar{a} 为穿透裂纹临界长度, 而实际结构中的缺陷多为表面裂纹或埋藏裂纹, 见图 4。英国标准 BS 7910 的附录 A 中给出了图 5 所示的穿透裂纹尺寸与表面裂纹尺寸的关系曲线。

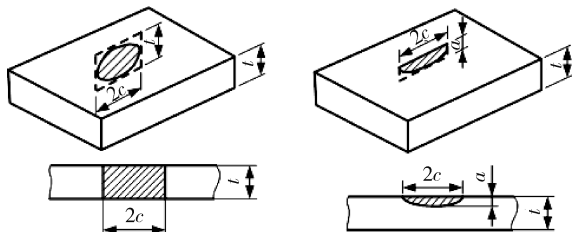


图 4 穿透裂纹与表面裂纹^[11]
2c-裂纹长度, a-裂纹深度, t-结构厚度

Fig.4 Through crack and surface crack^[11]

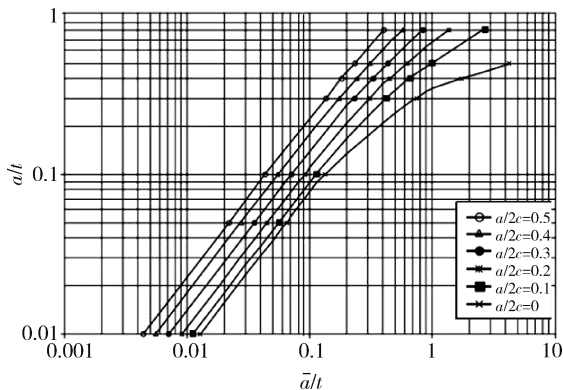


图 5 穿透裂纹尺寸与表面裂纹尺寸的关系

Fig.5 Relationship between through crack size and surface crack size

可知, 已知壁厚 t 的情况下, 通过在图中不同深长比 ($a/2c$) 的曲线上找点可以将穿透裂纹长度 \bar{a} 转换为不同深度 a 和长度 $2c$ 的表面裂纹。

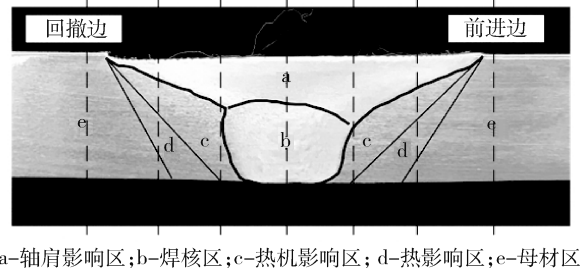
2 2219 铝合金搅拌摩擦焊结构 ECA 评定

2.1 评定参数的确定

在进行 ECA 评定之前需要通过试验的方法确定结构的性能参数, 包括: 非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 以及裂纹尖端张开位移 δ (Crack Tip Opening Displacement, CTOD)。

试验所用材料为 6 mm 厚的 2219 铝合金试板, 搅拌摩擦焊^[12] 采用的搅拌头轴肩直径为 24 mm, 探针直径为 6 mm, 长度 5.8 mm, 搅拌头转速为 800 r/min, 行进速度为 220 mm/min, 搅拌头倾角为 2° , 焊后热处理状态为 T6。

搅拌摩擦焊接头分为 5 个不同的微观组织区域: 焊核区 (NZ)、热机影响区 (TMAZ)、热影响区 (HAZ)、轴肩影响区 (SAZ) 和母材区 (BM), 如图 6 所示, 这 5 个区域的力学性能、组织形式各不相同, 纵横性能指标也不一致。搅拌摩擦焊工艺还存在焊接方向与搅拌头回转方向匹配问题, 每个接头都有一个前进边和一个回撤边, 焊缝两侧的力学性能也存在差异。



a-轴肩影响区; b-焊核区; c-热机影响区; d-热影响区; e-母材区

图 6 接头各区域 CTOD 试样取样位置

Fig.6 Sampling location of CTOD samples in different welded joint zones

通过室温拉伸试验测试 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头焊核区、纵向接头、横向接头及母材的屈服强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 。通过 CTOD 试验计算 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头各区域临界 CTOD 值 δ_c , 由于 SAZ 覆盖 NZ、TMAZ、HAZ, 试验时取 NZ、TMAZ、HAZ、BM 四个区域进行 CTOD 测试, 其中 TMAZ 与 HAZ 在前进边和回撤边分别试验, NZ、TMAZ 和 HAZ 在纵、横两方向分别测试, 纵向、横向接头示意图 7。CTOD 试样取样位置如图 6 中虚线所示, 试样制备、试验步骤参照文献 [13], CTOD 试验原理见图 8。

