

# 民用航空复合材料成型用可剥布评价与选用<sup>\*</sup>

## Evaluation Methods and Selection of Peel Ply in Fabrication Process of Civil Aviation Composites

上海飞机制造有限公司 王旭 陈璐圆 陈萍 顾灵聪

[摘要] 针对民用航空复合材料成型中使用到的可剥布的定义分类、来源供应、评价方法、控制与选用等做了系统的介绍。分析了各类可剥布的应用与优缺点,重点介绍了用于制备胶接表面的干、湿2种可剥布的评价指标,对民用航空制造企业对于可剥布的选用程序和控制方法做了详细的说明。

关键词:民用航空 复合材料 可剥布

[ABSTRACT] This article introduces the definition, classification, supply, evaluation methods, quality control and selection of peel ply in the fabrication process of civil aviation composite. The advantages and disadvantages of the application is analyzed. This paper also introduced the evaluation method and index of both dry and wet peel ply, which are used for the preparation of joint surface. The collection instructions and the quality control methods of peel ply are explained for civil aviation manufacturing enterprises in detail.

Keywords: Civil aviation Composite material Peel ply

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.088

复合材料已经成为当今航空、航天、体育、能源、船舶等各领域普遍采用的高性能材料之一。在复合材料成型过程中,可剥布是一种重要的工艺材料,可以用于形成复合材料的胶接表面,也可以用作复合材料热压罐成型的导气层、导胶层等,不同种类的可剥布其性能与评价方法不同。鉴于军事保密和技术水平限制,国内军用航空器制造商选用的复合材料基本都是国产材料,包括预浸料、胶膜和可剥布等;而国内民用航空材料目前依靠进口。国产材料的表观质量和性能稳定性都明显不如进口材料。就可剥布而言,国内可剥布的生产企业较少,且大多侧重于风电、船舶领域,目前还没有类似湿可剥布的产品。本文将就民用航空复合材料成型用的可剥布的定义、分类、供应、评价以及选用做简要的介绍。

## 1 可剥布的定义与分类

### 1.1 可剥布的定义

在各类文献资料中,对于可剥布的称呼不尽相同,大部分国外的文献将可剥布称为“Peel ply”,也有少部分生产商将表面带有脱模剂的可剥布划分到“Release Fibric”一类。由于将可剥布从成型后的制件表面去除时的状态,国内有些生产商也形象地将其称之为“扒皮布”,也有些文献中将其称为“可去除的保护层”,无论如何称呼,可剥布指的是“为保持制件表面清洁完整,而置于待胶接表面的织物层”<sup>[1]</sup>。

### 1.2 可剥布的分类

可剥布分类方法较多,通常可以按照用途、材质或使用温度进行划分。按照用途的不同,可剥布大致可以分为用于胶接前表面处理的和用于表面保护2类;在用于胶接的可剥布中,按照表面是否被树脂浸润,还可以分为干态和湿态。按材质的不同,可剥布可分为聚酯、尼龙和玻璃布3类;而按照使用温度还可以分为低温、中温、高温和超高温4种类型。

#### (1) 按用途分类。

按照用途将可剥布分为2类,第一类用于复合材料胶接表面的胶接前处理,这类可剥布的主要作用是使表面变得粗糙并具有化学活性<sup>[2]</sup>,增加胶接的强度。目前这类用于胶接的可剥布主要向“干可剥布”和“湿可剥布”2个发展方向。

干可剥布表面不含有其他涂层或杂质,在使用过程中不会对胶接面带来任何污染。相较于湿可剥布,它的优点是无储存期限和温度的限制,质量轻,便于贮存和运输;缺点是在从制件表面移除后会带走表面的一层树脂,容易引起制件表面贫胶,严重时可能引起表面纤维的裸露甚至剥离。目前,国内航空企业主要使用干可剥布。

湿可剥布表面浸润有一层树脂,与干可剥布相比,湿可剥布最大的优点是避免了制件表层树脂的损失,并且可粘结工装,避免滑移。固化后易于剥离,可以节约生产的工时和成本。但此类可剥布使用时必须与制件的基材树脂体系相匹配,因此单一种类的可剥布不具备

