裂纹尖端张开角在飞机金属薄壁 结构中的应用



鲁龙坤*,庄茁,柳占立 清华大学航天航空学院,北京 100084

摘 要:本文回顾了裂纹尖端张开角(Crack Tip Opening Angle, CTOA)在飞机金属薄壁结构中的应用。主要回答了"为什么 CTOA是一个有效的断裂参数"和"CTOA怎样估算工程结构的断裂过程"这两个问题。韧性断裂的微观机理为空洞的形核、 扩展及合并过程,断裂过程区(Fracture Process Zone, FPZ)包含了上述过程。CTOA实际上是FPZ的整体表征,因此CTOA是 一个有效的断裂参数。此外,CTOA准则是一个局部断裂准则,它并不关心FPZ以外区域的状态,这使得它能够估算金属薄 壁结构的裂纹扩展过程。

关键词: CTOA; 断裂过程区; 薄壁结构; 局部断裂准则; 韧性断裂

中图分类号:V215.6

文献标识码:A

为了保证飞机服役期间的安全,必须对飞机结构进行 完整性分析,而剩余强度分析是结构完整性分析^[1-3]的重要 组成部分。此外,机翼、机身等飞机结构通常归属于金属薄 壁结构,因此金属薄壁结构的剩余强度分析在飞机结构分 析中占据十分重要的地位。

剩余强度分析的本质就是裂纹扩展过程的分析。金属 薄壁结构通常由低强度、高韧性材料组成,并且结构整体处 于平面应力状态(厚度较小)。因此,这类结构的裂纹扩展 过程具有以下特点⁽⁴⁾:(1)裂纹尖端的塑性区比较大,小范 围屈服条件不再满足;(2)裂纹在结构失效之前发生了较大 范围的扩展。由于塑性区比较大,基于线弹性断裂力学的 评估方法不再适用,必须采用弹塑性断裂参数对结构进行 评估。

常用的弹塑性断裂参数主要有J积分与裂纹尖端张开 位移(Crack Tip Opening Displacement, CTOD)两种^[5-6]。其 中,J积分的推导前提为弹塑性材料的本构关系由非线性弹 性材料的本构关系代替,如图1所示,上述前提要求载荷不 发生卸载。当裂纹在金属材料中扩展时,裂纹尖端的载荷 必然会发生卸载,卸载区的范围与裂纹扩展量正相关。换

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.04.004

句话说,当裂纹具有较大范围的扩展时,J积分不再适用。因此,CTOD及其演化而来的裂纹尖端张开角(Crack Tip Opening Angle,CTOA)成为估算大范围屈服结构长距离裂纹稳态扩展的首选断裂参数^[4]。



图 1 弹塑性与非线性弹性材料的应力一应变曲线 Fig.1 Stress strain curves of elastic plastic and nonlinear elastic materials

CTOD/CTOA 是衡量裂纹尖端变形的参数,该参数与裂纹尖端区域以外结构的变形关系不大。此外,弹塑性裂纹的稳态扩展过程实际上就是裂纹面的形成过程,CTOA

收稿日期: 2019-12-04; 退修日期: 2020-01-08; 录用日期: 2020-02-25 基金项目:清华大学"水木学者"计划(2019SM077)

*通信作者 Tel.: 010-62773780 E-mail: lulongkun@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式: Lu Longkun, Zhuang Zhuo, Liu Zhanli. CTOA applications in metallic thin-walled structures of airplane[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(04):21-29. 鲁龙坤, 庄茁, 柳占立. 裂纹尖端张开角在飞机金属薄壁结构中的应用[J]. 航空科学技术, 2020, 31 (04):21-29.

