doi:10.11887/j.cn.201802006 http://journal.nudt.edu.cn

固体火箭发动机复合材料壳体裙黏接性能分析*

栗永峰[1,2],张 赋[2],申志彬[1],李海阳[1]
(1. 国防科技大学 空天科学学院,湖南 长沙 410073;2. 中国航天科工六院四十一所,内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要:采用数值计算方法研究复合材料壳体裙连接结构的黏接性能。通过建立纤维缠绕壳体的有限元模型,采用内聚力模型定义裙黏接面的接触关系,引入黏接界面的损伤失效准则,模拟黏接界面的脱黏行为,以此预测裙连接结构的极限承载。同时,研究壳体的轴向和环向应变及黏接面上的剪应力分布情况,以及弹性层的弹性模量与黏接长度对黏接性能的影响。数值算例表明,计算结果与实验数据相吻合,验证了该方法的正确性。所提方法可用于裙连接结构的优化设计中。

关键词:纤维缠绕壳体;裙连接结构;内聚力模型;黏接性能
中图分类号:TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)02-035-06

Analysis of the skirt bonding properties of solid rocket motor composite case

LI Yongfeng[1,2], *ZHANG Fu*[2], *SHEN Zhibin*[1], *LI Haiyang*[1]
(1. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. The 41th Institute of Sixth Academy of CASIC, Huhhot 010010, China)

Abstract: The skirt bonding properties of the composite case was analyzed by using the numerical method. The finite element model of the filament wound case was established. The contact of the skirt bonding interface was defined with the cohesive zone model. The damage failure criterion was employed and the debonding of the interface was simulated to predict the ultimate load of the skirt structure. Moreover, the distributions of the axial strain and the hoop strain on the case and the shear stress in the interface were investigated. The effects of the elastic modulus and the bonding length on the ultimate tensile load were studied. Numerical example shows that the results have a good agreement with the experimental data, which can provide validity for the present method. The proposed method can be applied to the optimal design of the skirt structure.

Key words: filament wound case; skirt structure; cohesive zone model; bonding properties

固体火箭发动机裙连接结构是全弹的关键组件之一,用于发动机与级间段的连接。对于传统的金属裙,其与纤维缠绕壳体通常以胶接形式连接,而由于脱黏产生的分层破坏是胶接连接结构的主要破坏形式[1]。因此,针对裙连接区域进行脱黏分析,研究结构参数、弹性层参数对裙连接结构性能的影响,对提高裙连接结构的承载能力有着重要作用。

侯晓等[1]使用有限元法分析了复合材料壳体的承载能力,给出裙连接区域的变形情况。王立强等[2]与苑博等[3]使用有限元法分析了轴压载荷作用下复合材料裙与壳体搭接区域的受力变形情况及承载能力,同时考察了影响搭接区域承载能力的因素。彭超义等[4]通过有限元法研究了碳纤维无纬带平纹布铺层的体积比对整体复合裙抗轴压性能的影响。陈科等[5]应用人工神经网络算法对复合材料壳体裙连接区结构进行分析,并针对裙尖直筒段距离等5个参数进行优化设计。刘钧等[6-7]针对RTM与VARTM工艺制备的全复合材料整体连接裙的性能进行了试验研究,考察了裙在轴压载荷作用下的轴向与环向应变以及轴压承载能力。

Needleman等[8]采用内聚力模型方法计算得到了胶接接头中的应力分布,随着内聚力模型的不断完善,该模型被广泛应用于胶接接头脱黏分析和复合材料的层间分层问题[9-10],徐林等[11]采用内聚力模型分析了电子封装产品在热循环载荷作用下焊点/IMC界面脱层开裂问题,Pang

* 收稿日期:2016-12-19
基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2014M552684)
作者简介:栗永峰(1979—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,E-mail:lyf_hx41@163.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

