DOI: 10.3901/JME.2019.12.189

基于子模型法的动车侧窗粘接强度快速评价方法*

秦国锋^{1,2} 范以撒³ 那景新² 慕文龙² 谭伟²

(1. 广西师范大学职业技术师范学院 桂林 541004;

2. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130022;

3. 华北水利水电大学机械学院 郑州 450045)

摘要: 根据动车结构的特点, 基于有限元子模型法的基本原理, 提出一种动车侧窗粘接强度的快速评价方法。车体结构采用尺寸相对较大单元建立整体有限元模型, 侧窗结构采用尺寸较小单元建立有限元子模型, 基于三角形面积插值法提取侧窗子模型的位移边界条件, 对侧窗子模型进行强度分析获得胶粘剂的应力; 通过单搭接接头和对接接头的轴向拉伸试验测试, 建立二次应力准则作为失效准则, 对侧窗胶粘剂的粘接强度进行快速评价, 整个过程通过编写 FORTRAN 程序自动完成; 最后将快速评价方法和传统的整体细化评价方法进行对比。结果表明, 快速评价方法获得的胶粘剂安全系数略低于传统评价方法, 但是计算时间是传统评价方法的约 1/17, 这说明快速评价方法在保证可靠性的前提下, 大幅度提高计算效率, 为动车侧窗粘接结构的优化设计奠定了基础。

关键词: 动车; 侧窗; 粘接; 强度评价; 子模型法

中图分类号: U266

Rapid Evaluation Method of Adhesive Strength for EMU Train's Side-window Based on Sub-model Technology

QIN Guofeng^{1,2} FAN Yisa³ NA Jingxin² MU Wenlong² TAN Wei²

(1. Teachers College for Vocational and Technical Education, Guangxi Normal University, Guilin 541004;

2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022;

3. School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045)

Abstract: According to the structure characteristics of EMU train, a rapid evaluation method of adhesive strength is presented based on sub-model technology. The global finite element (FE) model of body structure is built with big size elements, and the sub-model of side-window is built with small size elements. The displacement boundary condition of sub-model is extracted through interpolation method of triangle area, and then the stress of side-window adhesive structure is obtained by strength analysis of sub-model. The quadratic stress criterion is established by experimental tests of single lap joints and butt joints to evaluate the adhesive strength of side-window. Furthermore, the process of evaluation method is implemented by a FORTRAN program. Finally, the rapid evaluation method is compared with the traditional method of overall refined model. Results showed that the safety coefficients calculated by the rapid evaluation method are slightly lower than that by the traditional method, but the computing time of rapid evaluation method was 1/17 of traditional method. It is concluded that the rapid evaluation method possess is reliable and efficient, which lay the foundation of optimization design for EMU train's adhesive structure.

Key words: EMU train; side-window; adhesive; strength evaluation; sub-model technology

0 前言

随着中国动车技术和铁路运输工业的迅猛发展, 许多新型材料如铝合金、碳纤维、玻璃钢、

蜂窝材料、泡沫材料等在轨道车辆上得到广泛的应用^[1]; 粘接技术作为一种新型的结构连接技术, 具有承载面积大、应力分布均匀等特点, 不仅可以实现不同材质、复杂结构形状的连接, 还能够在不破坏零件结构的前提下实现连接^[2-4]。动车组侧窗采用粘接结构, 在列车运行过程中承受着自身重力、大气负压、车体变形等多种载荷的影响, 其

* 国家自然科学基金(51775230)和吉林大学研究生创新基金(101832018C198)资助项目。20180617 收到初稿, 20181215 收到修改稿

粘接强度直接影响到动车的使用寿命、乘客的安全性与舒适性^[5]。

飞机、船舶、汽车、桥梁等结构尺寸较大,为了获得局部区域的详细应力分布,传统的分析方法是将整个模型细化,这必然带来建模和计算时间的增加;另一种方法是子模型法,将局部模型分割出来单独细化^[6]。子模型分析方法是采用较大单元建立整体有限元模型进行分析,根据分析结果获取局部精细化模型的边界条件,再对局部模型进行分析^[7]。子模型分析方法的关键在于建立局部模型的边界条件,常用的边界条件是整体有限元模型分析的位移或应力^[8-9]。LARSSON^[6]采用有限元子模型法分析零部件焊点和安装孔周围的应力;WIERER 等^[8]采用有限元子模型法分析复合材料管道的复杂损伤;徐伟等^[9]应用子模型法对大跨径混凝土斜拉桥梁桥面板局部进行有限元结构受力分析;涂周杰等^[10]采用子模型法分别计算平板和箱形结构中包含椭圆形表面裂纹的三个应力强度因子;梁珩等^[11]采用有限元子模型法对高超声速飞行器结构强度应力损伤问题进行分析研究。