的局部特性与断裂的局部本质不谋而合。上述性质使得 CTOD/CTOA(尤其是CTOA)准则在过去40年间取得了成功,它成功估算出了单裂纹试样^[7]、多裂纹试样^[8]、单裂纹加 筋试样^[9]、多裂纹加筋试样^[10],以及机翼/机身/全机等结构 的剩余强度^[11]。

CTOA及其应用也具有限制条件,并且CTOA参数的内在机理亟待进一步研究。本文将对CTOA的特点及其需要面对的问题进行总结,并侧重于阐述CTOA在金属薄壁结构中的应用。

1 裂纹尖端张开角

1.1 断裂参数

断裂的实质是材料发生分离,这一结果使得材料的连续性假设不再有效,因此连续介质力学本身不足以描述断裂现象,需要额外引入描述断裂现象的参数,这些参数就是断裂参数。

有效的断裂参数必须在一定的条件下具有通用性,即 从一种几何构型获得的断裂参数临界值可以应用到另一种 几何构型。基于上述思路,断裂参数必然经历两个阶段:产 生阶段与应用阶段。图2给出了上述两个阶段。

顾名思义,生成阶段是指断裂参数的提出阶段。这一 阶段包含如下步骤:(1)提出缺陷的理想模型;(2)寻找描述



图2 断裂参数有效性验证流程



缺陷局部状态的物理量,这些物理量就是潜在的断裂参数。 这些断裂参数的有效性将通过应用阶段验证。由于断裂参数的临界值在一定程度上反映了缺陷的临界状态,应用阶段的核心思路为由一种构型获得的临界断裂参数估算另一构型的裂纹扩展行为。

1.2 CTOA 的定义

CTOA是指裂纹面的夹角^[12],它有工程与数学两个常用的定义。由于CTOA的工程定义便于应用数学定义从而便于理论分析,因此有必要对CTOA的两个定义都进行介绍。CTOA的工程定义为裂纹尖端后特定距离d处的裂纹面张开位移与距离d的比值:

$$\psi = 2 \tan^{-1}\left(\frac{\delta_d}{2d}\right) \approx \frac{\delta_d}{d} \tag{1}$$

式中: ψ 为CTOA, δ_d 与d如图3所示。由于 ψ 代表了裂纹尖端 附近的状态,d的值不能太大。当 ψ = 25°时, $2 \tan^{-1}(\delta_d/2d)$ 与 δ_d/d 的误差仅有1.62%,即在CTOA不太大时,式(1)的假 设成立。



图3 CTOA的工程定义 Fig.3 The engineering definition of CTOA

当裂纹扩展时,裂纹尖端处于临界状态,此时的CTOA 即为临界CTOA(ψ_{cr})。由于真实的裂纹面不是平面,d值的 不同可能会导致不同的临界CTOA。针对上述问题,美国 国家航空航天局(NASA)分别采用0.5mm、1.0mm、1.5mm 的测量位置(d值)测量了铝合金2024-T351的临界CTOA (材料厚度分别为1.0mm、1.6mm、2.3mm)^[13],德国GKSS分 别采用0.25mm、0.5mm、0.75mm、1.0mm、1.5mm的测量位 置(d值)测得了铝合金5083 H321的临界CTOA(厚度为 3.0mm)^[14]。他们得出了相同的结论:(1)d值越小,临界 CTOA数据点越发散;(2)数据点的平均值与d值无关。

由于真实裂纹面的曲折性⁶⁰,结论(1)并不难理解,而 结论(2)的唯一解释便是:裂纹尖端附近的裂纹面可以等效 为一个三角形,如图4所示。

上述解释得到了GKSS的证实^[14],他们的试验表明:当 裂纹扩展量 Δa 不太大时,临界CTOA等于 δ_5 – Δa 曲线的 斜率。因此:

$$\psi_{\rm cr} = \frac{\mathrm{d}\delta_5}{\mathrm{d}a} \tag{2}$$

式中:a为裂纹长度, δ_5 为原裂纹尖端上下2.5mm处的张开 位移,如图5所示。当裂纹扩展量不太大时, δ_5 可以表征裂 纹尖端附近裂纹面的张开位移;由于 da 的任意性,式(2)等 价于裂纹尖端附近裂纹面的三角形假设。

类似于式(2),CTOA的数学定义为:

$$\psi = \frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}a}\Big|_{\mathrm{tip}} \tag{3}$$



