

热塑性复合材料纤维 铺放技术研究进展*

Research on Thermoplastic Composites Fiber Placement Technology

哈尔滨工业大学机电工程学院 富宏亚 李玥华



富宏亚

哈尔滨工业大学机电学院教授、博士生导师。主要从事机械制造自动化方面的教学与研究工作。主持和参与完成各类科研项目 30 余项,发表学术论文 60 余篇,获国家发明专利 6 项、软件著作权 3 项。在纤维缠绕/铺放成型技术、机床数控技术等方面取得多项成果。

自动纤维铺放技术是飞机复合材料构件自动化成型的关键制造技术之一,其又可细分为自动纤维丝铺放技术和自动纤维带铺放技术。前者适用于平面型或低曲率的曲面型,

自动纤维铺放技术是飞机复合材料构件自动化成型的关键制造技术之一,其又可细分为自动纤维丝铺放技术和自动纤维带铺放技术。前者适用于平面型或低曲率的曲面型,或者说准平面型复合材料构件的铺层制造;后者综合了自动纤维缠绕与自动纤维带铺放两者的优点,可实现复杂曲面型复合材料构件的铺层制造。

或者说准平面型复合材料构件的铺层制造;后者综合了自动纤维缠绕与自动纤维带铺放两者的优点,可实现复杂曲面型复合材料构件的铺层制造。表 1 中列出了纤维铺放技术在飞机结构上的应用情况^[1]。

自动纤维铺放技术加工原料通常为碳纤维单向增强树脂基预浸丝或预浸带。用于预浸丝或预浸带的树脂根据其热行为不同,又分为热固性树脂和热塑性树脂。在自动纤维铺放过程中,以碳纤维增强热固性树脂基预浸丝或预浸带为加工对象,结合“热压罐”技术来生产飞机复合材料构件以广泛应用于飞机制造领域。而以碳纤维增强热塑性树脂基预浸丝或预浸带为加工对象,结合“原位固化”技术来生产飞机复合材料构

表1 纤维铺放技术在飞机结构上的应用

机型	结构
F/A-18E/F	进气道、后中心滑动板蒙皮、平尾蒙皮
C-17	风扇罩、起落架吊舱
A380	后机身
V-22	后机身、滑动板蒙皮
JSF	S型进气道
Premier I	机身段
F-22	鸭翼、平尾枢轴

件是飞机制造业一个新的发展趋势,据文献报道,已应用到空客 A380 和 A350 中^[2]。除了热塑性树脂具有良好的焊接性、抗冲击韧性、可循环性、抗化学腐蚀性以及近乎无限的保质期等优点外,“原位固化”技术与“热压罐”技术相比,还具有不受加工场

* 国家自然科学基金(51005060)、国家科技重大专项(2009ZX04004-111)资助。

地、零件大小和形状的限制等优点。

但目前据文献报道,“原位固化”成型技术加工的铺层层间强度为高压固化成型加工的铺层强度的89%~97%^[3]。如何消除近10%的差距,将是热塑性复合材料纤维铺放技术成功应用到实际生产当中的最大障碍。因此,有必要对热塑性复合材料纤维铺放技术中涉及的关键技术进行深入研究。

加热工艺研究

在自动纤维铺放过程中,为提高铺放效率,通常设置预加热及主加热2个加热环节。在这2个环节中,都会涉及到选择热源、建立加热模型及确定加热温度三方面的问题。图1所示为纤维铺放工艺简图。

