

自动铺丝过程中的典型缺陷及原因分析*

原崇新,李妍,潘杰,赵新福

(中国商飞北京民用飞机技术研究中心,北京 102211)

[摘要] 自动铺丝工艺已经成为飞机机体结构的主要制造方法,对于铺丝工艺的研究也越来越多。聚焦了自动铺丝工艺过程中的常见缺陷、缺陷的形成机理以及缺陷对力学性能的影响。在总结了当今国内外最新的研究成果基础上,结合自身在实际铺丝过程中遇到的常见缺陷,分析了造成缺陷的原因,铺放材料包括热固性预浸料、热塑性预浸料和干纤维。综述了有关铺丝工艺常见缺陷的研究;介绍了转变半径试验中遇到的缺陷;分析了曲面模具上铺贴质量问题;研究了夹层结构的主要缺陷类型;最后分别介绍了干纤维和热塑性复合材料自动铺丝的常见缺陷。

关键词: 自动铺丝;缺陷;纤维间隙;纤维搭接;复合材料

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.04.066



原崇新

博士、高级工程师,毕业于荷兰代尔夫特理工大学,长期从事复合材料的工艺研究,主要方向为自动铺丝、液体成型、纤维缠绕、夹层结构、智能制造等领域。

铺丝过程的工艺缺陷研究综述

自动铺丝技术已经广泛应用于民用客机以及其他航空航天器的制造上,对铺丝过程中产生的缺陷影响也有了大量的研究。铺丝机一般由 8 到 16 根纤维束组成,丝束宽度为 0.63cm,通过末端执行器(铺丝头)与机器系统进行连接并 PLC 联动控制,以达到精确铺放目的。通常来讲,在纤维铺放中主要有 5 种缺陷类型:面内纤维波纹度、纤维剪切、丝束架桥、起泡和面外褶皱。

1 形成缺陷的因素及缺陷模拟

铺层过程的层压板的质量受到铺放温度、速度、压实力以及纤维张力的影响。其中铺放温度对于铺放质量影响很大,如果加热温度过高超出了材料的允许范围,树脂基体可能会发生热老化或者部分固化,同时可能会造成黏度增大,这样一旦有铺放缺陷,

再人工纠正铺放就不太可能。另一方面,如果温度没有达到一定值,材料可能黏性不够,会造成材料无法贴合在模具上,或每层材料之间出现滑移、翘曲、褶皱等现象,影响后续铺放的继续。因此在铺放时给予合适的加热窗口,以使得材料的黏度达到一定的范围至关重要。在实际工作中往往以试错法进行合适加热窗口的确认,而有学者力图通过建立模型进行温度场预测的方法来较科学地对加热功率的设定进行指导。Lichtinger 等^[1]研究了红外加热方式下相邻铺层之间的热辐射,以一平板为例,采用了热电偶埋设以及热成像相机来测试铺放过程中的温度场,建立了参数化的 3D 有限元模型进行热场预测,并和试验结果进行了对比验证。测试结果与模拟结果稳合性较好,同时作者认为纤维层随着铺丝头的运动在面内方向上有温度梯度,同时在厚度上也存在温度梯度,并且内部温度会随着铺放层数的增加

* 基金项目:国家自然科学基金(E050804)。

而增加。

除了工艺因素外,材料的老化也会影响铺放质量。Schmidt等^[2]研究了材料老化对其自动铺丝成型的碳纤维复合材料质量及力学性能的影响。将环氧/碳纤维预浸料在室温下放置不同的天数,然后在铺放过程中利用红外测温仪监测不同老化程度化材料的铺放温度变化,并且对比了不同老化程度铺出的复合材料件的弯曲模量和强度。如图1所示,老化程度低的材料(图1(a))可以较好的粘贴在模具上,因此在热成像图上颜色比较均匀一致,当老化程度逐渐增大,纤维的黏性降低,并且变硬,在铺放中产生气泡或架桥,在热成像图上形成颜色较浅的热点。

目前有学者针对铺丝过程的缺陷产生以及固化成型过程缺陷的变化进行了模拟仿真。Bakhshi等^[3]研究了在热固性预浸料纤维在曲线自动铺放过程中容易出现的缺陷,并且通过对压辊、铺放路径以及纤维丝束本身进行有限元建模,在ABAQUS中利用内聚力模型(Cohesive Zone Modeling)对纤维丝束的黏性进行建模,最终进行了显性的非线性计算模拟出纤维丝束的变形,如图2所示。

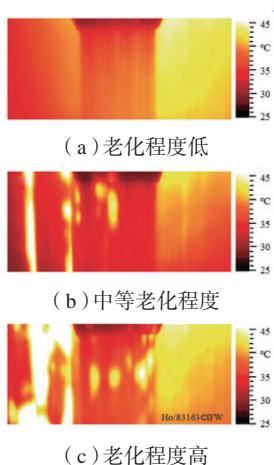


图1 不同老化程度下的铺放过程的温度分布图

Fig.1 Thermal images during lay-up of prepreg of different aging

经过试验验证,模拟结果能比较准确地预测出纤维的面外褶皱和气泡等缺陷。Guin等^[4]通过有限元建模,对由纤维间隙或纤维搭接引起的面外褶皱在预压实和热压罐固化过程中的变化。进行了模拟,结果与CT无损检测结果对比,此模型可以较准确地预测在固化过程中纤维褶皱的变化过程。