图4 裂纹尖端附近裂纹面的三角形等效

Fig.4 The equivalent triangle of real crack flanks near the crack tip



Fig.5 The definition of δ_5

式(3)表示裂纹面在裂纹尖端处的斜率,式(3)实际上 是式(1)的极限形式(见图6)。当裂纹扩展时,分别让 δ_a 与d等于 $\Delta\delta_{tip}$ 与 Δa ,并假设 $\Delta a \rightarrow 0$:

$$\psi_{\rm cr} = \lim_{\Delta a \to 0} \frac{\Delta \delta_{\rm tip}}{\Delta a} = \frac{\mathrm{d} \delta_{\rm tip}}{\mathrm{d} a} \tag{4}$$

式中:**δ**_{in}为瞬时裂纹尖端的张开位移。

国际上有两个测量临界CTOA的标准:ASTM E2472^[13] 与ASTM E3039^[16]。ASTM E2472采用了CTOA的工程定 义,而ASTM E3039采用了CTOA的数学定义。CTOA通 常用于估算薄壁金属结构与石油管道的裂纹扩展过程;薄 壁金属结构通常由铝合金制成,此时裂纹尖端附近的裂纹 面满足图4所示的三角形假设,CTOA的工程与数学定义近 似等价;石油管道通常由管线钢制成,此时裂纹面就是一个 平面,此时CTOA的工程与数学定义完全等价。因此,本文





认为CTOA的工程与数学定义相互等价。

1.3 临界CTOA的性质

大量的试验结果表明^[8,10,11,13,14]:裂纹启裂时,临界 CTOA的值比较大,一旦裂纹开始扩展,临界CTOA将迅速 减小至一个常值,并在接下来的扩展过程中保持不变。图7 给出了 ψ_{g} – Δa 曲线的典型形式。





如图7所示,临界CTOA包含初始阶段(非常数阶段) 与稳态阶段(常数阶段)。上述结果引出了两个问题:(1)什 么原因导致了初始阶段的临界CTOA?(2)初始阶段的临界 CTOA对裂纹扩展过程有影响吗?

塑性变形与"隧道效应"是导致"临界CTOA初始阶段" 的两个因素。由于塑性变形,尖锐的弹塑性裂纹在扩展前 会产生钝化,钝化区域会或多或少地影响初始扩展阶段的 裂纹张开位移,进而影响到临界CTOA的值。

韧性断裂的微观机理通常是空洞的形核、扩展及合并, 并且空洞的演化过程对静水压力十分敏感。由于沿着壁厚 方向不同位置的静水压力不同,越靠近自由表面静水压力 越小,越靠近壁厚中心静水压力越大,因此裂纹前沿将呈现 "指甲盖"形状,这就是"隧道效应"^[17],如图8所示。

Dawicke等[13]运用3D有限元分析了"隧道效应"对临界



CTOA的影响,他们发现:在裂纹扩展的初始阶段,自由表面处的临界CTOA最大、在壁厚中心位置临界CTOA的值最小,随着裂纹的继续扩展,壁厚各个位置的临界CTOA趋于一致,并且初始阶段的临界CTOA可由稳态值整体代表。图9给出了上述变化趋势。





根据 Dawicke 等的研究^[17],初始阶段的临界 CTOA 对 裂纹扩展过程没有影响。然而 Lam 等^[18]的研究表明:临界 CTOA 的初始值对裂纹扩展过程有较大的影响。以笔者的 观点,如果临界 CTOA 的初始值主要由"塑性变形"导致,初 始值对裂纹扩展有影响;如果临界 CTOA 的初始主要由"隧 道效应"导致,初始值对裂纹扩展没有影响。

值得一提的是,Newman^[7]以"ψ=临界 CTOA 稳态值"为 断裂准则成功模拟了简单试样的裂纹扩展过程。紧接着, NASA的大量研究表明^[7]:临界 CTOA 的稳态值足以描述金 属薄壁结构的裂纹扩展过程。因此,临界 CTOA 通常指临 界 CTOA 在稳态阶段的值,下文所提的临界 CTOA 均指稳 态阶段的值。