通过有限元子模型法能够获得复杂粘接结构在复杂载荷作用下的应力分布,为了对粘接结构进行强度评价,还需要建立合适的失效准则^[12]。考虑到胶层厚度一般较薄,在载荷作用下主要存在垂直于粘接界面的正应力和平行于粘接界面的剪应力两个应力分量^[5]。基于正应力和剪应力的二次应力准则被广泛应用于胶粘剂初始破坏的强度预测,该准则首先由 BREWER 等^[13]提出,能够对纯正应力、纯剪应力以及正剪混合模式受力状态下的失效进行预测;LEE 等^[14]对比了 von Mises 准则和二次应力准则对不同应力状态下粘接接头的失效预测,发现二次应力准则具有更高的预测精度;CAMPILHO 等^[15]采用二次应力准则对 CFRP 单搭接接头在拉伸状态下的失效强度进行预测。NA 等^[16]应用二次应力准则预测铝合金单搭接、对接和不同角度的嵌接接头在拉伸测试过程中的破坏强度。

考虑到动车结构尺寸较大,而侧窗胶粘剂厚度方向尺寸较小,若采用传统的整体细化方法,则单元尺寸较小,单元数量较大,造成计算效率低下。基于有限元子模型法,提出一种动车侧窗粘接强度的快速评价方法;车体结构采用尺寸相对较大单元建立整体有限元模型进行强度分析,忽略侧窗对车体结构的影响,获得车体结构变形的位移;采用小尺寸单元建立侧窗子模型,并且该侧窗子模型与车体结构整体模型存在重叠区域,基于三角形面积插值法提取侧窗子模型的位移边界条件,对侧窗结构

的胶粘剂进行强度分析,获得胶粘剂实体单元在六个方向的应力分量;对单搭接接头和对接接头进行试验测试,建立二次应力准则;根据弹性力学的力的平衡原理,将胶粘剂的六个应力分量转换简化为正应力与剪应力的形式,根据二次应力准则对胶粘剂进行强度评价;最后将传统的整体模型细化评价方法与快速评价方法进行对比。

1 侧窗结构粘接强度应力分析

1.1 车体结构强度分析

选择某动车组头车及司机室结构进行强度分析,在 MSC.Patran 平台上,采用 80 mm 壳单元建立车体结构有限元模型(不含侧窗结构),如图 1 所示;动车车体采用右手坐标系, X 正向为动车的正向运动方向, Z 轴正向为垂直于地面向上, Y 轴位于水平面。单元以四边形为主,单元数量为 202 323 个,节点数量为 113 655 个。车体结构为大型中空型铝合金车体,其材料的弹性模型、泊松比、密度如表 1 所示。

图 1 车体结构有限元模型

表 1 铝合金材料属性参数

材料属性	密度/(kg/m ³)	泊松比	弹性模量/GPa
铝合金	2 730	0.33	71

根据 EN 12663: 2010 轨道交通—铁道车辆车体结构要求^[17],选择最大垂直载荷工况对车体结构进行强度分析,车体整备质量 38 t,最大载客量 10.8 t,载荷均布在地板上,重力加速度为 1.3g,采用 MSC.NASTRAN 求解器进行仿真分析,其变形云图如图 2 所示,最大变形为 18.1 mm,大变形区域主要集中在车体结构中部的地板上。

图 2 车体结构变形云图

1.2 基于三角形面积插值法的位移边界条件提取原理

本文提出的整体模型与子模型存在重叠区域(图3), 即子模型边界大于整体模型边界, 则子模型边界上的所有节点都会落在整体模型内部。

图3 整体模型与子模型具有重叠区域示意图

以任意节点 O 说明边界位移插值原理, 由图3可知, 节点 O 一定位于整体模型四边形单元的内部或者边上, 如图4所示, 计算节点 A 、 B 、 C 、 D 距离节点 O 的距离 AO 、 BO 、 CO 、 DO , 根据节点 O 与节点 A 、 B 、 C 、 D 的距离, 由近及远依次编号为1~4, 4个节点 A 、 B 、 C 、 D 可以组成4个三角形, 即 ABC 、 ABD 、 ACD 、 BCD ; 计算三角形中三个节点与节点 O 距离的总和, 根据距离总和由小到大, 依次判断节点 O 是否在该三角形内部或者边上, 直到节点 O 位于某个三角形内部或者边上为止。由图4可知, 节点 O 一定位于某个三角形内部或者边上。