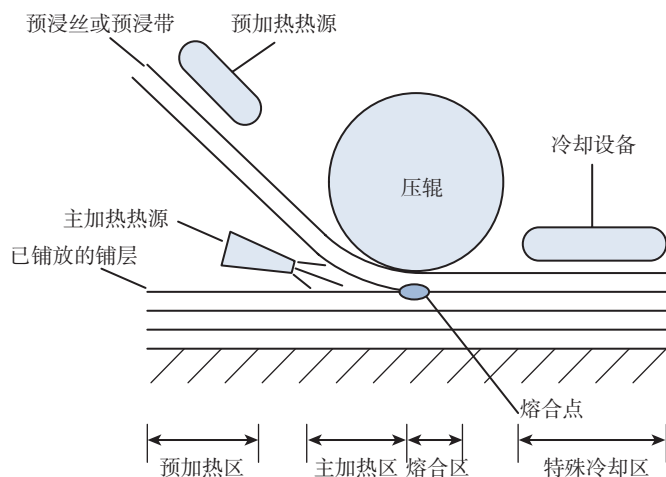


图1 纤维铺放工艺简图

目前,应用在自动纤维铺放中的热源主要有激光热源、红外线热源和高温气体热源3种。选择热源时,针对不同的加工原料及结合具体的应用场合,需对所选热源的加热温度(或加热功率),可连续加热时间,加热温度是否可控及热源自身的价格、质量、体积、热利用率等方面进行综合考虑。首先,设置预加热区,可显著缩短主加热所需时间,提高纤维铺放速率,同时,可避免铺层啮合点处温度梯度变化过大而引起过多的残

余应力。预加热时,为保持基体材料原有的物理化学性质及最大限度提高铺放速率,预加热温度通常应略低于基体材料玻璃转化温度,因此,预加热热源的加热温度选择应略高于基体材料玻璃转化温度^[4-5]。在主加热区,基体材料的安全加热温度通常应低于基体材料的退化温度,为使基体材料充分熔融,主加热区的温度又应高于基体材料的玻璃转化温度,同时,考虑铺放效率,选择主加热区热源的加热温度略高于基体材料退化温度是较为合理的。其次,热源使用场所空间的大小及安装的难易程度,在热源选择过程中也需要充分的考虑。

目前,无论是工业上使用的预浸丝或预浸带,其厚度都小于长度或宽

度的1/10,因此,国外研究人员在进行纤维铺放加热模型建立时,通常根据热力学第一定律,考虑热量传递方向,建立一维或二维的热传递模型^[6-11]。同时,根据热源的不同,铺放设备及周围的实际环境,确定相应的热传递方式,建立热传递模型的边界条件。鉴于热传递模型及其边界条件的复杂性,多数情况采用有限元的方式对模型进行数值求解,来研究不同时刻、温度在纤维束中不同位置的分布情况以及时间、温度、位置三

者之间的关系,然后与试验数据进行对比,分析所建模型的合理性,同时对所建模型进行合理修正。

自动纤维铺放过程中,在加热温度、加热热源、加热模型三者确立之后,可以通过计算加热时间确定的铺放速率理论值范围,指导实际铺放过程铺放参数的设定。

冷却工艺研究

用于自动纤维铺放的碳纤维单向增强树脂基预浸丝或预浸带,其基体材料通常为半结晶聚合物。在这类聚合物兼有无定形聚合物和结晶聚合物的优点,其使用温度、抗蠕变性、硬度和强度主要受结晶度的影响,随结晶度的增大而增大,但结晶度过高,又会使聚合物变脆^[12-13]。因此,在实际应用中,需严格控制半结晶聚合物成品的结晶度来保证产品质量。在纤维铺放过程,通常会设置特定的冷却区对熔合后的铺层进行冷却以完成其最终的结晶固化,而不是让其在室温条件下自然冷却。

对于半结晶聚合物,结晶速率是材料结晶程度和结晶状态的显著影响因素,而冷却速率及冷却时间决定了结晶速率。因此,在纤维铺放过程中,只要严格控制这个参数,就可保证最终的产品品质。而合理的冷却速率主要是通过大量试验数据得到的。首先,基体材料性能最优时所对应的结晶度值的范围可从材料制造厂商处得到;其次,设定具体的冷却条件(等温冷却或以一定的冷却速率冷却),通过试验确定在此条件下的基体材料的结晶速率,结晶速率的测定方法通常有膨胀计法、光学解偏振法、DSC法、热台偏光显微镜法、小角激光光散射法等^[14];最后,通过仿真软件,可计算出在此冷却速率下达到要求结晶度所需的时间,即在纤维铺放过程中,铺层需在特殊冷却区所停留的时间。