首先,临界CTOA具有卓越的通用性。许多研究表明: 对于薄板结构,当裂纹长度与非裂纹韧带宽度大于等于4 倍厚度时,临界CTOA与面内几何及加载方式无关(见图 10)。最近,Shibanuma等^[19-20]对真实管道进行了爆破试验并测量了裂纹扩展过程中的CTOA,他们发现:在整个裂纹扩展过程中,裂纹尖端的速度不断发生变化,临界CTOA却始终保持为一个常值。此外,他们还从该管道上切出了两组DWTT试样,并依据ASTM E3039测量了相应的临界CTOA的值,试验表明:试样与管道的临界CTOA相同。这进一步证明了临界CTOA的通用性。



其次,临界 CTOA 与材料的厚度相关^[21-23]。断裂准则 其实是材料微观破坏机理的宏观体现,而微观破坏机理在 不同应力状态下有所不同,因此断裂参数的临界值与应力 状态相关,又由于厚度不同应力状态也不同,临界断裂参数 与厚度相关。

根据上文,临界CTOA面临两个问题:(1)为什么面内 几何大于等于4倍厚度时,临界CTOA具有通用性?(2)临 界CTOA与厚度具有什么样的关系?

Mahmoud 等^[21-22]、鲁龙坤等^[23]均发现:对于铝合金材料,临界CTOA随着厚度的增加而减小,但是减小趋势不呈线性。此外,鲁龙坤等^[23]推断:对于固定材料,临界CTOA存在上下限。此外,厚度直接决定了应力三轴度(静水压力

与Von Mises等效应力的比值),厚度越大,应力三轴度越大。NASA^[26]、甄莹等^[27]研究了临界CTOA与应力三轴度的关系,均发现:临界CTOA随着应力三轴度的增加而线性减小。上述关系是否具有普遍性仍需要进一步的研究。

1.4 CTOA与裂纹扩展驱动力

最近,鲁龙坤等^[28]从理论上证明了"为什么CTOA是一个有效的断裂参数",其论证过程如下:

首先,裂纹扩展问题的本质是裂纹面的形成问题,有效 的断裂参数必须能够表征这一过程。对于单位厚度试样, 假设形成裂纹面所消耗的功率为P_{crack},这个功率可以看作 一个力F_T乘以一个速度。如果将这个速度取为裂纹尖端 扩展速度*a*,就好像在裂纹尖端施加了一个力一样,这个力 推动着裂纹尖端向前移动,这个力就是裂纹扩展驱动力。 有效的断裂参数必然与F_T相关:

 $P_{\text{crack}} = F_{\text{T}}\dot{a}$ (5)

 其次,弹塑性扩展裂纹尖端附近有三个区域,最外围是

 弹性区域,该区域包围着塑性区域,紧挨着裂纹尖端的是断

 裂过程区(Fracture Process Zone, FPZ)。由于材料的微观

 分离过程全部发生在 FPZ, FPZ 消耗的功率就是形成裂纹

 面所消耗的功率。对于 I 型裂纹, FPZ 受周围材料拉伸载荷

 的作用, FPZ 可由图 11 所示模型代替。图 11 中, (x_1, x_2) 是以

 裂纹尖端为原点的直角坐标系, l_{FPZ} 是断裂过程区的长度,

 $\sigma(x_1)$ 是周围材料对 FPZ 的作用力。





 $P_{\text{crack}} = F_{\text{T}}\dot{a} = \int_{0}^{l_{\text{FFZ}}} \sigma(x_1)\dot{\delta}(x_1) \mathrm{d}x_1$ (6)

