

导弹推进剂贮箱结构强度及剩余寿命实验研究

刘国庆¹ 常新龙² 张晓军²

(1 西北工业大学航天学院,西安 710072)

(2 第二炮兵工程学院,西安 710025)

文 摘 用三点弯曲多试样方法对导弹推进剂贮箱主要材料 LD10 铝合金及其焊件的断裂韧性和疲劳性能进行了实验研究,得到了材料母材、热影响区和焊缝的断裂韧性 J_{IC} 和疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的规律。结合无损检测信息可以对导弹推进剂贮箱进行安全性评定和剩余寿命评估。

关键词 三点弯曲, J 积分, 剩余寿命, 断裂韧度, 裂纹扩展速率

Experimental Study of Structural Strength and Residual Life for Missile Propellant Tanks

Liu Guoqing¹ Chang Xinlong² Zhang Xiaojun²

(1 Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072)

(2 The Second Artillery Engineering Coll., Xi'an 710025)

Abstract Experimental study on fracture toughness and fatigue performance of aluminum alloy LD10 and its welds is performed by using three point bend multi-specimens. The fracture toughness J_{IC} and fatigue crack propagation law da/dN for the matrix material, the heat affected zone and the welds are obtained. Safety evaluating and residual life estimating of missile propellant tanks can be carried out with these data coupling with non-destructive testing information.

Key words Three point bend, J -Integral, Residual life, Fracture toughness, Crack propagation rate

1 引言

推进剂贮箱是液体导弹的重要部件,对整弹的可靠性有重要影响。作为一种大型焊接压力容器,由于材料或焊接缺陷以及在贮存中意外损伤,会因此产生裂纹。实验和现场数据表明,贮箱失效模式主要是低应力下的脆断,裂纹是失效的主要原因。因此无论是设计制造中的质量控制,还是使用过程中的安全监督,都必须针对结构缺陷建立安全评定标准 J_{IC} 准则。另一方面考虑到现役贮箱的使用状况和服役年限的要求,还要研究裂纹疲劳扩展速率,计算结构剩余寿命。LD10 铝合金是某型号导弹推进剂贮箱的主要材料,按照贮箱的焊接工艺焊接试板,然后制取三点弯曲试样,裂纹由线切割而成,分别在母材、焊缝及热影响区测定了断裂韧度 J_{IC} 和裂纹扩展速率 da/dN ,对导弹推进剂贮箱进行结构强度和剩余寿命的实验研究。

2 基本原理

2.1 结构安全评定理论

结构安全评定的一般方法是通过无损探伤检测

出裂纹位置、大小和形状,对结构进行受力分析,并结合裂纹的具体信息计算出材料的断裂因子,然后与通过试验测得的材料断裂韧度比较。 J 积分表征了材料对裂纹萌生过程的阻力,是材料在裂纹开始扩展时吸收能量的临界值。它的最大特点在于:无论裂纹附近材料是弹性状态还是发生大范围的塑性变形,都能准确表征裂纹扩展行为^[1-2]。一般地

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (1)$$

式中, W 为应变能密度, Γ 是由裂纹自由表面任一点开始,逆时针方向环绕裂纹尖端地区,终止于裂纹另一边自由表面上一点的任意积分回路, T 是沿积分回路 Γ 的张力, u 为积分回路上的位移^[3-4]。

对于三点弯曲试样

$$\begin{cases} J_e = \frac{1-\nu^2}{E} \left[\frac{F_e S}{BW^{2/3}} \cdot f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \\ J_p = \frac{2U_p}{Bb_0} \end{cases} \quad (2)$$

式中, J_e 、 J_p 分别是 J 积分的弹性和塑性部分, ν 为泊

收稿日期:2006-07-03;修回日期:2006-08-14

作者简介:刘国庆,1963年出生,副教授,主要从事航空及宇航推进理论与工程方面的研究工作

松比, E 为弹性模量, B 、 W 分别是试件的厚度和宽度, a_0 为初始裂纹的平均长度, b_0 为初始韧带宽度, S 为弯曲试样加载跨距, $f(\frac{a_0}{W})$ 为材料函数, F_p 、 U_p 分别为 P - Δ 曲线的最大加载载荷和塑性吸收能。

2.2 剩余寿命预估原理

一般地认为裂纹扩展速率 da/dN 为 ΔK 的函数^[6], 即:
$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (3)$$

式中, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ 。Paris 等建议用幂函数表示

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{BW^{1/2}} \cdot \frac{6\alpha^{1/2}}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} [1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)] \quad (6)$$

式中, B 、 W 分别是试件的厚度和宽度, 系数 $\alpha = a/W$, a 为裂纹扩展长度。

3 实验

3.1 材料

LD10 铝合金板材, 淬火状态; 焊丝为 BJ380A 硅铝合金, 硬状态, 直径为 2.5 mm。按照装备的焊接工艺焊接, 焊接坡口为 V 型, 焊口宽度为 20 mm 左右。

3.1.1 材料的理化性能

材料的化学成分和力学性能见表 1 和表 2。

表 1 材料的化学成分

材料	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Ti	其他
LD10	4.2	0.6	0.8	0.7	0.8	0.3	0.1	0.15	0.15
BJ380A	1.8	0.05	0.05	0.3	5.0	0.1	0	0.15	0.15

