

基于扫描线点云的飞机蒙皮修配量提取方法

杨角龙¹, 黄翔¹, 李泷杲¹, 熊天辰², 赵子越³

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 江西航天海虹测控技术有限责任公司, 南昌 330024;

3. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

[摘要] 针对飞机蒙皮数控加工时需要精确修配量的问题, 提出了一种基于扫描线点云的飞机蒙皮修配量提取方法。首先对点云进行分块处理并通过点到拟合平面的距离提取每条扫描线的边界特征点; 然后采用弦高法对特征点进行去噪处理并选取中间点作为初始点向两侧进行排序; 最后对蒙皮对接模型和激光扫描边界进行分析, 将特征点沿着对接方向进行补偿。试验验证表明, 该方法可以提取精确的修配量, 精度达到 0.06mm, 满足蒙皮数控加工的需求。
关键词: 数控加工; 修配量; 特征点; 扫描线点云; 弦高差法

Method for Extracting Repair Amount of Skin Seam Based on Scan Line Point Cloud

YANG Jiaolong¹, HUANG Xiang¹, LI Shuanggao¹, XIONG Tianchen², ZHAO Ziyue³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Department of Manufacturing, Jiangxi Aerospace Haihong Test & Control Co., Ltd., Nanchang 330024, China

3. AVIC Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

[ABSTRACT] In order to solve the problem of precision fitting in numerical control machining of the skin seam, a method for extracting repair amount of the skin seam was proposed based on scan line point cloud. Firstly, the point cloud was processed in blocks and the boundary feature point of each scan line was extracted by the distance from the point to the fitting plane. Then, the feature points were denoised using chord height difference method and the middle point was selected as the initial point to sort on both sides. Finally, the skin seam docking model and laser scanning boundary were analyzed and the feature points were extended to the docking direction to compensate. Field experiments showed that this method could provide exact repair amount with an accuracy of 0.06mm, which could meet the needs of numerical control machining.

Keywords: Numerical control machining; Repair amount; Feature point; Scan line point cloud; Chord height difference method

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.073

飞机蒙皮是包围在飞机骨架外围的构件, 使用铆钉或黏接剂固定在骨架上, 形成飞机的气动力外形。蒙皮不仅要形成和维持飞机的气动外形, 还必须能够承受一定的局部气动力^[1-2]。飞机装配时, 蒙皮对接精度要求较高^[3]。蒙皮粗加工时存在一定余量, 此时需要对蒙皮进行修配, 提高其修配精度可以有效提高飞机装配质量。

传统的飞机蒙皮修配方法是人工划线并手动切割, 传统修配方法在国内各大主机厂蒙皮加工方面仍然占很大的分量。手工切割的效率差、精度低、加工质量差, 只适合单批次、少量、精度较低的零件。随着飞机生产

对蒙皮对接质量要求的提高, 逐渐采用数控加工来修配飞机蒙皮, 此时需要提供修配量用于数控加工。精确的修配量可以提高切割的精度与效率, 提高飞机装配质量, 所以需要蒙皮修配量提取方法进行研究。王辉等^[4]对高速飞行器薄壁异形零件加工余量进行了分析, 提出了一种基于毛坯/零件三维模型匹配对准的工件加工余量数值分析方法, 得到的三维加工余量数据 RMS (Deviation) $\approx 0.15\text{mm}$ 。

常用的激光测量设备有 TSCAN、激光雷达等^[5], 本文使用 TSCAN 进行蒙皮边界的扫描^[6]以提取修配量。

飞机蒙皮与飞机的梁、框等结构件不同,边界较长、多为空间曲线且厚度小,其边界测量多通过激光扫描完成。常用的边界提取方法包括特征点提取法^[7]和曲面重构法^[8]。特征点提取法是通过提取边界特征点后拟合边界特征线。曲面重构法与之相反,即直接得到边界特征线,然后离散边界特征线得到边界特征点^[9-10]。本文采用特征点提取法提取边界。

1 点云数据预处理

本文使用 Leica T-Scan 5 扫描蒙皮边界进行数据采集, Leica T-Scan 5 扫描精度为 20 μm,线间距最小可设置为 0.1mm。为了尽量保证测量准确性,保留蒙皮的边界特征,将线间距设置为 0.1mm。T-Scan 5 的扫描数据结构是线式点云,测量点有序排列,如图 1 所示。考虑到蒙皮边界长度较长,对扫描结果进行分块处理,每次只取 30 条扫描线进行处理。