\* 企业创新专项科研课题:复合材料成型用工艺材料的评价方法。

广泛的适用性。另外,还需要低温存储,在常温条件下具有操作寿命与力学性能寿命,湿可剥布的铺贴需要在操作寿命结束之前完成,而带有湿可剥布的制件则需要力学性能寿命结束之前完成固化,这给制件的质量控制和生产计划安排提出了新的要求。目前这种可剥布已经在波音等国外的航空企业得到批准和应用。

第二类可剥布主要用于制件固化表面的保护,这类可剥布的表面带有硅酮或聚四氟乙烯涂层,可以在固化后很容易从制件表面剥离。这种可剥布在保护零件表面的同时,也起到一定程度导气作用,有利于提高零件表面质量。

(2)按材质分类。

可剥布按照基材分为聚酯(涤纶)、聚酰胺(尼龙)、玻璃布3种。其中聚酯和尼龙2种材质使用较为普遍,一般可以通用。但在波音与华盛顿大学共同开展的一项试验中,尼龙可剥布处理后的表面使用MB1515-3胶膜进行交接后,胶接强度大幅下降。而其他共同试验的胶膜却没有类似的结果<sup>[3-4]</sup>。这个结果表明对于特定的胶膜和可剥布,需要开展研究,以确定它们之间的匹配性。Benard等发现,相同粗糙度的情况下,对于极性液体,尼龙处理过的表面浸润角更小,而对于非极性液体,聚酯处理过的表面浸润角更小,甚至可以低至零<sup>[5]</sup>。

玻璃布由于强度较低,不易剥离故使用较少,一般表面涂聚四氟乙烯,形成的可剥布主要用于脱模。

(3)按使用温度分类。

可剥布也可以用使用温度来分类。一般可以分为4种,适用于低温固化的,指使用温度低于120℃的可剥布,如用于风机叶片和船体大型模具中的低成本多孔尼龙可剥布;适用于中温固化的,指使用温度介于120~180℃;适用于高温固化的,指使用温度介于180~245℃;适用于超高温固化的可剥布,通常指耐温高于

300℃。

## 2 可剥布的来源

### 2.1 国外可剥布供应商

目前,国外主要的可剥布供应商有Airtech、Cytec、Henkel以及Hexcel。Airtech是传统的航空辅助材料供应商,成立于1973年,在国际市场上被广泛认可,其供应的产品系列中,Release Ply系列的可剥布为不带涂层,可用于胶接的可剥布;Bleeder Lease系列的可剥布则表面带有硅酮涂层,用于零件表面保护。Release Ease系列是表面带有PTFE涂层的玻璃基材可剥布,通常用于脱模;而Econo系列则是经济型可剥布,该系列产品的最高的适用温度仅为190℃。表1和表2中所示为Release Ply系列与Bleeder Lease系列中主要的产品特性。Cytec、Henkel以及Hexcel均是以生产树脂为主,在2011年Cytec收购Richmond之前,这3家公司在可剥布产品中主要以湿可剥布为主,用以匹配各自的复合材料预浸料主材。在Cytec收购Richmond,并将其更名为Umico公司之后,原Richmond的部分产品得以保留并进入Cytec公司产品的供应清单,如广泛用于胶接表面处理的60001等。CYTEC目前用于胶接表面处理的可剥布产品特性如表3所示。

Henkel公司目前只生产一种湿可剥布,即EA9895WPP,该可剥布适用于环氧体系,为聚酯基材,固化温度为180℃。

Hexcel公司在湿可剥布领域的产品主要有2种,牌号是HexPly<sup>®</sup>M21/48%/F08111和HexPly<sup>®</sup>F161/43%/F08111,均为环氧树脂织物预浸料,其中M21和F161代表树脂类型,也分别代表了这2种可剥布匹配的树脂体系,织物基材为聚酯,固化温度为180℃,保存期限为从生产之日起在-18℃保存12个月。

表1 Airtech公司Release Ply系列产品特性

牌号	Release Ply Super A	Release Ply B	Release Ply C	Release Ply F	Release Ply Super F	Release Ply G	Stitch Ply G	Ultra Ply 22T
材质	尼龙			聚酯				
胶接表面粗糙程度	粗糙	细致		中等		细致		粗糙
最高适用温度/℃	232	232	204	204	204	204	204	204

