

基于知识的翻边工艺设计支持系统

Knowledge Based Design Support System for Complex Flanging Process Planning

浙江大学航空航天学院 季廷炜 郑 耀

[摘要] 钣金零件是组成飞机机体的主要部分,为了提高钣金工艺设计的质量与效率,实现知识的重用和共享,对翻边工艺设计的智能化、知识获取技术进行了研究。根据翻边成形受力状态的不同,提出了翻边件的特征表示方法,总结了3种翻边组合模式,用于建立相应的设计模块;提出了面向实验和有限元数据的知识获取方法,将隐式知识从数据中提取出来,构建知识库,支持系统的智能设计。根据提出的方法,结合CAE模拟,建立翻边工艺设计支持系统,具体实际事例表明所建立的系统提高了设计的质量和效率。

关键词: 翻边成形 知识工程 机器学习 智能设计系统

[ABSTRACT] In order to improve the aircraft sheet metal forming process planning quality and efficiency based on the knowledge reuse, the knowledge based flanging process planning system and process knowledge acquisition technology are developed. Based on the strained condition of the flanging process, the flanging geometrical characteristic represent method is built to establish the design module, including 12 different combined models. And then, the process knowledge acquisition technology is constructed to abstract implicit knowledge form the database, which is achieved from the experiments or the finite element methods. The knowledge is used to construct the knowledge base, in order to support the intelligent process planning. After that, the knowledge based design support system for the complex flanging process planning is developed. An example of flanging part is used to verify the effectiveness and practicability of the system.

Keywords: Flanging process Knowledge engineering Machine learning Intelligent design system

飞机框肋类钣金件是指通过模具成形具有直线或曲线翻边得到的工件,常常在翼肋、机身隔框或其他骨架零件得到了广泛的应用。通常,飞机的框肋零件是按照模线肋制造展开样板,或者按展开尺寸制造出零件展开件,然

后根据展开样板或展开件来进行下料,最后进行成形得到翻边件。展开下料的质量不仅影响成形的质量,而且影响板料的利用率。由于历史原因,有机加零件的展开,一直以手工计算为主,或者根据工人经验所得,余量较大,开发周期长、效率低、废品率高。

近年来,计算机软硬件技术、图形学技术、人工智能技术和板料成形理论的发展和交叉集成,开创了利用计算机辅助设计、计算机辅助制造和数值模拟技术进行钣金制造工艺设计的新领域,大大降低了产品开发的成本,缩短了开发时间^[1,2]。目前,由于传统的CAD技术脱离了设计领域知识,缺乏对设计工程知识的支持,使得现有的设计系统仍然依赖于设计者的经验和知识^[3,4]。随着人工智能技术和知识工程技术的发展,板料成形智能化技术兴起,主要是将专家系统技术移植到CAE中,其中知识库的构建主要通过工程师对现有知识和设计手册的整理归纳,其规模和质量受到很大的制约,从而约束了该技术的进一步发展^[5,6]。本文以翻边件为对象,探讨开发基于知识的翻边智能工艺设计方法,特别研究基于模糊的知识自动获取方法,方便知识的自动获取和提供合适的知识,从而为设计人员快速有效地完成设计任务提供支持。

1 翻边毛坯形状智能设计

翻边成形是飞机钣金加工中的一种典型而且重要的工艺方法。按变形性质,翻边成形可分为弯曲类翻边、伸长类翻边和压缩类翻边。当翻边的变形区边缘为一直线时,翻边变形就转化为弯曲类翻边。伸长类翻边时,在把板料向凹模肩部弯曲时,通过将板料变形区沿圆周方向拉长而形成侧壁,变形区材料受拉应力切向伸长,厚度减薄,易发生破裂,如圆孔翻边和外缘翻边中的内曲翻边。压缩类翻边时,在把板料向凸模肩部弯曲时,通过将板料变形区沿圆周方向压缩而形成侧壁。变形区材料切向受压应力产生压缩变形,厚度增厚,易起皱,如外缘翻边中的外曲翻边。翻边变形区的应力应变状态和性质几乎包含了所有的冲压成形变形区的应力应变状态和性质,致使对于翻边成形理论研究难度较大。

