

碳纤维复合材料残余应力消除方法探讨

吴 杰 肖正航

(北京空间机电研究所, 北京 100076)



摘要:分析了碳纤维复合材料产品在实际生产过程中发生的变形问题,指出产品的变形是由于材料中存在残余应力而引起的。为了提高碳纤维复合材料产品的精度及稳定性,促进其在空间遥感器上的应用,对消除该材料残余应力的方法进行了探讨,提出了可采用振动时效的方法来消除碳纤维复合材料中的残余应力。

关键词:碳纤维复合材料; 残余应力; 振动时效

Discussion on Carbon Fiber Composite Residual Stress Relief

Wu Jie Xiao Zhenghang

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100076)

Abstract: This paper considers that deformation of the carbon fiber composite is induced by residual stress, and discusses methods of residual stress relief. It is proposed that vibratory stress relief can be used for relieving residual stress in carbon fiber composite.

Key words: carbon fiber composite ; residual stress ; vibratory stress relief

1 引言

碳纤维增强环氧树脂基复合材料,综合了碳纤维与环氧树脂两者的特点,具有低密度、高比强、高比模、耐蚀、耐磨、耐热、耐疲劳、抗蠕变、自润滑、吸能抗振和热胀系数小等诸多优异特性,在各类航空航天飞行器结构上得到了广泛的应用^[1, 2]。

随着空间光学遥感器的不断发展,对其结构的轻量化、高效能化提出了越来越高的要求,而在遥感器结构中大量应用复合材料是遥感器结构减重的最有效方法之一,也是遥感器发展的必然趋势。碳纤维复合材料(本文中的碳纤维复合材料特指碳纤维增强环氧树脂基复合材料)的各种优异特性能够有效地适应遥感器高结构效率的要求,目前已开始逐步应用于空间光学遥感器结构中,并且呈现出不断增长的趋势^[3]。

2 碳纤维复合材料在空间遥感器结构件应用中的尺寸稳定性分析

2.1 尺寸稳定性问题

在实际生产中发现,成型后的碳纤维复合材料产品在放置一段时间或经过某些处理(如真空镀钛、放气处理)后会发生变形,导致尺寸和形位精度不合格。如某型号相机安装支架,由各碳纤维零件经胶接组装完成后,通过研磨、铣削等手段保证了其尺寸及形位公差。但在存放一段时间后,支架整体发生变形导致形位公差超差,如平面度由0.05变为0.12。

对空间光学遥感器来说,各光学元件间的尺寸精度及稳定性要求很高,其结构件本身应达到较高的精度,并且其尺寸稳定性必须得以保证,这样才能够确保产品的最终使用状态。如为减轻整机重量,使结构设计更加合理,各光学元件间的连接常常采用桁架式结构,尤其对于轻型大视场遥感器,桁架式支撑结构的尺寸稳定性更加重要,它关系到遥感器整机结构中各光学镜头间的相对位置精度,对遥感器的最终成像质量具有直接影响^[4]。而碳纤维复合材料所具有的优异性能,使其成为制造此类航天光学遥感器结构件的理想材料,但碳纤维复合产品的这种变形对它的应用推广与发展产生了严重的不良影响,需要对其进行分

作者简介:吴杰(1980-),工程师,材料加工工程专业;研究方向:机制工艺工作。

收稿日期:2012-05-04

析研究，并找出解决的方法。

2.2 问题分析

复合材料由两种或多种材料复合而成，其制造方法一般为高温固化，因此在材料成型后必然会经历由高温降至室温的过程。对碳纤维复合材料而言，在这个过程中，由于其内部组分间热物理特性不匹配，其中碳纤维热膨胀系数小，约等于0甚至为负值，而常用的环氧树脂热膨胀系数在玻璃态转化温度 T_g 以下约为 $39 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，在 T_g 以上为 $100 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，因此在温度变化过程中必然会在材料内部形成残余应力^[5]。

残余应力是指物体在没有外部因素作用时，存在于物体内部并且保持平衡状态的应力，它的存在状态是随着材料性能、产生条件的不同而变化的，按作用范围区分，可以分为宏观残余应力和微观残余应力。碳纤维复合材料的残余应力是在由固化温度下降到室温时，材料内部所产生的应力。残余应力的存在，会对复合材料的性能造成不利影响，与复合材料承载后的应力分布、材料强度、材料破坏等问题有密切关系^[6]。

