

文章编号:1674-8190(2015)01-052-07

含裂纹铝合金薄板的断裂韧度与剩余强度研究

樊振兴, 李亚智, 王亚星, 姜薇

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 为了探究影响含裂纹铝合金薄板材料断裂韧度、剩余强度的几何因素以及韧性材料的断裂机理, 对典型航空铝合金 2524-T3 薄板, 采用不同宽度、不同初始裂纹长度的中心裂纹板试样进行试验, 测定材料的 $K-R$ 阻力曲线, 确定平面应力断裂韧度 K_c 和表观断裂韧度 K_{app} 。试验结果表明: 对于薄板结构, $K-R$ 阻力曲线与板宽相关; 试件宽度、初始裂纹长度对断裂韧度和表观断裂韧度的确定都有影响, 且板宽度的影响较大。基于上述结论, 推荐两种可同时反映韧性材料断裂中的净截面屈服效应和韧性撕裂过程的剩余强度预测方法。

关键词: 含裂纹铝合金薄板; $K-R$ 阻力曲线; 断裂韧度; 剩余强度

中图分类号: V215.6; O346.1

文献标识码: A

Study on Fracture Toughness and Residual Strength of Aluminum Alloy Thin Sheet with Crack

Fan Zhenxing, Li Yazhi, Wang Yaxing, Jiang Wei

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to study the geometric factors affecting the fracture toughness and residual strength of thin sheet structures with crack and the fracture mechanism of ductile material, an experiment is conducted to obtain $K-R$ resistance curves for a typical type of aviation materials, 2524-T3 aluminum alloy sheet, using middle crack tension specimen with different width and initial crack length, and hence determine the plane stress fracture toughness K_c and apparent fracture toughness K_{app} . The testing and analysis results indicate that the $K-R$ resistance curves highly relevant to specimens' width but less to the initial crack length. The fracture toughness and apparent fracture toughness are affected apparently by both the specimen width and the initial crack length. Two models for the residual strength prediction of thin sheet structures are proposed. Both can exhibit the features of net-section yielding and stable ductile tearing during the fracture of ductile metals.

Key words: aluminum alloy sheet with the crack; $K-R$ resistance curve; fracture toughness; residual strength

0 引言

平面应力断裂韧度用于描述薄板材料抵抗裂纹扩展的能力。通常用来表征薄板断裂韧度的参数有应力强度因子 K 、能量释放率 G 、 J 积分、裂纹尖端张开位移 $CTOD$ 和裂纹尖端张开角 $CTOA$ 。针对不同参数的测量, 形成了一系列测试标准, 一些学者进行了相关研究^[1-5]。在工业领域, 特别是

航空航天行业, 广泛采用基于线弹性断裂力学的 $K-R$ 阻力曲线作为确定材料平面应力断裂韧度 K_c 和结构剩余强度的基础。对于确定材料, 使用不同试件形式获得的 $K-R$ 阻力曲线相似, 因此将 $K-R$ 阻力曲线看作独立于试件内几何尺寸与试件类型的材料属性, 只关心材料厚度与测试温度的影响。为了尽可能保证小范围屈服条件, 进行 $K-R$ 阻力曲线测试时通常采用大型宽板试样^[6]。出于试验成本和试验条件等因素的考虑, 有必要研究小板宽条件下 $K-R$ 阻力曲线、断裂韧度与其在近似无限板宽条件下的值的关系。杨继运等^[7-8]对 $K-R$ 阻力曲线进行数学表达, 得出阻抗应力强度因子只

收稿日期: 2014-03-25; 修回日期: 2014-05-17

通信作者: 樊振兴, fanzxwy@163.com

与裂纹扩展量有关而与初始裂纹长度无关的结论,并探究了裂纹扩展阻力曲线与试样厚度、剩余强度的关系。刘秀丽等^[9-10]分别使用不同方法测定多种材料平面应力状态下的 $K-R$ 阻力曲线和断裂韧度 K_0 。Zhu Xiankui 等^[11]参考线弹性和弹塑性断裂力学对金属材料断裂韧性测试、实验评价、测试方法和标准做了系统性的技术总结。

本文针对典型航空铝合金 2524-T3 薄板进行 $K-R$ 阻力曲线与断裂韧度 K_0 的测定,讨论影响 $K-R$ 阻力曲线和 K_0 的几何因素。同时,探究韧性材料的断裂机理,研究有限宽试验件断裂过程中线弹性断裂力学模式和静力学破坏模式的作用机制,并以此为基础,探讨薄板结构剩余强度的估算方法。