1.1 特征点识别及提取

南京航空航天大学的严成等^[6]通过点到扫描线距离求取特征点,但该方法易受扫描方向、单条扫描线质量等因素影响,本文通过点到平面距离求取特征点。求取特征点时求出点云两侧特征点,然后判断哪侧特征点为边界特征点。以前 30 条扫描线为例求取特征点,如图 2 (a) 所示,提取扫描线上点 $P_{i,j}$ ($0 \leq i \leq 29, 4 \leq j \leq 24$) 拟合出一个平面方程为 $Ax+By+Cz=D$ 的平面 1。图 2 (b) 为单条扫描线 n 个点(每条扫描线上的 n 不一定相等),设 $d_{j_0}, d_{j_1}, d_{j_2}$ 分别为点 P_j, P_{j+1}, P_{j+2} 到平面 1 的距离,定一个阈值为 δ 。再利用公式(1)计算,单条扫描线上单侧特征点的识别方法如图 3 所示。

$$d_{j_0} = \frac{|Ax_j + By_j + Cz_j + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (1)$$

求出点云两侧所有特征点后,根据特征点离散程度提取所需特征点。设 m 为单侧特征点个数,提取所需特征点步骤如下:

步骤 1 将两侧特征点分别存入数组 Leftlinjie[n][3] 和 rightlinjie[n][3] 中,将中间变量初值赋为 $i=0, \text{leftnum}=0, \text{rightnum}=0, m_0=0, m_1=0$ 。

步骤 2 leftlinjie[i][3] 和 leftlinjie[$i+1$][3] 间的距离赋值给 m_0 , rightlinjie [i][3] 和 rightlinjie [$i+1$][3] 间的距离赋值给 m_1 ,判断 m_0 和 m_1 关系:

- (1) 若 $m_0 > m_1$, leftnum= leftnum+1, $i=i+1$;
- (2) 若 $m_0 < m_1$, rightnum = rightnum + 1, $i=i+1$ 。

步骤 3 判断 i 和 m 关系:

- (1) 若 $i < m-1$,则跳到步骤 2;
- (2) 若 $i = m-1$,则跳到步骤 4。

步骤 4 判断 leftnum 和 rightnum 关系:



图1 测量点
Fig.1 Measuring point

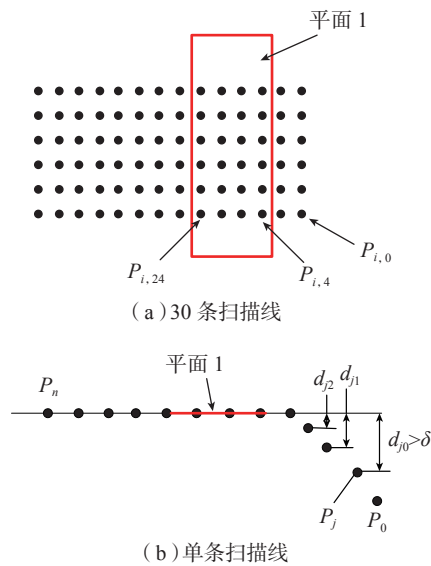


图2 特征点提取
Fig.2 Extracting the feature points

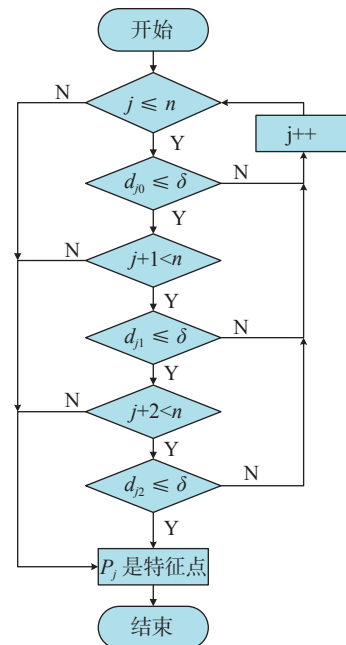


图3 特征点识别方法
Fig.3 Identification method of feature points

(1) 若 $leftnum > rightnum$, 则取右侧特征点, 算法结束;