文献[7]认为，复合材料的残余应力，根据其形成原因可分为三种：第一种称作微观残余应力，是由于碳纤维增强体与树脂基体的热胀系数和湿胀系数不同而造成的，它主要存在于同一铺层内，作用在碳纤维增强体和树脂基体的界面上；第二种可称为宏观残余应力，同样是由于碳纤维增强体与树脂基体的热胀系数和湿胀系数不同引起的，但主要作用于铺层角不同的相邻铺层之间；第三种残余应力，是由于在材料冷却的整个过程中，材料的不同部位具有不同的热历史而产生的残余应力，被称为“global”应力，这种残余应力遍布在整个厚度方向上，呈现出抛物线型分布。

碳纤维复合材料内部所存在的残余应力随着时间的推移不断释放，导致了零件的变形超差，这对于精度要求很高的遥感器零件来说是一个非常严重的问题。而且残余应力对材料、结构的疲劳强度、使用寿命等性能的影响也早已为人们所熟知。因此，碳纤维复合材料内部残余应力的存在已成为制约该材料发展的一个重要因素，消除这种残余应力的方法也已成为一个亟需研究解决的重要问题。

3 消除碳纤维复合材料残余应力方法的探讨

3.1 消除残余应力的方法

对于金属而言，消除残余应力一般有两种方法。一种方法是向金属原子提供足够的能量，使原子振动

加剧，从而恢复到平衡状态，使得晶格畸变减少。另一种方法则是使金属材料中处于弹性应力状态的部分发生塑性屈服，将残余应变释放出来，减少材料内部存在的弹性应变量，从而减少残余应力^[8]。金属材料减小、消除残余应力的常用方法有自然时效、热时效、振动时效几种。但自然时效耗时长、效率低、工件堆放场地大，应用受到诸多限制^[9]。

金属材料热时效，即去应力退火，是把金属工件加热到共析温度以下的某一温度，然后保温一段时间，再缓慢冷却至室温，从而消除材料内部的残余应力，使工件的几何尺寸获得稳定。去应力退火的加热温度应根据不同金属的自身特性来确定，保温时间则应根据具体工件的截面尺寸或装炉量来决定，保温后的冷却过程应缓慢进行，以免产生新的应力。

振动时效又被称作振动消除应力法，是将工件在某一固定频率下进行一定时间的振动处理，以消除工件的残余应力，增强其尺寸精度的稳定性。该方法效果显著，用时短（一般仅需数分钟至数十分钟），且能耗远远低于热时效等手段，因此近年来获得了快速发展，在诸多行业都取得了广泛的应用。

本质上，振动时效就是通过振动（一般为共振），使工件内部增加新的应力。而当新增的应力与工件内部原有的应力相互叠加，使得总的内应力大于材料自身屈服极限时，工件就会产生塑性变形，从而释放残余应变，达到降低并且平衡工件残余应力的目的，使工件的几何精度获得稳定状态^[10]。

3.2 热时效消除碳纤维复合材料残余应力

碳纤维复合材料不同于金属材料，金属材料的热处理是通过改变金属内部组织结构来改善材料性能的，而碳纤维复合材料是由碳纤维和环氧树脂两种不同的材料组成的，其内部组织结构不同于金属，若采用热时效作为后处理，其内部组织结构也不会发生变化，但是由于碳纤维的热膨胀系数明显小于环氧树脂基体的热膨胀系数，因此在温度变化时，能量首先在纤维与基体的界面处消耗，并在复合材料内部产生界面应力^[11]。

文献[12]对碳化硅晶须增强铝基复合材料（SiCw/Al）的残余应力的形成以及消除方法进行了研究。指出由于基体和增强体的热胀系数存在很大差别，对金属基复合材料进行去应力退火时，在材料冷却至室温的整个过程中，金属基体内部都会产生热错配残余应力（一般为拉应力），因此高温去应力退火的方法无法用于消除此类复合材料的残余应力。可以认为，热残余应力的存在，是金属基复合材料的一种本质特征。而SiCw/Al复合材料中残余应力形成的原

因与碳纤维复合材料中残余应力形成的原因类似，都是由于基体和增强体之间的热胀系数差别过大，当复合材料从生产制造时的高温状态冷却至室温时，基体的收缩量远大于增强体而引起的。由此可以看出，对碳纤维复合材料进行去应力退火，在冷却过程中，随着温度的降低，环氧树脂基体不断收缩，且收缩量远大于碳纤维，仍然会产生残余应力。因此热时效方法对消除碳纤维复合材料残余应力并不适用。

3.3 振动时效消除碳纤维复合材料残余应力

振动时效就是在激振力的作用下，通过循环加载使工件发生共振，从而产生交变应力，并与工件内部原有的残余应力相叠加，使得处于峰值应力区内的局部材料发生屈服效应，引起微小的塑性变形，改变了原有应力场，从而使工件内部应力分布均匀化，残余应力得到释放，应力峰值下降，又在较低的应力水平下达到新的平衡，材料得以强化，结构的弹性工作区增大，最终工件尺寸趋于稳定^[13, 14]。

