doi:10.11887/j.cn.201803021 http://journal.nudt.edu.cn

采用扩展有限元法的线式爆炸分离装置裂纹扩展分析*

张 亮[1],申志彬[1],蒋纯志[2]
(1. 国防科技大学 空天科学学院,湖南 长沙 410073; 2. 湘南学院 电子信息与电气工程学院,湖南 郴州 423000)

摘 要:为了提高线式爆炸分离装置的安全性,本研究基于扩展有限元法,通过创建二维和三维动态裂纹扩展模型,探索了线式爆炸分离装置在爆轰波作用过程中的动态裂纹扩展和止裂机理。研究表明,分离壳体的裂纹扩展路径独立于裂纹初始角度;不考虑载荷时序时,二维和三维动态裂纹扩展的主方向分别沿着分离壳体的径向和环向;考虑载荷时序时,受不同区域应力波的联合作用,三维裂纹沿环向扩展的同时会沿着轴向扩展,但裂纹的扩展均不会影响到止裂槽以外的结构。所提方法和相应结论可为线式爆炸分离装置设计提供参考。

关键词:线式爆炸分离装置;动态裂纹扩展;止裂;扩展有限元法
中图分类号:TN95 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2018)03-135-07

Analyses on crack propagation of linear explosive separation system based on extended finite element method

ZHANG Liang[1], *SHEN Zhibin*[1], *JIANG Chunzhi*[2]
(1. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. College of Electronic Information and Electronic Engineering, Xiangnan University, Chenzhou 423000, China)

Abstract: In order to improve the safety of linear explosive separation system, the dynamic crack propagation and crack arrest mechanism during the detonation wave propagation of linear explosive separation device were investigated on the basis of the extended finite element method and by creating 2D and 3D models. The results show that the crack propagation path is independent of the initial angle of preset crack. Without considering the loading sequence, the main directions of crack propagation are radial direction and circumferential direction for 2D and 3D models respectively. Once the loading sequence is taken into account, due to the combined effect of the stress wave from different regions, the 3D crack propagates circumferentially and axially but it does not influence the region outside the crack-arrest slot either. The method used and results obtained in the study can provide a solution for the design of explosive separation devices.

Key words: linear explosive separation device; dynamic crack propagation; crack arrest; extended finite element method

航天火工装置在飞行器的连接与分离过程中起着不可替代的作用,其中分离装置的可靠性最高,应用最广。线式爆炸分离装置作为分离装置的一种,被广泛应用于大型火箭和导弹的级间分离、整流罩分离以及有效载荷分离等关键发射过程。“强连接、弱分离”是线式爆炸分离装置在设计时遵循的思想,即在分离前保证足够的连接强度而在分离时又保证其能迅速断开[1]。

陈敏[2]利用LS-Dyna通过参数化建模的方法对线式火工分离装置进行了研究,基于损伤模型得到了削弱槽深度、削弱槽圆角半径、削弱槽切边与轴向的夹角等参数对分离装置力学性能的影响。陈荣等[3]运用冲击动力学原理,针对保护罩在爆炸分离过程中的结构断裂现象通过理论分析的方法建立了物理模型,在一定程度上反映了保护罩断裂的现象。高庆等[4]研究了高频冲击激励下火工装置的结构响应,通过试验方法得到了结构高应力释放对冲击环境的影响,找到了地面试验和实际飞行试验之间冲击环境的差异。

除了以上方法,对于爆炸冲击问题还可以采用基于裂纹扩展的方法进行研究,而扩展有限元法(eXtended Finite Element Method, XFEM)就是近年来兴起的一种方法。XFEM是由Belytschko院士的研究小组[5]提出,该方法的最大特点是独立于网格,对动态裂纹扩展过程可以进行很好的模拟。Talemi[6]通过XFEM来模拟X70管线钢在

* **收稿日期**:2017-04-19
基金项目:湖南省教育厅科研基金资助项目(14C1060);郴州市科技局科技计划资助项目(CZ2014042)
作者简介:张亮(1983—),男,甘肃陇西人,博士研究生,E-mail:liangzi0403@126.com;
申志彬(通信作者),男,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:zb_shen@yeah.net