2219 铝合金搅拌摩擦焊接头拉伸试验结果见表 1, 临界 CTOD 平均值 δ_c 的计算结果见表 2。

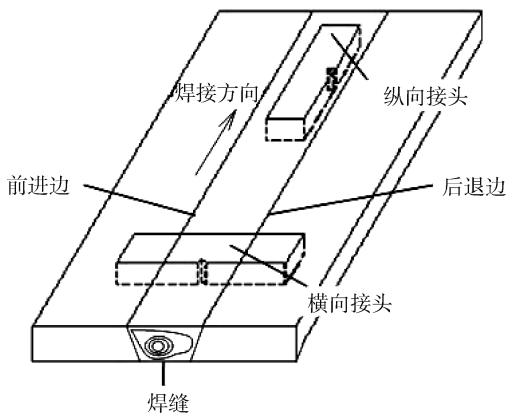


图7 纵向、横向接头示意图

Fig.7 Longitudinal and transverse joint

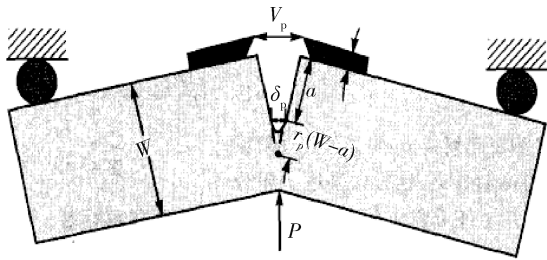


图8 CTOD 试验原理^[11]

Fig.8 CTOD test principle

表1 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头拉伸性能参数

Tab.1 Tensile property parameters of friction-stir-welded 2219 aluminum alloy

试验区域	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa
焊核	333	152
纵向接头	343	182
横向接头	343	191
母材	445	369

表2 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头 δ_c 值

Tab.2 The δ_c value of friction-stir-welded 2219 aluminum alloy

试验区域	δ_c (临界 CTOD 平均值)/mm
母材	0.0966
纵向 NZ	0.2264
纵向回撤边 TMAZ	0.2302
纵向前进边 TMAZ	0.2154
纵向回撤边 HAZ	0.1663
纵向前进边 HAZ	0.1436
横向 NZ	0.2109
横向前进边 TMAZ	0.2491
横向回撤边 TMAZ	0.2250

2.2 临界裂纹尺寸

2.2.1 临界裂纹尺寸计算方法

式(2)和式(3)中的载荷水平 $p_r (R/R_{p0.2})$ 是以宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2019年 第2期

$R_{p0.2}$ 作为参考,API 1104^[14]指出,对于承受一定塑性变形的结构,考虑应变强化现象,采用流变应力 R_f 作为载荷水平的参考,即 p_r 为结构设计应力 R 与流变应力 R_f 的比值 (R/R_f) ,因此结构受弹塑性断裂力学控制的临界裂纹尺寸与受净截面屈服控制的临界裂纹尺寸分别由式(5)与式(6)计算:

$$\bar{a} = \frac{\delta_c}{2\pi\varepsilon_y (\varepsilon/\varepsilon_y)^2} = \frac{E\delta_c}{2\pi R_f (p_r)^2} \quad (5)$$

$$\bar{a} = \left(1 - \frac{R}{R_{p0.2}}\right) \frac{W}{2} = (1 - p_r) \frac{W}{2} \quad (6)$$

$$R_f = \frac{1}{2}(R_{p0.2} + R_m) \quad (7)$$

对于贮箱等压力容器,通常以结构承受的内压 p 描述其实际工况,因此以结构承受的内压表示载荷水平,即:

$$p_r = p_a/p_f \quad (8)$$

式中, p_a, p_f 分别为与结构设计应力 R 及结构流变应力 R_f 所对应的内压力。

将贮箱筒段简化为薄壁圆筒,根据材料力学的相关知识,承受内压值为 p 的贮箱筒段,其纵焊缝截面上的周向正应力最大,以周向正应力 R_t 作为贮箱筒段承受的设计应力,由式(9)计算:

$$R_t = \frac{pD}{2t} \quad (9)$$

式中, p 为贮箱筒段承受内压; D 为贮箱筒段直径; t 为贮箱筒段壁厚。

2.2.2 临界裂纹尺寸计算

2219 铝合金的弹性模量 E 为 73 GPa^[15],根据拉伸试验得到的接头各区域 $R_{p0.2}$ 值及 CTOD 试验得到的各区域临界 CTOD 值 δ_c ,只考虑弹塑性断裂力学,将接头视为含有长度为 $2a$ 的中心裂纹的无限大平板,由式(2)确定各区域临界裂纹尺寸与应力的关系如图 9 所示。可以看出,应力一定时,纵向前进边 HAZ 的临界裂纹尺寸最小,为最危险区域。这里主要分析纵向前进边 HAZ 的缺陷容限,作为 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头的缺陷容限。对于有限板宽的结构则需要考虑净截面屈服的约束条件。

对于采用搅拌摩擦焊接工艺的贮箱筒段结构,设其直径 D 为 3 350 mm,长度 L 为 1 000 mm,壁厚 t 为 8 mm,其流变应力为:

$$R_f = \frac{1}{2}(R_{p0.2} + R_m) = \frac{1}{2}(343 + 182) = 262.5 \text{ (MPa)}$$

由式(9)可知,流变应力对应的内压力 p_f 为:

$$p_f = \frac{R_f \times 2t}{D} = \frac{(R_m + R_{p0.2})t}{D} = 1.254 \text{ (MPa)}$$

将贮箱筒段简化为宽为 1 000 mm 的平板,综合

考虑弹塑性断裂判据和净截面屈服判据,如图 10 所示,阴影区域为贮箱筒段结构的安全区。载荷水平 $p_r < 0.12$ 和 $p_r > 0.98$ 时结构的失效受净截面屈服判据控制,载荷水平 $0.12 < p_r < 0.98$ 时结构的失效受弹塑性断裂判据控制。

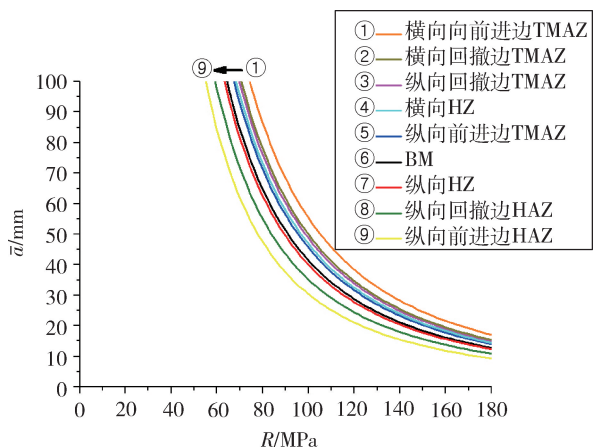


图 9 各区域临界裂纹尺寸与应力关系
Fig.9 Relationship between critical crack size and stress in different zones

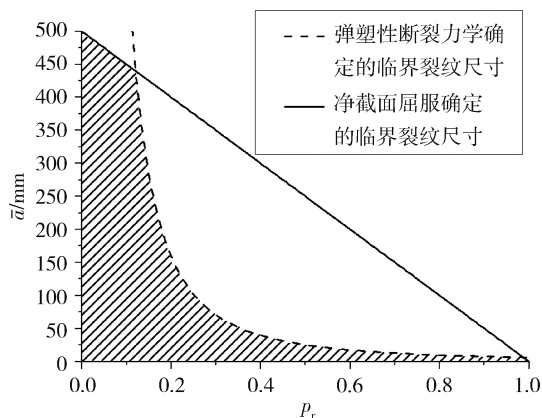


图 10 前进边 HAZ 临界裂纹尺寸与载荷水平关系
Fig.10 Relationship between critical crack size and stress level in advancing side HAZ