等[12]使用内聚力模型针对振动载荷作用下胶接接头进行疲劳分析,但对轴拉载荷作用下裙连接区的脱黏分析还未涉及。

由于裙连接区结构复杂且材料属性较多,特别是分层破坏通常发生在厚度极小的界面层上,理论计算难以对该结构进行有效的应力分析和脱黏分析。

1 基于内聚力模型的接触技术

1.1 内聚力接触技术

固体火箭发动机插入式裙与复合材料壳体采用黏接方式连接,在数值模拟过程中,需要体现裙与壳体的脱黏行为以及脱黏后部件间的接触关系。商业有限元软件 ABAQUS 中提供了内聚力接触技术来解决这一问题。将内聚力模型引入到接触关系中,不仅可以用来模拟厚度可忽略的黏接界面层的力学行为,同时方便处理界面单元不承压而导致的节点侵入问题以及界面脱黏后黏接对象的接触行为。基于内聚力模型的接触技术可以描述为:当裙内、外侧黏接界面发生脱黏或界面受压时,开启接触关系模型;在黏接界面未发生脱黏时,遵循内聚力关系模型。

1.2 内聚力模型

内聚力模型定义了界面应力和界面相对位移的函数关系,即内聚本构关系,反映了裙连接结构黏接界面层的模量、强度和韧度等力学性质。内聚力模型假定分层断裂由失效界面上的法向应力分量 σ_n 和两个切向剪应力分量 τ_s 与 τ_t 引起,其他应力分量对分层不产生作用。

在描述内聚力模型的力学行为时,即是要确定上述本构关系模型的具体形状,包括界面刚度、极限强度以及临界断裂能量释放率或失效位移。目前常用的内聚力模型为双线性本构模型,如图1所示,它描述了界面应力达到强度极限前的线弹性阶段(OA)及达到强度极限后刚度线性降低的软化阶段(AB)。线弹性阶段的斜率为黏接界面材料的刚度,而裙黏接界面的破坏过程将伴随着能量损耗,临界断裂能代表了发生单位面积破坏所需的能量,即图1中折线 $OA-AB-BO$ 所围成的三角形面积。

初始损伤的发生将导致黏接界面性能开始退化,即当应力或应变状态达到初始临界损伤准则时(图1中的 A 点),材料刚度则发生退化。本文采用二次名义应力准则,即当裙连接结构的黏接面三个方向上的名义应力满足式(1)时,裙黏接界面发生初始损伤。

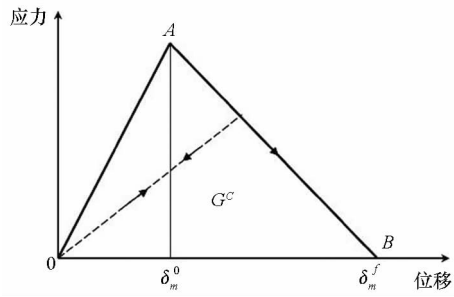


图1 双线性应力-剥离法则的内聚力模型

Fig. 1 Cohesive zone model based on the bilinear stress-stripping method

$$\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_n^0}\right)^2+\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_s^0}\right)^2+\left(\frac{\sigma_t}{\sigma_t^0}\right)^2=1 \tag{1}$$

其中,σ_n^0、σ_s^0 和 σ_t^0 分别表示Ⅰ型(张开型)、Ⅱ型(滑开型)或Ⅲ型(撕开型)破坏的最大名义应力。

损伤失效演化过程(图1中 AB 段)通常基于位移或能量准则。由于裙连接结构属于混合模式加载,能量准则更适用于判断混合模式失效。由 Benzeggagh 和 Kenane[13] 提出的 BK 准则应用广泛,其基于临界法向断裂能 G_n^C 和临界切向断裂能 G_s^C、G_t^C 以及材料常数 η,当满足式(2)时界面发生失效。

$$G_n^C+(G_s^C-G_n^C)(G_S/G_T)^\eta=G^C \tag{2}$$

其中,

$$G^C=G_n+G_s+G_t,\ G_S=G_s+G_t,\ G_T=G_n+G_S$$

通过定义损伤变量 D 来控制黏接界面的损伤退化规律,损伤变量 D 定义为:

$$D=\frac{\delta_m(\delta_m^{\max}-\delta_m^0)}{\delta_m^{\max}(\delta_m-\delta_m^0)} \tag{3}$$