-100℃下的落锤撕裂试验,通过仿真结果与试验结果的比对证明了基于 XFEM 的裂纹扩展分析可以用来计算管线钢的低温脆断问题。Fan 等[7]利用 XFEM 模拟了混凝土梁在三点弯曲试验过程中裂纹的产生和扩展过程,结果表明随着断裂能的缓慢增加,混凝土梁从脆性断裂逐渐过渡到韧性断裂。Singh[8]基于 XFEM 模拟了室温轧制的 6351 铝合金的弹塑性裂纹扩展过程,计算结果表明 6351 铝合金断裂属性提升的主要原因是颗粒的细化。Schatzer 等[9]基于 XFEM 通过裂纹张开位移法计算了应力强度因子,结果表明该方法简单可靠,并且计算结果不受转动自由度的影响。Das 等[10]以基于试验的夏比冲击功作为判据,采用 XFEM 通过裂纹尖端的应力分布计算和裂纹尖端塑性区仿真等对比了两种不同合金的断裂行为。Mostofizadeh 等[11]基于 XFEM 介绍了一种考虑塑性变形和高应变率的薄壁结构的裂纹扩展计算方法。Schiavone 等[12]通过原始数据对比了 GTN(Gurson-Tvergaard-Needleman)和 XFEM 两种方法在计算不同缺陷形状(V 形、U 形和方形)的铝样本裂纹产生和扩展过程中的异同。Taheri 等[13]利用 XFEM 分析了焊接残余应力对裂纹扩展的影响,计算结果表明最大裂纹扩展深度由热载荷下的应力强度因子的变化速率来决定而不是由应力强度因子的值来决定。

在线式爆炸装置分离的过程中,分离壳体在爆炸冲击作用下可能会产生裂纹并且产生的裂纹可能会扩展到止裂槽以外的壳体区域。本文将基于 XFEM 通过二维和三维模型进行爆炸分离装置的动态裂纹扩展和止裂机理研究。

1 二维动态裂纹扩展仿真

1.1 线式爆炸分离装置起裂分析

典型的线式爆炸分离装置主要包括分离壳体、保护罩、导爆索和连接紧固件四部分,其纵截面示意图[1]如图1所示。分离壳体上通常会预置三个缺陷槽,中间的凹槽为削弱槽,其作用是在导爆索引爆之后壳体从削弱槽处分离;两侧的凹槽为止裂槽,其作用是阻止裂纹的轴向延伸,确保止裂槽以外的结构不受爆炸的影响。保护罩的作用主要是防止爆炸碎片飞入航天器内,保证内部仪器的安全。

在建立二维模型研究裂纹扩展和止裂机理之前,首先建立有限元模型对爆炸分离装置进行力学分析,找到爆炸过程中的薄弱区域和分离壳体

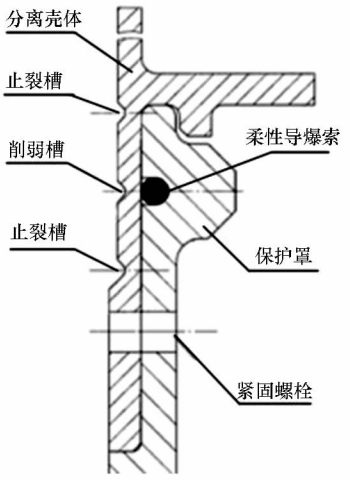


图1 线式爆炸分离装置结构示意图

Fig. 1 Schematic graph for the linear explosive separation device

的损伤模式。根据模型的对称性,对整个装置建立轴对称模型,在壳体一端施加约束,限制其轴向位移,在导爆索位置施加压强。模型的建立不考虑螺栓模型,在分离壳体和保护罩之间设置接触约束,而在螺栓连接位置设置绑定约束。基础材料参数如表1所示,计算过程中考虑材料的塑性和应变率。

