

某聚酰亚胺基复合材料构件 R 角内部缺陷研究

Internal Defect Research of R -Corner Area of Polyimide Matrix Composites Component

海军驻北京军事代表室 王晓亮

[摘要] 聚酰亚胺基复合材料由于其自身反应复杂,成型难度较大,带拐角的聚酰亚胺基复合材料构件,其拐角区域(以下称为 R 区或 R 角)更容易产生分层、架桥等缺陷,本研究从拐角处的应力及固化过程中的模具、零件热膨胀差异等方面着手,探讨了拐角处的分层缺陷的成因及机理,并通过试验进行验证。发现,铺层结构、模具形式、热匹配等因素对拐角处分层缺陷影响较大。

关键词: 聚酰亚胺基复合材料 分层缺陷 热膨胀匹配

[ABSTRACT] Polyimide-based composites due to its own reaction complex and molding difficulty, its R region is easy to produce delamination, bridging, and other defects. The present study focuses on the aspects of stress inside the R area, curing process in the mold and thermal expansion differences to explore the causes and mechanism of the defects of the R corner area. All of the above are validated by experiments. It is found that the overlay structure, mold forms, thermal matching are the main causes of delamination defects in R area of polyimide-based composite parts.

Keywords: Polyimide-based composites Delamination defect Thermal matching

聚酰亚胺基复合材料由于其使用温度高,目前在航空航天等某些耐温要求较高的领域普遍采用,但由于其反应复杂,反应过程中溶剂、小分子挥发份析出较多,因此成型工艺难度较大。某聚酰亚胺基复合材料构件,为带复合材料翻边的环形封闭筒体结构,因其使用条件的特殊性,工艺上采用在 R 角处采用阴模成型的方法。这种成型方法虽然有利于满足其使用条件,但是工艺上难度很大,其 R 区部分很难完全压实到位,容易产生沿着 R 区的分层。

本文从模具匹配性、计算及铺层角度出发,考虑了某聚酰亚胺基复合材料构件 R 角成型的影响因素,通过优化成型工艺、优化铺层设计等方法,对 R 角的内部分层缺陷进行分析,并通过试验选取最合适的工艺手段对

R 角缺陷尺寸进行控制。

1 R 角缺陷的形貌及形成机理

R 角的典型缺陷主要为早期缺陷表现为 R 区沿周长大方向的分层缺陷。该缺陷主要集中在翻边 R 区和筒体 R 区 2 部分,如图 1、图 2 所示,分布位置深度比较一致,无损检测无底波。

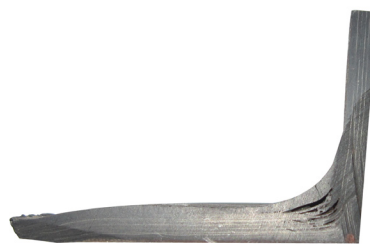


图1 R 角截面图

Fig.1 R Angle of cross section diagram

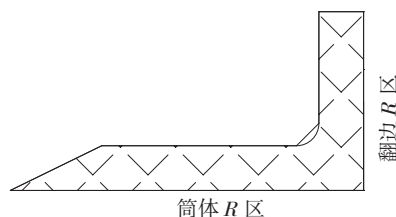


图2 R 角截面示意图

Fig.2 R Angle of cross section diagram

经过研究积累及技术改进,目前 R 区缺陷已经由前期的较大孔洞(图 1),变成了目视不可见的线状分层,宽度约为 1mm,厚度为约 0.01mm 左右。

由于在制件成型时, R 角处的压力分布不均匀^[1-2],因此拐角处容易出现各种制造缺陷。图 3 所示为 R 角形貌是从采用碳布/单向带预浸料混杂铺层的构件中

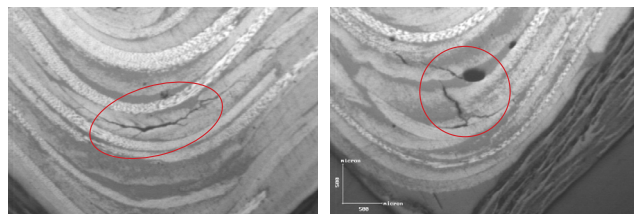


图3 后段 R 区缺陷金相照片

Fig.3 Back part of defect metallographic photos of R area

截取的。从图中可以看出,发生缺陷的部位,厚度为单向带厚度的2倍多,且能看到编织纹路,因此缺陷分布于碳布区域。另外,分层边缘较为尖锐,因此不是未排出的挥发份所致,而是由于拐角处的应力引起。由于碳布层的刚度低于单向带层,因此应力在碳布层优先释放,导致该处极易产生分层缺陷。