其中,$\delta_m^f=2G^C/T_{\mathrm{eff}}^0$ 为混合模式下界面单元完全失效对应的等效位移,δ_m^0 为界面单元发生刚度退化的临界位移,$\delta_m^{\max}$ 为单元在加载过程中对应的最大等效位移。

根据内聚力模型定义,当黏接界面所受载荷增加时,黏接界面上的应力随之增大,当正应力与剪应力满足初始损伤准则时,黏接界面发生初始损伤,界面刚度随之退化,当界面损伤变量 D 达到1时,黏接界面发生脱黏。

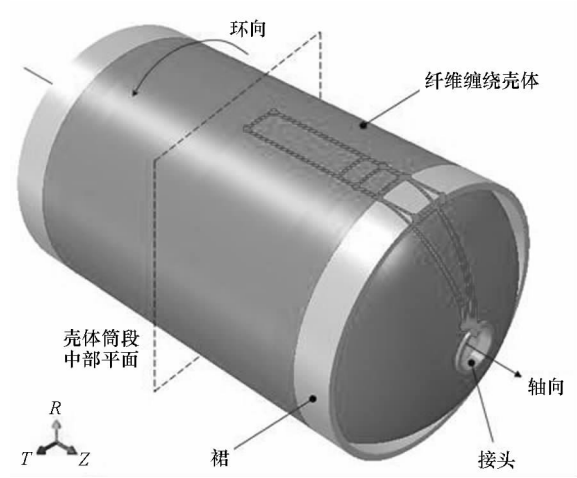
2 有限元模型

2.1 有限元模型定义

在发动机工作过程中,复合材料壳体裙结构将受到均布轴向载荷的作用。为分析轴向载荷作用下裙黏接界面的强度,可采用有限元分析方法,引入内聚力模型,推演黏接界面的损伤失效过程,

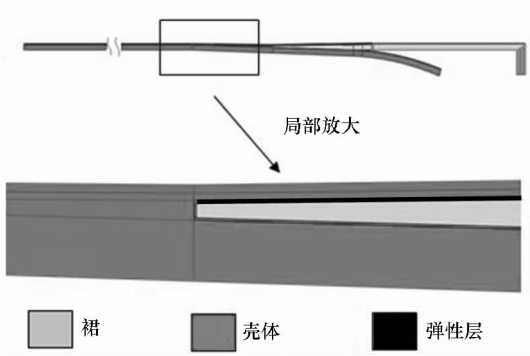
获得裙黏接界面的极限承载能力。

在进行复合材料壳体裙连接区结构的脱黏行为分析时,为提高计算效率,沿轴向取 1/2 壳体模型;根据壳体的回转体结构以及载荷的均匀分布特点,可采用对称模型进行分析,为提高网格密度以获得更高的计算精度,沿环向取整体模型的 1/120 进行计算;同时对壳体结构进行一定的简化,不考虑裙连接区的补强层,且忽略在轴向拉伸载荷下对结果影响较小的防热层、封头及接头,由此建立的几何模型如图 2 所示。



(a) 整体模型

(a) Overall model



(b) 简化模型

(b) Simplified model

图 2　几何模型

Fig. 2　Geometric model

纤维缠绕铺层为横观各向同性的单向板,约定 1 方向为纤维铺设方向。壳体轴向与纤维铺设方向的夹角为缠绕角,裙内缠绕层 40 层,其铺层方式为$[90°/90°/18°/-18°]_{10}$,在封头处无环向铺层,裙外缠绕 5 层,缠绕角均为 90°。计算中使用的材料参数如表 1 所示。

根据裙连接结构的几何模型进行网格划分,对裙、弹性层部分采用 C3D8R 实体单元,对裙连接结构的复合材料壳体部分采用 SC8R 连续壳单元。裙连接结构模型共划分了 3675 个单元,6468 个节点,其中 SC8R 单元共 820 个,图 3 为壳体各结构的网格划分结果。