图4 子模型节点位于整体模型四边形单元内的示意图

假设节点 O 落在整体模型节点 A 、 B 、 C 组成的三角形内部(含边上), 计算三角形 ABC 、 OAB 、 OAC 、 OBC 的面积, 分别表示为 S_{ABC} 、 S_{OAB} 、 S_{OAC} 、 S_{OBC} 。

通过整体模型的有限元分析, 已经获得了整体模型节点 A 、 B 、 C 在三个方向的平动和转动位移。假设节点 A 在 XYZ 三个方向的平动位移为 D_{XA} 、 D_{YA} 、 D_{ZA} , 节点 A 在 XYZ 三个方向的转动位移为 R_{XA} 、 R_{YA} 、 R_{ZA} , 同理, 节点 B 、 C 在 XYZ 方向的平动位移及转动位移分别为 D_{XB} 、 D_{YB} 、 D_{ZB} 、 R_{XB} 、 R_{YB} 、 R_{ZB} 、 D_{XC} 、 D_{YC} 、 D_{ZC} 、 R_{XC} 、 R_{YC} 、 R_{ZC} 。根据式(1)~(6)三角形面积插值获得子模型节点 O

在 XYZ 方向的平动位移及转动位移, 分别表示为 D_{XO} 、 D_{YO} 、 D_{ZO} 、 R_{XO} 、 R_{YO} 、 R_{ZO} 。

$$D_{XO} = D_{XA} \times \frac{S_{OBC}}{S_{ABC}} + D_{XB} \times \frac{S_{OAC}}{S_{ABC}} + D_{XC} \times \frac{S_{OAB}}{S_{ABC}} \quad (1)$$

$$D_{YO} = D_{YA} \times \frac{S_{OBC}}{S_{ABC}} + D_{YB} \times \frac{S_{OAC}}{S_{ABC}} + D_{YC} \times \frac{S_{OAB}}{S_{ABC}} \quad (2)$$

$$D_{ZO} = D_{ZA} \times \frac{S_{OBC}}{S_{ABC}} + D_{ZB} \times \frac{S_{OAC}}{S_{ABC}} + D_{ZC} \times \frac{S_{OAB}}{S_{ABC}} \quad (3)$$

$$R_{XO} = R_{XA} \times \frac{S_{OBC}}{S_{ABC}} + R_{XB} \times \frac{S_{OAC}}{S_{ABC}} + R_{XC} \times \frac{S_{OAB}}{S_{ABC}} \quad (4)$$

$$R_{YO} = R_{YA} \times \frac{S_{OBC}}{S_{ABC}} + R_{YB} \times \frac{S_{OAC}}{S_{ABC}} + R_{YC} \times \frac{S_{OAB}}{S_{ABC}} \quad (5)$$

$$R_{ZO} = R_{ZA} \times \frac{S_{OBC}}{S_{ABC}} + R_{ZB} \times \frac{S_{OAC}}{S_{ABC}} + R_{ZC} \times \frac{S_{OAB}}{S_{ABC}} \quad (6)$$

1.3 侧窗子模型粘接强度分析

选取动车某侧窗建立侧窗结构子模型(图5), 窗框结构、玻璃采用壳单元, 胶粘剂采用实体单元, 单元平均尺寸为10 mm, 单元数量47 099, 单元节点数44 892; 侧窗子模型周围建立宽度为 L 的车体侧围, 该车体侧围即整体模型与子模型的重叠部分; 子模型车体侧围使边界约束条件远离侧窗结构的胶粘剂, 根据圣维南原理, 重叠部分越大, 边界约束条件对子模型的影响越小。

图5 侧窗结构子模型

选用Sikaflex-265, 它是一种单组份聚氨酯车窗玻璃胶胶粘剂, 其通过与大气中的湿气反应固化形成一种永久性的弹性物质。窗框和车体侧围采用铝合金, 车窗玻璃为钢化玻璃。Sikaflex-265、铝合金、钢化玻璃的材料属性如表2所示。