1 基于小板宽的 $K-R$ 阻力曲线与断裂韧度的测定

试验材料为 2524-T3 铝合金,其厚度为 1.6 mm,取向为 $L-T$,弹性模量(E)为 65 GPa,屈服强度($\sigma_{0.2}$)为 307 MPa,拉伸强度(σ_b)为 435 MPa。

$K-R$ 阻力曲线试件类型为 M(T),尺寸设计依据标准 ASTM E561-10^[12],试件几何构型和名义尺寸分别如图 1 和表 1 所示。

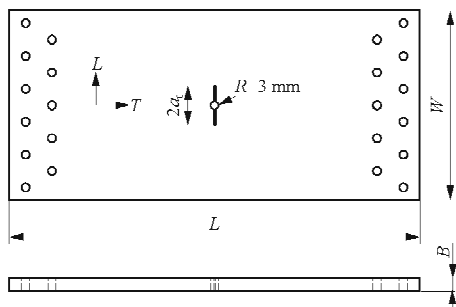


图 1 试件几何形状示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the specimen geometry

表 1 试件名义尺寸

Table 1 Nominal size of the specimens

宽度(W)/ mm	长度(L)/ mm	总数量/件	相对初始裂纹		
			$(\frac{2a_0}{W})$		
100	312	13	0.25	0.35	0.50
144	312	12	0.25	0.35	0.50
197	312	12	0.25	0.35	0.50
400	688	2	0.315		

应力强度因子的一般表达式为

$$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \tag{1}$$

式中: σ 为远场应力; a 为裂纹长度; β 为几何修正因子(无量纲应力强度因子)。

对于 M(T)试件:

$$\sigma = \frac{P}{WB}, \beta = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{W}} \tag{2}$$

式中: P 为作用载荷; W 为板宽; B 为板厚; a 为半裂纹长度。

不同宽度试件先于中部用铅丝切割狭窄缝,再经过疲劳预裂形成理想裂纹并达到指定长度,然后进行恒位移速率下的拉伸。试件的预裂及静力拉伸均在 MTS Teststar ± 100 kN 电液伺服疲劳试验机上完成。试件加载连接情况如图 2 所示,安装防翘曲装置以防止试件在加载中发生翘曲变形。

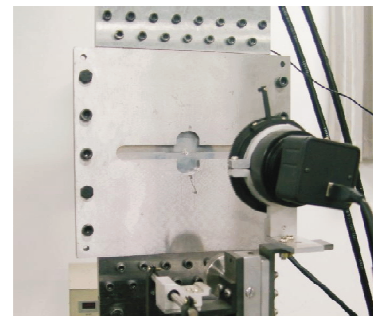


图 2 防翘曲装置及加载形式

Fig. 2 Specimen with loading fixture and anti-buckling fitting

静拉伸之前在裂纹中心孔安装裂纹张开位移计,利用 DH3820 高速静态应变数据采集仪同步记录试件轴向拉伸载荷 P 与裂纹张开位移 V 。典型的 $P-V$ 曲线如图 3 所示(试件号为 W100_01,试件宽度为 100 mm,名义初始裂纹长度($2a_0$)为 25 mm,即 0.25 W)。

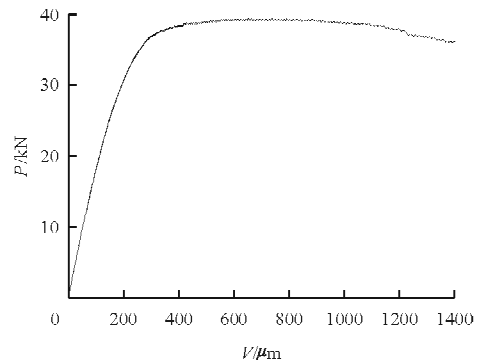


图 3 典型 $P-V$ 曲线

Fig. 3 Typical $P-V$ curve

确定 K - R 阻力曲线需要计算一系列裂纹长度下的应力强度因子 K 值。通过 P - V 曲线上每一点的割线斜率计算裂纹长度的公式(柔度法)^[12]为

$$X_i = 1 - \exp\left\{\frac{-\sqrt{[E_{\text{eff}}B(\Delta V_i/\Delta P_i)]^2 - (2Y/W)^2}}{2.141}\right\} \quad (3)$$

$$\frac{2a_i}{W} = 1.2235X_i - 0.699032X_i^2 + 3.25584X_i^3 - 6.65042X_i^4 + 5.54X_i^5 - 1.66989X_i^6 \quad (4)$$

式中: P 为载荷; W 为板宽; B 为板厚; a_i 为有效裂纹尺寸; E_{eff} 为有效弹性模量; $\Delta V/\Delta P$ 为试件柔度(裂纹张开位移 $CMOD$ 与载荷变化量的比值); Y 为引伸计半跨距。