表 1　壳体材料力学性能

Tab. 1　Mechanical properties of case material

弹性模量	E_1	E_2	E_3
	134.8	13.82	13.82
剪切模量	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	5.275	5.275	6.676
泊松比	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}
	0.344	0.344	0.035

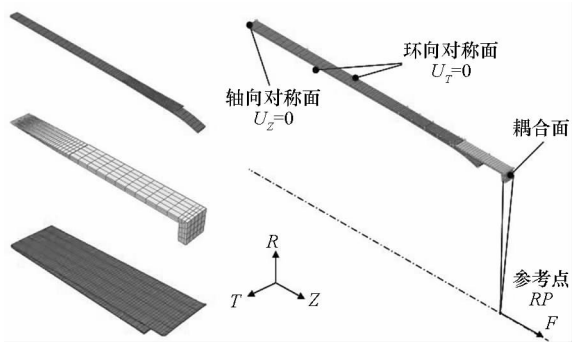


图 3　裙连接结构的有限元计算模型

Fig. 3　Finite Element computational model for the skirt structure

固体火箭发动机壳体为回转体结构,在定义边界条件和施加载荷时采用圆柱坐标系更加方便。由于选用了部分壳体几何模型作为分析对象,根据实际加载工况需要进行对称约束,因此约束裙连接结构两侧端面所有节点沿环向的自由度,同时约束模型底端面在 Z 方向上的自由度。

对纤维缠绕壳体进行轴向拉伸试验时,通过试验工装将载荷施加在裙端面上,裙端面近似做刚体运动。本文采用耦合约束方法,即将裙端面与参考点进行耦合约束,通过控制参考点的运动方式实现裙端面的刚体运动。根据拉伸载荷大小,在参考点上沿 Z 方向施加相应的集中力载荷 $\boldsymbol{F}$。图 3 给出了相应的边界条件及加载情况。

2.2　内聚力接触技术引入

根据裙连接结构的实际黏接情况,在裙连接区域建立了两组共六对黏接接触关系:第一组为弹性层与裙的黏接接触关系,分别为裙内侧表面、裙外侧表面和裙尖端面与弹性层对应

表面的黏接接触,图 4 所示为裙内侧表面与弹性层的黏接区域;第二组为弹性层与壳体的黏接接触关系。

在建立接触关系后,设置接触摩擦系数为 0.1,并对每个接触对赋予基于内聚力模型的黏接属性。根据内聚力模型定义,对模型中各参数进行赋值:黏接界面刚度 $K_{nn}=K_{tt}=K_{ss}=10^6$ MPa/mm,初始损伤准则式(1)中最大破坏名义应力分别为 $\sigma_n^0=5$ MPa,$\tau_t^0=\tau_s^0=6$ MPa,损伤演化准则式(2)选为线性退化的 BK 混合法则,黏接失效时对应的能量释放率分别为 $G_n^C=0.08$ J/mm^2,$G_t^C=G_s^C=0.1$ J/mm^2,材料常数 $\eta=1.45$。内聚力模型中参数的确定可通过采用相同工艺制备的结构件试样,对比拉伸试验及有限元分析结果拟合获得。

