

基于工艺过程的复合材料舱门制造成本评估

Cost Evaluation for Composites Port Fabrication Based on the Manufacturing Process

中航工业成都飞机设计研究所 孔斌 甘建 张庆茂
南京航空航天大学航空宇航学院 叶强 陈普会

[摘要] 介绍了基于制造工艺过程的成本评估模型的基本特点,基于此模型开发了飞机制造成本评估软件,并对复合材料、金属和装配工时进行了估算,与相关文献数据吻合良好。应用该软件对复合材料舱门制造成本进行评估,并与金属舱门进行了比较,同时研究了生产批量及工艺方法等因素对复合材料舱门制造成本的影响。

关键词: 复合材料 制造成本 工艺过程 成本评估模型 舱门

[ABSTRACT] The primary objective of this paper is to develop the cost estimation software for composite fabrication based on the existing cost models. On the basis of the manufacturing process-based cost modeling, a cost estimation code is developed. The simulations of composite, metal and assemblage man-hour agree well with data in the correlative literature. The costs of two kinds of port manufactured with advanced composite and traditional metal materials are estimated. Finally the influences of production batch and manufacturing method on the composite port fabrication cost are studied.

Keywords: Composites Fabrication cost Manufacturing process Cost evaluation model Port

采用先进复合材料和整体化结构是提高飞机经济性的一种重要手段。然而,飞机的经济性提高不仅由技术决定,还需要管理和计算操作软件的配合,尤其是成本管理和估算方面。其中,成本估算,特别是设计阶段的成本估算具有非常重要的作用。

Adnan Niazi 等^[1]把产品的成本估算方法分为两大类:定性成本估算方法和定量成本估算方法。

其中,定性成本估算方法分为类比法和直觉法两类,定量成本估算法可分为参数法和分析估算法。定性成本估算方法主要依赖于对类似的已有产品的成本进行比较分析获取新产品的成本,例如类比法。定量成本估算方法对产品的设计、特征以及生产工艺的分析进行

成本估算,典型的参数法以及分析估算法都属于定量成本估算方法。

参数法^[2]通过对产品的历史数据进行统计分析,建立成本与其特征(通常为产品重量等)间的函数关系式(Cost Estimating Relationships, CERs),进行产品成本近似计算。参数法是一种自上而下的成本估算方法,将产品成本拆解成若干驱动因素的 CERs 之和,需要产品的设计和工艺信息较少,估算速度快,可用于概念设计,但需要大量的历史数据,且难以适应工艺变化。以生产活动和工艺技术为基础的(Activity Based Costing, ABC)成本模型是参数法的一种,如 Rand 公司开发的参数化成本估算软件 DAPCA^[3]和 PRICE 系统公司开发的 PRICE-H 软件^[4]。

分析估算法是一种自下而上的成本估算方法,通过将产品分解成最基本的单元,计算生产阶段各种操作所消耗的资源,累加得到产品的总成本。这种方法计算比较准确,但是需要产品的详细信息。基于工艺的成本模型^[5](Process-based Cost Modeling, PCM)是一种典型的分析估算法,其基本出发点是将加工成本与结构的设计特征、材料、工艺方法关联起来。Northrop 公司开发的先进复合材料成本估算手册^[6](Advanced Composite Cost Estimating Manual, ACCEM)对夹芯复合材料的具体加工工艺进行分析,通过试验将每一工步的时间与制件的工艺特征尺寸间关系拟合成幂定律形式,从而估算产品的总工艺时间。MIT 的研究人员提出了一个基于 WEB 的制造成本估算模型^[7],模型建立的理论基础是一级反应动力学定律,目标是给出时间和成本的估算以及帮助设计者评价成本降低策略。

PCM 模型的基础是根据构件的加工和装配工艺过程建立的尺寸和复杂性标定定律,具有较强的成本预测能力,能快速适应工艺条件的变化,对历史数据的需求较少。

随着复合材料在航空结构应用中的成本问题日益突出,国内开始着手飞机复合材料结构的成本分析理论及成本数据库的研究工作,并初步形成了成本评估方法,成功应用于某型飞机的复合材料副翼的成本估算^[8],但仍存在一些诸如复杂构形零部件分析有效性尚待验证、输