建立基体材料冷却模型涉及传

热学与结晶动力学 2 个学科的知识。冷却模型的建立是将结晶动力学模型与能量模型相耦合,通过设定温度、材料的密度、黏度、热传导率、热熔等物理参数,同时设定符合实际情况的边界条件,利用现有的多物理场仿真软件(如 COMSOL)得到达到某一结晶度的条件下冷却速率与冷却时间之间的关系。冷却模型建立的关键是结晶动力学模型的选择,国外学者已经对基于 Avrami 方程的模型,基于 Tobin 方程的模型及 Ozawa 模型进行了较为深入的研究^[15-16]。

在计算得到冷却时间后,可以确定在这一区域合理铺放速率理论值的范围,但纤维铺放过程中,铺放速率只能是一个值,当由加热时间所计算的铺放速率与由冷却时间所计算的铺放速率不能协调一致时,可以通过调整加热区间的长度或特定冷却区间的长度来达到二者速率的一致。

纤维铺层间强度研究

利用自动纤维铺放技术加工的复合材料构件,其基体材料的性能指标由加热工艺参数和冷却工艺参数共同决定;其整体性能指标还与铺层间强度有关,即与任意相邻两铺层熔合后所能达到的铺层间强度有关。铺层间强度受到两铺层间紧密接触程度、两铺层熔合时分子渗透距离及纤维铺放压力三方面因素的共同影响。

铺层间紧密接触度被定义为:

在任意给定时间,两铺层接触面积占铺层面积总面积的百分比,与温度、压力、接触时间有关^[17]。由于表面粗糙度的原因,预浸丝或预浸带表面与铺层表面(或芯模表面)的微观几何形貌为不规则体,在未加热和未施加压力的条件下,预浸丝或预浸带表面与铺层表面(或芯模表面)不可能完全接触。为理论计算方便,国外研究人员首先将不规则的微观几何体简化成大小不同的矩形(指截面),然后再将上述矩形简化成大小相同的矩形^[18-20]。纤维铺放过程中,在加热到一定温度时,当压辊对预浸丝或预浸带施加一定的铺放压力后,预浸丝或预浸带与铺层表面(或芯模表面)的突起的矩形将发生变形,矩形高度将减小,宽度将增大,然后根据这一模型,建立计算铺放压力与铺层间紧密接触度之间的函数关系。将现行的粗糙度评价指标融入上述计算模型中,可显著提高实际应用的方便程度。图 2 为铺层表面微观几何形貌及简化模型示意图。

铺层间熔合是指相邻两铺层表面,当加热到温度高于自身基体熔化温度时,并在一定的铺放压力作用下,会发生一铺层表面的分子向另一铺层扩散的现象^[17]。分子扩散的距离决定了铺层间强度,这与温度、压力与扩散时间有关。基于链的塌滑理论,研究人员分别对等温条件下与非等温条件下,热塑性聚合物的熔合模型进行了研究,建立铺层间强度与铺放温度、铺放压力之间的函数,找

出熔合所需的最佳时间,为纤维铺放过程提供压辊压实的时间参数^[21-24]。

在温度一定的条件下,铺层间的紧密接触度与铺层间熔合由铺放压力和施压时间来决定。研究人员对此建立了二维的可压缩的牛顿流体模型,对压辊及所接触铺层的压力场分布进行了较为深入的研究^[7]。此外,铺放压力还影响基体材料的孔隙率,目前所见文献,仅通过试验的对比进行了定性研究,定量研究未见报道。

纤维铺放轨迹规划算法研究

鉴于自动纤维带铺放主要用于加工形状简单的平板类或类平板类复合材料构件。这里所研究的纤维铺放轨迹规划算法主要针对自动纤维丝铺放而言。由于自动纤维丝铺放设备具有可灵活操作的铺放头及铺放所采用的预浸纤维丝宽度窄等特点,可用于加工形状复杂的自由曲面复合材料构件。

目前,在实际生产中,应用最为广泛的是采用定角度纤维铺放所制造的 0° 铺层、45° 铺层和 90° 铺层^[25-29]。基于上述铺层,针对不同形状的复合材料构件,国内研究人员提出了不同的轨迹规划算法。例如,针对自由曲面复合材料构件,研究了基于等距线、等分点原理的 2 种轨迹规划算法;针对 S 形进气道,在分析等铺放角法和等距偏置法 2 种轨迹规划方法的基础上,提出基于纤维带边缘曲线的轨迹规划方法及将等铺放角法和等距偏置法 2 种轨迹规划方法相结合,提出以曲线在曲面内等距偏置为核心的铺放轨迹优化方法。