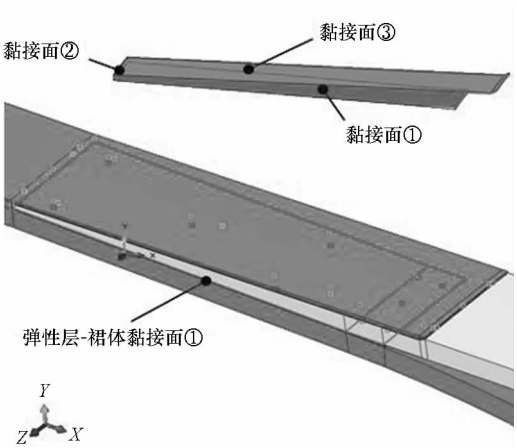


图 4　壳体、裙结构、弹性层之间的黏接接触对

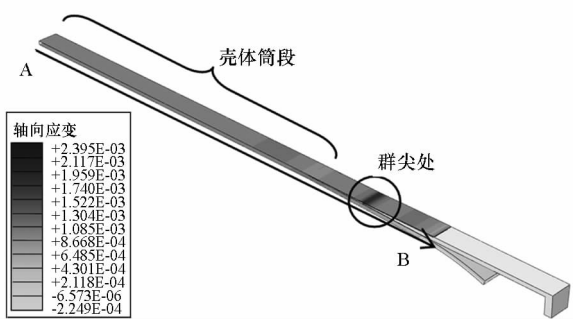
Fig. 4　Contact pairs between case, skirt structure and elastic layer

3　数值算例

3.1　应变分析

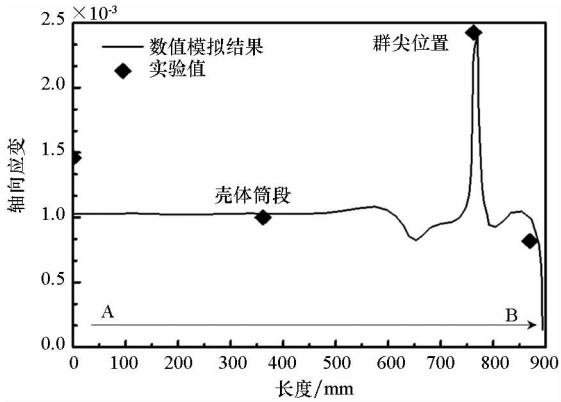
在建立了纤维缠绕壳体有限元模型后,根据实验条件在裙端面上施加 1800 kN 的轴向拉伸载荷,分析壳体轴向与环向应变分布情况。图 5 与图 6 分别给出纤维缠绕壳体最外层铺层的轴向应变与环向应变云图,同时提取了沿 AB 路径上的轴向与环向的应变曲线并与实验结果进行了比较,对比两个方向的应变可见计算结果与实验数据相吻合,验证了有限元模型的有效性。

在进入壳体直筒段,轴向应变趋于稳定,基本保持不变,壳体中部(A 处)的轴向应变为 1.05E－3。轴向应变在裙尖附近变化剧烈,并在裙尖点处达到最大值 2.395E－3。对于环向应变,除裙尖附近应变出现正值外,其他部位应变均为负值,其应变趋势同样与实验数据相吻合。