* 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项(2009ZX04004-101)资助。

入详细材料参数和几何参数工作繁琐的不足。基于此,本文对基于工艺过程的制造成本评估模型进行了深入研究,开发了飞机结构成本评估软件,对复合材料舱门制造成本进行了评估,提出了降低成本的改进措施,为实现复合材料在飞机结构中的经济高效应用奠定了基础。

1 基于工艺过程的制造成本评估模型

机体结构成本评估采用基于工艺的成本模型,其基础是根据构件的加工和装配工艺过程建立的尺寸和复杂性标定定律。制造成本评估技术的开发关键在于对制造成本驱动因素的分析以及相应数学模型的建立。制造成本是产品全寿命周期成本的重要组成部分,其具体构成见图 1。

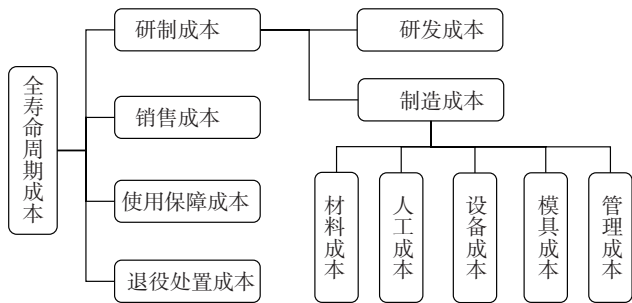


图1 制造成本构成

Fig.1 Components of manufacturing cost

基于工艺的成本模型一般根据产品加工工艺过程的物理机制来推导描述成本与产品设计等因素之间定量关系的方程。

基于工艺过程的成本模型的提出源于对工艺过程的观察研究结果:在产品设计与工艺成本与产品成本之间存在一种内在的关系。这一模型将变化成本与固定成本区分开来,并且将它们与具体的加工步骤关联起来。因此,它可以对构件成本构成进行相对精确的描述,进而对工艺的成本有效性做出评估。其最突出的特点是通过建立产品设计、选材、工艺筛选与加工成本之间的关系来评估材料类型、工艺技术、设计更改以及生产条件对产品成本的影响。一般根据产品的加工工艺过程来推导描述成本与产品设计等上述因素之间定量关系的方程。例如,通过应用基本的物理学定律,很多工艺可以采用动力学、热动力学、热传导等规律来很好地描述。这些定律通常都给出了构件设计特征与加工时间之间的关系。

成本估算采用一阶模型、幂定律模型及信息论等方法模型,建立了尺寸、复杂度、学习效应的标定定律,同时对典型工艺工步参数进行了统计,建立了典型结构件工艺方法的成本模型,细节部分参见前期工作^[8]。