取载荷水平 p_r 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8,则由图 10 可知,结构的失效受弹塑性断裂判据控制,与板宽无关,由式(5)计算贮箱筒段的临界裂纹尺寸见表 3。

表 3 不同载荷水平下贮箱筒段的临界裂纹尺寸
Tab.3 Critical crack sizes of launch vehicle tank in different stress level

p_r	\bar{a} / mm	\bar{a} / t
0.2	158.97	19.87
0.4	21.77	4.97
0.6	17.66	2.21
0.8	9.94	1.24

2.3 表面缺陷容限

根据图 5 将临界裂纹尺寸转换为深长比 ($a/2c$) 分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 时的表面缺陷长度与深度。由于 BS 7910 中规定表面缺陷深度不超过壁厚的 80%,为提高评定的安全性,当 $a/t > 0.8$ 时,均以 0.8 作为相应的 a/t 值;表面缺陷深度不得超过 $a/2c = 0.5$ 时的缺陷深度值;表面缺陷长度不得超过 $a/2c = 0.1$ 时的缺陷长度值。最终得到了如图 11 中虚线所示的 4 种载荷水平下的 2219 铝合金搅拌摩擦焊结构缺陷容限,随着载荷水平的增大,表面缺陷深度临界尺寸没有明显变化,表面缺陷长度临界尺寸减小。参考美国石油协会标准 API 1104,缺陷深度不超过结构壁厚的 50%,缺陷长度不超过结构长度的 12.5%,确定了图 11 中的水平与竖直两条截止线,若由图(5)确定的表面缺陷容限于截止线之外,则以截止线作为最终缺陷容限;否则以由图(5)确定的表面缺陷容限作为结构的表面缺陷容限。

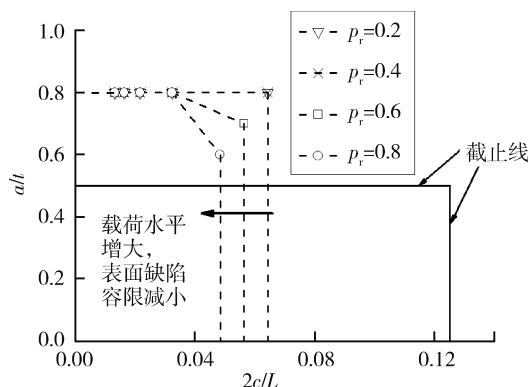


图 11 不同载荷水平下的贮箱筒段表面缺陷容限
Fig.11 Surface defect tolerances of launch vehicle tank in different stress level

若实际结构的表面缺陷尺寸对应的评定点在评定曲线之下,则缺陷可以接受,反之则判定失效;若评定点落在评定曲线上,则此时对应的尺寸为可以允许的缺陷极限尺寸。

实际 ECA 评定时,依据式(8)计算的载荷水平确定一条评定曲线。若载荷水平在图中没有标明,可以采用接近的评定曲线,或采用更高的载荷水平所对应的评定曲线。最后根据结构壁厚与长度可以将缺陷容限曲线确定。

设贮箱筒段的设计压力 p_a 为 0.5 MPa,存在长度为 30 mm,深度为 2 mm 的表面缺陷,则评定曲线的载荷水平 p_r 为: $p_r = p_a / p_f = 0.5 / 1.254 = 0.399$ 。

依据前述 2219 铝合金搅拌摩擦焊结构 ECA 评定方法,采用相近的较高载荷水平曲线,即载荷水平为 0.4,得到图 12 中初始评定线。由于焊接缺陷在检测时存在误差,参考 API 1104 中对缺陷容限修正的