通过式(3)~式(4)可以将 P - V 曲线上每一点(V_i, P_i)转换为(a_i, P_i),再代入式(1)即可确定每一点对应的 K_R 值。然后对得到的(a_i, K_R)数据利用关系式 $K_R = e^{\alpha(\Delta a + C_0)^{\beta}}$ 进行数值拟合。

外加荷载 P 作用下,裂纹尖端的应力强度因子 K 称为裂纹扩展“动力”,可由式(1)确定。通过拟合曲线,分别绘制关于裂纹的 K - R 阻力曲线与 K 动力曲线。在临界载荷 P_c 下, K 曲线与 K - R 曲线相切,如图4所示。

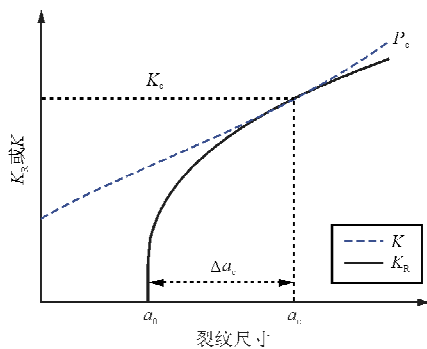


图4 典型 K - R 阻力曲线与 K 曲线
Fig. 4 Typical K - R curve and K curve

在切点之后裂纹会发生失稳扩展:

$$K \geq K_R \quad (5)$$

$$\frac{\partial K}{\partial a} \geq \frac{\partial K_R}{\partial a} \quad (6)$$

K 曲线与 K - R 曲线的切点所对应的裂尖应力强度因子,称为材料的断裂韧度(K_c),确定 K_c 的公式为

$$K_c = \frac{P_c}{WB} \sqrt{\pi a_c \cos\left(\frac{\pi a_c}{W}\right)} \quad (7)$$

式中: a_c 为失稳断裂时的临界裂纹长度。

工程上常采用裂纹稳定扩展的起始长度 a_0 和其对应的失稳临界载荷 P_c 来计算断裂韧度,称为表观断裂韧度(K_{app}),表示介于裂纹扩展起始和快速断裂之间的断裂韧度值,其计算公式为

$$K_{\text{app}} = \frac{P_c}{WB} \sqrt{\pi a_0 \sec\left(\frac{\pi a_0}{W}\right)} \quad (8)$$

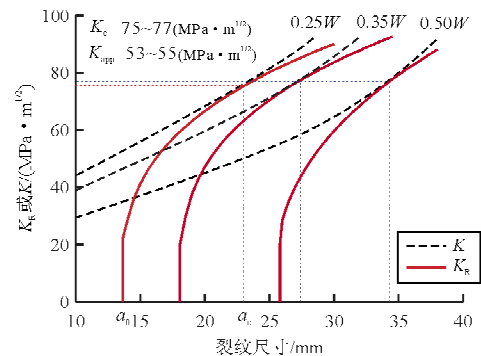
试验数据的有效性判断准则^[12]为任意时刻的净截面平均应力不得超过材料的屈服强度,即必须满足

$$R_v = \frac{\sigma_{\text{net}}}{\sigma_{ys}} = \frac{P_i}{\sigma_{ys} \cdot B(W - 2a_i)} \leq 1 \quad (9)$$

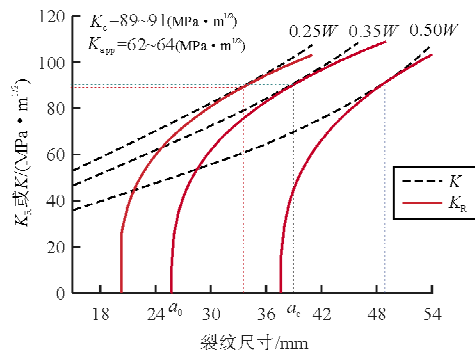
式中: σ_{net} 为任意时刻的净截面平均应力; σ_{ys} 为材料屈服强度; P_i 为任意时刻加载端作用力; a_i 为有效裂纹尺寸 a_e 与裂纹尖端塑性区 r_y 的差值,即物理裂纹长度 a_p 。

利用该判据对本文的试验数据进行有效性判断,大量数据被过滤掉,仅留下很小一部分。用过滤后的数据进行拟合,发现阻力曲线与动力曲线不存在切点,反映出目前的测试标准存在缺陷。为此,将式(9)中的屈服强度 σ_{ys} 变更为屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 与破坏应力 σ_b 的算数平均值,再进行数据拟合,将 K - R 曲线适当延伸,得到比较理想的结果。