2 缺陷对力学性能的影响及机理分析

总体上讲,引起复合材料力学性能下降的主要缺陷有:纤维屈曲、纤维错位、富树脂、纤维体积分数波动等。对于铺丝缺陷与力学性能的关系,国内外学者也做了大量的研究。

Guin等^[4]研究了丝束与丝束之间的间隙对力学性能的影响,通过人为地在相邻丝束间设置1.27mm的间隙,并利用光学显微镜观察有缺陷的复合材料剖面,然后对比测试了90°铺层有间隙、每层都有间隙和无间隙试样的拉伸性能、压缩性能以及开孔拉伸性能,每种性能进行了正则化处理。结果发现,与无间隙的试样相比,90°铺层有间隙的试样强度影

响不大,但每层都有间隙的试样力学性能影响较大,其中拉伸强度降低了35%,压缩强度降低27%,开孔拉伸强度降低20%。剖面结果表明,只有90°铺层有间隙纤维变形较小,但每层都有间隙会造成纤维明显的屈曲变形,对试样的性能影响较大。如果只是偶尔在某些层内有1mm左右的间隙,只要纤维的轴向变形没有大的变化,并不会影响其整体的力学性能(图3)。

Croft等^[5]研究发现间隙会导致压缩性能下降,下降的原因主要来自于间隙引起的纤维屈曲和富树脂区。但随着间隙的增大,压缩性能并没有持续下降,因为随着间隙增大,由间隙导致的应力集中影响也在下降。Woigk^[6]也研究了纤维间隙和对接对准各向同性对称铺层复合材料的拉伸和压缩性能的影响,重点研究了强度折减因子以及破坏模式的变化。

Woigk等^[6]研究了4种缺陷形式(间隙、搭接、间隙/搭接混合、丝束扭曲)下自动铺丝面板的力学性

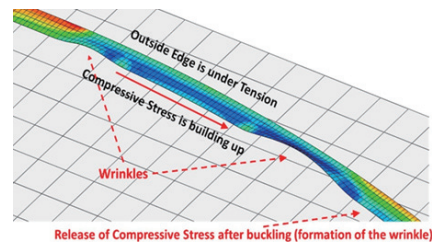


图2 单根丝束产生褶皱的模拟结果

Fig.2 Simulation of wrinkles of single fiber tape

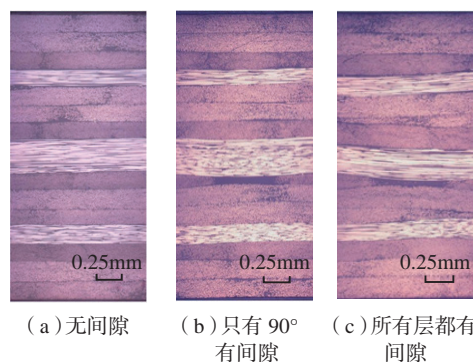


图3 3种不同类型的层合板剖面图

Fig.3 Cross section of three different laminates

能。在纤维层级研究了纤维的拉伸、压缩及面内剪切性能,在层合板级研究了开口拉伸和开口压缩性能。通过与无缺陷的标准板进行对比,发现在纤维层级力学性能下降至少 5%,而在层合板级至少下降 13%,这是因为在纤维层级缺陷对纤维的弯曲影响不如在层合板级大,这也印证了纤维的屈曲是影响其力学性能的主要因素。

Fayazbakhsh^[7-8] 等利用缺陷层分析方法对含纤维间隙的纤维曲线铺放试验件进行了有限元仿真模拟,纤维间隙如图 4 所示。模型中试验件为 0.254m × 0.4064m 的长方形,铺层为 [45° / 0° / -45° / 90°]_{2s} 共计 16 层。在模拟中引入了尺寸为 0.0254m × 0.0254m 的方块放置于长方形的中间,此层含有纤维间隙或纤维交叠等缺陷,如图 5 所示。在有限元模型中进行压缩及剪切的模拟计算,结果发现没有缺陷的变刚度复合材料件的屈曲载荷比典型纤维复合材料(纤维直线铺放)高 37%,但变刚度含有纤维间隙后,只增高了 20%。另一方面,有纤维交叠的屈曲强度可提到 78%。作者在结论中提到,通过与其他文献中的模拟方法对比,缺陷层方法能更精确地去确定缺陷面积及位置。国内对于铺丝过程中的缺陷也做了一定的研究,如黄新杰^[9] 在其硕士论文中研究了间隙和搭接对横向拉伸,纵向拉伸,弯曲性能的影响。

3 干丝铺放缺陷对渗透率的影响

干丝铺放液体成型是一种低成本非热压罐的成型工艺,自动铺丝主要完成纤维预成型体的铺放。研究内容主要集中在纤维预成型体中的缺陷对于渗透率或后期树脂注胶的影响上。因为与手工铺放相比,干丝自动铺放预成型体的渗透率一般较低,树脂在其间的渗透率较慢,容易引起干斑或贫胶等现象。