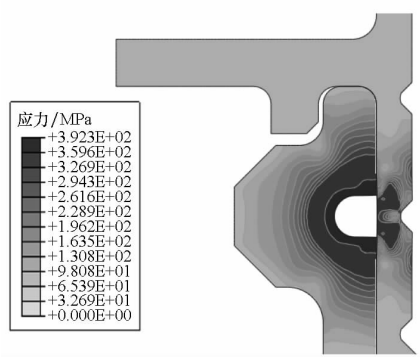
表1 分离装置各部分的材料参数

Tab. 1 Material properties of explosive separation device

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 ρ/(g/cm^3)
分离壳体	70 000	0.30	2.82
保护罩	68 900	0.33	2.7

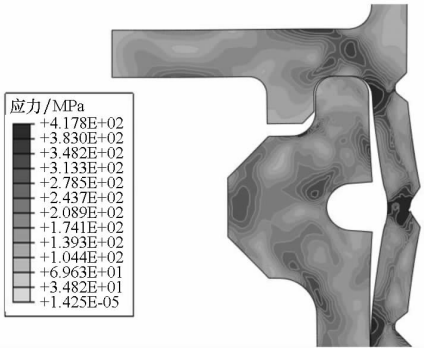
采用显示动态求解器,压强的变化为在4 μs内上升到1 GPa然后迅速下降。止裂槽与削弱槽间距为20 mm。

爆炸分离过程整体结构的 Von Mises 应力云图如图2所示。在压力达到峰值时,分离壳体和保护罩与炸药接触区域的应力开始迅速增大,但是削弱槽并没有开裂(见图2(a)),结构的响应具有一定的滞后性。在12.5 μs左右,压力下降到约50 MPa,削弱槽的根部开始出现损伤(见图2(b))。在33.75 μs左右,压力下降到约5 MPa,此时削弱槽根部已经完全断开(见图2(c))。随着时间的进一步推移,爆轰压力逐渐消失,分离壳体完全分离但是保护罩结构依然保持完好(见图2(d))。如果在计算中适当增大峰值压强,分离壳体的止裂槽也将从根部完全断开。



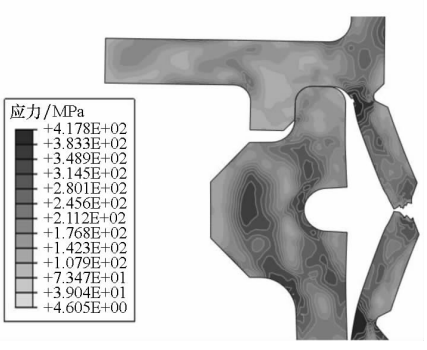
(a) 压强峰值时刻结构的响应

(a) Structure response under peak pressure



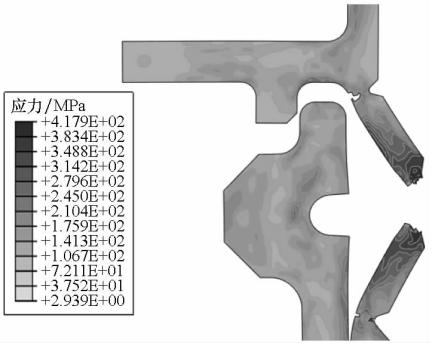
(b) 削弱槽开裂时刻结构的响应

(b) Structure response when the damage is initiated on the weakening slot



(c) 削弱槽完全断开时刻结构的响应

(c) Structure response when the weakening slot is disconnected



(d) 壳体分离过程中结构的响应

(d) Structure response during the separation

图 2　爆炸分离过程结构的响应

Fig. 2　Structure response during explosive separation

对分离壳体而言,随着爆轰波的传播,分离壳体产生了较大的弯曲变形,在削弱槽根部形成了一个拉伸应力集中区域。这时削弱槽的尖端可以看作一个 I 形裂纹,最终导致分离壳体从削弱槽处断裂,完成爆炸分离。在爆轰压力比较大的情况下,分离壳体在削弱槽处断开后变形继续增大,止裂槽根部将持续损伤直至完全断开。

1.2　二维动态裂纹扩展分析

对整个爆炸分离装置的应力进行计算,结果表明削弱槽位置属于整个分离壳体最薄弱的区域,如果在爆炸分离过程中在分离壳体上产生裂纹,那么裂纹必定首先出现在削弱槽的区域,但是初始裂纹的方向可能是任意的。