表 2 LD10 的力学性能

σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	μ	ρ /g·cm ⁻³	E /GPa
451	392	8	0.31	2.8	7.0

3.1.2 试样的尺寸和数量

试样的宽、高和跨度之比为 $W/B=2$, $S/W=4$, 初始无量纲裂纹长度 a_0/W 取 0.6。

母材: $B=13.2$ mm, $W=26.4$ mm, $S=105.6$ mm, 试样总长度 $L=120$ mm。裂纹开在试样中心。

焊缝区: $B=10$ mm, $W=20$ mm, $S=80$ mm, $L=100$ mm。裂纹沿焊缝开在较窄焊缝一面中心。

热影响区: $B=10$ mm, $W=20$ mm, $S=80$ mm, $L=100$ mm。裂纹沿焊缝开在紧靠焊缝较宽一面外侧。

试验采用多试样法, 母材、焊缝区、热影响区每组预备断裂韧性试样 10 个, 疲劳裂纹扩展速率试样 3 个。

3.2 断裂韧性测试试验

J 积分试验按 GB/T 2038—1991《金属材料延性断裂韧性 J_{IC} 试验方法》, 在英国制造的 20 t INSTRON1342 型材料试验机上进行, 加载速率为 0.5 mm/min。对试样进行二次疲劳加载, 以区分试样中

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (4)$$

式中, C 、 n 分别是材料常数。积分(4)式得剩余疲劳寿命

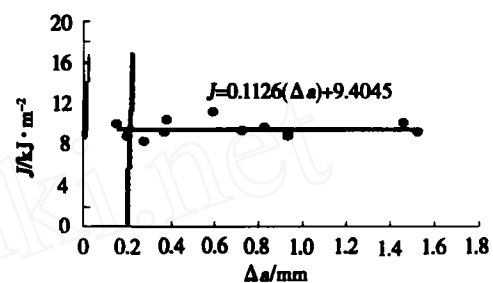
$$N_c = \int_0^N dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K)^n} = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta\sigma)^n (Ma)^{n/2}} \quad (5)$$

式中, $\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{Ma}$, M 为几何因子, a_0 、 a_c 分别是初始裂纹、临界裂纹长度, N_c 为循环周次, 即剩余疲劳寿命。

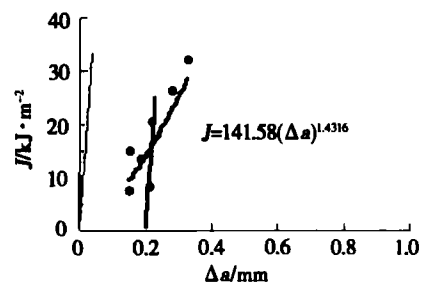
对于三点弯曲 $SE(B)$ 试样(跨距 S 取 $4W$)有^[5]

的稳定裂纹扩展量 Δa 。

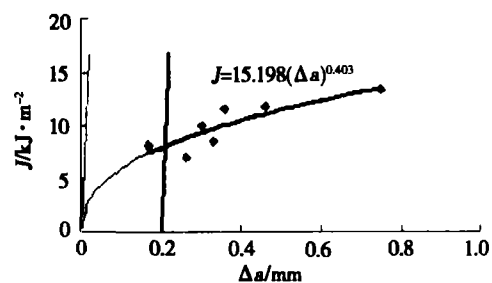
根据原始记录数据, 计算 Δa 和 J 积分。根据经验公式 $J = c_1 \Delta a^2$ 拟合 J 幂乘回归线(图 1), 幂乘回归线与 $\Delta a = 0.20$ mm 偏置线的交点即要测的 J_{IC} 。



(a) 母材



(b) 热影响区



(c) 焊缝

图 1 母材、热影响区及焊缝的 J 积分曲线
Fig. 1 J -integral curves of matrix material, heat affected zone and welds

3.3 裂纹扩展速率试验

试验按 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》, 在 10 t INSTRON1341 材料试验机上进行。加载波形为正弦波, 频率为 25 Hz。取应力

比 $R = P_{\max}/P_{\min} = 0.1$ 。

根据实验记录的数据作出 $a-N$ 曲线,然后用割线法计算裂纹扩展速率

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\bar{a}} = (a_{i+1} - a_i) / (N_{i+1} - N_i) \quad (7)$$