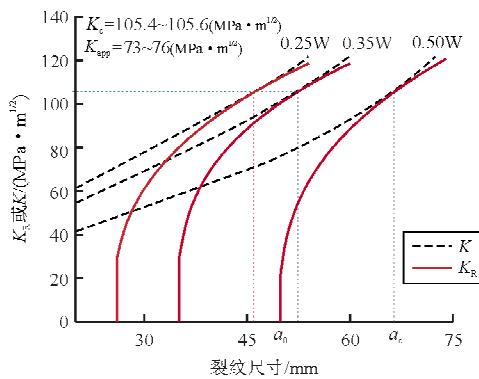
对同种宽度、不同初始裂纹长度试件绘制 K - R 阻力曲线以及与之相切的 K (动力)曲线如图5所示。



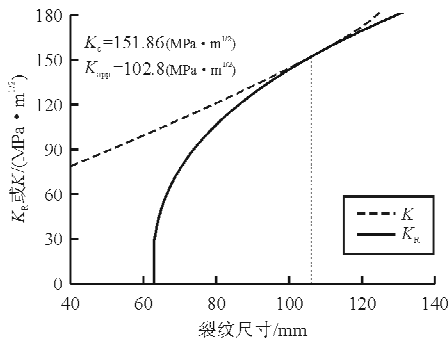
(a) 初始裂纹长度为 100 mm



(b) 初始裂纹长度为 144 mm



(c) 初始裂纹长度为 197 mm



(d) 初始裂纹长度为 400 mm

图 5 不同初始裂纹长度 K-R 阻力曲线与 K 曲线

Fig. 5 K-R resistance curve and K curve of different initial crack length

从图 5 可以看出:(1)同种宽度情况下,不同初始裂纹长度 a_0 对应的 K-R 阻力曲线非常相似,但对应的断裂韧度(包括 K_c 和 K_{app})有一定差异;(2)试件宽度不同时, K_c 值差异明显,并且随着试件宽度的增加, K_c 值增大。即试件宽度、初始裂纹长度对断裂韧度和表观断裂韧度的确定都有影响,且板宽度影响较大。

通过有限宽板试验测定的断裂韧度和表观断裂韧度是在给定宽度和给定初始裂纹长度下的条件值,称为“条件”断裂韧度,即

$$\begin{cases} K_c = K_c(W) \\ K_{app} = K_{app}(W) \end{cases} \quad (10)$$

粗略计算中,可以认为 K-R 阻力曲线和断裂韧度值对 a_0 不敏感,对于同种宽度试件只需拟合一条 K-R 阻力曲线。拟合曲线参数值与断裂韧度结果如表 2 所示。

表 2 拟合曲线参数值与断裂韧度结果

Table 2 Parameter values of fitting curve and fracture toughness results

W/mm	α	C_0	γ	$K_c / (MPa\sqrt{m})$	$K_{app} / (MPa\sqrt{m})$
100	3.621	0.175	0.321	75.77	54.5
144	3.642	0.057	0.330	89.75	63.6
197	3.616	0.466	0.359	106.36	75.3
400	3.669	0.603	0.356	151.86	102.0