如果将削弱槽的结构用初始裂纹代替进行建模,初始裂纹的长度与原模型中削弱槽的深度保持一致,取 7 个与径向呈一定角度(0°到 90°每隔 15°一个特征角度)的特征角度分析二维动态裂纹的扩展路径。以与径向呈 30°的预置裂纹为例,建立二维平面应变模型,并采用最大主应力准则为断裂准则,裂纹的扩展过程如图 3 所示。

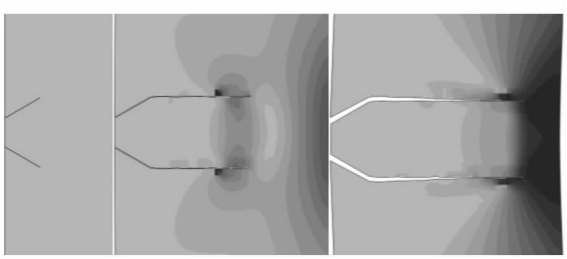


图 3　30°预置裂纹扩展过程

Fig. 3　Crack propagation process of preset 30° crack

从 7 个特征角度的计算结果来看,对于分离壳体而言,无论初始裂纹的角度如何,扩展的主方向一定是沿最大主应力方向,即分离壳体的径向。即使给分离壳体预置轴向裂纹(特征角度为 90°),最终的扩展方向依然是径向。因此对二维动态裂纹扩展模型而言,裂纹的扩展方向与初始角度是独立的,裂纹扩展始终沿着分离壳体的径向,因此裂纹扩展不会破坏止裂槽以外的壳体结构。

2　三维动态裂纹扩展仿真

2.1　三维动态裂纹扩展模型

二维动态裂纹扩展模型计算的裂纹状态比较理想,相当于在整个分离壳体的环向都分布有径向裂纹,而且裂纹产生的区域均设置在整个结构的薄弱区域。然而在爆炸分离过程中,裂纹很可

能是在壳体的表面随机产生的,在这种情况下,二维的平面模型将不能再用于裂纹扩展分析,必须采用三维模型来进行计算。

线式爆炸分离装置沿环向由 120 个螺栓紧固,在几何上属于循环对称。因而如果要拿出一个含预置裂纹的特征区域进行分析,为了简化计算可以在建立模型时采用 1/120 的循环对称模型。采用循环对称模型可以计算出在动态载荷下当预置裂纹沿壳体轴向时三维动态裂纹的扩展路径。

建立的循环对称模型如图 4 所示,模型采用柱坐标系,约束两个对称端面的环向,在模型的顶部(即上部止裂槽的远端)施加固定约束,在导爆索的位置施加压力载荷。预置的裂纹为一个垂直于分离壳体的平面,长度取 3 mm,厚度与分离壳体厚度一致,位于削弱槽和上部止裂槽之间。

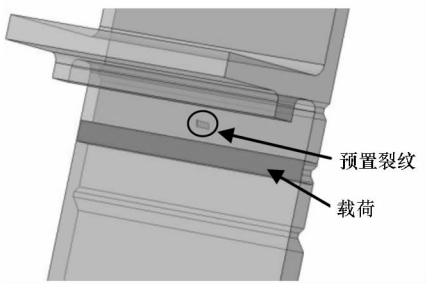


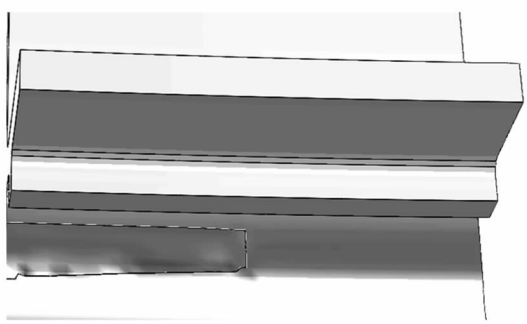
图 4　三维循环对称模型

Fig. 4　Created 3D cyclic symmetric model

在计算中预置裂纹的方向分别与壳体的轴向呈 0°、15°、30°和 45°四个特征角度,计算当预置裂纹沿着壳体轴向或与轴向呈一定角度时在动态载荷的激励下的扩展路径。