表2 Sikaflex-265、铝合金、钢化玻璃的材料属性

材料属性	铝合金	Sikaflex-265	钢化玻璃
密度/(kg/m ³)	2 730	1 200	2 500
泊松比	0.33	0.48	0.2
弹性模量/MPa	71 000	2.7	72 000

通过车体结构的强度分析,获得车体有限元模型上所有节点的位移(第 1.1 节),采用三角形面积插值法提取子模型边界的位移,整个过程通过编写 FORTRAN 程序自动实现(第 1.2 节)。将位移边界条件加载到侧窗子模型对应的节点上,作为侧窗子模型的约束边界条件。

根据 EN 12663:2010 轨道交通—铁道车辆车体结构要求^[17],选择侧窗的某一静强度工况进行强度分析,该工况下侧窗结构承受 X 正方向 $3g$ 加速度、 Z 负方向 $1g$ 的加速度、以及垂直于玻璃平面由车内指向车外的 $6\,000\text{ Pa}$ 的压力(即进出隧道时的车内外压差)。采用 MSC.NASTRAN 求解器进行仿真分析,获得胶粘剂单元在六个方向的应力分量。

2 失效准则

2.1 试验测试

选用单搭接接头和对接接头进行准静态试验测试,其几何尺寸如图 6 所示,粘接基材采用铝合金,胶粘剂采用 Sikaflex-265,粘接区域为边长 25 mm 的正方形,粘接厚度为 1 mm 。单搭接接头代表剪应力受力状态,对接接头代表正应力受力状态。在常温下,采用万能电子拉伸试验机对试件进行测试,试验测试时,粘接试件的上下两端通过十字万向节与电子拉力试验机相连,保证粘接试件的受力是轴向的,记录拉伸作用力随时间的变化曲线。

(a) 单搭接接头

(b) 对接接头

图 6 几何尺寸

2.2 建立二次应力准则

每个单搭接和对接试件测试五次,取每次结果的平均值,测试结果如表 3 所示。用平均拉力除以试件的粘接面积,即可得到平均破坏强度。

根据试验测试获得的单搭接接头和对接接头破坏强度,建立二次应力准则^[14]

$$\left(\frac{\sigma}{N}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

式中, σ 、 τ 分别表示正应力与切应力; N 、 S 分别表示纯正应力、纯切应力状态下的极限破坏强度。

表 3 粘接试件测试结果

试件编号	单搭接接头 最大拉力/N	对接接头 最大拉力/N
1	6 025	5 059
2	6 104	5 132
3	5 986	5 012
4	6 086	4 995
5	5 975	4 981
平均拉力	6 035.2	5 035.8
平均破坏强度/MPa	9.66	8.06

建立直角坐标系,以切应力 τ 为横坐标,正应力 σ 为纵坐标,将试验测试的破坏强度代入式(7),得到胶粘剂的二次应力准则,如图 7 所示,该曲线包含了胶粘剂在纯正应力、纯切应力以及混合受力状态下的破坏强度。

图 7 胶粘剂破坏强度曲线

3 胶粘剂粘接强度评价

3.1 应力坐标转换

通过有限元子模型分析方法获得了胶粘剂单元在六个方向的应力分量,分别为 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{xz} ,而二次应力准则是基于粘接界面法向正应力和切向切应力建立的,因此需要将胶粘剂的六个应力分量转换简化成正应力 σ 与切应力 τ 的形式。

以任意胶粘剂单元 i 为例进行具体说明,胶粘剂粘接面局部坐标系与整车全局坐标系的关系,如图 8 所示。 A 、 B 、 C 三点所在平面为粘接面,设其法线方向矢量为 $\mathbf{n}'$,其在在全局坐标系 XYZ 下的方向余弦分别为 l 、 m 、 n 。

图8 应力坐标转换原理图

根据弹性力学力的平衡原理^[18], 可得到A、B、C所在平面的全应力 $p(p_x, p_y, p_z)$

$$\begin{cases} p_x = l\sigma_x + m\tau_{xy} + n\tau_{zx} \\ p_y = m\sigma_y + n\tau_{yz} + l\tau_{xy} \\ p_z = n\sigma_z + l\tau_{zx} + m\tau_{yz} \end{cases} \quad (8)$$