2 制造成本评估模型验证

基于上述流程开发了飞机结构成本评估软件(CES软件),现在通过与文献[7]的统计结果比较,验证成本估算软件的数学模型的正确性。

复合材料工时估算模型大致可以分为:手工铺放(双曲线)模型、加热固化模型、树脂流动模型、自动铺带/丝模型等。选取复合材料典型成型工艺进行分析,对比结果见图 2。

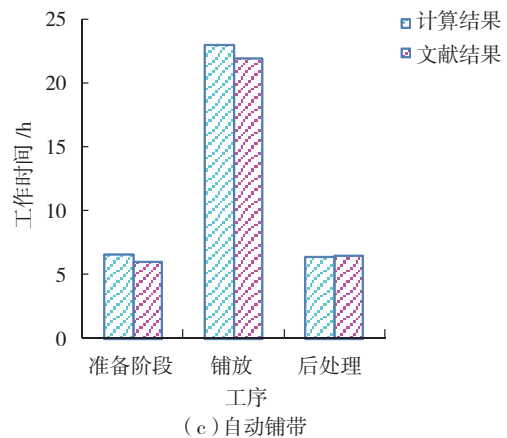
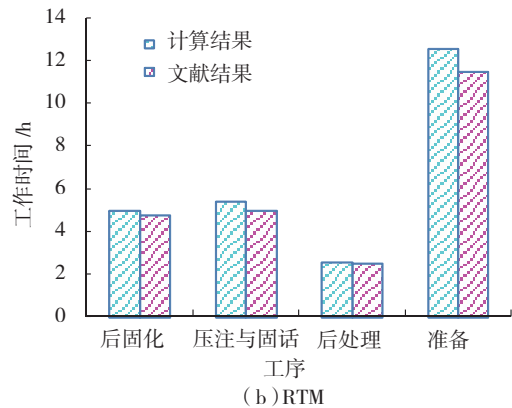
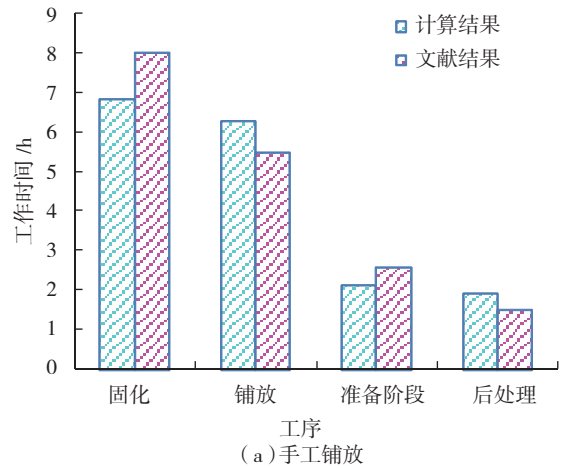


