

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.05.022

CFRP 层板电热作用下温度场及内应力变化

路鹏程, 陈栋

(中国民航大学理学院, 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300)

摘要: 航空器用碳纤维增强树脂 (CFRP) 复合材料结构在其服役期间会受到复杂环境作用, 低强度电流引起的电热作用是 CFRP 复合材料结构特有的、尚未引起足够关注的损伤形式, 针对这一现象, 以民用航空器用 CFRP 复合材料层板结构为研究对象, 采用试验方法和有限元分析软件 ANSYS 对不同直流电流强度作用下的 CFRP 复合材料层板温度场分布和热应力变化进行系统研究和分析。利用复合材料电热测试平台对单向层板和不同角度铺层层板在不同电流强度下的表面温度进行测试。结果表明, 电流作用产生的焦耳热使 CFRP 复合材料层板温度迅速升高, 随着电流强度增加, 其温度随之增加; 同时利用 ANSYS 有限元软件对其电热温度场模拟, 获得电热温度结果与试验结果吻合良好。当电热作用达到稳态温度时, CFRP 复合材料层板内部存在梯度温度; CFRP 复合材料铺层方向对电热温度场大小和分布影响明显, 而且电热作用下 CFRP 复合材料层板内应力值与电流强度具有良好的线性关系。

关键词: 碳纤维增强树脂复合材料; 电热作用; 数值模拟; 温度场; 热应力

中图分类号: TB332, TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)05-0115-07

Temperature Field and Internal Stress Change of CFRP Laminates under Electro-Thermal Action

Lu Pengcheng, Chen Dong

(Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance,
School of Science, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract : Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite structures for aircraft will be subjected to complex environmental effects during their service. The electro-thermal effect caused by low-intensity current is unique to the structure of CFRP composites and has not attracted enough attention. In view of this phenomenon, the structure of CFRP composite laminates used in civil aircraft was studied, the temperature field distribution and thermal stress change of CFRP composite laminates under different DC current intensities were systematically studied and analyzed by using the test method and finite element analysis software ANSYS. The surface temperature of the laminate with different layer structure under different DC current intensity was measured by means of composite electro-thermal test platform. The results show that the Joule heat induced by current causes the temperature of CFRP composite laminates to rise rapidly, as the current intensity increases, the temperature increases. At the same time, ANSYS finite element software was used to simulate the electro-thermal temperature field, and the electro-thermal temperature results are in good agreement with the experimental results. When the electro-thermal action reaches the steady temperature, the gradient temperature exists in the CFRP composite laminate. The coating direction of CFRP composite has obvious influence on the size and distribution of electro-thermal temperature field, and there is a good linear relationship between the internal stress value and current intensity of CFRP composite laminate subjected to electro-thermal action.

Keyword : carbon fiber reinforced polymer ; electro-thermal action ; numerical simulation ; temperature field ; thermal stress

碳纤维增强树脂 (CFRP) 复合材料具有比强度和比模量高、性能可设计性强、抗疲劳性能优异、耐

腐蚀和易于整体成型复杂构件等优点, 因此成为航空航天飞行器、船舰、汽车及其它先进工业设备的主

基金项目: 中国民用航空局科技基金项目 (MHRD20160106), 中央高校中国民航大学专项 (3122018L001)

通讯作者: 路鹏程, 实验师, 研究方向为树脂基复合材料 E-mail: Asummer@126.com

收稿日期: 2019-02-25

引用格式: 路鹏程, 陈栋. CFRP 层板电热作用下温度场及内应力变化 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5):115-121.

Lu Pengcheng, Chen Dong. Temperature field and internal stress change of CFRP laminates under electro-thermal action[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):115-121.