则胶粘剂单元 i 的正应力 σ_i 与切应力 τ_i

$$\begin{cases} \sigma_i = lp_x + mp_y + np_z \\ \tau_i = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \sigma_i^2} \end{cases} \quad (9)$$

3.2 粘接强度评价

利用二次应力准则, 对胶粘剂转换后的正应力与切应力进行强度评价。如图9所示, 以胶粘剂单元 i 的切向切应力 τ_i 为横坐标, 法向正应力 σ_i 为纵坐标, 组成的坐标点 $P(\tau_i, \sigma_i)$, 落在胶粘剂的失效准则曲线图中, 连接坐标原点 $O(0,0)$ 与点 $P(\tau_i, \sigma_i)$, 并延长该线段与失效准则曲线交于点 $P'(\tau'_i, \sigma'_i)$ 。 $P'(\tau'_i, \sigma'_i)$ 通过式(10)获得

$$\begin{cases} \left(\frac{\sigma}{8.06}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{9.66}\right)^2 = 1 \\ \sigma = \frac{\sigma_i}{\tau_i} \tau \end{cases} \quad (10)$$

式中, σ 为失效准则曲线上的正应力 σ'_i , τ 为失效准则曲线上的切应力 τ'_i 。

图9 强度评价原理图

安全系数 S_i 定义为

$$S_i = \frac{|OP'|}{|OP|} = \frac{\sqrt{\sigma_i'^2 + \tau_i'^2}}{\sqrt{\sigma_i^2 + \tau_i^2}} \quad (11)$$

式中, $|OP'|$ 为胶粘剂极限粘接强度; $|OP|$ 为侧窗胶粘剂单元实际应力。

根据安全系数 S_i 的大小对动车侧窗的粘接强度进行评价, 若 $S_i < 1$, 则该胶粘剂单元应力超过极限强度值, 不符合强度要求; 若 $S_i \geq 1$, 则该胶粘剂单元应力没有超过极限强度值, 符合强度要求, 安全系数越大, 越安全; 粘接强度评价的整个过程通过编写FORTRAN程序自动完成。

4 快速评价方法与传统评价方法对比

4.1 传统评价方法

建立车体结构和侧窗结构的一体化有限元模型, 如图10所示, 车体、窗框、玻璃采用壳单元, 胶粘剂采用六面体单元, 单元平均尺寸为10 mm, 节点数量为1 874 525个, 单元数量为2 671 309个。一体化有限元模型的材料属性、分析工况与子模型分析方法保持一致, 并采用相同的二次应力准则对传统分析方法获得的胶粘剂应力进行强度评价。

图10 车体与侧窗结构一体化有限元模型

4.2 结果对比

为了对快速评价方法和传统评价方法进行对比, 考虑到动车左右侧窗对称, 选取左侧9个侧窗胶粘剂的最小安全系数进行统计, 如图11所示。快

图11 侧窗胶粘剂安全系数对比

速评价方法获得的安全系数略低于传统的评价方法,最大约 10.4%。由于快速评价方法在车体结构分析的时候忽略了侧窗对车体结构的贡献,导致车体结构变形略微增大,进而使侧窗胶粘剂应力增大,安全系数偏低,这是偏于安全的设计。

对快速评价方法和传统评价方法的单元数量和仿真分析时间进行统计,结果如表 4 所示。传统评价方法的单元数量是快速评价方法的 3.8 倍,计算时间是快速评价方法的 17 倍。而且当胶粘剂结构尺寸发生改变的时候,快速评价方法的车体结构分析不需要重复计算,只需要计算侧窗子模型。

表 4 单元数量与计算时间对比

方法	单元数量	计算时间/min
快速方法	697 215	13
传统方法	2 671 309	221

5 结论

本文基于子模型法的基本原理,提出一种具有重叠区域的子模型分析方法,再结合试验测试建立的二次应力准则,对动车侧窗粘接强度进行快速评价,得到以下结论。

(1) 提出的子模型分析法中整体模型与子模型具有重叠区域,能够避免边界条件引起的应力集中;子模型位移边界通过整体模型中距离最近的三个节点位移插值获得。

(2) 通过对单搭接和对接接头的拉伸试验测试,基于粘接胶层的正应力与切应力,建立二次应力失效准则,能够对正应力、切应力以及正剪组合应力状态下的胶层进行强度评价。

(3) 通过动车、侧窗一体化模型的传统分析方法与本文提出的快速分析方法对比,发现快速评价方法的安全系数略低于传统分析方法,且快速评价方法的计算时间是传统分析方法的 1/17,证明了快速分析方法的可靠性与高效性。