图2 复合材料工时估算模型对比

Fig.2 Comparison on evaluation models of labor-hour for composites manufacturing

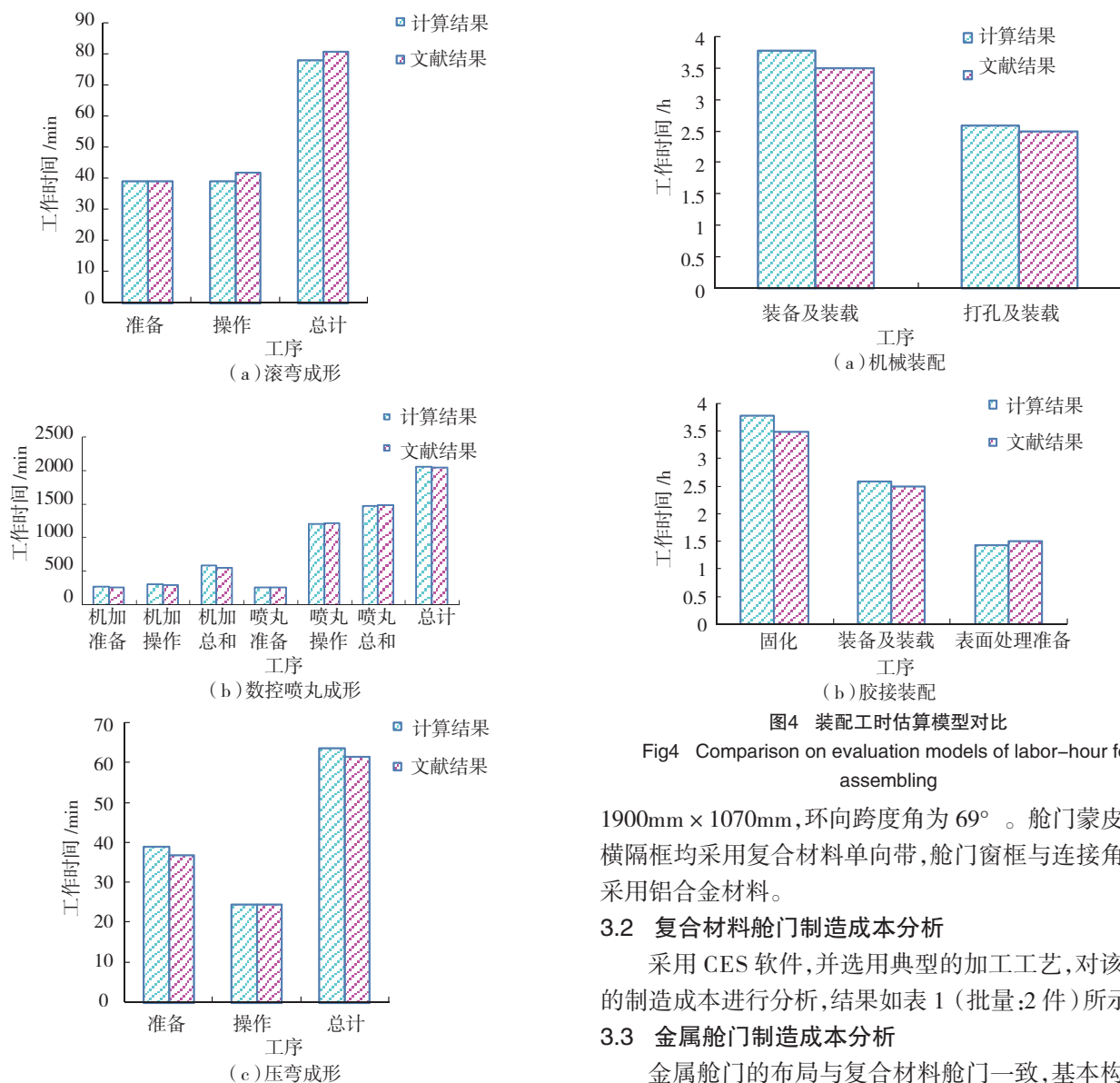


图3 金属工时估算模型对比

Fig.3 Comparison on evaluation models of labor-hour for metal manufacturing

金属工时估算模型主要有双曲线模型和数控加工模型,按零件类型分类为蒙皮类零件、整体壁板类零件、框肋类零件、型材类零件等。选取金属典型成型工艺进行分析,对比结果见图3。

装配模型分为机械装配和胶接装配,对比结果如图4。

由图3~4可知,CES软件对飞机典型工艺工时的估算结果与文献[7]的统计结果吻合较好,验证了成本估算数学模型的正确性。

3 舱门制造成本评估

3.1 舱门概况

舱门结构由舱门蒙皮、舱门窗框、4根横隔框、9根纵隔框和若干角片构成,其中舱门尺寸为

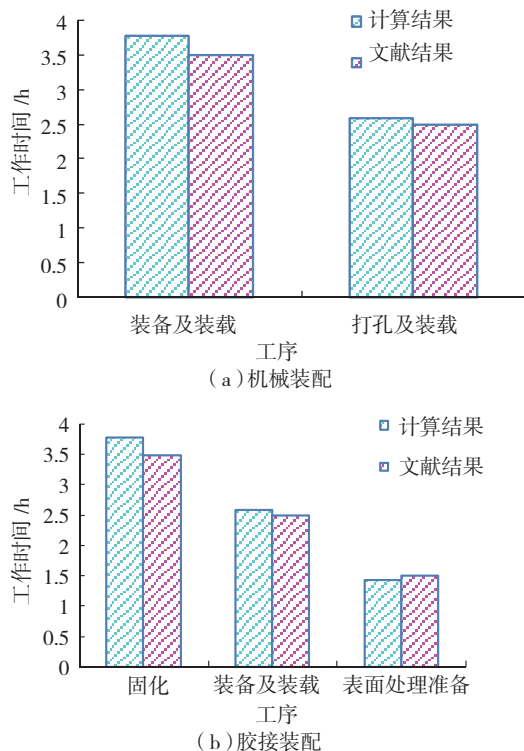


图4 装配工时估算模型对比

Fig.4 Comparison on evaluation models of labor-hour for assembling

1900mm×1070mm,环向跨度角为69°。舱门蒙皮与纵横隔框均采用复合材料单向带,舱门窗框与连接角片均采用铝合金材料。

3.2 复合材料舱门制造成本分析

采用CES软件,并选用典型的加工工艺,对该舱门的制造成本进行分析,结果如表1(批量:2件)所示。

3.3 金属舱门制造成本分析

金属舱门的布局与复合材料舱门一致,基本构型及尺寸均与复合材料舱门相同。金属舱门的蒙皮/纵横隔板、纵/横隔板间及蒙皮与/窗框间均采用机械连接,且连接间距及选用的紧固件与复合材料舱门相同。金属舱门制造成本的CES软件分析结果如表2(批量:2件)所示。

3.4 生产批量与工艺选择的影响

由上述分析可知,单架次生产时,与金属材料舱门相比,复合材料舱门所涉及的复合材料加工工艺需花费较长的工时、较高的模具和设备耗费,以及较昂贵的材料价格使其单件制造成本明显增加。为降低复合材料构件制造成本,可采取以下措施:

(1)通过增加生产批量的方式降低单件零部件的模具费用;

(2)采用共固化成形、共胶接等整体化成形工艺,降低装配成本,从而降低制造总成本。

表1 复合材料舱门制造成本 万元

| 名称 | | 数量 | 工艺 | 材料成本 | 人工费用 | 设备费用 | 模具费用 | 合计 |
|----------|---------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 零件加工 | 蒙皮 | 1 | 自动铺带 | 7.00 | 0.99 | 1.69 | 4.73 | 14.41 |
| | 横隔框 | 4 | VARI | 5.39 | 8.07 | 8.04 | 1.75 | 23.25 |
| | 纵隔框 | 9 | 拉挤成形 | 5.08 | 1.72 | 1.70 | 2.02 | 10.52 |
| | 角片 | 20 | 金属型材类 | 0.05 | 0.35 | 1.06 | 0 | 1.46 |
| | 窗框 | 1 | 金属框肋类 | 0.04 | 0.09 | 0.38 | 0.003 | 0.51 |
| 合计 | | | | 17.56 | 11.22 | 12.87 | 8.50 | 50.15 |
| 装配加工 | 横隔框与蒙皮 | 4 | 机械连接 | 0.45 | 2.13 | 0.20 | 10.13 | 12.91 |
| | 纵隔框与蒙皮 | 9 | 机械连接 | 0.48 | 2.63 | 0.22 | 5.48 | 8.79 |
| | 纵隔框与横隔框 | 20 | 机械连接 | 0.26 | 2.36 | 0.12 | 0 | 2.74 |
| | 窗框与蒙皮 | 1 | 机械连接 | 0.04 | 0.29 | 0.02 | 0 | 0.35 |
| | 合计 | | | | 1.23 | 7.41 | 0.56 | 15.61 |
| 总计(单件成本) | | | | 9.40 | 9.32 | 6.72 | 12.06 | 37.47 |

表2 金属舱门制造成本 万元

| 名称 | | 数量 | 工艺 | 材料成本 | 人工费用 | 设备费用 | 模具费用 | 合计 |
|----------|---------|----|-------|------|------|------|-------|-------|
| 零件加工 | 蒙皮 | 1 | 金属蒙皮类 | 1.44 | 0.14 | 0.90 | 2.87 | 5.35 |
| | 横隔框 | 4 | 金属框肋类 | 0.67 | 0.76 | 3.56 | 0.02 | 5.01 |
| | 纵隔框 | 9 | 金属型材类 | 0.38 | 0.30 | 1.16 | 0.10 | 1.94 |
| | 角片 | 20 | 金属型材类 | 0.05 | 0.35 | 1.06 | 0 | 1.46 |
| | 窗框 | 1 | 金属框肋类 | 0.04 | 0.09 | 0.38 | 0.003 | 0.51 |
| 合计 | | | | 2.58 | 1.64 | 7.06 | 2.99 | 14.27 |
| 装配加工 | 横隔框与蒙皮 | 4 | 机械连接 | 0.45 | 2.13 | 0.20 | 10.13 | 12.91 |
| | 纵隔框与蒙皮 | 9 | 机械连接 | 0.48 | 2.63 | 0.22 | 5.48 | 8.79 |
| | 纵隔框与横隔框 | 20 | 机械连接 | 0.26 | 2.36 | 0.12 | 0 | 2.74 |
| | 窗框与蒙皮 | 1 | 机械连接 | 0.04 | 0.29 | 0.02 | 0 | 0.35 |
| | 合计 | | | | 1.23 | 7.41 | 0.56 | 15.61 |
| 总计(单件成本) | | | | 1.91 | 4.53 | 3.81 | 9.30 | 19.53 |

表3列出了在保持工艺不变的情况下,增加批量时的复合材料舱门制造成本的计算结果(批量:200件)。表4列出了在保持批量不变的情况下,舱门蒙皮与横隔框采用共固化工艺时制造成本的计算结果(批量:2件)。这两种途径均显著地降低了成本。