Belhaj 等^[10] 对 3 种干纤维的形

式(标准、有间隙、有搭接)进行自动铺放成预成型体后,进行了压缩试验以及渗透率测试。压缩试验中对比 3 者的压力与纤维层厚度(进而换算成纤维体积分数)。发现在给定的压力下,有间隙的预成型体的纤维体积分数为 65%,有搭接的预成型的纤维体积分数为 72%。另外,通过渗透率的测试发现预成型体的间隙并不能显著提高其渗透率,但值得注意的是,渗透率的测试方法作者没有提及,也没有说明是面内渗透率还是厚度方向上的渗透率。

Aziz 等^[11] 也做了类似的研究,对 TX1100 干纤维的自动铺丝预成型进行了厚度方向渗透率的测试。同时也进行了理论模型仿真,在 X-CT 机里进行了在线的预成型体压缩试验并观察间隙的变化和微观形貌,通过 TexGen 软件在微观形貌基础建立了干纤维预成型模型,模型中考虑了流道,并在 ANSYS 中进行了流体动力学模拟以预测厚度方向上的渗透率。

预测的渗透率与实际测试和厚度渗透率基本一致,并且发现不同的预成型在厚度方向上的渗透率可相差 5 倍(图 6)。

4 缺陷的在线监测方法

探寻一种稳定而可靠的在线监测方法是保证纤维铺丝质量的重要前提,因为在实际生产中,为了提高效率,很难做到每铺一层就停下然后人工检查铺贴质量,即使这样做,对于大型的机身壁板等结构件,单纯靠肉眼去观察也不现实。目前常用的做法是通过在线摄像头的方法去观察铺放中的实时缺陷,但这种光学识别方法对于都是黑色的纤维层来说,有时难以辨别是否有缺陷。因此也有学者通过其他方法来在线监测铺贴过程的缺陷。

Denkena 等^[12] 研究了热成像技术对自动铺丝过程的在线缺陷监测,分析了铺放丝束及下方铺贴面的温度差,并研究了纤维搭接、间隙、丝束扭曲、纤维架桥等缺陷的

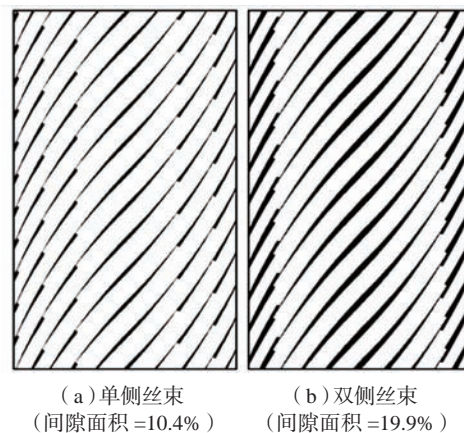


图4 纤维曲线铺放中的间隙分布
Fig.4 Gap distribution for curved fiber lamina

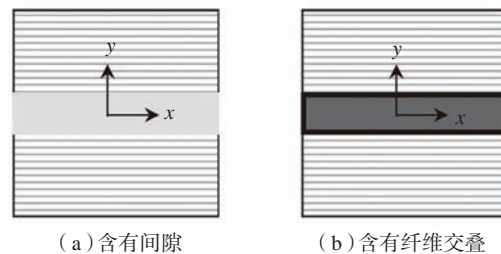


图5 缺陷层
Fig.5 Defect layer

成像信息。Schmidt 等^[13]用了涡流探伤的方法对自动铺丝的预浸料以及固化后制作表面进行了缺陷探测。研究表明,尽管碳纤维具备较高的导电率,但其电磁性与金属相比相差较多。这种造成碳纤维复合材料中的涡流密度较低,从而信号透入深度较大但测得信号不明显。对于金属来讲,涡流的频率为0.05~1MHz,但对于碳纤维复合材料,其频率至少达到5MHz才能使用。要想获得最佳的成像质量,频率范围最好在5~25MHz。但作者提出,通过探测纤维方向的变化,涡流探伤可以检测到纤维间隙及搭接,甚至可能探到纤维的气泡或架桥(此项有待验证)。目前涡流探头的最大扫描速度为70mm/s,远远低于正常的铺放速度1m/s,此矛盾有望通过建立传感器矩阵来实现,如图7所示。

纤维弯曲铺放试验中的典型缺陷

本文研究团队对于纤维 TX1100 以及 Hexcel M21E 碳纤维 / 环氧预浸料分别做了纤维弯曲铺放试验,在试验中主要发现了翘边、纤维褶皱、剪切变形、气泡、面外架桥等缺陷。

在干纤维铺放试验中,主要发现了剪切变形、架桥和气泡等缺陷,因为干纤维表面只有少量的定型剂,变形能力较强,但在弯曲的铺放曲线中,最外侧受拉力,最内侧受压力,在内侧受到挤压后纤维会鼓起,但随着压辊的压力,鼓起的纤维又被压下去而发生剪切变形。在起始端当铺放速度过快或压力较小时容易出现翘边。另外气泡主要在纤维束的中间产生,这种情况是由于纤维束两边紧贴在模具上,此时纤维的应力会通过产生小鼓包而释放。气泡在干纤维铺放中较为普遍,这主要是由于干纤维的黏性相对不强,中间的纤维不能很好地贴合在