1.1 智能设计框架

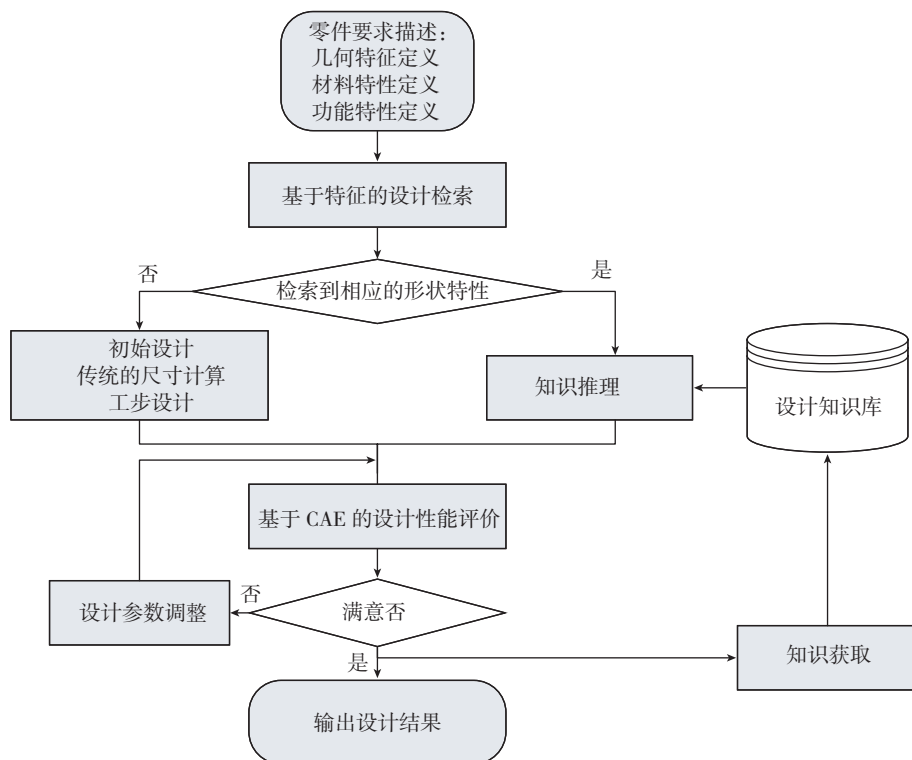


图1 翻边工艺智能设计框架

Fig.1 Intelligent design framework for flanging process

翻边工艺设计是一项复杂的工作。在设计过程中,通常要考虑翻边件的形状、材料、性能、成形工艺性、模具加工条件等,因此,翻边智能设计必须考虑经验性强、知识密集等特点,采用恰当的策略进行研制。同时,系统应该具备自学习功能,能够在工艺设计和优化过程中自动获取知识,并对所获取的知识做进一步加工处理,不断完善系统的知识库。

根据设计系统要求,建立翻边智能设计系统的框架,如图1所示。首先根据零件要求描述,通过基于特征的设计检索,如果检索到类似的设计,则通过推理,满足当前零件的具体要求。若没有检索到相似的特性,则在传统设计理论的引导下开始一个新的工艺设计过程,初步设计完成后,通过CAE技术对其可成形性进行评价,若不能满足要求,则根据设计工艺参数调整规则对其进行调整,直到满足设计要求。最后通过知识自动获取,充实设计知识库中的规则。

1.2 翻边件特征表示

为了对各种翻边件的几何形状进行统一描述,根据翻边件各个部分受力状态与变形性质,结合不同受力状态的交互影响,将其分解为3种交互影响模式(见表1)。

如图2所示的复合翻边,其Ⅱ区为弯曲类翻边,由于两边都受到伸长类翻边的影响,导致

了其毛坯形状发生变形。根据翻边线弧线和直线的变形部位,可以分为端部和中部,端部的翻边变形受两种应力状态的交互影响,而中部的翻边变形存在三种应力状态的叠加,如弯曲类翻边在端部,其变形可能受压缩类翻边或弯曲类翻边的影响;如果其在中部,其两端均有可能受压缩类翻边或弯曲类翻边的影响。因此,根据不同受力情况的影响,获取调整的设计知识,建立相应的设计模块,解决其中蕴含的不确定性。