表3 批量增加后复合材料舱门制造成本 万元

| 名称 | | 数量 | 工艺 | 材料成本 | 人工费用 | 设备费用 | 模具费用 | 合计 |
|----------|---------|----|-------|------|------|------|------|-------|
| 零件加工 | 蒙皮 | 1 | 自动铺带 | 700 | 99 | 169 | 5 | 973 |
| | 横隔框 | 4 | VARI | 539 | 811 | 804 | 2 | 2156 |
| | 纵隔框 | 9 | 拉挤成形 | 508 | 172 | 170 | 2 | 853 |
| | 角片 | 20 | 金属型材类 | 5 | 35 | 106 | 0 | 145 |
| | 窗框 | 1 | 金属框肋类 | 4 | 9 | 38 | 0 | 51 |
| 合计 | | | | 1756 | 1126 | 1287 | 9 | 4178 |
| 装配加工 | 横隔框与蒙皮 | 4 | 机械连接 | 45 | 195 | 20 | 10 | 270 |
| | 纵隔框与蒙皮 | 9 | 机械连接 | 48 | 245 | 22 | 5 | 319 |
| | 纵隔框与横隔框 | 20 | 机械连接 | 26 | 233 | 12 | 0 | 272 |
| | 窗框与蒙皮 | 1 | 机械连接 | 4 | 24 | 2 | 0 | 31 |
| | 合计 | | | | 123 | 697 | 56 | 16 |
| 总计(单件成本) | | | | 9.40 | 9.12 | 6.72 | 0.13 | 25.35 |

表4 复合材料新舱门制造成本 万元

| 名称 | | 数量 | 工艺 | 材料成本 | 人工费用 | 设备费用 | 模具费用 | 合计 |
|----------|---------|----|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 零件加工 | 蒙皮/横隔框 | 1 | 共固化成形 | 11.76 | 2.83 | 2.87 | 8.08 | 25.54 |
| | 纵隔框 | 9 | 拉挤成形 | 5.08 | 1.72 | 1.70 | 2.02 | 10.52 |
| | 角片 | 20 | 金属型材类 | 0.05 | 0.35 | 1.06 | 0 | 1.46 |
| | 窗框 | 1 | 金属框肋类 | 0.04 | 0.09 | 0.38 | 0.003 | 0.51 |
| | 合计 | | | | 16.93 | 4.99 | 6.01 | 10.10 |
| 装配加工 | 纵隔框与蒙皮 | 9 | 机械连接 | 0.48 | 2.63 | 0.22 | 5.48 | 8.79 |
| | 纵隔框与横隔框 | 20 | 机械连接 | 0.26 | 2.36 | 0.12 | 0 | 2.74 |
| | 窗框与蒙皮 | 1 | 机械连接 | 0.04 | 0.29 | 0.02 | 0 | 0.35 |
| 合计 | | | | 0.78 | 5.28 | 0.36 | 5.48 | 11.88 |
| 总计(单件成本) | | | | 8.86 | 5.14 | 3.18 | 7.79 | 24.97 |

4 结论

本文对复合材料舱门制造成本评估方法进行了研究,得出以下结论:

(1)研究了基于制造工艺过程的成本评估模型,基于此模型开发了飞机制造成本评估软件,并对复合材料、金属和装配工时进行了估算,与相关文献数据吻合

(下转第82页)