(a) 第 5 层轴向应变云图

(a) Axial strain contour of the 5th layer

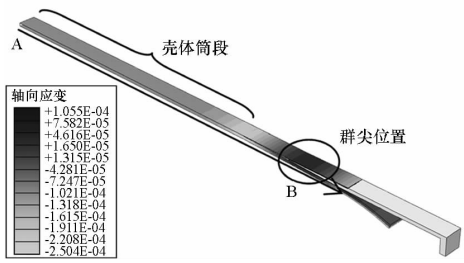


(b) 沿 AB 路径上的轴向应变分布

(b) Axial strain distribution along AB

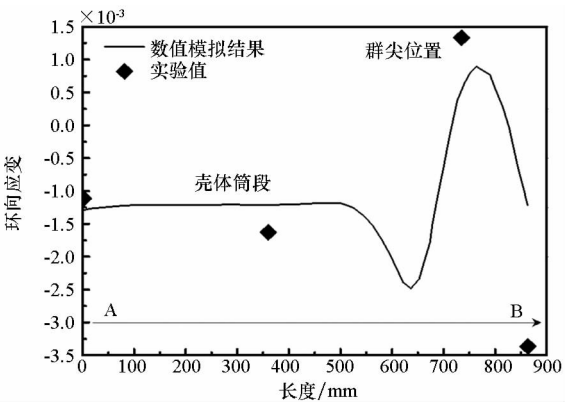
图 5　轴向应变结果

Fig. 5　Results of the axial strain



(a) 第 5 层轴向应变云图

(a) Hoop strain contour of the 5th layer



(b) 沿 AB 路径上的应变分布

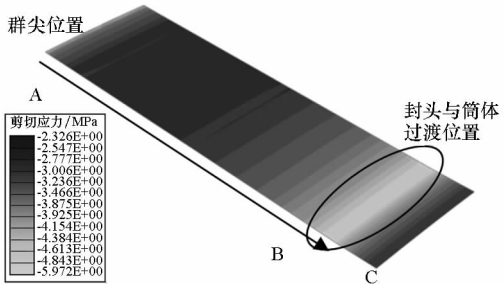
(b) Hoop strain distribution along AB

图 6　环向应变结果

Fig. 6　Results of the hoop strain

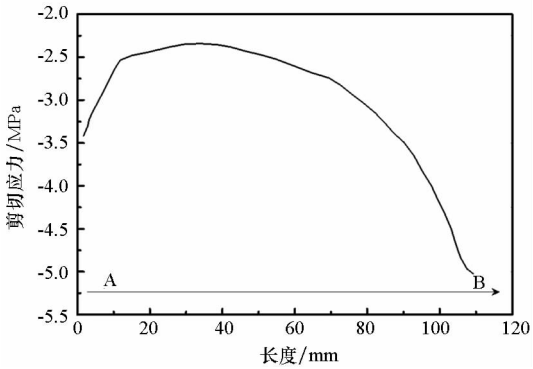
3.2　剪切应力分析

在裙连接结构设计时,根据理论计算得到轴向载荷为 1800 kN 时界面上受到的剪应力大小为 5.6 MPa。从计算结果文件中提取 1800 kN 时弹性层与裙 1 号黏接界面上的剪应力分布云图及沿图中 AC 路径的变化曲线,如图 7 所示。



(a) 弹性层 1 号黏接界面上剪切应力

(a) Shear stress contour on the bonding interface of the elastic layer 1



(b) 沿 AB 路径上的剪切应力分布

(b) Shear stress distribution along AB

图 7　剪切应力结果

Fig. 7　Results of the shear stress

由于弹性层受的剪应力方向与轴拉载荷方向相同为正值,因此界面上的接触剪应力为负,其最小值为 2.318 MPa,最大值出现在封头与筒体的过渡处(B 处)为 5.072 MPa。在 AB 范围内的黏接界面上,接触剪应力呈现中间小两端大的趋势,其平均剪应力小于 5.6 MPa,因此理论设计得到的黏接长度偏大,黏接结构有很大的强度富裕。

3.3　极限承载能力分析

根据 1.2 节的描述,通过提取裙连接结构黏接界面上的损伤变量,判断黏接界面的破坏情况,由损伤失效理论可知,随着裙外部载荷的不断增大,黏接界面将不断发生损伤与退化,脱黏区域将逐步扩展,最终导致裙体与界面完全剥离,此刻结构的承载能力达到极限,将其作为拉伸极限载荷。

对 110 mm 黏接长度的裙连接结构进行损伤失效分析。当轴向载荷 $F = 2154$ kN 时,黏接界面局部损伤变量 SDEG 达到 1,黏接界面发生失效,界面开始脱黏。随着载荷的增大,失效区域不断扩大,并在 $F = 2532$ kN 时,黏接界面完全失效。

3.4　弹性层材料参数对黏接性能的影响

弹性层是由橡胶、树脂、胶层等材料组成的复合材料。在仿真过程中,将其等效为各向同性材料,通过设置不同的弹性层材料性能研究其对裙脱黏性能的影响程度。本文针对弹性层弹性模量为 300 MPa、500 MPa、1000 MPa、1650 MPa 和 3300 MPa 五种情况进行分析,并给出了该五种材料性能下裙完全脱黏时的极限拉伸载荷。

图 8 给出了弹性层弹性模量对极限拉伸承载载荷的影响情况,可见随着弹性层弹性模量的增大,极限拉伸载荷呈现减小趋势。这是由于随着弹性层弹性模量的减小,弹性层的剪切变形增大,可以有效地抵抗界面的滑开型断裂。