(2) 若 $leftnum < rightnum$, 则取左侧特征点, 算法结束。

1.2 特征点去噪

常用的去噪方法包括弦高差法、最小二乘法和平滑滤波法等, 本文采用弦高差法进行特征点去噪, 判断准则为: 过 P_i 的相邻点 P_{i-1} 和 P_{i+1} 作弦, 如图 4 (a) 所示。给定两个阈值 er_1 和 er_2 , 若 $h_i > er_1$, 则 P_i 属于噪声点; 若 $h_i < er_2$, 则 P_i 不属于噪声点; 若 $er_2 < h_i < er_1$, 则为图 4 (b) 求点 P_i 到相邻点 P_{i-1} 和 P_{i+1} 连线的距离 h_i' 。若 $h_i' < er_2$, 则 P_i 不属于噪声点; 否则, P_i 属于噪声点。

1.3 特征点排序

本文采用 B 样条算法拟合曲线, 因此需要对特征点进行排序, 得到一组有序的点^[11]。常用的点排序方法是求出初始点, 再根据最小距离选取下个点进行排序。但是扫描边界时, 在起始位置可能会反复扫描, 初始点较难判断, 因此对点排序算法进行优化。点排序步骤如下:

步骤 1 提取特征点数组 $linjie[i][3]$ 中间的一个点作为初始点 P' , 将该点添加到空链表 $_trlist1$ 和空链表 $_trlist2$ 中并在 $linjie[i][3]$ 中去除该点。

步骤 2 求出 $linjie[i][3]$ 中距离 P' 最近的点 P'' , 最近距离为 d_{min} 。

步骤 3 由 d_{min} 大小判断:

(1) 如果 $d_{min} < 2$, 将 P'' 添加到链表 $_trlist1$ 尾部, P'' 赋值给 P' , 在 $linjie[i][3]$ 中去除 P'' , 跳到步骤 2;

(2) 如果 $d_{min} > 2$, 跳到步骤 4。

步骤 4 取出链表 $_trlist2$ 头元素为 P' 。

步骤 5 判断 $linjie[i][3]$ 是否为空:

(1) 如果 $linjie[i][3] == NULL$, 则跳到步骤 7;

(2) 如果 $linjie[i][3] != NULL$, 则求出 $linjie[i][3]$ 中距离 P' 最近的点 P'' , 最近距离为 d_{min} , 跳到步骤 6。

步骤 6 由 d_{min} 大小判断:

(1) 如果 $d_{min} < 2$, 将 P'' 添加到链表 $_trlist2$ 尾部, P'' 赋值给 P' , 在 $linjie[i][3]$ 中去除 P'' , 跳到步骤 5;

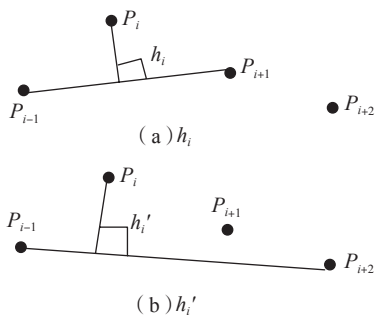


图4 特征点去噪

Fig.4 Feature point denoising

(2) 如果 $d_{min} > 2$, 跳到步骤 7。

步骤 7 由链表 $_trlist1$ 和 $_trlist2$ 得到有序特征点, 算法结束。

点云数据处理完成得到特征点后, 通过 B 样条算法^[12-13]。拟合曲线并在 SpatialAnalyzer (SA) 中生成。

2 修配量的提取

蒙皮对接模型如图 5 (a) 所示, 在机床加工后的两块蒙皮沿着规定的方向移动并旋转后, 可以实现对接, 此时理论上有个大小为 b 的间隙。在实际对接时蒙皮会发生干涉或产生对缝, 如图 5 (b) 所示。对 d 进行分析, 当蒙皮之间产生间隙时, 修配量为 $-d+b$ 。当蒙皮之间发生干涉时, 修配量为 $d+b$ 。

扫描结果移动的距离和方向及旋转的角度由蒙皮位置决定。但是, 因为 T-Scan 属于点激光扫描, 扫描结果是离散点, 有一定的点间距, 蒙皮边界通常离特征点有一定距离, 如图 6 所示。可以看出单个蒙皮单条扫描线最大误差值为 a (a 为点间距), 而结果是取多条扫描线特征点拟合曲线, 所以要将特征点根据对接方向整体偏移一个平均值 $a/2$ 。因蒙皮理论上有个大小为 b 的间隙, 因此将其中一侧特征点延着相同方向再平移 b 距离。