一起。

在预浸料铺放试验中,主要发现了架桥,纤维面外褶皱以及起始端翘边等缺陷。由于预浸料的黏性较大,与模具的切合性较好,因此在预浸料的弯曲铺放试验中,气泡的缺陷要远远小于干纤维。但在纤维的内侧由于受到压力,纤维仍然会发生屈曲而引起架桥。如图8所示,有一处比较严重的缺陷为纤维有明显的面外褶皱,在纤维束的外侧纤维被拉起而发生卷曲,弯曲的纤维在受到压辊压实后又折叠,最终造成有纤维间隙和纤维折叠同时存在的结果。值得说明的是,在此试验中,预浸料的存放时间超过1年的保质期,黏性已不太好,这也是发生面外褶皱的原因之一。如果预浸料发生了工艺性变化,其中的树脂发生了部分交联、固化度

升高,会导致预浸料变硬并且黏度下降^[11]。

曲面铺放中的典型缺陷

曲面尤其双曲面的自动铺放过程中不可避免地会出现一些间隙或交叠,通常可以通过分区的方式去尽量避免这些缺陷。但对于曲面铺放来说,存在纤维铺放角度偏差与纤维间隙相矛盾之处。例如,如果严格限制铺放角度偏差在 1° 之内,随着纤维距离参考线越远,其与参考线的方向偏差也越大,当大于 1° 时,就需要进行建立一个新的铺放区来重新定义参考线,这时区与区之间会产生间隙。此外,对于曲面结构,由于压辊有一定的宽度,当在转角比较明显的曲面上铺放 0° 纤维时,如果是阳模,可能容易出现纤

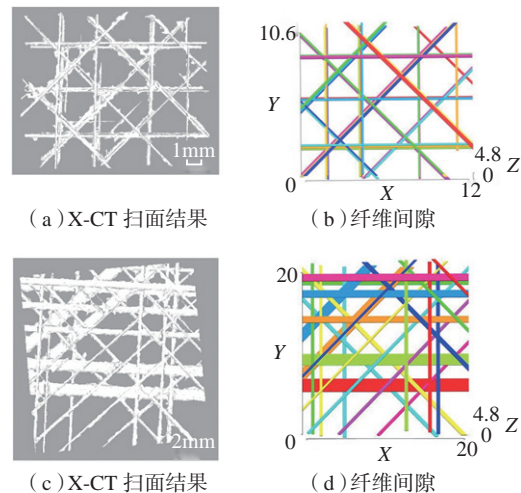


图6 干纤维预成型体厚度方向上扫描结果和纤维间隙

Fig.6 Through-thickness view of stacked gaps in X-CT 3D scan and TexGen 3D model re-constructed

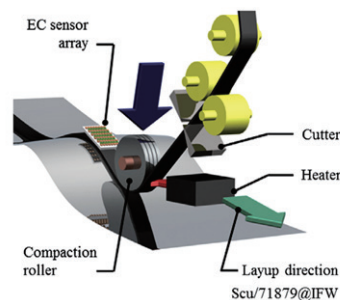


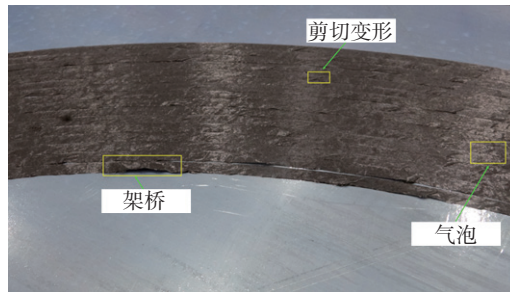
图7 集成在铺丝头上的在线涡流探伤机械原理图

Fig.7 CAD illustration of sensor integration

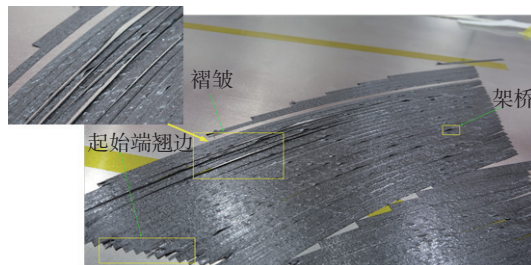
维与纤维之间存在间隙;如果是阴模,可能容易出现纤维与纤维出现搭接。

本文研究团队曾对吊挂前缘左侧段以及机翼前缘(局部)进行铺放,其中左侧段为环氧预浸料,前缘为热塑性预浸料(图9)。两种结构相类似的是:都是阳模;都存在较大的转角区;都是双曲面结构。结果发现在铺放 0° 时都出现了较大的间隙。尽管在铺放轨迹设计中,丝束与丝束之间的设计间隙为0,但在实际铺放中依然存在,有的甚至接近2 mm,如图10所示。初步分析,这可能是由于压辊在凸面模具上铺放时,压辊的挤压变形(图11)会引起纤维向内的收缩力,造成纤维束与纤维束之间的间隙变大。除此之外,在铺放 0° 时,还存在纤维粘接不紧的现象,如图12所示。这种纤维粘接不紧是由于压辊在凸面上铺放时,压辊的变形受到一定材料变形限制而不能完全与模具进行压实,造成部分纤维在铺贴时没有压实力而粘接不紧。后将铺丝根数由16根减为8根,且此8根纤维保持在压辊中间,粘接不紧的现象得到改善。