翻边零件的定义主要是由两组属性组成:几何形状特性和材料属性特性。几何形状特性包括分类翻边特性序列、切点位置、板料厚度;材料属性特征包括材料区分强度、伸长率、弹性模量等。翻边设计系统分别构建相应的零件类Product_name,其中包括Geometric和Mechanical_properties结构体。

2 工艺设计知识获取

对翻边件的设计过程主要包括翻边件尺寸的展开、工步的确定、凸凹模的圆角半径及工艺参数的选择。本节主要介绍通过实验或有限元数据对翻边件尺寸展开设计的知识获取。

2.1 数据处理

由于翻边成形零件和毛坯的外轮廓都是连续的,而模糊系统知识库的构建需要的是离散值,因此,如何从零件和毛坯的外轮廓提取输入、输出数据集是基础问题。本文以图3零件为例,研究了输入、输出数据集的构建方法。

首先,设定坐标系位置,以翻边件中中性层翻边线的切点作为坐标原点,横坐标同弯曲类翻边变形部分的翻边线相合,纵坐标与之垂直,如图4所示。

然后将零件和毛坯相同部分重合,建立输入输出数据对,分别将翻边件中中性层的翻边线和毛坯边界线由原点向两边均分,如图5(a)所示,构建所需要的输入输出数据

表1 翻边组合

| 伸长类压缩类翻边组合 | 伸长类弯曲类翻边组合 | 压缩类弯曲类翻边组合 |
|------------|------------|------------|
| | | |

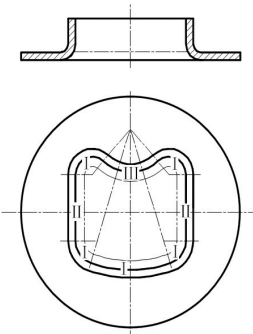


图2 复合翻边
Fig.2 Combination flanging

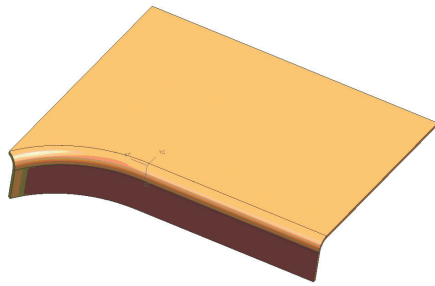


图3 翻边件
Fig.3 Part drawing

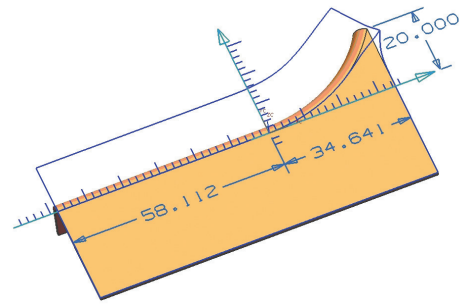


图4 坐标定义
Fig.4 Set of coordinates

对 $[p, (x_0^p, y_0^p, z_0^p); (x_1^p, y_1^p)]$, $p = 1, 2, \dots, N$ 。

其中, P 代表点的编号; (x_0^p, y_0^p, z_0^p) 代表零件翻边前模具上的点; (x_1^p, y_1^p) 代表毛坯边界线上的点。获得的部分输入、输出数据对,如图 5 (b) 所示。

2.2 设计知识的构建

翻边毛坯输入、输出数据对格式为编号和点的三维坐标,输出为毛坯边界线上的点的坐标。因此,可以将翻边毛坯模糊设计系统分为两个四维对一维的系统,然后将两个系统组合到一起。

将输入输出变量的模糊空间划分为多个隶属度函数。一般而言,模糊空间的划分为知识获取的关键问题,如果划分过多,会造成维度灾难;如果划分过少,又会导致拟合精度不够等问题。因此,模糊空间的划分不能导致规则数量过多,又不能使精度过低,达到实际板料成形设计所需要的要求即可。然后,根据输入、输出数据对构建模糊知识库。由于存在大量的数据,以数据 $[05, (-32.28, 4, 11); (-32.33, 11.93)]$ 中的 x_0^p 为例构建模糊规则,其他规则的构建与此类似,不再详述。坐标为 -32.28 时隶属于其隶属度函数 SS, S, M, B, BB 的隶属度值分别为 $0, 0.842588, 0.15674, 0, 0$, 如图 6 所示,因此, x_0^p 的最大隶属度函数集为 S 。