测量蒙皮上事先规划的点得到对接方向的单位向量 $\vec{\beta} (a_1, b_1, c_1)$, 两侧特征点分别为 $P_i' (x_i,$

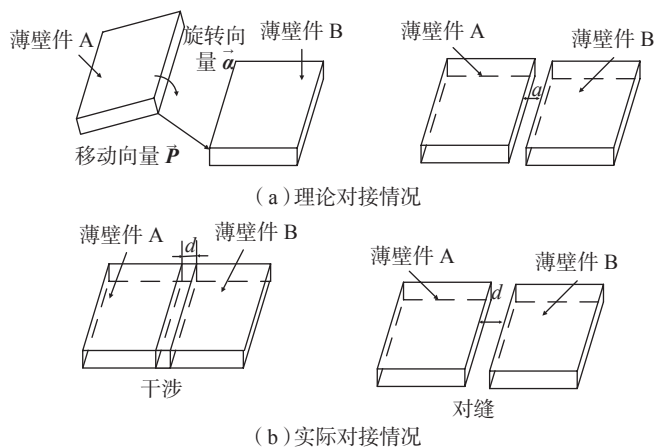


图5 蒙皮对接

Fig.5 Thin-walled parts docking

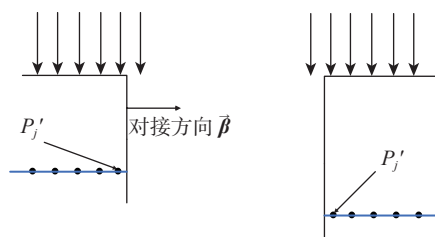


图6 激光扫描边界

Fig.6 Laser scanning boundary

$y_i, z_i)$ 和 $P_j'(x_j, y_j, z_j)$, 则偏移后的坐标分别为 $P_i''(x_i + a_1 \cdot (b+a/2), y_i + b_1 \cdot (b+a/2), z_i + c_1 \cdot (b+a/2))$ 和 $P_j''(x_j - a_1 \cdot a/2, y_j - b_1 \cdot a/2, z_j - c_1 \cdot a/2)$ 。

3 试验与分析

3.1 试验装置

如图 7 和 8 所示, 利用压紧机构固定模拟件, 其材料是 45# 钢。将两块模拟件无缝对接, 测量模拟件上事先设置靶标以确定薄壁件位置关系, 靶标标定的精度小于 0.01mm。根据模拟件上靶标确定模拟件的位置, 然后由模拟件的位置确定点云移动的距离和方向及旋转的角度, 此时间隙理论值及修配量的理论值皆为 0。

3.2 试验测试

在试验测试中, 将 T-Scan 的扫描设置参数设置为线间距 0.1mm, 点间距 0.075mm, 扫描宽度 40% (约为 40mm)。本文根据以上方法使用 VS2008, 通过 C++ 语言开发了相关软件, 包括 T-Scan 的数据采集模块、相应的数据处理模块及曲线生成模块, 在测试时图 2 中的阈值 δ 根据调试结果取值为 0.075mm。

扫描靶标点, 得到移动的距离和方向及旋转角度。固定压紧模拟件, 分别扫描两块模拟件的边界, 在 SA 中生成的特征点如图 9 所示。对扫描结果进行处理: 在 SA 中生成由模拟件 2 的特征点拟合得到的曲线, 将曲线沿一定方向拉伸得到曲面; 模拟件 1 的特征点移动后求到拉伸曲面的距离, 如图 10 所示, 此时距离方向指向模拟件 1 内部即对接产生间隙, 修配量为负值。