表2 Airtech公司Bleeder Lease系列产品特性

牌号	Bleeder Lease A	Bleeder Lease B	Bleeder Lease C	Bleeder Lease E	Bleeder Lease G	Superlease Blue
材质	尼龙		玻璃纤维		聚酯	尼龙
表面粗糙程度	中等	细致	中等	细致		
最高适用温度/℃	232	232	427	427	204	232

表3 Cytec公司胶接表面处理用可剥布

名称	A100PS	B100	51789	60001	CYCOM7701/52006	CYCOM934/60001	CYCOM7701/120	CYCOM 7668 /60001
形态	干可剥布				湿可剥布			
材质	尼龙	尼龙	尼龙	聚酯	尼龙	聚酯	玻璃纤维	聚酯
最高适用温度 /℃	180	180	232	200	/			
固化温度 /℃	/				121	177	121	177
外置时间	无要求				200 小时	10 天	200 小时	15 天
低温保管条件	/				≤ -12℃	≤ -18℃	≤ -12℃	≤ -12℃
低温保管时间	/				270 天	6 个月	270 天	1 年

2.2 国内可剥布供应商

国内复合材料产业起步较晚,在可剥布领域,尚未有成熟的产品获得民用航空领域的广泛应用,产品也主要是以干可剥布以及非胶接表面处理用可剥布为主。大部分复合材料成型用工艺材料的生产单位主要面向风电领域,如上海沥高、浙江佑威、上海康展等。

3 可剥布的评价

根据不同的类别和用途,可剥布的评价指标也不尽相同。由于胶接用可剥布对于胶接质量的重要影响,国际上很多航空制造企业都对胶接用可剥布提出了性能的要求,这些要求不仅包括可剥布自身的物理、化学特性,还包括使用这些可剥布制成的胶接试验件的性能。

3.1 非胶接可剥布的评价

对于非胶接用途,表面带有脱模剂的可剥布,其耐高温性、单位面积质量是评价和选用的重要指标,单位面积质量决定了可剥布的吸胶量,同时也大致决定了可剥布的使用成本。使用者依据制件固化所需的温度,以及工艺所需的吸胶量来选用合适的可剥布。

3.2 用于胶接的干可剥布的评价

对于这种可剥布,主要控制的理化特性包含:萃取残留物、纤维成份、织物均匀性以及断裂强度。其中对残留物控制是对可剥布中杂质的控制,防止表面杂质残留在胶接面,影响胶接性能。纤维成份的监控主要是保证纤维原材料供应的稳定性和一致性,可以通过红外光谱的方法监控,也有通过 pH 的测试来进行监控。织物的均匀性一般采用称重或厚度测试来控制。断裂强度则是可剥布使用性能的重要指标,在从制件表面剥离时,如果可剥布的断裂强度不足,则会发生断裂,增加施工的难度。

对于力学性能,主要采用考察胶接性能的力学项目,如搭接剪切、断裂韧性(GIC)。这2项指标均是评价胶接质量的有效指标。在正常的破坏模式中,破坏的位置出现在胶膜内部,一旦发现破坏的位置出现在用可

剥布处理过的胶接界面,同时伴随着胶接强度的大幅下降,则表明所用的可剥布不能产生有效的胶接表面。

对于可剥布的工艺性,有一项重要的指标为“剥离强度”,该强度用来判断可剥布被剥离制件胶接面时的难度。Benard 对可剥布形成的制件表面进行表征,复合材料表面的树脂层完全复制了可剥布的纹理<sup>[5]</sup>,并在织物经纬纱的空隙中溢出至可剥布的另一面,当剥离可剥布时,实际上,一方面是将粘接在树脂上的织物纤维剥离,另一方面是使每一个在经纬纱空隙处连接上下两层树脂的树脂带断裂(见图1)。因此,剥离的难度不仅取决于织物本身的材质,也取决于织物经纬纱的粗细以及编织方式。若越剥离越困难,则意味着工人在实施制件胶接前撕去可剥布需要的时间更多。因此,适用于工业生产的可剥布应将这种剥离强度限制在一定的范围,以避免工时的延长所带来的成本增加。这一剥离强度与可剥布的材料、密度、吸胶程度等综合因素有关,该指标