式中: $\dot{\delta}(x_1)$ 为FPZ上裂纹面张开速率。

式(6)可以转化为:

$$F_{\mathrm{T}}\dot{a} = \dot{\delta}_{\mathrm{tip}} l_{\mathrm{FPZ}} \sigma_0 \int_0^{l_{\mathrm{FPZ}}} \frac{\sigma(x_1)}{\sigma_0} \frac{\dot{\delta}(x_1)}{\dot{\delta}_{\mathrm{tip}}} \mathrm{d}\frac{x_1}{l_{\mathrm{FPZ}}}$$
(7)

式中: $\dot{\delta}_{ip}$ 为裂纹尖端处的裂纹面张开速率。

将式(4)代入式(7):

$$\psi_{\rm c} = \frac{F_{\rm T}}{\sigma_0 \beta_{\rm FPZ} l_{\rm FPZ}} \tag{8}$$

$$\beta_{\rm FPZ} = \int_{0}^{l_{\rm FPZ}} \frac{\sigma(x_1)}{\sigma_0} \frac{\delta(x_1)}{\dot{\delta}_{\rm tip}} d\frac{x_1}{l_{\rm FPZ}}$$
(9)

β_{FPZ}是一个只取决于FPZ内材料微观破坏机理的参数。 因此,CTOA等价于裂纹扩展驱动力,CTOA是一个有效的 断裂参数。

2 临界CTOA在薄壁结构中的应用

金属薄壁结构的面内几何通常大于4倍厚度,因此临 界CTOA非常适用模拟金属薄壁结构中裂纹的扩展行为。 本节总结了 CTOA 准则预测薄壁结构断裂过程的基本 流程。

2.1 基本思路

CTOA 准则应用的基本思路为"裂纹扩展驱动力等于 裂纹扩展阻力"。扩展驱动力指CTOA 与几何构型的关系, 扩展阻力就是临界 CTOA,如1.4节所述,临界 CTOA 取决 于 FPZ 内材料的微观破坏机理,当几何构型对 FPZ 没有影 响时,临界 CTOA 只取决于材料及厚度。

CTOA估算断裂过程的步骤[12]如下:

(1)进行单轴拉伸试验,精确获得材料的应力一应变 曲线。

(2) 按照 ASTM E2472 或者 ASTM E3039 进行相应的 断裂试验,测量材料的临界 CTOA 值以及记录试样的稳态 扩展过程数据点;这一步骤需要注意以下几点:试验测量的 临界 CTOA 值往往具有 ±0.5°~±1.5°的波动;试验件与真实 结构应该具有相同的材料、厚度;试验件在达至剩余强度前 具有显著的稳态裂纹扩展(即试样足够大)。

(3)进行 2D/3D 建模,采用节点释放法、临界 CTOA 值 模拟试验件的裂纹扩展过程;由于模型与真实试验件的差 异,临界 CTOA 试验值可能不足以重现试验结果,这时需要 对临界 CTOA 进行上下微调使得模拟结果尽可能吻合试验 结果;这一步骤需要注意以下几点:裂纹尖端附近的区域是 三轴应力状态,当采用 2D 模型时,采用平面应变核模型(见 图 12);为了避免额外的误差,模型与试验的 d 要相同;为了 增强模型的自信心,可以先大概估算一下材料临界 CTOA 值的范围,然后在试验前对试验件进行盲估。

(4)对真实结构进行有限元建模,运用步骤(3)校正的 临界CTOA对结构进行分析;这一步需要注意的是:试验件 与真实结构的有限元模型在裂纹尖端应该具有相同的单元 尺寸;试验件与真实结构应该采用相同的建模方法(3D、2D 或者平面应变核模型)。

上述步骤的实质是通过有限元计算裂纹扩展驱动力 ψ,并根据ψ = ψ_{er}判断裂纹是否扩展。通过将扩展裂纹张 开轮廓等效为静态裂纹张开轮廓减去塑性尾迹区轮廓(见 图 13),鲁龙坤等^[29]理论计算出了裂纹扩展驱动力ψ,他们的步骤为:



Fig.12 The plane strain core model

(1)假设塑性尾迹区的高度是一种裂纹扩展阻力曲线,该曲线只取决于应力状态与材料属性;其中,塑性尾迹区的高度等于真实裂纹尖端在临界状态下的CTOD(考虑了塑性区)。