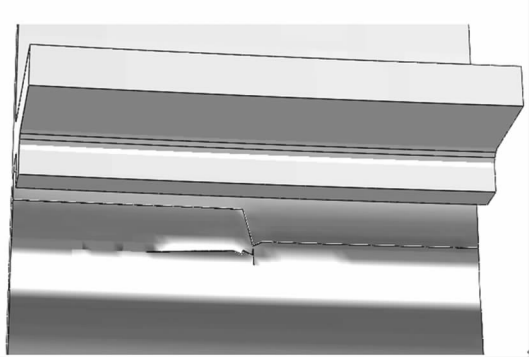
2.2　三维动态裂纹扩展分析

计算过程中为了考虑预置裂纹初始位置对计算结果的影响,与轴向呈 0°、15°和 30°的裂纹初始位置预置在模型中部,而与轴向呈 45°的裂纹初始位置预置在 0.25 倍螺距处,不同初始角度的三维动态裂纹扩展状态如图 5 所示。



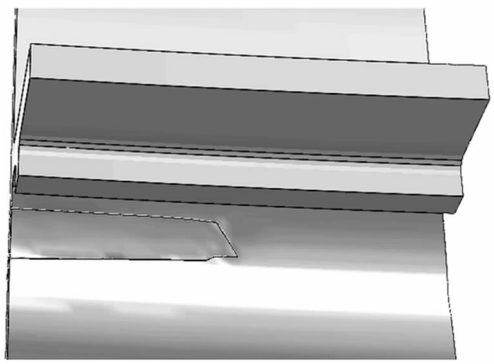
(a) 0°预置裂纹的两端扩展到模型对称约束端同侧

(a) Preset 0° crack propagates to the symmetrical boundaries at the same side



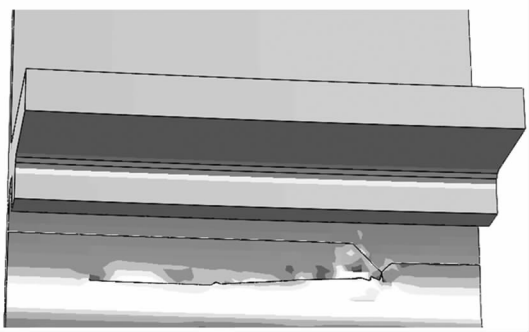
(b) 15°预置裂纹的两端扩展到模型对称约束端两侧

(b) Preset 15° crack propagates to the symmetrical boundaries at the opposite side



(c) 30°预置裂纹的两端扩展到模型对称约束端同侧

(c) Preset 30° crack propagates to the symmetrical boundaries at the same side



(d) 45°预置裂纹的两端扩展到模型对称约束端两侧

(d) Preset 45° crack propagates to the symmetrical boundaries at the opposite side

图 5　不同角度预置裂纹的两端扩展到模型对称约束端

Fig. 5　Cracks with different preset angles propagates to the symmetrical boundaries

从裂纹的扩展过程来看,随时间变化的应力波沿轴向传递到裂纹所在区域,预置裂纹的下端即靠近削弱槽的一端开始扩展并迅速扩展到模型的一个对称端面,紧接着预置裂纹的上端即靠近上止裂槽的一端也开始扩展,并且在某些角度(15°和 45°)下裂纹上端扩展的同时预制裂纹的

下端附近会产生一条新的裂纹也沿环向扩展。具体的扩展状态如表 2 所示。

表 2　不同角度初始裂纹的扩展状态

Tab. 2　Crack propagation status under different preset angles

初始裂纹与轴向夹角	扩展方向	裂纹两端扩展方向是否同侧	是否有新裂纹产生	是否穿过止裂槽
0°	环向	是	否	否
15°	环向	否	是	否
30°	环向	是	否	否
45°	环向	否	是	否

总的来说,无论裂纹的预置角度如何,裂纹的扩展方向均为壳体的环向。因此,如果模型取循环对称,在相同的爆轰载荷激励下,预置裂纹的扩展方向与预置裂纹的角度是独立的,裂纹始终朝着壳体的环向即平行止裂槽的方向扩展,裂纹的扩展不会破坏止裂槽以外的结构。