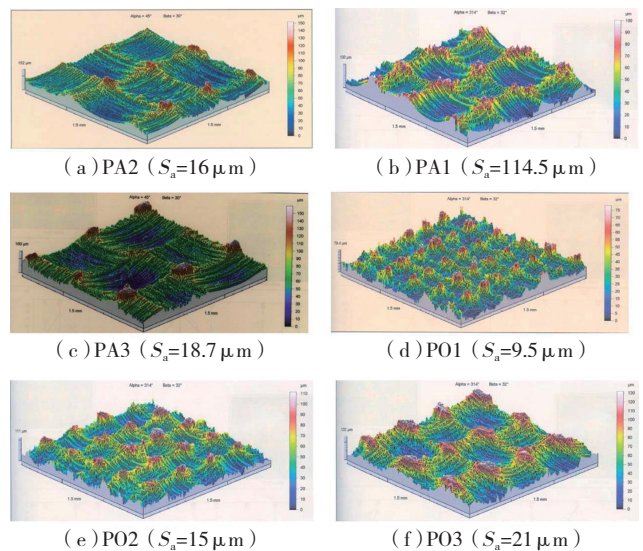


图1 Benard等测定不同种类可剥布形成的制件表面形貌以及粗糙度<sup>[5]</sup>

Fig.1 Benard, et al. measured surface morphology and roughness of different kinds of peel ply

的控制可以通过“滚筒剥离强度”测试来实现。

### 3.3 胶接用湿可剥布的评价

湿可剥布由于表面浸润有一层树脂,因此在一些资料中,也将此类可剥布归为“预浸料(Prepreg)”,它的很多评价指标也与制造结构的预浸料相似。

在物理性能方面,需要控制树脂含量、纤维面积质量、挥发份含量、玻璃化转变温度、耐环境性等。树脂含量和纤维面积质量两项指标主要控制湿可剥布的均匀性。而挥发份含量、玻璃化转变温度、耐环境性则是关注湿可剥布上树脂的性能,由于该树脂层随着制件同时固化,因此挥发份含量不能高于制件本体树脂的挥发份含量,否则将引起制件的孔隙率上升。在可剥布被剥离后,该树脂层将有部分残留于胶接表面,最终成为制件的一部分,因此,该树脂层的玻璃化转变温度、耐环境性能等亦不能低于制件本体树脂材料。

在化学性能方面,与本体预浸料类似,对于湿可剥布也需要进行红外光谱测试与高压液相色谱测试,以保证每一批次的材料均一稳定,成分不发生变化。

在力学性能与工艺性能方面,与干可剥布类似,也需要评价使用湿可剥布处理的胶接试验件的搭接剪切、断裂韧性以及与制件剥离时的剥离强度。

## 4 民用航空可剥布的选用与控制

鉴于可剥布对于复合材料结构性能的重要性,尤其对于复合材料胶接性能的重要影响,国际上主要的民用航空制造商对胶接用可剥布的选用都有专门的技术文件做出说明和限制,如波音公司的材料规范 BMS-308、庞巴迪公司的材料规范 BAMS541-001 中国商飞的工艺材料选用目录 CDS0030 以及空客公司工艺规范中的工艺材料附录清单,都规定了工艺过程可以选用的可剥布牌号以及供应商。

进入这些清单名册的产品与供应商是经过严格的筛选和审核的,筛选的依据主要是产品的性能。对于民用航空制造领域,材料性能的优劣包含 2 个方面,一方面是材料自身各项性能指标;另一方面是在长期多批次的供应中,材料的稳定性。为保证清单中的产品能够满足要求,通常需要经过申请、性能测试、工艺控制文件评审、现场评审、产品抽样测试、资格认定等 6 个环节才能将某牌号的可剥布纳入可选的范围,如图 2 所示。

首先是供应商的申请,当供应商确定自己的产品能够达到主制造商(OEM)的要求后,向 OEM 提出申请并提供测试报告和样品。所提供的测试报告由供应商自己或其指定的测试机构提供,测试项目应包含 OEM 发布的技术文件中包含的全部测试项目。