经过分析研究发现后段R区缺陷形成机理较为复杂,影响因素很多,目前普遍认为有如下2方面的影响。

(1) 复合材料同模具之间的热膨胀匹配性影响。

由于复合材料构件筒体与金属模具之间线膨胀系数存在较大差异,采用阴模成型的某复合材料构件后段在热成型过程中,金属模具的线膨胀系数大,模具会出现较大的尺寸伸长变化,而复合材料的线膨胀系数与金属相差一个数量级以上,尺寸变化很小,因此成型时出现复合材料尺寸与模具尺寸不匹配。当外部压力作用时,在R角区域的复合材料与模具之间出现间隙,而外部压力又很难通过复合材料构件传导至间隙处将R角压实。这就使R角区域的复合材料向两侧拉成圆角形式,导致固化后的复合材料构件R角区域出现分层缺陷。复合材料结构件缺陷产生如图4所示^[2]。

复合材料构件拐角区的架桥缺陷的大小可用以下公式判定:

$$\Delta L = (\alpha_1 - \alpha_2) \times \Delta T \times L,$$

其中: ΔL 为复合材料构件拐角区的架桥缺陷的大小;

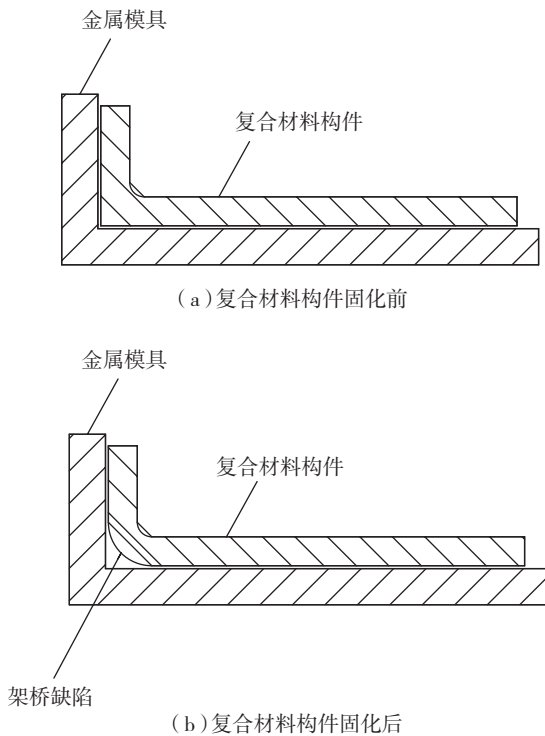


图4 复合材料结构件缺陷产生示意图
Fig.4 Composites structure defects

α_1 为金属模具的线膨胀系数; α_2 为复合材料的线膨胀系数; L 为零件长度; ΔT 为固化温度与室温的差; 当 $\Delta T \times L$ 越大时,拐角区的架桥缺陷越明显。

(2) 拐角处应力的影响。

为了模拟拐角处的面外应力分布趋势,这里采用体单元建立局部拐角处的模型,用等效模量的方法计算了拐角处的应力变化情况。

假设从复合材料构件上典型部位取下一小部分进行有限元分析,结构尺寸如图5所示。

查看局部发现,拐角处的应力变化如图6所示。图中显示的为 Vonmises 应力云。

Z向应力分量如图7所示。

从图7可以明显看出拐角处应力分布不均匀,从外表面到内表面,拐角处出现先拉后压的Z向应力变化。

综合上面2方面分析,R区缺陷的产生来源于2方

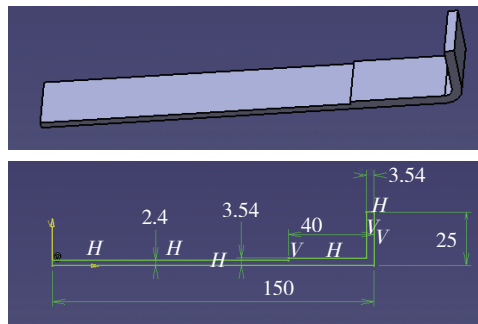


图5 典型结构部位尺寸
Fig.5 Typical structure part size

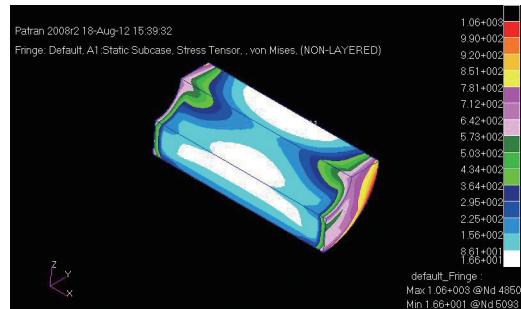


图6 应力云图
Fig.6 Stress nephogram

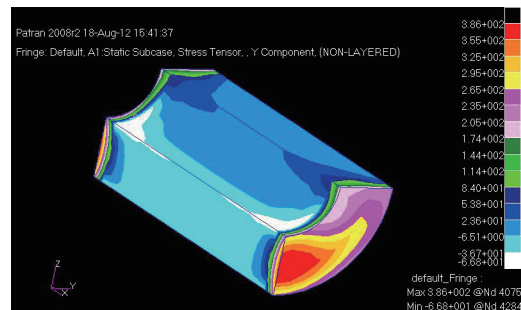


图7 Z向应力分量
Fig.7 Z to stress component

面,一个是热膨胀匹配性的影响;另一个是材料本身热应力释放的影响。因此,从模具形式和材料铺层2方面进行考虑,研究 R 角缺陷的成因及影响因素。

2 试验及结果

2.1 试验设计

本次试验设计主要考虑以下2方面。

(1)对于热膨胀匹配性影响,拟从模具形式与端盖配合性2方面予以研究。在 R 角区域,设计阴模成型方式及阳模成型方式,对2种成型方式的 R 角区域质量分别进行试验,并通过超声及金相试验分析结果。在对阴模成型的 R 角,采用活动端盖、固定端盖2种方法研究,关于活动端盖及热膨胀工艺补偿的内容,详见参考文献[3]。