从表 2 可以看出,随着试件宽度的增加, K_c 值逐渐增大。

不同宽度下的 K-R 阻力曲线如图 6 所示。

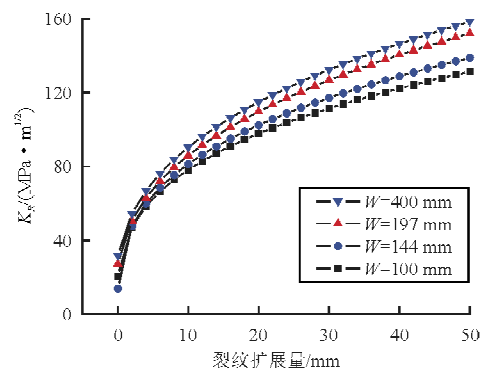


图 6 四种宽度情况下的 K-R 阻力曲线

Fig. 6 K-R resistance curve of four width cases

从图 6 可以看出,不同宽度试件其 K-R 阻力曲线明显不同,对于相同的裂纹扩展量,随着试件宽度增加,裂纹扩展阻力增大。

I. S. Yablonskii^[18] 讨论了几种铝合金材料的试件宽度与断裂韧度 K_c 的关系,如图 7 所示,离散点为试验值,曲线为理论值。

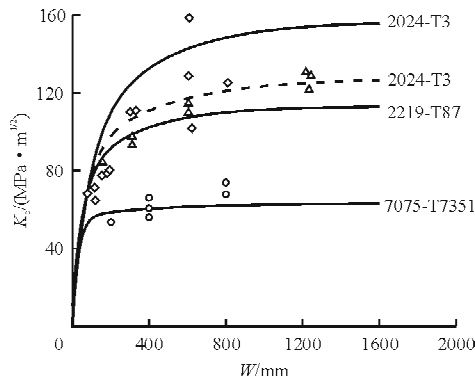


图7 断裂韧度试验值与试件宽度关系

Fig. 7 The test results of K_c vs. specimen width

从图7可以看出, K_c 随试件宽度增加而提高, 最后趋于恒定, 此时的 $K_c = K_c^*$, 是不随宽度变化的理想值。

指数衰减函数模型能够很好地反映上述变化趋势, 因此选用指数衰减函数对试验测得的四种不同宽度下的断裂韧度数据(如表2所示)进行拟合, 分别得到 $K_c(W)$ 、 $K_{app}(W)$ 与试件宽度的近似关系为

$$K_c(W) = -194.53 \times e^{-W/443.484} + 230.8 \quad (11)$$

$$K_{app}(W) = 132.7 \times (1 - 0.809 \times e^{-W/318}) \quad (12)$$

式中: W 的单位为 mm; K_c 、 K_{app} 的单位为 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$; 理想 K_c 的近似值为 $230.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; 理想 K_{app} 的近似值为 $132.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

式(11)~式(12)的对应曲线如图8所示。

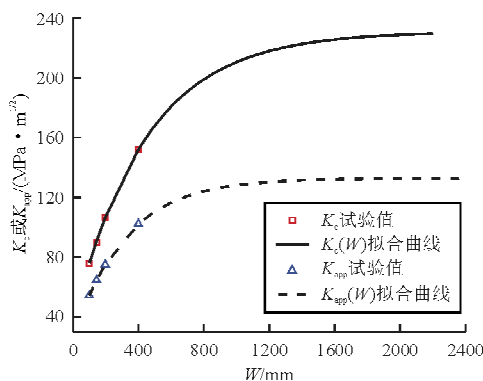


图8 (表观)断裂韧度与试件宽度的关系

Fig. 8 The relationship between (apparent) fracture toughness and specimen width

若要直接测定理想的断裂韧度值, 为了满足小范围屈服条件, 需要很大的试件宽度, 这给试验增

加了难度。可以利用不同较小板宽下测定的条件断裂韧度, 进行拟合外推, 近似得到断裂韧度的理想值。这样既可降低试验成本, 又节省了人力物力。

2 剩余强度分析方法探讨

金属结构断裂是断裂力学模式和静力学模式相互竞争或融合的结果。在断裂力学模式的断裂预测中, 线弹性断裂准则基于断裂韧度 K_c (即临界应力强度因子), 适用于脆性断裂过程; 韧性断裂过程则适用弹塑性断裂准则, 例如 $CTOD$ 准则和 $CTOA$ 准则等。工程上常将线弹性断裂准则进行修正, 用于韧性金属结构的剩余强度预估, 即采用基于表观断裂韧度 K_{app} 的断裂准则估算结构剩余强度应力 σ_{rs} :

$$\sigma_{rs} = \sigma_c = \frac{P_c}{WB} = \frac{K_{app}}{\sqrt{\pi a_0} \beta_0} \quad (13)$$

式中: σ_c 为断裂临界应力; β_0 为对应初始裂纹 a_0 的形状修正因子, 对于中心裂纹试件, $\beta_0 = \sqrt{\sec \frac{\pi a_0}{W}}$ 。

表观断裂韧度的测定隐含了材料的韧性撕裂过程。通常将在某种宽度下测得的 K_{app} 作为材料常数^[14]用于剩余强度分析。而实际上, K_{app} 的大小强烈依赖于板宽, 只有当试件宽度增大到使裂纹尖端小范围屈服严格成立时, K_{app} 才趋于理想值 K_{app}^* 。

因此, 建议采用考虑宽度影响的表观断裂韧度准则来预测剩余强度, 即

$$\sigma_{rs} = \sigma_c = \frac{f(W) K_{app}^*}{\sqrt{\pi a_0} \beta_0} \quad (14)$$

式中: $f(W)$ 为宽度修正因子; 对 1.6 mm 厚的 2524-T3 铝合金板, $f(W) = 1 - 0.809 \times e^{-W/317.66}$; $K_{app}^* = 132.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