同样,可以获得各个参数的所属的最大隶属度函数,得到以下的 IF—THEN 规则: IF P is M and x_0^p is S and x_1^p is SS and z_0^p is S , THEN y_1^p is SS 。

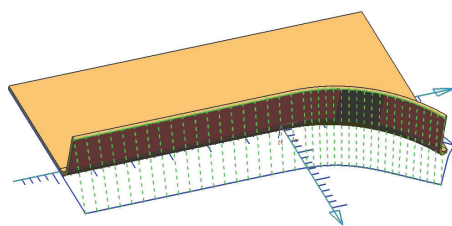
由于输入、输出数据的数据量通常较大,且每对数据都会产生一条规则,因此,可能出现有冲突的规则。即,规则的 IF 部分相同,而 THEN 部分不同。为了解决这一个冲突,本文采用 $D = \prod_i \mu_{A_i^p}(x_0^p) \mu_{B_i^p}(y_0^p)$ 规则强度公式,从而使冲突规则中仅有一条规则具有很大的强度。最后,创建设计知识库,其主要由两部分组成:

第一部分为翻边试验或有限元计算数据产生的具有最大强度的规则;第二部分为部分为专家的语言规则。

3 设计实例

本文采用翻边高度为 10mm 的翻边零件数据对其进行测试,如图 7 所示。其中颜色浅的是系统预测值,而颜色深的为 DANYFORM 的毛坯计算值。DANYFORM 毛坯设计结果是由毛坯展开模块完成的,其结果与系统预测值比较接近的,而且其中的差别主要在于内曲部分的曲率不同,但差别较小。在实际工程中,可以方便地利用工程师的经验进行微调。

系统调用有限元软件 ETA/DYNAFORM 进行了有限元模拟,有限元模型如图 8 所示。成形过程模拟采用动力显示求解器 LS_DYNA3D,建立等效拉深筋模型,选取半圆形拉深筋,高度为 5mm,其他参数设置:材料厚度为 0.8mm,凸模运动速度为 1000mm/s,摩擦系数为 0.1。从图 9 中可以看出内曲翻边的圆角变形区,产生了起皱现象,而且由于压力不大,导致了整体出现了弓形,而相对于图 10 的 DYNAFORM 结果,起皱问题已经得到了较好的控制。厚度变化率最大为 9.4%,满足板料成形的厚度变



(a) 翻边件与工件的数据

| No. | x0 | y0 | z0 | x1 | y1 |
|-----|----|---------|-------|----|-----------------|
| 1 | 9 | -68.110 | 4.000 | 8 | -58.230 9.0200 |
| 2 | 8 | -61.660 | 4.000 | 8 | -61.760 8.9870 |
| 3 | 7 | -65.190 | 4.000 | 8 | -65.290 8.9600 |
| 4 | 6 | -68.740 | 4.000 | 8 | -68.820 8.9400 |
| 5 | 5 | -72.280 | 4.000 | 8 | -72.340 8.9200 |
| 6 | 4 | -75.830 | 4.000 | 8 | -75.870 8.9010 |
| 7 | 3 | -79.370 | 4.000 | 8 | -79.400 8.8870 |
| 8 | 2 | -82.910 | 4.000 | 8 | -82.920 8.8800 |
| 9 | 1 | -86.450 | 4.000 | 8 | -86.460 9.0000 |
| 10 | 0 | 0.000 | 4.000 | 8 | 0.000 9.1000 |
| 11 | 10 | 0.000 | 4.000 | 8 | 0.000 9.1000 |
| 12 | 11 | 4.170 | 4.240 | 8 | 3.920 9.2980 |
| 13 | 12 | 8.300 | 4.370 | 8 | 7.800 10.0900 |
| 14 | 13 | 12.310 | 4.470 | 8 | 11.500 11.1930 |
| 15 | 14 | 16.160 | 4.550 | 8 | 15.220 12.6800 |
| 16 | 15 | 19.780 | 4.620 | 8 | 18.680 14.5000 |
| 17 | 16 | 23.180 | 4.680 | 8 | 21.960 16.7000 |
| 18 | 17 | 26.180 | 4.730 | 8 | 25.040 19.1810 |
| 19 | 18 | 28.370 | 4.760 | 8 | 27.960 21.9000 |
| 20 | 19 | 31.170 | 4.780 | 8 | 30.650 24.7990 |
| 21 | 9 | -68.110 | 4.000 | 11 | -58.210 11.8800 |
| 22 | 8 | -61.660 | 4.000 | 11 | -61.740 11.9400 |
| 23 | 7 | -65.200 | 4.000 | 11 | -65.270 11.9900 |
| 24 | 6 | -68.740 | 4.000 | 11 | -68.800 11.9900 |
| 25 | 5 | -72.280 | 4.000 | 11 | -72.300 11.9900 |
| 26 | 4 | -75.830 | 4.000 | 11 | -75.870 11.9900 |
| 27 | 3 | -79.370 | 4.000 | 11 | -79.401 11.9150 |
| 28 | 2 | -82.910 | 4.000 | 11 | -82.933 11.9490 |
| 29 | 1 | -86.450 | 4.000 | 11 | -86.465 11.9900 |
| 30 | 0 | 0.000 | 4.000 | 11 | 0.000 12.0660 |
| 31 | 10 | 0.000 | 4.000 | 11 | 0.000 12.0660 |