荷兰代尔夫特理工大学的研究人员提出了“变刚度”铺层铺放的概念,这类铺层刚度的变化是由于铺放角度的不断变化所导致的,针对变角度纤维铺放,他们研究了测地线方

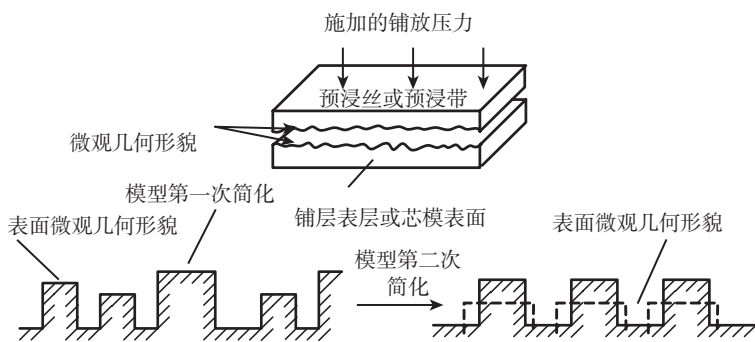


图2 铺层表面微观几何形貌及简化模型

式、常曲率方式及角度线性变化方式的轨迹规划算法^[30-32]。自动铺带轨迹规划中采用的测地线算法,也可归为变角度纤维铺放。

针对不同类型的自由曲面复合材料构件,在纤维铺放过程中,如何避免或减少除构件边缘外的剪切和重送,是轨迹规划算法研究的一个主要出发点。因为复合材料构件铺层内部过多的剪切与重送,一方面会对复合材料构件的外形精度和各项性能产生影响,另一方面会使纤维铺放过程的复杂程度加剧,不利于生产效率的提高。由于轨迹规划算法直接影响所形成铺层的力学特性,满足铺层力学特性的需要,也是设计和研究轨迹规划算法的一个主要出发点。

铺放角,还可以改变零件的固有频率,对改善整体系统的共振,具有一定的作用。

铺层特性研究

铺层特性研究主要针对复合材料构件在不同的工况条件下,对其进行静力学分析或动态响应分析,通过分析结果,对铺层进行优化,以得到满足设计要求的铺层为最终目标。

纤维的变角度铺放是一种新型的轨迹规划算法,此算法可增大复合材料构件铺层设计的灵活性,充分利用复合材料的方向特性来满足设计要求。目前,国外研究人员主要针对这种变角度铺层进行深入研究。首先,针对变角度铺放制造的平板、类

有频率的影响^[32]。通过改变纤维铺放角,可改变壳体的固有频率,在实际应用中,对避免整体系统的共振具有积极的意义。

国内对于变角度铺层结构的研究较少。从发表的文献来看,国内学者对于变角度铺层结构的研究基本处于起步阶段。目前,国内的研究重点仍集中在固定角度直线铺层力学特性的分析上,通过改变纤维铺放角的固定角度及改变不同角度值铺层之间的层叠顺序来提高铺层的力学特性;并且这类研究主要针对平板或平板带孔类结构,对壳体类结构的研究较少。