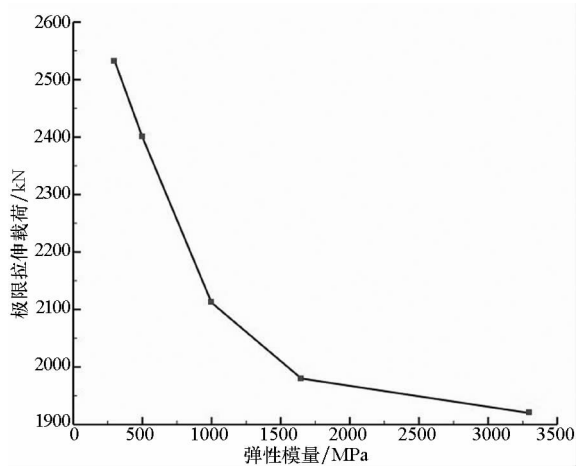


图 8　弹性模量对极限拉伸载荷的影响

Fig. 8　Effect of the elastic modulus on the ultimate tensile load

3.5　黏接长度对黏接性能的影响

裙黏接长度作为裙结构设计过程中的重要参数,将直接影响裙连接结构的黏接强度。过大的黏接长度将导致裙结构重量加大,且在黏接过程中更容易造成工艺上的缺陷,从而影响黏接性能的发挥,而过小的黏接长度又使得拉伸承载能力过小。

为了研究黏接长度对黏接性能的影响,这里分别建立了 5 种不同黏接长度的裙连接结构对应的壳体几何模型,并进行了极限拉伸载荷的分析计算。图 9 给出了极限拉伸承载能力随黏接长度的变化趋势,可见随着黏接长度的增大,极限拉伸载荷随之增大,且基本呈线性趋势。

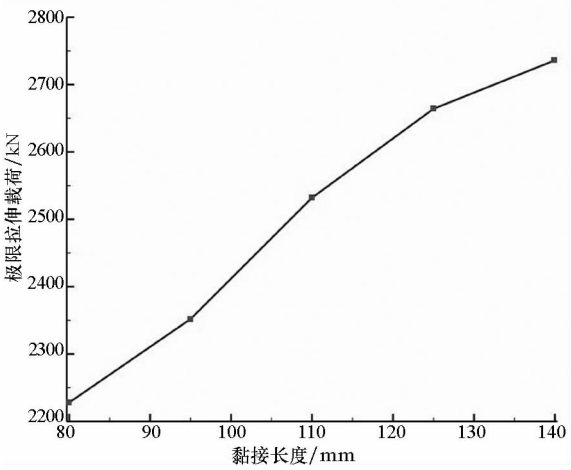


图9　黏接长度对极限拉伸载荷的影响

Fig. 9　Effect of the bonding length on the ultimate tensile load

4　结论

本文基于内聚力模型的损伤失效准则,建立纤维缠绕壳体复合裙连接结构的有限元模型,对复合裙连接结构的极限拉伸载荷及其影响因素进行了分析与讨论,主要结论如下:

1)由于裙连接区结构复杂且不连续,在轴向拉伸载荷作用下容易造成纤维缠绕壳体在裙尖位置应变变化剧烈,成为结构的薄弱部位。采用有限元模型计算得到的壳体轴向与环向应变与试验结果比较符合,验证了有限元模型的有效性。

2)黏接界面上的剪应力呈梯度分布,数值计算的剪应力小于理论计算值,说明理论设计下的黏接长度有足够的安全余量。

3)引入黏接界面的损伤失效模型,得出了裙连接区结构极限拉伸承载能力的分析方法,对裙连接结构的设计具有指导性作用。同时,基于内聚力模型的损伤失效准则也为复合材料的层间分层分析提供了解决途径。

4)极限拉伸承载能力受弹性层的弹性模量与黏接长度的影响。随弹性层弹性模量的减小,黏接结构的极限拉伸承载能力迅速增大;随黏接长度的增大,复合裙连接结构的极限拉伸承载能力基本呈线性增长的趋势。