对碳纤维复合材料而言，对其进行振动时效，在合适的激振力作用下，材料实际承受交变应力的作用，由于其基体环氧树脂强度低而碳纤维强度高，两者相差一个数量级以上，如碳纤维M40-1K的拉伸强度为2156MPa，但是树脂环氧648的拉伸强度仅为34.3MPa^[15]，而碳纤维复合材料的残余应力主要分布在纤维与环氧树脂基体的界面上，以及不同铺层间的基体树脂上，振动时在交变应力的作用下，这些残余应力区的环氧树脂基体会首先发生屈服，产生微观塑性变形。这会引起材料内部应力场的改变，使得界面及树脂基体的残余应力分布区域发生松弛，而由于应力场的整体自均衡特性，局部区域的应力松弛，会引起材料中所有残余应力的整体重新分布，从而纤维中的残余应力也得以释放，最终在较低的应力水平下达到材料内部的残余应力均匀化。也就是说，理论上，振动时效可有效地消除碳纤维复合材料中的残余应力。

对于振动时效而言，影响其残余应力消除效果的主要工艺参数包括激振动应力、激振频率和振动时间。当工件处于共振状态时，用最少的能量就可以使工件产生最大的振动应力，从而能够尽量多地消除其残余应力，工件尺寸稳定化的效果也最好，因此振动工艺参数的确定一般应按共振处理。对于采用振动时效的方法消除碳纤维复合材料的残余应力，其具体的工艺参数值尚需通过进一步的实验研究来确定。而当采用振动时效的方法消除材料残余应力时，工件的受力状况与承受疲劳荷载是完全相同的，因此在振动过程中，工件有可能发生疲劳性破坏^[16]，在确定振动工艺参数时需要对此进行考虑。

4 结束语

a. 碳纤维复合材料产品的变形，是由材料基体环氧树脂和增强体碳纤维的热和湿膨胀系数不同所产生的残余应力引起的。

b. 传统的热时效方法对消除碳纤维复合材料中的残余应力并不适用。

c. 采用振动时效，对碳纤维复合材料而言，理论上能够有效地消除其残余应力，振动具体工艺参数的制定及影响需要通过进一步的实验来摸索确定。

参考文献

- 1 姜利祥，何世禹，杨世勤，等. 碳（石墨）/环氧复合材料及其在航天器上应用研究进展. 材料工程，2001，(9)：39～43
- 2 田海英，关志军，丁亚林，等. 碳纤维复合材料应用于航天光学遥感器遮光镜筒. 光学技术，2003，29(6)：704～706
- 3 丁亚林，田海英，刘立国，等. 一种提高碳纤维复合材料框架结构应用性能的结构技术. 光学精密工程，2003，11(3)：287～290
- 4 孙宝玉. 轻型大视场光学遥感器结构动态特性研究. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士论文，2004
- 5 张志谦，要智勇，费维栋，等. 碳纤维复合材料界面残余应力的X射线衍射分析. 高技术通讯，2000，10(2)：72～74
- 6 陈巨兵. 光栅应变花的研制及其在复合材料残余应力测试中的应用. 上海交通大学博士论文，2005
- 7 金香花. 工艺参数对碳纤维增强复合材料的残余应力影响的测试. 上海交通大学硕士论文，2004
- 8 芦亚萍. 振动消除残余应力机理分析及试验研究. 浙江大学硕士论文，2002
- 9 葛彪，李国军，李文聪. 消除大型锻件残余应力的几种时效工艺方法比较. 热加工工艺，2005，(10)：69～74
- 10 张勇，路增林. 振动时效技术机理. 机械工业标准化与质量，2001，(10)：36～38
- 11 易金明，戴福隆，姚振汉，等. 编织结构复合材料热膨胀特性的实验研究. 复合材料学报，2000，17(4)：20～25
- 12 姜传海，吴建生，王德尊. 振动时效对SiCw/Al复合材料热残余应力及拉伸强度的影响. 金属热处理，2001，26(7)：3～5
- 13 陈立功，倪纯珍，刘毅萍，等. 不锈钢焊接构件的振动时效与热时效. 机械工业标准化与质量，2002，(3)：37～40
- 14 王莉虹. 振动时效消除应力工艺探讨. 机电工程技术，2003，32(4)：75～77
- 15 盛磊，谭放，李明珠. 碳纤维复合材料锥管扭转刚度的试验测定. 航天返回与遥感，2002，23(3)：48～51
- 16 芦亚萍，何闻. 振动时效机理及其对疲劳寿命的影响分析. 农业机械学报，2006，37(12)：197～200