2.3　考虑时序的三维动态裂纹扩展模型

循环对称模型也有其本身的局限性,其载荷不能考虑时序,即爆轰波传递的时间顺序。实际过程中导爆索的爆轰过程虽然是在很短的毫秒甚至微秒量级时间内完成,但是依然拥有从一个起爆点引爆然后传递到整个导爆索的过程。因此,更贴合实际的三维模型需要考虑爆轰压力载荷时序,在模型中同时考虑载荷时序和载荷历程两个变化维度,即同时考虑时间的变化和环向加载位置的变化。

建模中一旦要考虑加载时序,整个模型将不具备循环对称性,而如果建立全部模型,将大大增加计算量和收敛难度。为了简化计算但同时能够表征时序对裂纹扩展造成的影响,建模时将原来的圆柱壳体展开,变成平板模型,同时根据圆柱壳体的螺距给平板模型分块,按照既定的爆速以不同的时序对各区域加载,计算考虑加载时序的状态下裂纹的扩展状态。

在圆柱模型中,螺距为 47 mm,为了方便计算,在平板模型中将每个块设置为 50 mm,整个平板模型长度为 450 mm,分为 9 块,将裂纹设置在中间块的中心位置。爆轰压力的作用位置与圆柱模型保持一致,压力载荷作用的时序为从左到右,两个相邻块之间爆轰波的作用时差为块的宽度 50 mm 除以假定的爆轰波速度 1700 m/s,即 29.4 μs。为了模拟圆柱壳体,在平板模型的左右两个端面设置对称约束。计算模型如图 6 所示。

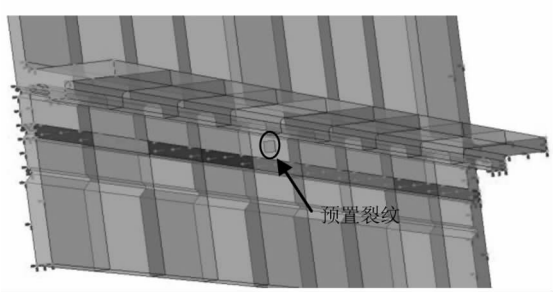


图 6　考虑时序的三维动态仿真模型

Fig. 6　Created 3D model for the crack propagation analysis considering the loading sequence

预置的裂纹长度为 3 mm,预置裂纹的方向分别与壳体的轴向呈 0°、15°、30°和 45°四个特征角度,计算在有时序的载荷激励下的裂纹扩展过程。

2.4　考虑时序的三维动态裂纹扩展分析

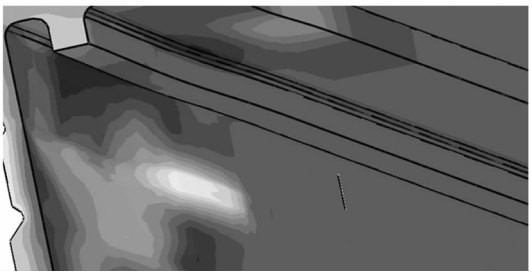
0°预置裂纹的扩展状态如图 7 所示。图中给出了裂纹在不同时刻的状态,当压力载荷作用在离裂纹较远的区域时,裂纹基本不受爆轰压力的影响(见图 7(a))。当爆轰压力作用在靠近裂纹的区域时,裂纹附近的应力开始变化但并未扩展(见图 7(b))。而当爆轰压力作用在裂纹所在区域时,靠近削弱槽的一端开始沿着环向扩展(见图 7(c))。沿环向扩展 1 μs 之后,裂纹开始沿着轴向扩展,并且扩展到了削弱槽所在区域(见图 7(d))。由于载荷随时间和空间两个维度变化,而 XFEM 采用的形函数模式也极大增加了计算收敛的难度,最终在总时间 124 μs 左右,裂纹所在区域的压强也下降到 4 MPa 左右,裂纹扩展计算终止。