参考文献(References)

[1]　侯晓,秦谊,丁文辉. 固体火箭发动机复合材料壳体承载能力分析[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1343-1349.
HOU Xiao, QIN Yi, DING Wenhui. Load-bearing capacity analysis of composite case structure of solid rocket motor [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1343-1349. (in Chinese)

[2]　王立强,任全彬,尤军峰. 固体火箭发动机复合材料壳体裙连接区结构数值分析[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(1): 108-113.
WANG Liqiang, REN Quanbin, YOU Junfeng. Numerical analysis on lap structure between skirt and composite SRM case [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(1): 108-113. (in Chinese)

[3]　苑博,刘勇琼,尤军峰,等. 轴压载荷作用下全复合材料裙与壳体搭接区的结构分析[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(6): 629-634.
YUAN Bo, LIU Yongqiong, YOU Junfeng, et al. Mechanical analysis of lap region between skirt and case under axial load [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(6): 629-634. (in Chinese)

[4]　彭超义,曾竞成,肖加余,等. 整体复合裙的铺层比优化设计与轴压性能分析[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(3): 208-211.
PENG Chaoyi, ZENG Jingcheng, XIAO Jiayu, et al. Optimum design of lay-up ratio and axial compression property analysis for an integral composite skirt [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006, 29(3): 208-211. (in Chinese)

[5]　陈科,任全彬,尤军峰,等. 固体火箭发动机复合材料壳体裙连接部位参数研究[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(1): 103-106.
CHEN Ke, REN Quanbin, YOU Junfeng, et al. Parameters investigation of lap structure between skirt and composite material case of SRM [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016, 36(1): 103-106. (in Chinese)

[6]　刘钧,肖加余,曾竞成,等. RTM工艺整体成型复合材料连接裙轴压性能[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(1): 45-50.
LIU Jun, XIAO Jiayu, ZENG Jingcheng, et al. Axial compression properties of composites adapter skirt integrally manufactured by RTM [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(1): 45-50. (in Chinese)

[7]　刘钧,肖加余,曾竞成,等. VARTM工艺整体成型复合材料连接裙局部性能试验研究[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 193-199.
LIU Jun, XIAO Jiayu, ZENG Jingcheng, et al. Experimental study on local properties of the composites skirt integrally manufactured by VARTM [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(6): 193-199. (in Chinese)

[8]　Needleman A. A continuum model for void nucleation by inclusion debonding [J]. Journal of Applied Mechanics, 1987, 54(3): 525-531.

[9]　赵宁,欧阳海彬,戴建京,等. 内聚力模型在结构胶接强度分析中的应用[J]. 现代制造工程, 2009, 11: 128-131, 149.
ZHAO Ning, OUYANG Haibin, DAI Jianjing, et al. The application of structure adhesive bonded strength using cohesive zone model [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009, 11: 128-131, 149. (in Chinese)

[10]　杨小辉,胡坤镜,赵宁,等. 内聚力界面单元在胶接接头分层仿真中的应用[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10): 317-320.
YANG Xiaohui, HU Kunjing, ZHAO Ning, et al. The simulation of the process of laminal damage in the adhesive bonded joint using the cohesive interface element [J]. Computer Simulation, 2010, 27(10): 317-320. (in Chinese)

[11]　徐林,魏俊红,安群力,等. 用内聚力模型研究PBGA封装焊点/IMC界面的分层开裂[J]. 固体力学学报, 2014, 35(4): 400-409.
XU Lin, WEI Junhong, AN Qunli, et al. Study on solder/IMC interface delamination of PBGA based on CZM method [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014, 35(4): 400-409. (in Chinese)

[12]　Pang J, Du Y, Wu K Y, et al. Fatigue analysis of adhesive joints under vibration loading [J]. The Journal of Adhesion, 2013, 89(12): 899-920.

[13]　Benzeggagh M L, Kenane M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(4): 439-449.