调整模拟件位置, 对其重复测量, 修配量平均值如

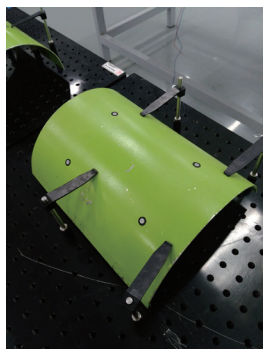


图7 试验装置
Fig.7 Experimental device

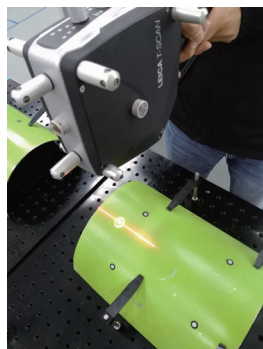


图8 试验现场
Fig.8 Experimental site

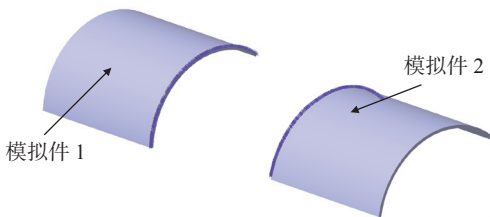


图9 扫描结果
Fig.9 Scan results

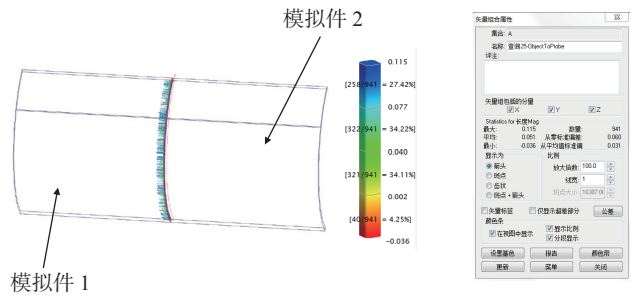


图10 修配余量
Fig.10 Repair allowance

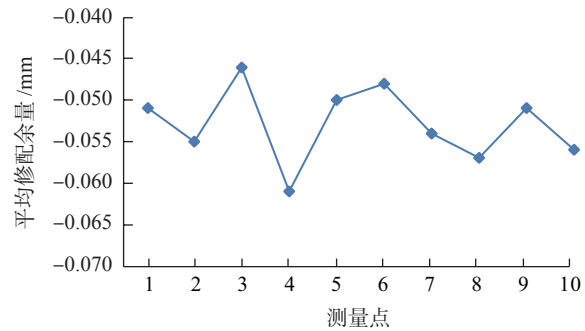


图11 平均修配量
Fig.11 Average repair allowance

图 11 所示。通过测量结果可以看出, 该测量方法精度较高且稳定性较好。

4 结论

本文提出了一种基于扫描线点云的飞机蒙皮修配量提取方法, 该方法针对扫描线提取特征点的缺陷采用点到平面距离提取特征点并根据特征点离散程度判断识别出边界特征点。通过试验验证, 该方法精度可以达到 0.06mm, 满足飞机装配需求, 对飞机装配有着重要的意义。

蒙皮边界经过热处理、喷漆等工序后存在圆角, 扫描边界提取的修配量的精度会受到影响, 为了消除圆角的影响, 可以扫描侧面用于提取修配量。当蒙皮的厚度较大时, 可以扫描侧面提取修配量。未来将对扫描侧面提取修配量的方法进行研究, 以提高修配量提取精度。

参考文献

[1] 张吉法. 飞机机翼纤维缠绕(FW)运动规律分析及控制系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.
ZHANG Jifa. Research on the law of winding filament winding (fw) and control system of aircraft wing[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002.

[2] 马张健. 飞机蒙皮接缝信息自动提取技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
MA Zhangjian. Research on automatic extraction of aircraft skin seam information[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and

Astronautics, 2011.

[3] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册—飞机装配[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.

Aeronautical Manufacturing Engineering Handbook Editorial Board. Aeronautical manufacturing engineering handbook—aircraft assembly[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.

[4] 王辉, 周明星, 郑维珍, 等. 高速飞行器薄壁异形零件加工余量的数字化分析与优化[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(6): 1456–1464.

WANG Hui, ZHOU Mingxing, ZHENG Weizhen, et al. Digital analysis and optimization of machining allowance for thin-walled high-speed aircraft parts[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(6): 1456–1464.

[5] 余飞祥, 黄翔, 李泷泉, 等. 基于扫描线点云的飞机蒙皮边界特征提取[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 701–707.

YU Feixiang, HUANG Xiang, LI Shuanggao, et al. Aircraft skin boundary feature extraction based on scanline point cloud[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 701–707.

[6] 严成, 黄翔, 李泷泉, 等. 基于三维激光扫描的蒙皮对缝检测研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 70–74.

YAN Cheng, HUANG Xiang, LI Shuanggao, et al. Study on the detection of skin seams based on 3D laser scanning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 70–74.

[7] 张旭, 王青, 柯映林. 基于模板的点云边特征提取技术[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(6): 1175–1181.

ZHANG Xu, WANG Qing, KE Yinglin. Point cloud edge feature extraction based on template[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(6): 1175–1181.

[8] 吕震, 柯映林, 孙庆, 等. 反求工程中过渡曲面特征提取算法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(2): 154–157.

LÜ Zhen, KE Yinglin, SUN Qing, et al. Research on feature extraction algorithm of transition surface in reverse engineering[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(2): 154–157.