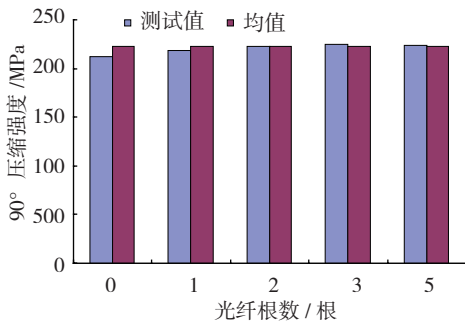


图4 光纤根数-90° 压缩强度

Fig.4 Number of optical fibers to 90° compress strength

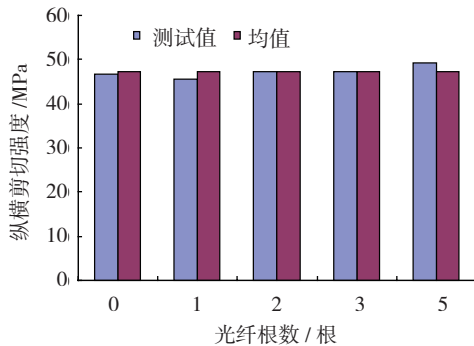


图5 光纤根数-±45° 剪切强度

Fig.5 Number of optical fibers to ±45° shear strength

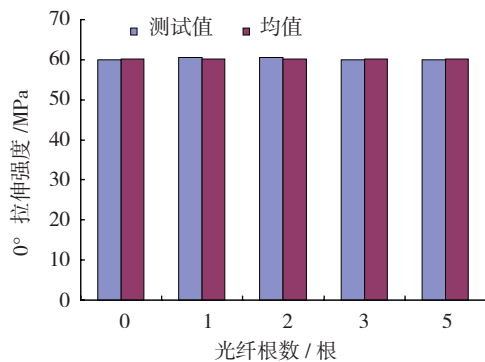


图6 光纤根数-0° 拉伸模量

Fig.6 Number of optical fibers to 0° tension modul

由图6可以看出,光纤铺设密度对0° 拉伸模量的影响更小。由表2中其他的刚度数据进一步可以看出,光纤铺设密度对试验件其他刚度性能的影响与对强度的影响类似,均小于5.0%。

进一步的分析发现,由于光纤纤芯为玻璃纤维材料,其强度性能较碳纤维强度性相当,但刚度性能较低。且以5根光纤为例,光纤材料在试验件中所占纤维材料的体积百分比为 9.7×10^{-12} 。根据微观复合材料力学理论,埋入少量的光纤,难以对试验件的力学性能产生较大的影响。

4 结束语

本文通过试验测试了埋入光纤对复合材料基本力学性能的影响作用。将光纤作为传感器使用,光纤的铺设间

隔密度大于4.8mm的条件下,试验和分析表明:

(1)埋入光纤对复合材料强度和刚度性能的影响较小,均小于5%。

(2)埋入光纤能少量增加复合材料90° 方向的强度和刚度性能。

参考文献

[1] 张光磊,杜彦良. 智能材料与结构系统. 北京: 北京大学出版社,2010.
 [2] Mearsures R M, Glossop N D W, Tennyson R C. Structurally integrated fiber optic damage assessment system for composite materials. SPIE,1988,986:120-129.
 [3] 梁大开,陶宝祺. 光纤埋入碳纤维复合材料后光学性能变化的研究. 材料工程,1998,11:8-13.
 [4] Yang S M, Chen C M. Application of single mode optical fiber sensors in structural vibration suppression. Intelligent Material Systems and Structure, 1996,7 (1):71-77.

(责编 小城)

(上接第76页)

良好。

(2)应用该软件对复合材料舱门制造成本进行评估后发现,单架次生产时,与金属材料舱门相比,复合材料舱门所涉及的复合材料加工工艺需花费较长的工时、较高的模具和设备耗费,以及较昂贵的材料价格,这使其单件制造成本明显增加。

(3)生产批量及工艺方法等因素对复合材料舱门制造成本有很大影响:增加生产批量的方式可以明显降低单件零部件的模具费用;采用共固化成形、共胶接等整体化成形工艺可明显降低装配成本。

参考文献

[1] Niazi A, Dai J S, Balabani S, et al. Product cost estimation: Technique classification and methodology review. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(2):563-575.
 [2] Watson R, Kwak Y H. Parametric estimating in the knowledge age: Capitalizing on technological advances // 13th international conference on management of technology, IAMOT, 2004: 1-11.
 [3] Boren H E. A computer model for estimating development and procurement costs of aircraft. The Rand Corporation, 1976.
 [4] PRICE Corp. PRICE H fundamentals course material. New Jersey: Price Systems L.L.C, 2004: 7-36.
 [5] Gutowski T G, Houl T D, Dillon G, et al. Development of a theoretical cost model for advanced composite fabrication. Composites Manufacturing, 1994, 5(4): 231-239.
 [6] Northrop Corporation. Advanced composite cost estimating manual. AFFDL-TR-76-87, 1976.
 [7] Sascha M H. Cost modeling and design for manufacturing guidelines for advanced composite fabrication[D]. Cambridge: MIT, 2002.
 [8] 叶强,陈普会,柴亚南. 复合材料结构制造成本估算模型及软件开发. 复合材料学报, 2008, 25(4):161-167.

(责编 良辰)