在铺放机翼前缘(局部)时,材料为PEEK热塑性预浸料,发现 45° 纤维带之间的间隙存在不一致的现象,有的地方无间隙,之后间隙变大,到最后又无间隙。在路径规划时采用了平移法而非平行法,因此模拟中纤维带无间隙。造成这种现象的可能原因有,在铺放过程中涉及到机器人运动与模具转动进行联动的情况,在联动时因控制精度不准而造成纤维间隙控制与模拟不能完全一致。此外,压辊也存在从一个铺放面转向另一个铺放面的情况,在转角处纤维会发生一定的变形,而引起纤维带的扩大。在图13中也可以看到纤维在转角处有褶皱的现象发生。值得说明的是,这种间隙一般在2 mm以内,



(a) 干纤维



(b) 预浸料

图8 转弯半径铺放中的典型缺陷
Fig.8 Defects in steering layup



图9 吊挂前缘左侧段的铺放
Fig.9 Layup of left part of pylon upper fairing



(a) 左侧段铺放 (b) 机翼前缘(局部)铺放

图10 0° 铺放时存在间隙
Fig.10 Gaps during 0° layup

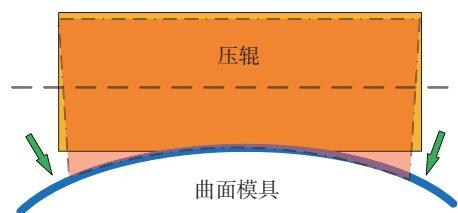


图11 压辊在曲面阳模铺放时的变形
Fig.11 Deformation of compaction roller contacting convex mould

铺丝机对曲面模具的铺放间隙精度验收标准也为 2 mm,因此从这种意义来说,提高未来铺丝机的精度控制也是改善这种情况的途径之一。

夹层结构铺放的缺陷

由于较强的弯曲刚度,夹层结构是航空结构的常见结构,自动铺丝夹层结构在飞机的整流罩、副翼等结构上广泛应用。但夹层结构铺放过程中存在一个较大的台阶,在台阶的衔接处容易出现架桥等缺陷。笔者曾研究了蜂窝夹层结构在铺放中容易遇到的问题并分析了原因,主要的缺陷类型如下。

1 蜂窝拐角处有纤维褶皱

如图 14 所示,纤维在蜂窝拐角处有纤维褶皱发生,这是由于压辊在拐角处有个角度突变,压辊由芯材的一侧转向另一侧时不能全部压实纤维而导致没压实的纤维起皱。另外为了防止在蜂窝加工时蜂窝发生撕裂,底边会预留 1~2mm 的预留高度,这也会使部分纤维无法与底面充分接触而架空,从而发生扭曲或褶皱。

2 夹层面夹角处的架桥

纤维在上坡的夹角区容易出现架桥,如图 15 所示,原因有:(1)纤维的黏性偏低,导致已经铺放压实的纤维会在张力下再次与铺贴面分开;(2)在上坡阶段,当压辊向前运动时会给纤维一个拉伸力,这种拉伸力会随着铺放速度的增加而更加显著,因此降低此处架桥的有效办法之一即适当放慢在此处的铺放速度;(3)纤维本身的变形能力限制,此位置纤维的变形程度超出了纤维的变形能力;(4)蜂窝夹芯的坡度或位置与模拟中的不一致,造成纤维拉扯较明显;(5)本试验中纤维架桥的原因,经过修改夹芯的外形尺寸并保证与数模一致,可有效避免此类现象的发生。

3 胶膜起泡

为了提高界面黏接强度,夹层

结构一般是通过胶膜将复合材料面板与蜂窝结构粘接在一起的。在自动铺放过程中,夹层结构中用到的胶膜容易因温度过高而起泡,造成铺贴表面不平整,如图 16 所示。遇到这种情况,可适当地降低加热功率或提高铺放速度,防止胶膜局部