方法,通常在缺陷容限的深度方向减少一定的尺寸,深度修正值为无损检测时的最大误差,视具体的无损检测方法而定,若无具体要求,可采用 0.25 mm 作为修正值,得到图 12 中的修正评定线。同时考虑到 API 1104 中规定的缺陷深度不超过结构壁厚的 50%,缺陷长度不超过结构长度的 12.5%,取较小值得到图 12 中所示的最终评定线。从图中可以看出,给定的缺陷尺寸对应的评定点 M 位于曲线所围成的区域内,因此该缺陷可以接受。

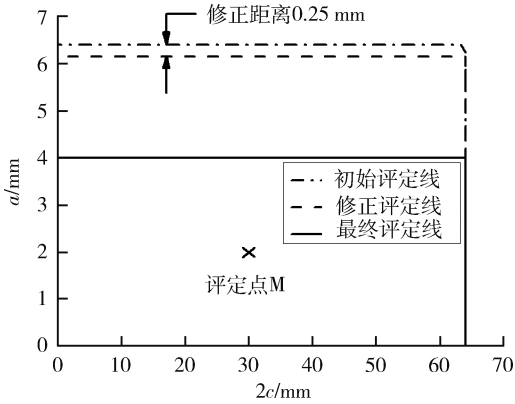


图 12 搅拌摩擦焊结构表面缺陷容限 ($p_a=0.5$ MPa)

Fig.12 Surface defect tolerances of FSW structure ($p_a=0.5$ MPa)

3 结论

(1)对 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头各区域的临界裂纹尺寸进行分析,研究表明,相同应力水平下,纵向前进边热影响区的临界裂纹尺寸最小,是 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头断裂控制的关键区域。

(2)依据 BS 7910 给出的临界穿透裂纹尺寸与表面缺陷尺寸的关系曲线,以 2219 铝合金贮箱筒段搅拌摩擦焊纵缝为例,确定了不同载荷水平下的表面缺陷容限;给出了内压为 0.5 MPa 条件下贮箱筒段的表面缺陷容限,评定结果表明长度为 30 mm,深度为 2 mm 的表面缺陷可以接受。

参考文献

[1] 尹旭妮,湛利华,赵俊.2219 铝合金稳态蠕变本构方

程的建立[J].中国有色金属学报,2014,24(09):2250-2256.

[2] 王祝堂.长征五号火箭燃料箱铝合金打造[J].有色金属加工,2017,46(02):6-9.

[3] ZHENLEI LIU, YUE WANG, SHUDE JI, et al. Effect of intense cooling on microstructure and properties of friction-stir-welded Ti-6Al-4V alloy[J].Materials Science and Technology, 2017,34(02),209-219.

[4] 郝云飞,王国庆,周庆,等.运载火箭铝合金贮箱全搅拌摩擦焊接工艺及应用[J].宇航材料工艺,2016,46(06):11-20.

[5] MILNE I, AINSWORTH R A, DOWLING A R, et al. Assessment of the integrity of structures containing defects[J].International Journal of Pressure vessels and Piping, 1988,32:3-104.

[6] Structure integrity assessment procedure for european industry project BE 95-1426[S]. SINTAP. 1999.

[7] Recommended practice for fitness-for-service[S].API Standard 579-1/ASMEFFS-1.API, Washington D C:2016.

[8] Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures[S]. British Standard BS 7910-2013.London:BSI,2013.

[9] 张彦华.焊接强度分析[M].西安:西安工业大学出版社,2011.

[10] WELLS A A.Applications of fracture mechanics at/and beyond general yielding[J].British Welding Journal, 1963, 10: 563-570.

[11] 张彦华.焊接结构原理[M].北京:北京航空航天大学出版社,2011.

[12] HUANG Y X, MENG X C, ZHANG YB, et al. Micro friction stir welding of ultra-thin Al-6061 sheets[J].Journal of Materials Processing Technology, 2017,250:313-319.

[13] 杜岩峰,田志杰,王一,等.2219 铝合金搅拌摩擦焊接头裂纹尖端张开位移(CTOD)试验研究[J].北京工业大学学报,2011,37(09):1287-1291.

[14] Welding of pipelines and related facilities[S]. API Standard 1104-2013.Washington D C: API, 2013.

[15] 刘燕.贮箱用 2219 铝合金热处理工艺的研究[D].天津大学,2014.