铺层特性研究与铺放轨迹规划算法研究,二者是密不可分的,一方

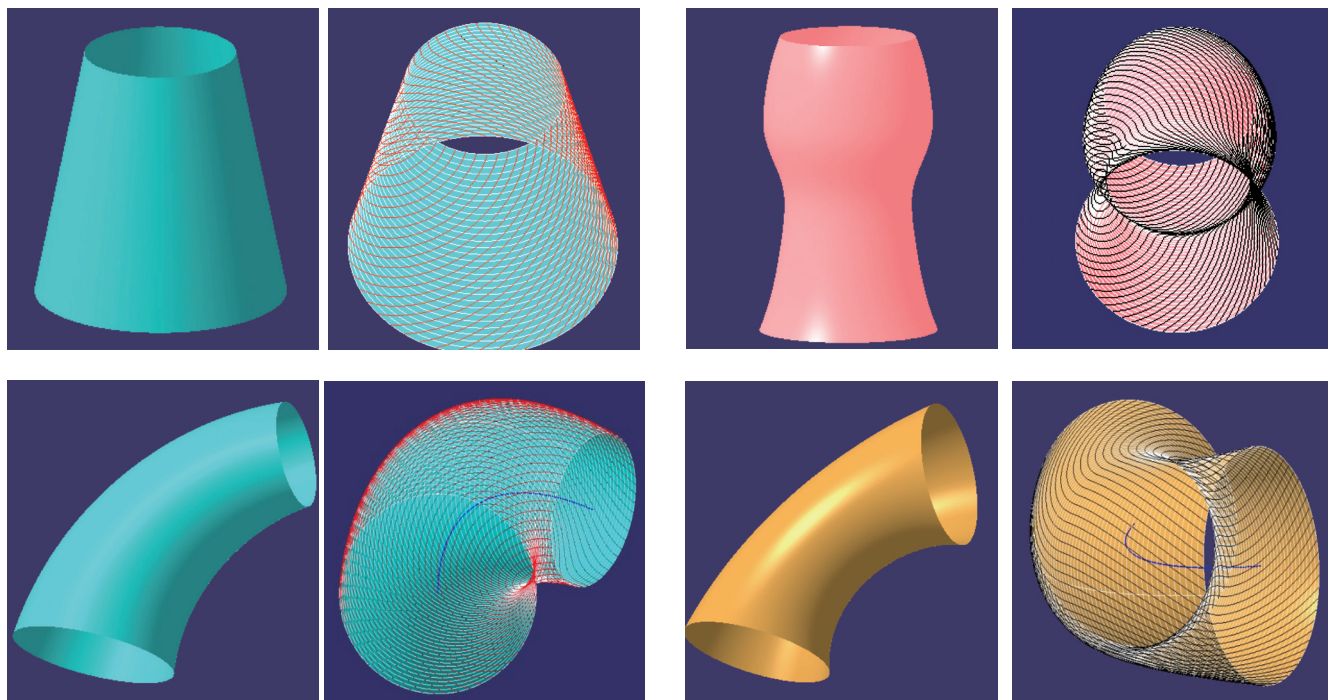


图3 变角度规划典型零件

目前,我们提出了一种新的变角度轨迹规划算法,可实现锥壳类零件、外壳类零件及变截面接头类零件的加工制造,如图3所示。变角度轨迹规划算法在上述零件的具体实现中,其最大优点是避免了除零件端面外的剪切与重送,可简化纤维铺放过程,提高加工效率。同时,改变初始

平板或平板上带孔结构,进行了静力学分析,研究了在拉伸载荷作用下,这类结构的承载能力,结合分析结果,对铺层角进行优化,优化后的铺层,较传统定角度铺放制造的铺层,各项性能指标都有明显的提高^[33-35]。其次,针对变角度铺放制造的圆柱壳和圆锥壳,重点研究了铺放角对其固

面,铺层特性研究为铺层轨迹规划算法的合理性提供了理论支持;另一方面,轨迹规划算法又为铺层特性研究提供了多种的选择性。

结束语

热塑性复合材料纤维铺放技术是未来复合材料构件极端制造发展

的一个重要方向。但就我国而言,制约其发展的主要因素主要有以下两点:

(1) 碳纤维单向增强热塑性树脂基预浸丝或预浸带的生产。目前,国内仅见有生产碳纤维单向增强热固性树脂基(环氧树脂基)预浸丝或预浸带的企业,没有生产碳纤维单向增强热塑性树脂基预浸丝或预浸带的单位,这类预浸丝或预浸带通过实验室制作,会存在生产质量不稳定的问题,不利于铺放工艺与铺层特性研究。

(2) 自动纤维铺放设备。国内自动纤维铺放设备主要依靠进口,并且大多为自动纤维带铺放设备。在自动纤维丝铺放设备方面,哈尔滨工业大学已完成样机研制。纤维丝铺放设备制约了铺放轨迹规划算法及铺层特性的研究。

参考文献

[1] 邵忠喜. 纤维铺放装置及其铺放关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[2] van Barschot J. Airbus en boeing vliegen met ten cate[N]. NRC Handelsblad, Rotterdam, 2005-01-05(17).