[9] YANG M, LEE E. Segmentation of measured point data using a parametric quadric surface approximation[J]. Computer-Aided Design, 1999, 31(7): 449–457.

[10] HE B W, LIN Z M, LI Y. An automatic registration algorithm for the scattered point clouds based on the curvature feature[J]. Optics & Laser Technology, 2103, 46(1): 53–60.

[11] 张杰, 黄翔, 李泷泉, 等. 基于 T-scan 测量的薄壁钣金件孔特征重构[J]. 工程科学学报, 2017, 39(6): 917–923.

ZHANG Jie, HUANG Xiang, LI Shuanggao, et al. Hole feature reconstruction of thin-walled sheet metal parts based on T-scan measurement[J]. Journal of Engineering Sciences, 2017, 39(6): 917–923.

[12] AO X, FU Q, WU Z, et al. An intersection algorithm for disk B-spline curves[J]. Computers & Graphics, 2017, 70: 99–107.

[13] UYAR K, ÜLKER E. B-spline curve fitting with invasive weed optimization[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 52: 320–340.

通讯作者: 黄翔, 教授, 博士生导师, 研究方向为飞机数字化装配技术和装备, E-mail: xhuang@nuaa.edu.cn. (责编 大漠)

(上接第 72 页)
1980.

[26] 姚逸伦. 高温高韧聚酰亚胺复合材料高韧化方法及机理研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2015.

YAO Yilun. Study on high toughening method and mechanism of high temperature and high toughness polyimide composites[D]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautical Materials, 2015.

[27] PATER R H. Interpenetrating polymer network approach to tougher and more microcracking resistant high temperature polymers part I, LaRC-RP40[J]. SAMPE Journal, 1988, 24(5): 25–27.

[28] PEARSON R A, YEE A F. Toughening mechanisms in thermoplastic-modified epoxies: I. Modification using poly (phenylene oxide) [J]. Polymer, 1993, 34(17): 3658–3670.

[29] PATER R H. Interpenetrating polymer network approach to tougher and more microcracking resistant high temperature polymers part II, LaRC-RP41[J]. SAMPE Journal, 1991, 31(1): 20–27.

[30] PATER R H, JOHNSTON N J. Tough high performance composite matrix[P]. US5159029A, 1992–10–27.

[31] JOHNSTON N J, SRINIVASAN K, PATER R H. Toughening of PMR composites by gradient semi-interpenetrating networks[C]// 37th International SAMPE Symposium and Exhibition. 1992: 690–704.

[32] 熊磊, 张佐光, 李小刚, 等. PAEK 增韧 LP-15 聚酰亚胺树脂体系性能研究[J]. 航空材料学报, 2006, 26(2): 44–51.

XIONG Lei, ZHANG Zuoguang, LI Xiaogang, et al. Study on the performance of PAEK toughened LP-15 polyimide resin system[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(2): 44–51.

[33] 王文俊, 李小刚, 陆银秋, 等. LP-15 聚酰亚胺树脂的增韧研究[J]. 复合材料学报, 2007, 24(5): 23–27.

WANG Wenjun, LI Xiaogang, LU Yinqiu, et al. Toughening of LP-15 polyimide resin[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 24(5): 23–27.

[34] AKSOY A, CARLSSON L A. Interlaminar shear fracture of interleaved graphite/epoxy composites[J]. Composites Science and Technology, 1992, 43: 55–69.

[35] MATSUDA S, HOJO M, OCHIAI S, et al. Mode I interlaminar fracture toughness of ionomer interleaved CFRP laminates[J]. Journal of the Society of Materials Science (Japan), 1998, 47(11): 125–1130.

[36] YASAE M, BOND I P, TRASK R S, et al. Damage control using discrete thermoplastic film inserts[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(6): 978–989.

[37] WOO E M, MAO K L. Evaluation of interlaminar toughened poly(etherimide) modified epoxy/carbon fiber composites[J]. Polymer Composites, 1996, 17(6): 799–805.

[38] 刘志真, 李宏运, 邢军, 等. RTM 聚酰亚胺复合材料“离位”增韧技术研究[J]. 航空材料学报, 2008, 28(6): 72–77.

LIU Zhizhen, LI Hongyun, XING Jun, et al. Research on RTM able polyimide composites toughened by Ex-situ method[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(6): 72–77.

通讯作者: 包建文, 博士, 研究员, 主要研究方向为树脂基复合材料, E-mail: 362667716@qq.com. (责编 大漠)