预置裂纹与壳体的轴向呈 15°、30°和 45°的裂纹扩展计算结果与 0°预置裂纹的计算结果类似,裂纹靠近削弱槽的一端首先开始扩展并且扩展的方向均为沿环向扩展的同时向靠近削弱槽的方向扩展。

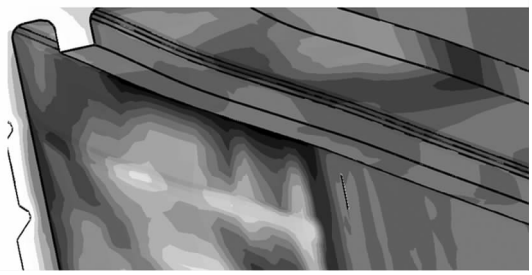
3　计算结果讨论

三维模型在考虑时序和不考虑时序加载的情况下出现了裂纹扩展方向的差异,其主要原因是在不考虑时序的情况下,应力波沿着壳体轴向逐层传递。当应力波传递到裂纹位置的时候,裂纹两个端部位置主要是承受环向拉伸应力波。由于该环向应力波沿轴向存在梯度,对裂纹两个端部而言相当于在施加沿径向的剪切载荷,正是在剪切载荷的作用下,裂纹朝着环向延伸。

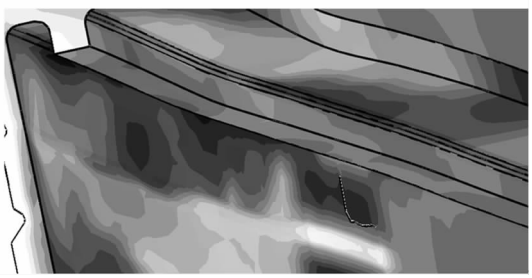
而当考虑载荷的时序时,由于相邻的区域载



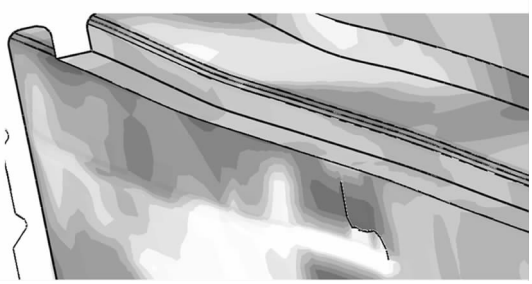
(a) 压力载荷作用区域离裂纹位置较远
(a) Pressure applied zone far from the preset crack



(b) 压力载荷作用区域离裂纹位置较近
(b) Pressure applied zone close to the preset crack



(c) 压力载荷下裂纹沿环向扩展
(c) Preset crack propagates circumferentially under applied pressure



(d) 压力载荷下裂纹沿轴向扩展
(d) Preset crack propagates axially under applied pressure

图7 0°预置裂纹在不同时刻的状态
Fig. 7 Crack status of preset 0° crack during its propagation

荷作用存在时间差,当一个区域应力波开始传递的时候,下一个区域还没有开始加载,这样当预置裂纹所在区域开始加载时,影响该区域裂纹扩展的应力波将是裂纹所在区域沿轴向传递的环向应力波和前一个加载区域传递过来的环向应力波。裂纹区域沿轴向扩展的环向应力波会使裂纹沿环向扩展(见图7(c)),而从相邻区域传递过来的环向应力波相当于对裂纹端部进行环向拉伸,因而会使裂纹沿轴向传递(见图7(d))。裂纹在这两种应力波的叠加作用下,在环向扩展的过程中也向削弱槽的方向扩展。这两种应力波中占主导一方将会决定裂纹的主要传播方向。

对于止裂槽的止裂问题,需要将裂纹扩展模型和损伤模型进行综合考虑。损伤模型的计算结果表明,当压强下降到50 MPa左右时,削弱槽根部已经出现损伤,随着时间推移,当压强下降到5 MPa左右时削弱槽根部完全断开(见图2(c))。而在裂纹扩展模型中,裂纹沿轴向传递穿过止裂槽的时刻压强已经下降到了4 MPa左右,根据损伤模型的计算,这个时刻削弱槽已经完全断开,因此裂纹不会再沿着轴向传递而穿过削弱槽。对于止裂槽区域,在削弱槽完全断开之后由于压强已经下降到约5 MPa,在如此小的压强下裂纹已经没有扩展的可能,当然也不可能扩展到止裂槽区域外侧。