粘接结构在动车的服役过程中受温度、湿度、载荷等影响因素的作用下会发生老化,导致力学性能的下降,因此在粘接结构设计的时候还需要考虑老化的影响。

参 考 文 献

- [1] 周贺祥. 高速铁路工业新材料的应用进展[J]. 化工新材料, 2016(4): 47-48.
ZHOU Hexiang. Progress in the application of new material for high speed railway industry[J]. New Chemical Materials, 2016(4): 47-48.

- [2] SILVA L D. Handbook of adhesion technology[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [3] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 1-23.
LI Yongbing, MA Yunwu, LOU Ming, et al. Advances in welding and joining processes of multi-material lightweight car body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 1-23.
- [4] 韩啸, 金勇, 杨鹏, 等. 胶层厚度对胶粘剂 I 型断裂韧性影响试验和仿真研究[J]. 机械工程学报, 2018(10): 43-52.
HAN Xiao, JIN Yong, YANG Peng, et al. Experimental and simulation study on the effect of adhesive thickness on mode I fracture toughness[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018(10): 43-52.
- [5] 刘玉. 高速动车组侧窗粘接结构强度校核方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
LIU Yu. Research on strength check method for side window bonding structures of high-speed EMU[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [6] LARSSON V. Analysis of holes and spot weld joints using sub models and superelements[D]. Luleå : Luleå University of Technology, 2010.
- [7] RAO S S. The finite element method in engineering[M]. Oxford: Butterworth-heinemann, 2017.
- [8] WIERER M, SEJNOHA M, ZEMAN J, et al. Multiscale analysis of woven composites-scale transition via macroelement[J]. Building Research Journal, 2005(52): 93-110.
- [9] 徐伟, 李智, 张肖宁. 子模型法在大跨径斜拉桥桥面结构分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 30-34.
XU Wei, LI Zhi, ZHANG Xiaoning. Application of submodeling method for analysis for deck structure of diagonal cable-stayed bridge with long span[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(6): 30-34.
- [10] 涂周杰, 李国清, 张辉, 等. 有限元子模型法计算箱形结构表面裂纹应力强度因子[J]. 华中科技大学学报, 2006(增刊 2): 65-67.
TU Zhoujie, LI Guoqing, ZHANG Hui, et al. Stress intensity factors of surface cracks in a box structure by sub-modeling technology of finite element[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2006 (Suppl.2): 65-67.
- [11] 梁珩, 曾建江, 易礼毅, 等. 高超声速飞行器多层次结构强度分析方法[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 588-596.
LIANG Heng, ZENG Jianjiang, YI Liyi, et al. Multi-level strength analysis approach for hypersonic vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 588-596.
- [12] BANE A M D, SILVA L F M D. Adhesively bonded joints

- in composite materials: An overview[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design & Applications, 2009, 223(1): 1-18.
- [13] BREWER J C, LAGACE P A. Quadratic stress criterion for initiation of delamination[J]. Journal of Composite Materials, 1988, 22(12): 1141-1155.
- [14] LEE M, WANG C H, YEO E. Effects of adherend thickness and taper on adhesive bond strength measured by portable pull-off tests[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013, 44(44): 259-268.
- [15] CAMPILHO R, MOURA M D, DOMINGUES J. Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs[J]. International Journal of Solids & Structures, 2008, 45(5): 1497-1512.
- [16] NA J, LIU Y, CAI L, et al. An adhesive joint strength evaluation method and its application in mechanical engineering[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016, 2(2): 1-14.
- [17] EN 12663 : 2010, Railway applications—Structural requirements of railway vehicle bodies[S]. Brussels : Comité Européen de Normalisation, 2010.
- [18] 李兆霞, 郭力. 工程弹性力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2009.
- LI Zhaoxia, GUO Li. Plastic in engineering[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2009.
-
- 作者简介:** 秦国锋(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为车身结构设计理论与强化技术。
E-mail: qinguofeng@gxnu.edu.cn
- 那景新(通信作者), 男, 1957 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车身结构设计理论与强化技术。
E-mail: najx@jlu.edu.cn