结构的静力学模式破坏即净截面屈服破坏。传统的净截面屈服准则认为, 当含裂纹截面的净截面平均应力水平达到材料的屈服强度时结构失效, 以 M(T) 试件为例, 失效载荷(剩余强度)与屈服强度、试件宽度 (W) 和初始裂纹尺寸 (a_0) 有关:

$$\sigma_{rs} = (1 - 2a_0/W) \sigma_y \quad (15)$$

对于硬化材料, 当结构薄弱截面上的应力达到屈服应力时, 结构并不会立即失效。本文四种宽度试件在断裂临界状态(裂纹从初始长度 a_0 扩展到

a_c)下,含裂纹截面净截面平均应力的临界值 σ_{Cnet} 如表 3 所示。

表 3 含裂纹截面净截面应力临界值
Table 3 The critical value of net-section in cracked section

W/mm	$\frac{2a_0}{W}$	$\frac{2a_c}{W}$	σ_{Cnet}/MPa
100	0.25	0.34	366
	0.35	0.41	366
	0.50	0.56	368
144	0.25	0.34	361
	0.35	0.43	366
	0.50	0.57	365
197	0.25	0.343	364
	0.35	0.407	360
	0.50	0.549	358
400	0.315	0.403	362

从表 3 可以看出,无论试件宽度和初始裂纹长度如何变化,在临界状态下, σ_{Cnet} 变化很小,且其平均值为 363 MPa。

工程上常将材料的屈服强度和强度极限的平均值作为材料性能指标,称为流动应力 σ_{flow} 。根据 2524-T3 材料的基本力学性能,其流动应力 $\sigma_{flow} = \frac{\sigma_b + \sigma_{0.2}}{2} = \frac{306 + 434}{2} = 370$ MPa,与 σ_{Cnet} 的平均值 363 MPa 非常接近,故令 $\sigma_{flow} = 363$ MPa,并合理地假设:对不同宽度的 M(T) 试验件,其断裂临界(剩余强度)载荷为

$$P_{rs} = P_c = \sigma_{rs} \cdot WB = (W - 2a_c) \cdot B \cdot \sigma_{flow} \quad (16)$$

变形得:

$$\sigma_{rs} = \left(1 - \frac{2a_c}{W}\right) \cdot \sigma_{flow} = \left[1 - \frac{2(a_0 + \Delta a_c)}{W}\right] \cdot \sigma_{flow} \quad (17)$$

式中: σ_{rs} 为试件剩余强度; P_c 为临界载荷; a_c 为半临界裂纹尺寸; a_0 为半初始裂纹尺寸; Δa_c 为临界裂纹扩展量。

式(17)是考虑流动应力和断裂临界状态的净截面屈服失效模型,由两部分构成,一部分为基于流动应力的净截面屈服准则,反映了静力学模式下结构的承载能力:

$$\sigma_1 = \left(1 - \frac{2a_0}{W}\right) \cdot \sigma_{flow} \quad (18)$$

另一部分反映了材料的韧性撕裂过程:

$$\sigma_2 = -\frac{2\Delta a_c}{W} \cdot \sigma_{flow} \quad (19)$$

临界裂纹扩展量 Δa_c 可由 K-R 阻力曲线确定,是与断裂韧度相关的特征量。式(17)能否有效使用取决于能否合理估计 Δa_c 的大小,还需要进一步研究。

李亚智等^[15]认为含裂纹结构的剩余强度是断裂力学模式破坏和静力学模式破坏共同存在的结果,并建议了综合的剩余强度估算公式:

$$\sigma_{rs} = \frac{\sigma_n \cdot \sigma_c}{\sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_c^2}} \quad (20)$$

$$\sigma_n = \left(1 - \frac{2a_0}{W}\right) \cdot \sigma_{flow} \quad (21)$$

$$\sigma_c = \frac{K_{app}^*}{\sqrt{\pi a_0} \beta_0} \quad (22)$$

式中: β_0 为形状修正系数; K_{app}^* 为理想表观断裂韧度。

σ_n 为考虑流动应力的净截面屈服准则,代表静力学模式破坏; σ_c 应用表观断裂韧度准则,代表断裂力学模式破坏。

将 2524-T3 铝合金板(厚度为 1.6 mm)的有关测试数据带入式(20)~式(22)计算,得到不同准则下的剩余强度预测结果如表 4 所示。

表 4 不同准则下的剩余强度预测
Table 4 Residual strength prediction results of different criteria

W/mm	a_0/mm	σ_n/MPa	σ_c/MPa	σ_{rs}/MPa	试验值/ MPa
100	13	269	629	247	254
	17	240	533	219	221
	21	211	459	191	190
144	18	272	536	243	252
	24	242	450	213	217
	30	212	385	186	186
197	24	275	465	236	258
	32	245	391	208	224
	40	216	336	181	193
400	50	272	322	208	243
	66	243	272	181	210
	80	218	238	161	185