[3] Lamontia M A, Gruber M B, Tierney J J, et al. Modeling the accudyne thermoplastic in situ ATP process // 30th International SAMPE Europe Conference. Paris: SAMPE, 2009.

[4] Ghasemi N M N. Three-dimensional thermal and residual stress analysis of in-situ thermoplastic composite filament winding[D]. Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, Newark, Delaware, 1992.

[5] Ghasemi M N. Thermal analysis for thermoplastic composite tow/tape preheating and pultrusion. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1997, 10(6): 504-523.

[6] Colton J, Leach D. Processing parameters for filament winding thick-section PEEK/carbon fiber composites. Polymer Composites, 1992, 13(6): 427-434.

[7] Pitchumani R, Don R C, Gillespie J W, et al. Analysis of on-line consolidation during thermoplastic tow-placement process. Thermal Processing of Materials, 1994, 289: 223-239.

[8] Lee M. Heat transfer and consolidation

modeling of composite fiber tow in fiber placement[D]. Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, Blacksburg, 2004.

[9] Grove S M. Thermal modeling of tape laying with continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic. Composites, 1988, 19(2): 367-375.

[10] Ghasemi N M N, Cope R D, Güceri S I. Thermal analysis of in situ thermoplastic composite tape laying. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1991, 4(1): 20-45.

[11] Tumkor S, Turkmen N, Chassapis C, et al. Modeling of heat transfer in thermoplastic composite tape lay-up manufacturing. Heat Mass Transfer, 2001, 28(1): 49-58.

[12] 张晓明, 刘亚雄. 纤维增强热塑性复合材料及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2007:245-247.

[13] Jandal M Z, Widmann G. 热分析应用手册系列丛书: 热塑性聚合物. 上海: 东华大学出版社, 2008:1-20.

[14] 金日光, 华幼卿. 高分子物理. 北京: 化学工业出版社, 2007:80-110.

[15] Tierney J J, Gillespie J W, Jr. Crystallization kinetics behavior of PEEK based composites exposed to high heating and cooling rates. Applied Science Manufacturing (Composites, Part A), 2004, 35(5): 547-558.

[16] Boutaous M, Brahmia N, Bourgin P. Parametric study of the crystallization kinetics of a semi-crystalline polymer during cooling. Comptes Rendus Mecanique, 2010, 338(2): 78-84.

[17] Tierney J J, Gillespie J W, JR. Modeling of situ strength development for the thermoplastic composite tow placement process. Journal of composite materials, 2006, 40(16): 1487-1506.

[18] Dara P H, Loos A C. Thermoplastic matrix composite processing model. Virginia

Polytechnic Institute and State University, Virginia, Blacksburg, 1985.

[19] Lee W I, Springer G S. A model for the manufacturing process of thermoplastic matrix composites. Composite Materials, 1987, 21(11): 1017-1987.

[20] Mantell S C, Springer G S. Manufacturing process models for thermoplastic composites. Composite Materials, 1992, 26(16): 2348-2377.

[21] de Gennes P. Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles. Chemical Physics, 1971, 55(2): 572-579.

[22] Doi M, Edwards S F. Dynamics of concentrated polymer systems. Faraday Transactions, 1978, 74(1): 1789-1801.

[23] Bastien L J, Gillespie J W, Jr. A nonisothermal healing model for strength and toughness of fusion bonded joints of amorphous thermoplastics. Polymer Engineering and Science, 1991, 31(24):1720-1730.

[24] Yang F, Pitchumani R. Healing of thermoplastic polymers at the interface under nonisothermal conditions. Macromolecules, 2002, 35(8): 3213-3224.

[25] 张振甫, 肖军, 吴海桥, 等. 复合材料锥壳 0° 铺层的自动铺放成型方法研究. 宇航材料工艺, 2007(2): 55-57.

[26] 安鲁陵, 周斌, 周来水. 复合材料纤维铺放路径规划与丝数求解. 航空学报, 2007, 28(3): 745-750.

[27] 尹洪玉. 纤维铺放运动轨迹规划及仿真系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

本文共有参考文献 35 篇, 因篇幅有限, 未能一一列出, 如有需要, 请向本刊编辑部索取。

(责编 夏宛)