(b) 输入 / 输出数据集

图5 输入/输出数据集的构建
Fig.5 Input/output data construction

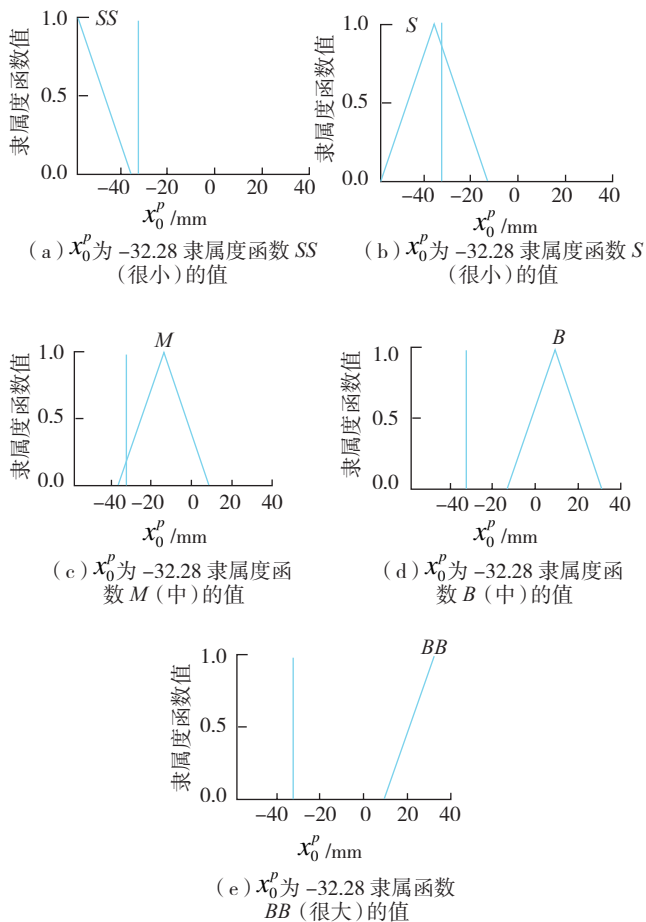


图6 坐标 x_0^p 为-32.28的隶属度函数值

Fig.6 Membership function value when x_0^p is -32.28

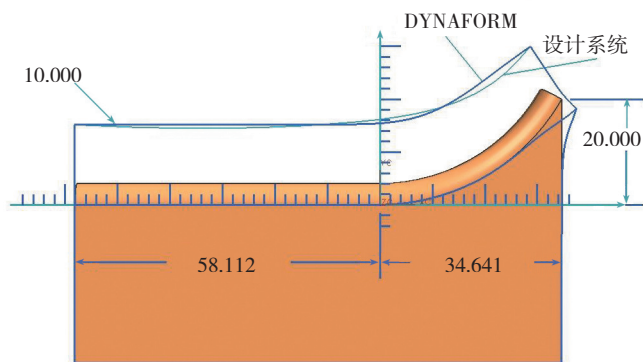


图7 系统和DYNIFORM输出结果比较

Fig.7 Comparison between system output and DYNIFORM output

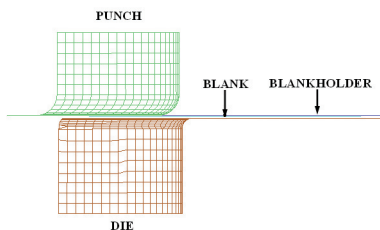


图8 FEM模型

Fig.8 FEM model

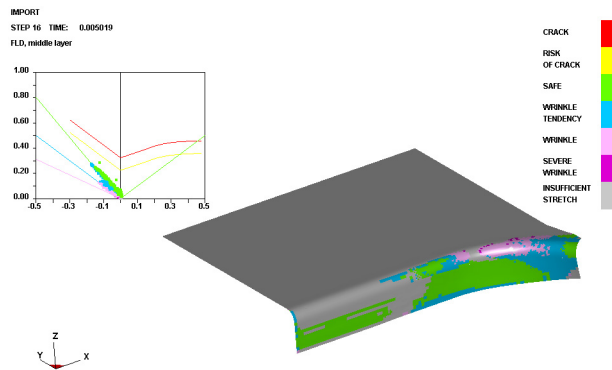


图9 系统设计结果数值模拟结果

Fig.9 Simulation result of stretch flanging by process design system

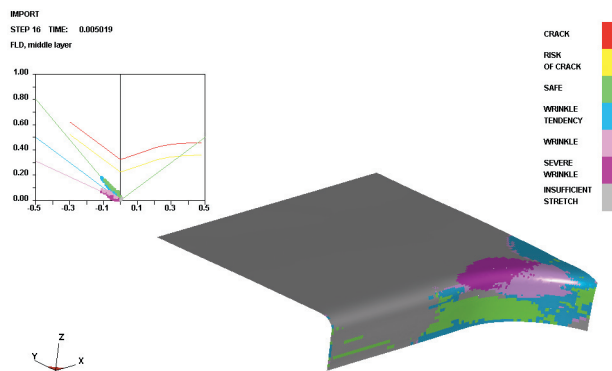


图10 DYNIFORM设计结果数值模拟结果

Fig.10 Simulation result of stretch flanging by DYNIFORM

化范围。

4 结论

通过研究基于知识的翻边展开智能工艺设计方法,探讨了基于形状单元的翻边件特征表示和对翻边工艺设计过程经验知识的获取方法,开发了基于知识的翻边展开工艺设计支持系统,给出实例,与 DANYFORM 的结果进行了比较,验证了该设计系统的有效性。其中应用的知识获取方法可以进一步推广到更复杂的翻边件产品设计中去。

参考文献