从表 4 可以看出:基于流动应力的净截面失效准则因为没有考虑临界裂纹扩展量,预测结果稍显

危险;应用理想值的表观断裂韧度准则亦给出偏危险的结果;综合模式失效准则(式(20))能够给出相对较好的预测结果,板宽较小时预测结果比较准确,板宽较大时预测结果偏低。

板宽度变化时,决定结构失效的两种断裂模式的主次关系发生交替变化。板宽较窄时,静力学模式起主要作用,而板宽较大时,断裂韧性准则模式起主要作用。式(20)虽然将两种模式结合在一起,但尚不能充分反映不同情况下两者的主次关系。

综上所述,高韧性材料的断裂是断裂力学模式断裂与静力学模式断裂综合作用的结果。用表观断裂韧度准则预测剩余强度时,必须考虑板宽的影响。考虑流动应力和断裂临界状态的净截面屈服失效模型反映了高韧性材料在两种断裂模式共同作用下的断裂机理,其能否有效应用于剩余强度预测取决于是否能够合理估计断裂临界裂纹尺寸。兼顾两种断裂失效模式的综合破坏准则思路合理,但不能充分反映两种模式的相互作用规律,还需要深入研究。

3 结 论

(1) 2524-T3 铝合金薄板的 $K-R$ 阻力曲线试验结果表明,试件宽度相同时, $K-R$ 曲线只是裂纹扩展量 Δa 的函数,与初始裂纹长度 a_0 无关。试件宽度不同时, $K-R$ 阻力曲线、平面应力断裂韧度 K_c 和表观断裂韧度 K_{app} 明显依赖于板宽。利用几种较小板宽的测试结果,通过拟合外推,可近似获得 K_c 、 K_{app} 与板宽的关系。

(2) 指出以往在剩余强度分析中采用的表观断裂韧度准则的不合理之处,建议了一种应用考虑宽度影响的表观断裂韧度准则的剩余强度预测模型。

(3) 发现流动应力在剩余强度分析中的独特作用,提出基于考虑流动应力和临界断裂状态的净截面屈服准则预测剩余强度的模型,同时反映韧性材料断裂过程的净截面屈服效应和韧性撕裂过程。

(4) 进行 $K-R$ 阻力曲线数据分析时,ASTM E561 中关于数据有效性的判据较为严苛,建议对韧性较好、强化作用明显的铝合金薄板适当放宽有效性限制。

参 考 文 献

- [1] Sullivan A M, Freed C N, Stoop J. Comparison of R -curves determined from different specimen types[J]. ASTM STP, 1973, 527: 85-104.
- [2] Schwalbe K II, Setz W. R curve and fracture toughness of thin sheet materials[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1981, 9(4): 13.
- [3] Hellmann D, Schwalbe K H. Geometry and size effects on JR and Delta- R curves under plane stress conditions[M]. Germany: GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 1985.
- [4] Putatunda S K, Rigsbee J M, Corten H T. Effect of size on elastic-plastic fracture toughness parameters[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1985, 13(3): 181-190.
- [5] Fett T, Munz D, Geraghty R D, et al. Influence of specimen geometry and relative crack size on the R -curve[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 66(4): 375-386.
- [6] Schwalbe K H, Newman Jr J C, Shannon Jr J L. Fracture mechanics testing on specimens with low constraint—standardisation activities within ISO and ASTM[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(4): 557-576.
- [7] 杨继运, 张行. 裂纹扩展阻力曲线与剩余强度关系的理论研究[J]. 机械强度, 2003, 25(3): 334-339.
Yang Jiyun, Zhang Xing. Mathematical research on the relation between resistance curve of crack growth and residual strength[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(3): 334-339. (in Chinese)
- [8] 杨继运, 张行. 含裂纹板断裂韧度厚度效应的理论研究[J]. 机械强度, 2005, 27(5): 672-680.
Yang Jiyun, Zhang Xing. Research on thickness effect on cracked plate fracture toughness[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(5): 672-680. (in Chinese)
- [9] 刘秀丽, 张海英, 魏玉龙. 2024-T351 及 LY12-CZ 平面应力断裂韧性测试与分析[J]. 结构强度研究, 2011(1): 7-14.
Liu Xiuli, Zhang Haiying, Wei Yulong. Fracture toughness test and analysis of 2024-T351 and LY12-CZ under plane stress[J]. Structural Strength Study, 2011(1): 7-14. (in Chinese)
- [10] 刘秀丽, 陈莉, 闫文伟. 铝合金薄板(1.8 mm) $K-R$ 曲线及 K_c 值测试研究[C]//第 22 届全国结构工程学术会议论文集: 第三册, 2013: 509-513.
Liu Xiuli, Chen Li, Yan Wenwei. Test research on curve $K-R$ and K_c for alloy flat batten(1.8 mm)[C]//The 22nd National Conference on Structure Engineering Symposium: Vol. 3, 2013: 509-513. (in Chinese)
- [11] Zhu Xiankui, James A Joyce. Review of fracture toughness (G , K , J , $CTOD$, $CTOA$) testing and standardization[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 85: 1-46.