过热。

干纤维铺放

随着干丝自动铺放液体成型工艺在俄罗斯 MS21 机翼上的成功应用,对于干纤维自动铺放的研究也与日俱增。目前市场上使用的是

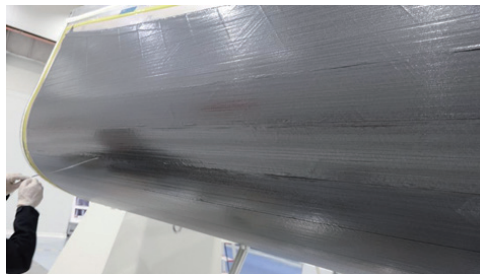


图12 0°铺放时因压实不紧而存在纤维拉起或褶皱

Fig.12 Fiber pull-ups or wrinkles in 0° layup due to weak compaction

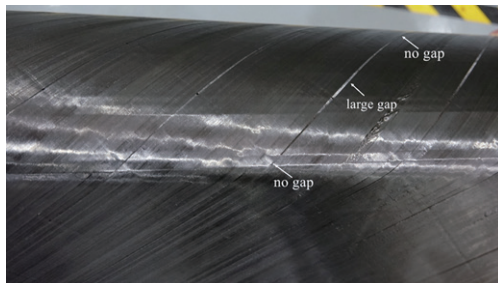


图13 在转角处铺放存在间隙不等现象

Fig.13 Gaps variation at turnovers of leading edge

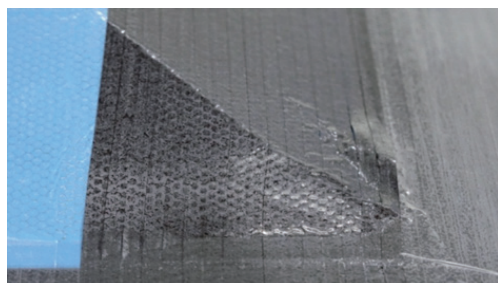


图14 蜂窝拐角处有纤维褶皱

Fig.14 Fiber wrinkles at honeycomb corner

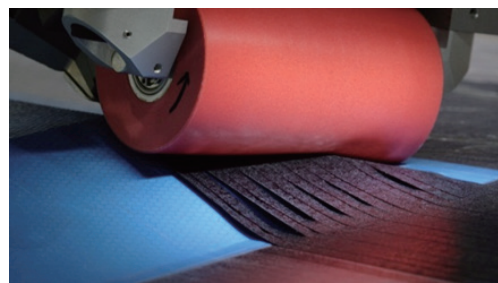


图15 纤维在夹角处的架桥

Fig.15 Fiber bridging at corner

Solvay 公司生的 TX 1100 干纤维, 这种干纤维的一面喷涂了热塑性的定型剂, 这种定型剂可以在 80~90℃ 左右熔化以帮助纤维之间完成粘接。另外一面则附加了由短切纤维组成的高渗透层 (Veil 层), 这种层可以帮助后期液体成型过程中的树脂流动, 防止干斑或贫胶现象发生。

本文研究团队对于干纤维的自动铺放进行了大量的试验研究, 首先干纤维的定型剂的温度工艺窗口较宽, 可以很好地实现纤维与纤维层之间的黏接。由于干纤维携带了短纤维, 在铺放过程这些短纤维可能会积聚成团, 然后在铺放中遗留在纤维层中, 形成小鼓包。这种小鼓包对于力学性能是否有大的影响目前无定性结论, 但根据研究经验, 如果只是偶尔出现, 并不会使纤维形成系统性的弯曲, 对力学性能的影响应该不大。另外一种缺陷是在初始端的纤维不齐 (图 18), 这种缺陷可以通过修改铺丝机的参数来消除。值得说明的, 对于大厚度的干纤维铺放, 需要特别注意的是纤维层厚度应该得到精确的测量并将其值在轨迹设计中输入, 因为如果轨迹设计中的设计厚度小于实际厚度, 随着厚度的增加, 纤维层的实际高度会高于铺丝头的铺贴面, 铺丝过程中, 压辊会不断地撞击已经铺放的纤维层, 这些铺放的纤维层在不断地撞击下会出现分层, 一旦出现分层易产生鼓包 (图 17), 后期的铺放会变得非常困难。因为分层会使整个纤维预成型变得蓬松, 在压辊经过时预成型体会呈现波浪式的变形, 从而使纤维发生褶皱或屈曲, 造成铺放无法继续进行。

热塑性复合材料铺放

热塑性复合材料因其可回收性以及较高的韧性而得到越来越多的研究, 尤其是研究其原位成型的可能性。本文研究团队曾对 PPS 及 PEEK 热塑性复合材料的自动铺丝

进行了铺放工艺试验。在铺放过程中, 主要发现以下几类缺陷。

1 加热参数造成边缘粘接不牢

通过与环氧热固性预浸料、干丝相对比, 热塑性材料对于温度控制要

求更高。这种材料本身需要的加热温度较高, 同时温度还必须保持在一定的范围内, 如果太高, 会造成压辊被烧焦或纤维被碳化的现象。如图 19 所示, 在首层铺放时, 因温度控制