(2)根据ASTM E2472对M(T)或C(T)进行断裂试验, 进而获得塑性尾迹区的高度。

(3)应用线弹性理论或者非线性弹性理论获得结构静态裂纹的张开轮廓,该轮廓值减去塑性尾迹区的高度即为驱动力ψ。



Fig.13 Crack growth model

有限元方法的优点为:(1)适用于加筋板等复杂的薄壁 结构;(2)可以考虑裂纹扩展的3D状态;(3)可以同时分析 多条裂纹的扩展。有限元方法的缺点为:(1)建模过程、模 型计算耗时耗力;(2)试验获得临界CTOA有较大的波动, 临界CTOA值的调试需要操作人员具有丰富经验;(3)模拟 过程是唯象的,不利于理解现象本质。

解析方法的优点为:(1)操作简单,只要将结果代入公 式即可;(2)有利于CTOA准则指导手册的编写;(3)有利于 理解现象的本质。解析方法的缺点为:(1)采用了还不成熟 的假设,即"塑性尾迹区的高度是一种裂纹扩展阻力曲线"; (2)不适用于复杂结构;(3)不适用于多条裂纹的同时扩展。

2.2 铆接加筋板

铆接加筋板是常见的飞机结构,该结构壁板上的裂纹 不会扩展至筋条之上,筋条可以看作是一种几何约束,因此 筋条仅影响裂纹扩展驱动力,2.1节的方法直接适用。

NASA 与美国联邦航空局(FAA)对含有多部位损伤 (Multiple Site Damage, MSD)的铆接加筋板进行了断裂试 验^[11],并应用CTOA 准则对加筋板进行了预测。壁板与筋 条的几何构型如图 14 所示,其中壁板由 2024-T3 组成(厚 度为 1.6mm),筋条由 7075-T6 组成(厚度为 2.2mm),壁板 前后均具有筋条,中央筋条由主裂纹切断,且主裂纹前分布 有 MSD。





NASA的估算过程如下:(1)测量2024-T3、7075-T6的 应力一应变曲线,并测量了厚度为1.6mm的2024-T3的临 界CTOA,试验件为M(T)试样(增加了防屈曲装置),*d*为 1mm,测量值为5.15°±1.0°。(2)应用2D壳单元模型模拟 了试验件的断裂过程。经过反复调试,发现平面应变核模 型的结果与试验结果吻合很好,其中平面应变核高度为 2mm、临界CTOA为5.4°。(3)运用第二步的平面应变核模 型模拟了铆接板的裂纹扩展过程,如图15所示。

2.3 整体加筋板

整体加筋板的裂纹扩展具有两个特点:(1)壁板裂纹经 过筋条时会分叉为两条裂纹,一条沿着壁板继续传播,另一 条沿着裂纹扩展(见图16)。裂纹分叉的过程十分复杂,需 要采用3D有限元进行模拟,模拟过程如图17所示。(2)壁 板的厚度会发生变化,并且壁板与筋条的厚度也可能不同。 结构具有几个厚度就需要几个对应的临界CTOA值,如图 18所示。

除了上述两个特点,整体加筋板的模拟过程与铆接加



图15 铆接加筋板的模拟结果





Fig.16 The crack passes through integral stiffener



图17 裂纹分叉的模拟过程





筋板相同。NASA对图 19所示剖面的整体加筋板进行了断裂试验^[30],加筋板的材料为 2219-T81;然后 NASA 应用 2.2 节的方法对其裂纹扩展过程进行了模拟。

模拟结果如图20所示,当裂纹穿过筋条时,真实的结构 已经失效,但是有限元模型仍然可以模拟裂纹的继续扩展, 这是因为临界CTOA仅是一个局部参数,它并不关心裂纹尖 端以外的区域,因此临界CTOA并不能判断结构的失效点。