(下转第 63 页)

- 1996, 33(5): 1003-1013.
- [12] 王森, 刘马宝, 王国力, 等. 广布损伤的试验研究与有限元分析[J]. 航空学报, 2010, 31(8): 1578-1583.
Wang Sen, Liu Mabao, Wang Guoli, et al. Test research and finite element analysis on multiple site damage[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(8): 1578-1583. (in Chinese)
- [13] 费斌军, 童明波, 刘文廷. 含多裂纹结构的概率损伤容限评定方法[J]. 航空学报, 1995, 16(2): 137-142.
Fei Binjun, Tong Mingbo, Liu Wenting. Probability damage tolerance evaluation method for multi-cracked structure [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1995, 16(2): 137-142. (in Chinese)
- [14] 张建宇, 费斌军, 赵丽滨. 疲劳多裂纹扩展随机模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(4): 396-399.
Zhang Jianyu, Fei Binjun, Zhao Libin. Random model of fatigue multi-crack propagation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(4): 396-399. (in Chinese)
- [15] 廖敏, 孙秦, 徐晓飞. 含多裂纹连接结构损伤容限试验研究[J]. 航空学报, 1998, 19(1): 103-106.
Liao Min, Sun Qin, Xu Xiaofei. Experimental investigation for damage tolerance of fastener joint in presence of multiple-site damage[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(1): 103-106. (in Chinese)
- [16] Smith B L, Saville P A, Mouak A, et al. Strength of 2024-T3 aluminum panels with multiple-site damage[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(2): 325-331.
- [17] Tan P W, Bigelow C A, Hughes W J. Widespread fatigue damage assessment approach[EB/OL]. (2004) [2004-11-22]. <http://aar400.tc.faa.gov/programs/aging/aircraft/structural/nato2001.pdf>.
- [18] Swift T. Damage tolerance capability[J]. International Journal of Fatigue, 1994, 16(1): 75-94.
- [19] U. S. Department of Transportation, MIL-HDBK-5 Metallic material properties development and standardization (MMPDS) [S]. USA: Department of Transportation, 2008.
- [20] 吴学仁. 飞机结构金属材料力学性能手册: 第 1 卷[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.
Wu Xueren. Handbook of mechanical properties of aircraft structure metals; Vol. 1 [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [21] 郑晓玲. 民机结构耐久性与损伤容限设计手册: 下册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
Zheng Xiaoling. Durability and damage tolerance design for civil aircraft structure; Vol. 2 [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:

隋立军(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:结构疲劳损伤容限设计、强度适航验证技术。

原磊(1984—),男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机适航验证技术、民用飞机安全性分析。

李骏(1990—),男,助理工程师。主要研究方向:结构疲劳损伤容限设计。

陈鹏(1985—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:结构疲劳损伤容限设计。

(编辑:马文静)

(上接第 58 页)

- [12] ASTM E561-10. Standard test method for K-R curve determination[S]. USA: American Society for Testing and Materials, 2011.
- [13] Yablonskii I S. Fracture toughness of sheet materials under static loading[J]. Strength of Materials, 1980, 12(11): 1373-1379.
- [14] 吴学仁. 飞机结构金属材料力学性能手册: 第 2 卷——损伤容限[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.
Wu Xueren. Handbook of mechanical properties of aircraft structure metals; Vol 2—damage tolerance[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [15] 李亚智, 郑晏仲. 含裂纹结构剩余强度的一种估算方法[J]. 机械强度, 2003, 25(1): 71-75.
Li Yazhi, Zheng Yanzhong. Methodology for residual strength evaluation of cracked structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(1): 71-75. (in Chinese)

作者简介:

樊振兴(1987—),男,硕士研究生。主要研究方向:结构疲劳断裂及可靠性分析。

李亚智(1962—),男,教授,博导。主要研究方向:结构疲劳与断裂、复合材料结构力学。

王亚星(1991—),女,硕士研究生。主要研究方向:结构疲劳断裂及可靠性分析。

姜薇(1987—),女,博士研究生。主要研究方向:结构疲劳断裂及可靠性分析。

(编辑:马文静)