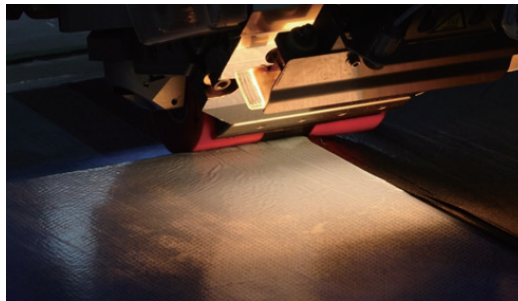


图16 胶膜受热引起波纹状起皱

Fig.16 Waviness and wrinkled of adhesive film due to over heating

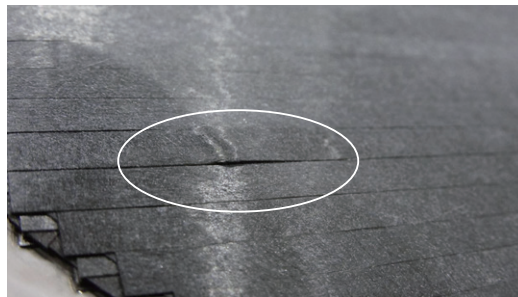


图17 纤维层中出现鼓包

Fig.17 Blisters of dry preform in automated fiber placement

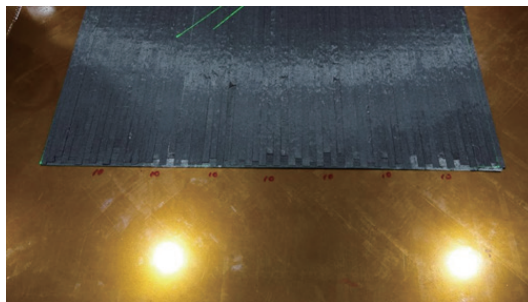


图18 铺放起始端纤维长度不一致

Fig.18 Uneven fiber length at layup beginning

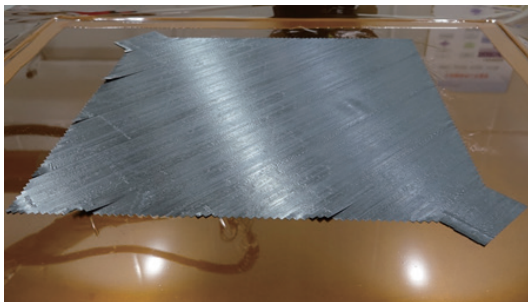


图19 热塑性预浸料在铺放时边缘翘曲

Fig.19 Edge warpage in first layup of thermoplastic prepreg

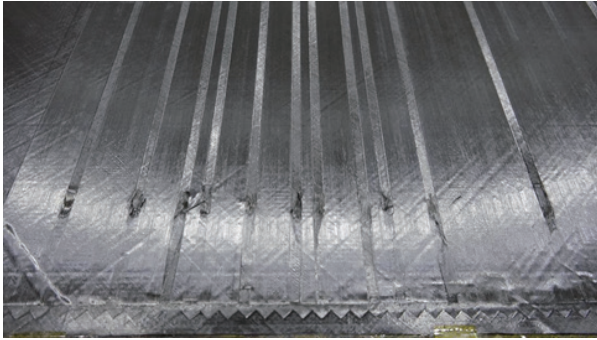


图20 纤维缺少或纤维长度太短

Fig.20 Shortage of fibers in automated fiber placement

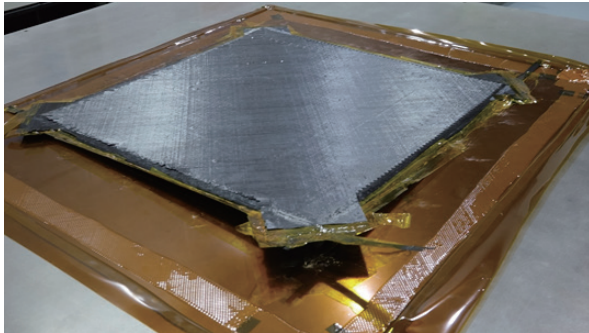


图21 大厚度热塑性层合板铺放时出现翘曲变形

Fig.21 Distortion of thick thermoplastic laminates in fiber placement

不好而造成纤维边缘粘接不牢。经分析,其中部分原因纤维在铺放时设定速度不同,在铺放时大概分成5个阶段,分别为铺丝头接近、送丝速度(铺放边界)、铺放速度、切丝速度(铺放边界)以及铺丝头离开速度。如果这5个阶段的速度设置不一致,会造成在实际铺放时的速度不一致,这样对于温度监测造成了很大的难度,因为无法建立铺放温度的闭环控制。在此情况,可以通过在纤维路径规划时将5个阶段的速度设定为同一值,保证在铺放中铺放速度恒定,即加热功率稳定,从而测出较为稳定的温度曲线,获得最佳的温度曲线。在实际铺放时,也可以以恒定速度进行铺放。试验证明,5阶段恒定速度下铺放效果比较好,可以有效避免边缘粘接不牢的现象。

2 铺丝起始端有纤维无法吐出

在铺放 90° 时,发现Tape起始端缺纤维,而是在结束时才出现缺陷。发生这种现象:一方面可能是

因为纤维在铺丝头或导丝管中有堵塞现象,这种情况可在出问题的丝上缠好较厚的压敏胶带,然后通过人工抽出纤维的方法,使导丝管中的杂物带出,如果是铺丝头处的送丝辊有纤维缠绕、杂质堵塞等,可利用酒精或丙酮进行擦拭;另一方面是在铺丝头的参数设置中有关纤维粘接距离(stick distance)设置不够,此距离代表当纤维已经接触铺贴面由送丝辊继续送出纤维的长度,一般为 $1\sim 50\text{mm}$,在此长度之后,纤维将由压辊向前走的力拽出。此值如果设置太小,纤维吐出后但压辊没有有效将纤维压在铺贴面并固定,导致纤维随着压辊前进而滑行,最终出现如图20所示的情况。对于热固性预浸料,由于其黏性大,可以很好地粘接在铺贴面上,因此此值采用默认值 1mm 即可,但对于干纤维和热塑性预浸料来说,此值可增至 10mm ,可有效避免纤维缺少的现象。

3 大厚度纤维板出现翘曲变形

由于PEEK以及PPS等热塑性复合材料在自动铺放时需要很高的温度,其中PEEK需要 350°C 左右,因此在铺放中需要很高的加热功率去实现此材料的良好黏接。随着铺放的进行,板子内部积聚的热量会越来越多,而周边环境以及模具本身的温度较低,板子内部会积累越来越大的热应力,此热应力会造成铺好的纤维层合板与铺贴面发生分离,如图21所示,导致铺贴无法继续进行。这种缺陷的原因需要从热应力入手,解决办法之一可以采用自加热的模具,保证在纤维铺贴时,不产生较大的热应力。