(2)对于内部应力释放的影响,拟从铺层结构方面予以研究。现有某聚酰亚胺复合材料构件的 R 区采用单向带预浸料及碳布层混杂铺层,而碳布层的结合力弱于单向带,因此本次试验在保证厚度不变的情况下,考虑了纯单向带铺层的情形。

2.2 试验结果

根据前面的理论分析,设计了3类典型结构的 R 区试验件,分为阳模、阴模2种模具形式,其中阳模又按照加厚区材料分为碳布加厚和单向带加厚2种铺层形式。

试验件尺寸为筒体方向150mm长,翻边高度45mm,加厚区长度50mm,整个试验件沿周向长度为阴模450mm,阳模1000mm。试验具体情况如表1所示。其中,阴模根据端盖形式不同,可分为活动端盖形式以及固定端盖形式。端盖活动形式试验如表2所示。表2中,无损检测的结果5/6处线状缺陷表示的位置是在相对于筒体厚度5/6处的缺陷。其中,试验 A 、 A_1 、 B 、 B_1 的试验件金相照片如图8所示。

表1 R 区典型试验件试验结果

模具形式	加厚区铺层材料	试验结果
A 阳模	碳布	翻边 R 区无缺陷,筒体 R 区有一个 40×1 的线状分层
A_1 阳模	单向带	无缺陷
B 阴模	碳布	筒体及翻边 R 区均存在大量5/6处缺陷
B_1 阴模	单向带	筒体 R 区无缺陷,翻边 R 区有若干线状缺陷,深度分布于1/6及1/3处

表2 端盖形式试验

阴模端盖形式	加厚区铺层材料	试验结果
固定	碳布	R 区肉眼可见孔洞
活动	碳布	R 区肉眼不可见5/6线状缺陷

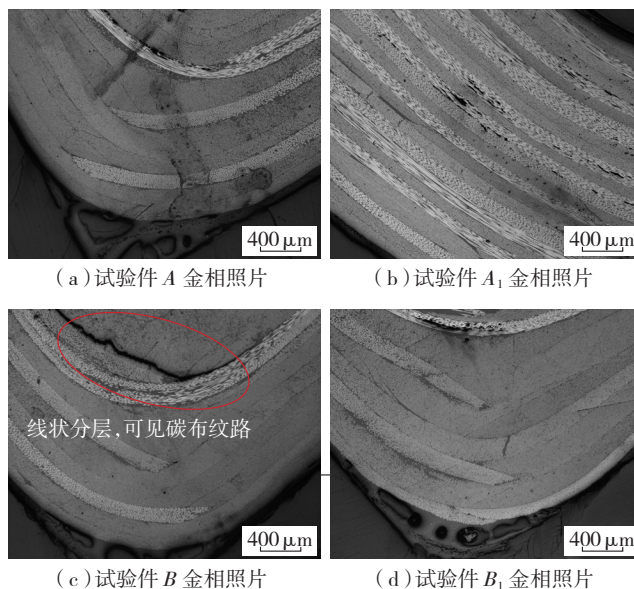


图8 试验件金相照片

Fig.8 Test metallographic photos

结合试验结果的无损检测及金相分析,发现模具所采用的形式、配合方式以及铺层结构对于聚酰亚胺基复合材料拐角处缺陷均有影响。其中,在控制 R 角缺陷方面,阳模比阴模更有利;阴模成型时,使用可适当补偿量的活动端盖,对于减小 R 角缺陷有利,这方面的具体内容参见文献[3]专利;改变铺层结构对于同样采用阴模成型的构件来说,单向带铺层比碳布/单向带混杂铺层更有利。

3 结论

根据以上试验结果,可以得出的结论有:

- (1) R 区采用阳模成型的单向带加厚试验件效果最佳;
- (2)同样的模具形式下,采用单向带加厚要比采用碳布加厚 R 区质量更好;
- (3)同样的铺层形式下,采用阳模成型要比采用阴模成型 R 区质量更好;
- (4)如采用阴模成型,采用适当工艺补偿量的活动端盖对抑制 R 区孔洞缺陷有利。

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] 王雪明. 热压罐成型加筋板 L 型筋条纤维维密实影响因素研究. 航空材料学报, 2011, 31(4): 64-68.
- [3] 邱启艳, 蒋蔚. 消除复合材料热压罐阴模成型时拐角缺陷的一种新型制造方法: 中国, 2011083000342030[P]. 2010-05-12.

(责编 三丰)