4 结论

本文基于扩展有限元法创建二维动态裂纹扩展模型以及考虑时序和不考虑时序的三维动态裂纹扩展模型,分析了爆炸分离装置在爆炸分离过程中的裂纹扩展和止裂问题。主要结论如下:

1)当裂纹沿着壳体的径向或者与径向呈某一角度时,基于二维平面应变模型计算发现动态裂纹扩展方向独立于裂纹初始角度,扩展的主方向始终沿着分离壳体的径向。

2)当裂纹沿着壳体的轴向或者与轴向呈某一角度时,基于三维循环对称模型计算发现在不考虑载荷时序的情况下,裂纹的扩展方向独立于裂纹初始角度,扩展的主方向始终沿着分离壳体的环向。

3)在考虑载荷时序情况下,基于三维平板模型计算发现裂纹在靠近削弱槽的一端由于裂纹所在区域和相邻区域应力波的联合作用,扩展的方向是沿壳体环向扩展的同时也向壳体轴向扩展。考虑载荷时序的三维动态裂纹扩展模型更符合实际情况,在工程应用中推荐采用。

4)裂纹扩展过程滞后于分离壳体的损伤过程,因此裂纹在扩展过程中不会穿过削弱槽和止裂槽。

参考文献(References)

[1] 张维星. 线式爆炸分离装置的强度分析及其动态断裂研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2014.
ZHANG Weixing. Strength analysis and research on dynamic fracture of linear explosive separation device[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)

[2] 陈敏. 宇航线式火工分离装置数值模拟及优化设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
CHEN Min. The numerical simulation and optimization design of aerospace string pyrotechically actuated separation device [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007. (in Chinese)

[3] 陈荣, 卢芳云, 王瑞锋, 等. 爆炸分离装置中保护罩安全性能分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(4): 13 – 16.
CHEN Rong, LU Fangyun, WANG Ruifeng, et al. Analysis on the security of retainer in the explosive separation system[J]. Missile and Sapce Vehicles, 2007(4): 13 – 16. (in Chinese)

[4] 高庆, 陈新民, 赵永辉. 线式分离结构高应力释放对高频冲击环境的影响分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(21): 166 – 170.
GAO Qing, CHEN Xinmin, ZHAO Yonghui. Influences of higher stress relaxation of separating structures on high frequency shock environments[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(21): 166 – 170. (in Chinese)

[5] MoësJohn N, Dolbow J, Belytschko T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46: 131 – 150.

[6] Talemi R H. Numerical simulation of dynamic brittle fracture of pipeline steel subjected to DWTT using XFEM-based cohesive segment technique [J]. Frattura ed Integrita Strutturale, 2016, 10(36): 151 – 159.

[7] Fan C, Jing X Q. Numerical study of crack propagation path in three-point bending beam using extended finite element method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 353/354/355/356: 3615 – 3618.

[8] Singh R. Crack growth analysis of room temperature rolled (RTR) 6351 Al alloys by XFEM[J]. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 2015, 10(3/4): 239 – 258.

[9] Schatzer M, Fries T P. Fitting stress intensity factors from crack opening displacements in 2D and 3D XFEM [J]. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 15: 149 – 150.

[10] Das P, Singh I V, Jayaganthan R. An experimental evaluation of material properties and fracture simulation of cryorolled 7075 Al alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(7): 1167 – 1181.

[11] Mostofizadeh S, Fagerstrom M, Larsson R. Dynamic crack propagation in elastoplastic thin-walled structures: modelling and validation [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2013, 96(2): 63 – 86.

[12] Schiavone A, Abeygunawardana-Arachchige G A, Silberschmidt V V. Crack initiation and propagation in ductile specimens with notches: experimental and numerical study[J]. Acta Mechanica, 2016, 227(1): 203 – 215.

[13] Taheri S, Julan E, Tran X V, et al. Impacts of weld residual stresses and fatigue crack growth threshold on crack arrest under high-cycle thermal fluctuations[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 311: 16 – 27.