结论

作为一种自动化成型工艺,自动铺丝工艺相比手工铺贴存在诸多优点,比如铺放效率高、批次稳定性好,纤维角度偏差小,人为因素导致的缺陷机率几乎为零等。本文对国内外有关自动铺丝工艺的文献进行总结,同时,对本文研究团队工作中的一些常见缺陷进行分析,形成了一些经验性分析,希望对未来的铺丝工艺的质量改进有所帮助。

(1)无论是纤维间隙还是纤维搭接,最终引起力学性能显著下降的因素是纤维发生了系统性的屈曲,此屈曲会导致纤维的轴向力学性能得不到充分发挥。因此,如果只是单纯的某些层存在一些纤维间隙,对层合板的整体力学性能影响不大。

(2)纤维在铺放中的缺陷有多种,主要有面内纤维波纹度、纤维剪切、丝束架桥、起泡和面外褶皱等。引起这些缺陷的因素主要有:工艺因素包括加热温度窗口的控制;模具因素,如模具型面复杂,模具表面贴合性不好;材料因素包括材料自身工艺窗口窄,材料宽度分散性大,材料自身有褶皱等。同时,有些缺陷

可以通过优化纤维路径,更改铺丝设置参数等来避免。

(3) 根据个人铺贴经验,就铺贴工艺性对比来讲,环氧热固性预浸料优于干丝,干丝优于热塑性复合材料,而在热塑性复合材料中,PPS热塑性复合材料的工艺性要远远优于PEEK热塑性复合材料。

参考文献

- [1] LICHTINGER R, HÖRMANN P, STELZL D. The effects of heat input on adjacent paths during automated fibre placement[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 68: 387–397.
- [2] SCHMIDT C, WEBER P, HOCKE T, et al. Influence of prepreg material quality on carbon fiber reinforced plastic laminates processed by automated fiber placement[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 67: 422–427.
- [3] BAKHSHI N, HOJJATI M. An experimental and simulative study on the defects appeared during tow steering in automated fiber placement[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 113: 122–131.
- [4] GUIN W E, JACKSON J R, BOSLEY CM. Effects of tow-to-tow gaps in composite laminates fabricated via automated fiber placement[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 115: 66–75.
- [5] CROFT K, LESSARD, PASINI D, et al. Yousefpour, experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(5): 484–491.
- [6] WOIGK W, HALLETT SR, JONES M I, et al. Experimental investigation of the effect of defects in automated fibre placement produced composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 1004–1017.
- [7] FAYAZBAKHS K, ARIAN NIK M, PASINI D. Defect layer method to capture effect of gaps and overlaps in variable stiffness laminates made by automated fiber placement[J]. *Composite Structures*, 2013, 97: 245–251.
- [8] ARIAN NIK M, FAYAZBAKHS K, PASINI D, et al. Optimization of variable stiffness composites with embedded defects induced by automated fiber placement[J]. *Composite Structures*, 2014, 107: 160–166.
- [9] 黄新杰. 铺丝工艺参数优化及典型工艺缺陷对性能影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [10] BELHAJ M, DELEGLISE M, COMAS-CARDONA S, et al. Figueiredo, Dry fiber automated placement of carbon fibrous preforms[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 50: 107–111.
- [11] AZIZ A R, ALI M A, ZENG X, et al. Transverse permeability of dry fiber preforms manufactured by automated fiber placement[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 152: 57–67.
- [12] DENKENA B, SCHMIDT C, VÖLTZER K, et al. Thermographic online monitoring system for automated fiber placement processes[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 97: 239–243.
- [13] SCHMIDT C, SCHULTZ C, WEBER P, et al. Evaluation of eddy current testing for quality assurance and process monitoring of automated fiber placement[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 56: 109–116.
- [14] 原崇新. 蜂窝夹层结构自动铺丝工艺试验研究与优化[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(23/24): 74–78.
- YUAN Chongxin. Experimental study and optimization of automated fiber placement for honeycomb sandwich structures[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(23/24): 74–78.

通讯作者: 原崇新, E-mail: yuanchong2012@163.com.

Typical Defects and Causes Analysis of Automated Fiber Placement

YUAN Chongxin, LI Yan, PAN Jie, ZHAO Xinfu

(COMAC Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

[ABSTRACT] Automated fiber placement has been become the main manufacture method to produce airframes such as wings and fuselages, thus the research about automated fiber placement is more and more popular. The paper focuses on the common defects during automated fiber placement, including its types, its causes and its effects on mechanical properties. In the first section, the worldwide research about automated fiber placement is reviewed. Firstly, the summary of common defects in practical placement experiment of our team is introduced, and its possible causes are analyzed, and the research object includes thermoset prepreg, dry fibers and thermoplastic materials. Secondly, a review about common defects in automated fiber placement is introduced. Thirdly, the defects in steering analysis is studied. Fourthly, the layup quality of automated fiber placement on curved panel is analyzed. Finally, the main defects in layup of sandwich structures is investigated, and the defects of dry fibers and thermoplastic prepreg are studied respectively. The introduction and summary should be benefit for the quality improvement in the future automated fiber placement.

Keywords: Automated fiber placement; Defect; Fiber gap; Fiber overlap; Composites

(责编 大漠)