- [1] Wang H, Li E Y, Li G Y. Development of hybrid fuzzy regression-based meta modeling technique for optimization of sheet metal forming problems. Materials and Design, 2009,30(8): 2854-2866.
- [2] Mahmood S L, Chowdhury N A, Patwari A U, et al. An approach to relate and optimize metal forming process parameters by fuzzy logic. Modelling, Measurement and Control A. 2009, 82(1-2): 80-91
- [3] Farsi M A, Arezoo B. Development of a new method to determine bending sequence in progressive dies. International Journal of Advanced

(下转第 81 页)

表4 室温自动铺带成型工艺适宜性试验结果

| 不同树脂体系预浸料 | 评定情况 | 粘性评分 | 等级 | 自动铺带成型工艺适宜性 |
|------------------------|---|-------------|----|-------------|
| 低温环氧 / 碳纤维 (LT03/T700) | 自身相互粘接 不能无损剥离 与垂直金属板粘接 $t \geq 8h$ | 2 0 3 | 2 | 室温不可铺 |
| 中温环氧 / 碳纤维 (3234/T700) | 自身相互粘接 可无损剥离 与垂直金属板粘接 $1h \leq t \leq 5h$ | 2 2 3 | 1 | 室温可铺 |
| 高温环氧 / 碳纤维 (5228/T700) | 自身相互粘接 可无损剥离 与垂直金属板粘接 $t \leq 1h$ | 2 2 1 | 2 | 室温不可铺 |
| 双马 / 碳纤维 (5429/T700) | 自身相互粘接 可无损剥离 不能与垂直金属板粘接 | 2 2 0 | 2 | 室温不可铺 |