其次是主制造商使用供应商提供的样品进行测试,

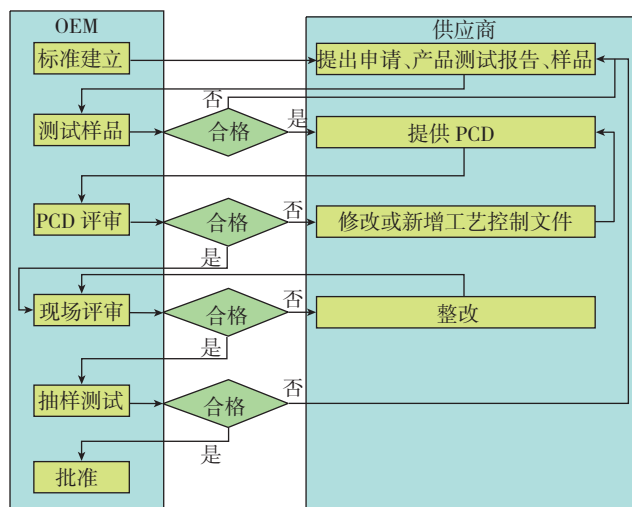


图2 航空企业工艺材料供应商选择流程图

Fig.2 Process material supplier selection process chart for aviation enterprises

该测试在 OEM 或其指定的评估机构进行。该测试具有 2 个方面的作用,首先是对产品进行初步评估,确定所提供的产品能够满足要求;其次是通过比对测试结果与供应商提交的结果,也能得到对于供应商测试机构测试能力的初步评判。当测试结果表面产品能够达到 OEM 的需求后,就进入工艺控制文件评审环节。

工艺控制文件(Process Control Document, PCD)评审环节,是指 OEM 对于供应商所有的工艺控制文件进行评估审查。在这个环节中,供应商需要提交所有的工艺控制文件,包括人员、设备、原材料、环境、管理制度等,由 OEM 进行审核。PCD 评审关注的重点在于工艺文件的控制范围是否涵盖了所有需要控制的关键参数以及控制方法是否合理可行,而非文件中参数的正确性,因为参数的正确性最终将在产品性能上有所体现。在评审中,供应商有可能根据 OEM 的要求补充提交或编制新的控制文件。

PCD 评审通过后,将进入现场审核阶段,现场评审重点关注 PCD 的执行情况。在现场审核中,OEM 的代表将实地审核生产现场是否达到 PCD 文件中所提到的要求,包括各种参数的数值设定、控制记录、人员资质、设备定检等。

在现场审核的同时,OEM 在供应商的生产现场随机抽取一定批次量的产品,并送往指定的测试机构进行测试,对测试结果的分析中,不仅包括对产品的性能的评估,还包括不同批次产品之间性能差异的评估。PCD 评审、现场审核以及产品抽样测试 3 个环节共同构成了对供应商生产体系的评估。

在通过前 5 个环节的评估过后,则进入资格认定程

(下转第 94 页)

点不停磨损刀具后刀面,对刀具后刀面的研磨作用,在后刀面沿切削速度方向划出沟痕,形成磨粒磨损。磨粒磨损最严重处为后刀面主切削刃的外缘处。相同时间内,切削刃外缘的切削行程最长,所受到的冲击力、摩擦力及摩擦热也最为严重,切削条件最为恶劣。CFRP中的碳纤维作为硬质点并不是均匀分布在材料之中,切削过程相当于断续切削,刀刃处承受持续的交变载荷,由于硬质合金本身的抗弯强度和韧性较差,所以在承受交变应力的过程中,容易产生崩刃。

切削刃后刀面的粘附磨损,类似于切削金属时的积屑瘤。在切削 CFRP 的过程中,刀具和 CFRP 的导热性差,热量无法及时散出,加工温度持续升高,使 CFRP 中的树脂软化,切削过程中的持续接触应力,使刀具和材料产生分子级别间的接触,在接触点形成强力的粘着,且粘着物不会随着持续切削脱落,严重影响后刀面的切削能力。

通过对试验数据的分析,可以得出,PCD 钻头钻削 CFRP 材料时,仍然符合随着钻孔数量即加工时间的增加,后刀面的磨损值及轴向力随之增大的规律。同时也可以看出,随着加工孔数的增多,轴向力和 VB 值的变化并不明显,可以推断,PCD 刀具加工 CFRP 的效果远好于硬质合金。