3 结束语

裂纹扩展实质上是一个局部行为,它的结果就是裂纹 面的形成。换个角度来讲,裂纹扩展过程就是"裂纹尖端处 的扩展驱动力"等于"裂纹尖端处的扩展阻力"的结果,以此 为思想,CTOA准则能够预测复杂结构的裂纹扩展过程。

假设一个含裂纹弹塑性体,裂纹在外载荷的作用下发 生扩展。这一过程可以表述为:外力施加功,外力功流入裂 纹尖端的部分就是裂纹扩展驱动力;当流入裂纹尖端的外 力功足以形成新的裂纹面时,裂纹就会扩展,形成新的裂纹 面所需的能量就是裂纹扩展阻力;外力功与流入裂纹尖端 部分的差值取决于材料属性、几何构型,这一部分直接决定 着结构的承载能力。

因此,断裂过程的研究有两个方向:(1)材料的本构关 系研究;这一部分主要包括材料的破坏机理、材料塑性变形 等耗能机制。(2)几何构型对裂纹扩展驱动力的影响;边界 条件对裂纹尖端状态的影响、多裂纹的相互影响、筋条及屈 曲对结构承载能力的影响等均属于这一部分。

参考文献

[1] 吴富民.疲劳强度在航空工业中的应用[J].航空科学技术, 1994,4(1):10-13.

Wu Fumin. Application of fatigue strength in aviation industry [J]. Aeronautical Science & Technology, 1994,4(1):10-13. (in Chinese)

[2] 尚晓冬,孙秀文,王刚.损伤容限技术在飞行器结构设计中的 应用[J]. 航空科学技术,2012,5(1):52-55.

Shang Xiaodong, Sun Xiuwen, Wang Gang. Application of damage tolerance technology in structure design of aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012, 27(1): 52-55. (in Chinese)

[3] 刘旭.民用飞机桶段试验及结果分析[J]. 航空科学技术, 2016,27(2):53-59.

Liu Xu. Civil aircraft barrel test design and data analysis [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(2): 53-59. (in Chinese)

- [4] Zerbst U, Heinimann M, Claudio D D, et al. Fracture and damage mechanics modeling of thin-walled structures An overview[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76:5-43.
- [5] Kanninen M F, Popelar C H. Advanced fracture mechanics[M]. New York: Oxford University Press, 1985.
- [6] Anderson T L. Fracture mechanics: fundamentals and applications[M]. Fourth Edition. New York: CRC Press, 2017.
- [7] Dawicke D S, Sutton M A, Newman J C, et al. Measurement and analysis of critical CTOA for an aluminum alloy sheet, NASA-TM-109024[R]. Hampton: NASA, 1993.
- [8] Xu W, Wang H, Wu XR, et al. A novel method for residual strength prediction for sheets with multiple site damage: Methodology and experimental validation [J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51: 551-565.
- [9] Newman J C, Dawicke D S, Seshadri B R. Residual strength analyses of stiffened and unstiffened panels Part I: laboratory specimens[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70: 493-507.
- [10] Seshadri B R, Newman J C, Dawicke D S. Residual strength analyses of stiffened and unstiffened panels Part II: wide panels[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70: 509-524.
- [11] Chen C S. Crack growth simulation and residual strength

prediction in thin shell structures[D]. Ithaca: Cornell University, 1999.