了维持预浸带的温度而获得较好的粘附力,模具也要避免使用吸热材料。

自动铺放技术常采用 Invar 钢(铁镍合金)制造的曲面模具和铝制的平面模具。因为预浸带或直接铺放在模具表面,或铺放在附有塑料薄膜表面(如 Mylar 膜等)的模具上,所以预浸带与模具表面之间的粘附力也是其自动铺放适宜性研究的一项重要指标。北京航空材料研究院利用一种评分标准对不同复合材料预浸料自动铺放的适宜性进行了研究^[1],其中包括了预浸带与模具之间粘结性的评价。这个预浸带的成型工艺适宜性测试由预浸带自身粘性测试和预浸带与垂直金属板之间的粘性测试组成。在后者试验中,作者采用了3个100mm×100mm的预浸带试样铺放在垂直金属板上形成三层铺层,压紧后观察并记录预浸带叠层与钢板开裂或脱落所经历的时间。然后根据预浸带与垂直金属板粘结时间的不同制定了等级评分标准:与垂直金属板粘结时间大于1h得3分;与垂直金属板粘接时间小于1h得1分;不可与垂直金属板粘接的得0分,通过预浸带与金属板之间的粘附力得分并综合其它各方面粘附力结果得出此种预浸带是否适合室温铺放^[2],如表3和表4所示。这个测试方法也可推广用来评价预浸带与模具之间的粘附力,从而选择出适合于模具的预浸带。

2 结束语

本文从离型纸与预浸带的作用、预浸带间的粘附性和预浸带对模具的粘附性3个方面对预浸带自动铺放适宜性的评价方法进行了简介。从离型纸与预浸带的作用机理和剥离力的测试手段可以找到符合自动铺放要求的离型纸;利用双悬臂梁测试和楔子剥离测试可以选择出符合自动铺放粘性要求的预浸带;利用预浸带等级评分标准,可以选择出适合于模具上铺放的预浸带。总之,虽然目前对于预浸料粘性尚没有通用的定量表征和测试方

法,但是综合上述几种关于预浸带的评价方法将更加有利于方便地确定并选出适合自动铺放的预浸带来。

参考文献

- [1] 蒋诗才,邢丽英,陈祥宝. 复合材料预浸料自动铺带成型适宜性研究. 武汉理工大学学报, 2009, 31(21):44-47.
- [2] Grimshaw M N, Grant C G, Diaz J M L. Advanced Technology Tape Laying for Affordable Manufacturing of Large Composite Structures. 46th International SAMPE Symposium, 2001:2484-2494.
- [3] 张玉龙. 先进复合材料制造技术手册. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [4] 薛德文. 硅酮防粘纸剥离纸加工技术的发展. 中华纸业, 2001, 22, (6):, 16-20.
- [5] 鲁长蓉,鲁薇. 有机硅离型纸的生产. 中国胶粘剂, 2000, 9(6):26-32.
- [6] Hulcher A, Marchello M J, Hinkley A J, et al. Lamontia, Dry ribbon for heated head automated fiber placement, 1999.
- [7] Cano R J, Belvin H L, Hulcher A B, et al. Grenoble, Studies on Automated Manufacturing of High Performance Composites, November 2001, American Helicopter Society Hampton Roads Chapter.
- [8] Hulcher B, Marchello J M, Hinkley J A. Correlation Between Double Cantilever Beam and Wedge Peel Tests for Automated Tow Placement. 43rd International SAMPE Symposium and Exhibition, 1997, 1955-1965.

(责编 三丰)

(上接第77页)

Manufacturing Technology. 2009,43(1-2):52-60.

- [4] Strano M. Automatic tooling design for rotary draw bending of tubes. International Journal of advanced manufacturing technology. 2005,26(7-8): 733-740.
- [5] Garcia C. Artificial intelligence applied to automatic supervision, diagnosis and control in sheet metal stamping processes. Journal of materials processing technology. 2005,164-165: 1351-1357.
- [6] Ray P, Mac Donald B J. Determination of the optimal load path for tube hydroforming processes using a fuzzy load control algorithm and finite element analysis. Finite Elements in Analysis and Design. 2004, 41(2):173-192.

(责编 可岚)