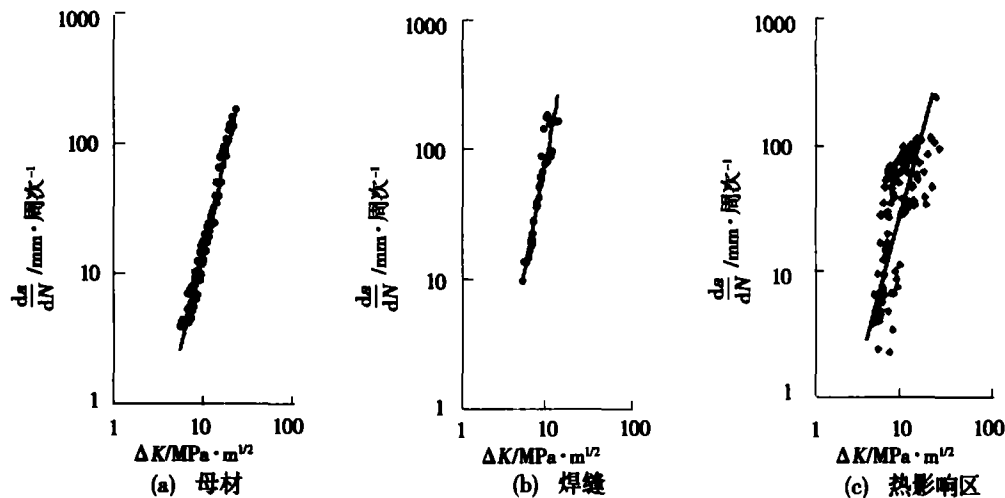


图2 母材、焊缝及热影响区的 $da/dN-\Delta K$ 曲线

Fig. 2 $da/dN-\Delta K$ curves of matrix material, welds and heat affected zone

4 结果与讨论

(1)由实验数据图1~图2关系,可以得到贮箱板材及焊件的断裂韧性 J_{IC} 和裂纹扩展速率 da/dN , 其结果如下:

LD10 母材的断裂韧性: $J = 0.1126(\Delta a) + 9.4045$, J_{IC} 的值 $J_0 = 9.4045 \text{ kJ/m}^2$; LD10 焊缝的断裂韧性 $J = 15.198(\Delta a)^{0.403}$; J_{IC} 的值 $J_0 = 8.0968 \text{ kJ/m}^2$; LD10 热影响区的断裂韧性: $J = 141.58(\Delta a)^{1.4314}$, J_{IC} 的值 $J_0 = 16.110 \text{ kJ/m}^2$; LD10 母材的裂纹扩展速率: $da/dN = 2 \times 10^{-8}(\Delta K)^{2.9149}$; LD10 焊缝的裂纹扩展速率 $da/dN = 4 \times 10^{-8}(\Delta K)^{3.4430}$; LD10 热影响区的裂纹扩展速率 $da/dN = 1 \times 10^{-8}(\Delta K)^{4.1174}$ 。

(2)LD10 母材的 J 阻力曲线基本上是一条水平线,说明母材材质均一,延展性好;热影响区的试样裂纹顶端发生了大范围的钝化,抗撕裂能力极好,断裂韧度 J_{IC} 是母材的 1.7 倍,这是因为焊接中热的影响,使材料结构发生变化;由于焊接过程中不可避免的存在缺陷,故焊缝的断裂韧性比母材要低。在测量裂纹和观察金相组织时发现焊缝中有杂质和气孔,就说明了这一点。

(3)LD10 母材和焊缝的疲劳裂纹扩展速率重合性很好,几乎在一条直线上;而热影响区试样的疲劳裂纹扩展速率的分散性很大。这是由于焊接过程中的热影响,改变了材料内部结构,使试样裂纹顶端发生了大范围的钝化,抗撕裂能力极好;同时焊接坡口是 V 型,热影响区实际上是母材、母材与热影响区过渡区和热影响区的混合区域,材料的混合组织对疲劳

式中, $\bar{a} = (a_{i+1} - a_i)/2$, 这样得到每一个 a 值对应的 $(\Delta K, da/dN)$ 值。在双对数坐标中拟合 $da/dN-\Delta K$ 曲线,其中 ΔK 由 $\bar{a} = (a_{i+1} - a_i)/2$ 代替式(6)中 a 求得。拟合后结果如图 2 所示。

裂纹扩展速率的影响很大。

5 结论

(1)推进剂贮箱的断裂、疲劳性能的最弱部位是焊缝区,且缺陷也多发生在此,而热影响区,由于焊接过程中的热影响,甚至比母材的性能都要好。因此,要改善结构的性能提高可靠性,就必须改善焊缝的组织,严格按照结构焊接工艺质量提检单上所规定的工艺流程进行,提高断裂疲劳性能,减少缺陷发生的机会。

(2)利用本文的实验结果,结合无损检测信息和导弹监测数据可以对导弹推进剂贮箱进行安全性评定和剩余寿命评估。

参考文献

- 1 杨立强,苗张木. J 和 CTOD 评价公式的试验比较. 武汉化工学院学报, 2004; 26(1): 36~41
- 2 耿平,曾梅光. 三点弯曲单试样测定高强高韧钢断裂韧度的柔度方法. 东北大学学报, 1997; 18(5): 561~564
- 3 褚武扬,林实. 断裂韧性测试. 北京: 科学出版社, 1979
- 4 GB/T 2038—1991, 金属材料延性断裂韧度试验方法
- 5 GB/T 6398—2000, 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法
- 6 刘宝琛. 实验断裂力学、损伤力学测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 7 袁杰红,唐国金. 断裂力学在推进剂贮箱安全评定中的应用. 强度与环境, 1999; (1): 30~36.

(编辑 吴坚)