- [12] Newman J C, James M A, Zerbst U. A review of the CTOA/ CTOD fracture criterion [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003,70: 371-385.
- [13] Dawicke D S, Newman J C, Bigelow C A. Three dimensional CTOA and constraint effects during stable tearing in a thin sheet material [R]. ASTM STP, 1995.
- [14] Heerens J, Schodel M. On the determination of crack tip opening angle, CTOA, using light microscopy and deta5 measurement technique[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003,70: 417-426.
- [15] ASTM E2472 Standard test method for determination of resistance to stable crack extension under low-constraint conditions [S]. American Society of Testing Materials, 2012.
- [16] ASTM E3039 Standard test method for determination of crack tip opening angle of pipe steels using DWTT specimens[S]. American Society of Testing Materials, 2016.
- [17] James M A, Newman J C. The effect of crack tunneling on crack growth: experiments and CTOA analyses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70: 457-468.
- [18] Lam P S, Kim Y, Chao Y J. The non-constant CTOD/CTOA in stable crack extension under plane-strain conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73: 1070-1085.
- [19] Shibanuma K, Hosoe T, Yamaguchi H, et al. Crack tip opening angle during unstable ductile crack propagation of a high pressure gas pipeline[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018,204: 434-453.
- [20] Xu S, Bassindale C, Williams B W, et al. Comments on CTOA transferability in crack tip opening angle during unstable ductile crack propagation of a high pressure gas pipeline[204(2018)434-453] [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 214: 335-338.
- [21] Mahmoud S, Lease K. The effect of specimen thickness on the experimental characterization of critical crack-tip-opening angle in 2024-T351 aluminum alloy[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003,70: 443-456.
- [22] Mahmoud S, Lease K. Two-dimensional and three-dimensional finite element analysis of critical crack-tip-opening angle in 2024-T351 aluminum alloy at four thicknesses[J]. Engineering

29

Fracture Mechanics, 2004, 71: 1379-1391.

- [23] Lu L K, Wang S N. Relationship between crack growth resistance curves and critical CTOA [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017,173: 146-156.
- [24] Newman J C, Crews J H, Bigelow C A, et al. Variations of a global constraint factor in cracked bodies under tension and bending loads [R]. ASTM STP, 1995.
- [25] Lu L K, Wang S N. A simple model to explain transferability of crack tip opening angle[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018,193: 197-213.
- [26] Johnson W M, James M A. A relationship between constraint and the critical crack tip opening angle[R]. NASA-CR-215930, 2009.
- [27] Zhen Y, Tian H J, Yi H J, et al. Constraint-corrected fracture failure criterion based on CTOD/CTOA[J]. International Journal of Fracture, 2018,214: 115-127.
- [28] Lu L K, Wang S N, Tong GR. Relationship between incremental J integral and crack tip opening angle in elastic plastic materials

[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2019, 75: 399-409.

- [29] Lu L K, Wang S N. An analytical method to predict residual strength based on critical CTOA[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 200: 31-41.
- [30] Seshadri B R, Tiwari S N. Residual strength analysis of monolithic structuresl[R]. NASA TR 102051, 2001.

(责任编辑 王为)

作者简介

鲁龙坤(1992-)男,博士,助理研究员。主要研究方向:固体力学、断裂力学、材料力学。

Tel:010-62773780

E-mail: lulongkun@mail.tsinghua.edu.cn

庄茁(1952-)男,博士,教授。主要研究方向:固体力学、 飞行器结构力学、断裂力学和非线性有限元的研究。 柳占立(1981-)男,博士,副教授。主要研究方向:计算固 体力学、复合材料力学、断裂力学。

CTOA Applications in Metallic Thin-walled Structures of Airplane

Lu Longkun*, Zhuang Zhuo, Liu Zhanli

School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: The application of Crack Tip Opening Angle (CTOA) in metal thin-walled structures is reviewed in this paper. It answers "Why CTOA is a valid parameter" and "How to estimate fracture processes of engineering structures by CTOA". The micro mechanism of ductile fracture is the nucleation, growth and coalescence of void damage, which are included into the Fracture Process Zone (FPZ). CTOA is in fact a representative of the FPZ, and thus CTOA is a valid fracture parameter. In addition, since CTOA criterion is a local fracture criterion, the CTOA parameter doesn't care what's going on outside of FPZ. That is why this parameter can estimate the crack growth process in metallic thin-walled structures.

Key Words: CTOA; fracture process zone; thin-walled structures; local fracture criterion; ductile fracture

Received: 2019-12-04; Revised: 2020-01-08; Accepted: 2020-02-25 Foundation item: Shuimu Tsinghua Scholar (2019SM077)

*Corresponding author.Tel. : 010-62773780 E-mail : lulongkun@mail.tsinghua.edu.cn