使用体式显微镜和扫描电镜拍摄钻头表面磨损形式观察 PCD 刀具的照片发现,PCD 钻头主要的磨损形式为磨粒磨损和切屑粘附。PCD 刀片在切削过程中持续承受交变载荷和热作用,致使 PCD 刀片产生机械疲劳和热疲劳,导致 PCD 表层材料的粘结晶粒之间产生微裂纹,进而使金刚石颗粒之间的连接状态恶化,晶界强度降低,刀具抗磨能力下降。随着切削时间的增加,金刚石颗粒周围的粘结剂被刮除,使 PCD 颗粒脱落,造成磨粒磨损。PCD 钻头是将 PCD 刀片钎焊在高速钢基体上,而 PCD 刀片的导热性强于高速钢基体,因此 PCD 刀片附近的高速钢基体的热量比较集中,软化的树脂粘附在高速钢基体上。

### 3 结论

(1)从数据上分析,随着钻头钻孔数量的增加,硬质合金钻头 YG6X 和 PCD 钻头,钻孔轴向力及刀具后刀面磨损值 VB 均增大。PCD 钻头的上升趋势较 YG6X 缓慢,由此说明 PCD 钻头更适于加工 CFRP。

(2)YG6X 在钻削过程中会产生磨粒磨损、粘着磨损及崩刃,这主要是刀具导热性差,较脆且强度不够造成的;PCD 刀具出现磨粒磨损和粘着磨损的形式,但是磨粒磨损程度较慢,且粘着物主要集中在高速钢基体上,对切削性能影响不大,故 PCD 钻头更适合加工

CFRP。

(3)试验中的数据和图片显示,PCD 钻头在钻削 CFRP 材料时表现出良好的切削性能,刀具磨损缓慢,磨损形式简单。

### 参考文献

- [1] 上官倩英,蔡柳华.碳纤维及其复合材料的发展及应用.上海师范大学学报,2008,37(3):275-278.
- [2] 高航,刘国兴,张选龙,等.电镀金刚石刀具钻削碳纤维复合材料磨粒磨损特征研究.大连理工大学学报,2011,51(5):675-680.
- [3] 贺虎,碳纤维复合材料钻削力与质量研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
- [4] 张毅.超声振动铣削碳纤维复合材料刀具磨损研究.精密制造与自动化,2010(2):13-15.
- [5] Ilescu D, Gehin D, Gutierrez M E, et al. Modeling and tool wear in drilling of CFR. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010,50:204-213.
- [6] Kim H Y, Ahn J H, Kim S H, et al. Real-time drill wear estimation based on spindle motor power. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124(3):267-73.
- [7] Oh Y T, Kwon W T, Chu C N. Drilling torque control using spindle motor current and its effect on tool wear. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(5-6):327-34.
- [8] Ertunc H M, Oysu C. Drill wear monitoring using cutting force signals. Mechatronics, 2004, 14(5):533-48.
- [9] Abu-Mahfouz I. Drill flank wear estimation using supervised vector quantization neural networks. Neural Computing and Applications, 2005, 14(3):167-75.
- [10] 王瑞新.PCD 刀具钻削碳纤维复合材料研究.工具技术, 2012, 46(5):72-74.

(责编 玲犀)

(上接第 91 页)

序,将与产品有关的所有信息予以固化和批准,并将供应商列入供应商名录。在资格认定之后,产品任何的变更都要告知主 OEM,并由其评估是否需要重新审查,以及重新审查的内容,并根据审查的结果决定是否将新产品继续保留在可选的名录之中。

### 参考文献

- [1] 赵渠森.先进复合材料手册.北京:机械工业出版社,2003.
- [2] Harris A F, Beevers A. The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion. Int J Adhes Adhes, 1999, 19(6): 445-452.
- [3] Kanerva M, Saarela O. The peel ply surface treatment for adhesive bonding of composites: a review. Int J Adhes Adhes, 2013, 43:60-69.
- [4] Flinn B, Phariss M. The Effect of Peel-Ply Surface Preparation Variables on Bond Quality.US. FAA, 2006.
- [5] Benard Q, Foris M, Grisel M. Peel Ply surface treatment for composite assemblies: chemistry and morphology effects. Composites, Part A, 2005, 11(36): 1562-1568.

(责编 玲犀)