要结构材料之一^[1]。在民用航空器上,CFRP 复合材料的应用基本实现了从次承力构件到主承力构件的全覆盖^[2]。然而飞机上的 CFRP 复合材料在其服役过程中不可避免会受到复杂的环境和应力作用,并且复合材料结构损伤失效评估一直是航空工业关注的重要问题。电流引起的电热作用是 CFRP 复合材料飞机结构特有的、尚未引起足够关注的老化损伤形式^[3],包括雷击产生的电流(kA 级)、飞机表面积累的电荷所释放的电流及各种机内设备产生的感应电流(A 级)。这些电流的电热作用产生的焦耳热可能导致纤维、树脂基体及纤维/树脂基体界面损伤,甚至导致纤维与基体分离(脱胶)或层与层之间发生分离(分层)。另一方面也可以利用 CFRP 复合材料电热效应达到某些有益目的^[4-5],如自修复^[13-14]、导电、保暖或表面除冰^[15]等。

蔺越国等^[6]研究了 CFRP 复合材料层合板导电性能、电-热温度及其对拉伸和疲劳性能的影响,并进行了 CFRP 复合材料电-热耦合实验,获得了单向层合板上测量点的温度与电流的关系曲线。Y. Hirano 等^[7]利用人工雷击实验研究了雷击对环氧树脂/石墨复合材料的作用,总结出多种雷击损伤的形式。G. Marco 等^[8]利用试验和模拟相结合的方法分析了直流电对 CFRP 复合材料的电热作用,获得其电流作用下的宏观表面温度场及相关宏观静力学行为。杨正林等^[9]采用混合状态 Hamilton 半解析法研究了复合材料层合板的热弹性问题,发现应用该方法求解的层合板面内和层间应力与实际结果较为吻合。于祺等^[10]采用有限元分析方法研究了热循环过程中双马树脂/碳纤维复合材料的热应力分布,结果表明复合材料自由端的热应力大于其内部区域,其中最大热应力位于自由端的富树脂区。国内外学者对 CFRP 复合材料雷击效应和部分环境热条件下的电热作用和热应力已进行了一定的研究,但对于小电流(A 级别)作用下 CFRP 复合材料的温度场及电热作用碳纤维作为热源对其内部热应力的影响研究尚属空白,仍待进一步研究。

笔者以航空用 CFRP 复合材料为研究对象,通过试验和有限元数值模拟方法,研究在不同强度电流作用下 CFRP 复合材料层合板温度场和热应力场的变化规律。为民用航空器 CFRP 复合材料结构许用值和设计值的确定提供基础理论和实验数据,使得复合材料应用优势充分体现。

1 实验部分

1.1 原材料

CFRP 复合材料单向预浸料由日本东丽公司提供,纤维为 T300 聚丙烯腈基碳纤维,束丝为 3K,单丝直径为 $7\ \mu\text{m}$;树脂基体材料是由 HUNTSMAN 公司提供的满足航空材料 BMS8-301 标准的 Epocast 52-A/B 双组分环氧树脂。

1.2 仪器及设备

复合材料电热测试机:CMET-300 型,自制;

火焰喷涂机:SULZER METCO 6C 型,美国 Sulzer Metco 公司;

热压罐:SKD-12-02 型,大连樱田机械制造有限公司;

复合材料切割设备:SMART-B1224 II 型,福裕事业股份有限公司。

1.3 试样制备

采用热压罐工艺制备了铺层结构为 $[0]_8$ 的 CFRP 复合材料单向层板,固化工艺为:125℃保温 3 h,升温速率 $2^\circ\text{C}/\text{min}$,降温速率 $2.8^\circ\text{C}/\text{min}$,压力 0.6 MPa。纤维体积分数约为 56%。利用复合材料切割设备加工成试验件,试验件尺寸如图 1 所示。

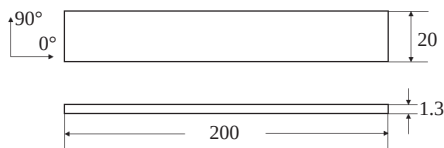


图1 试验件尺寸

1.4 温度场测试

采用复合材料电热测试机,对试件进行电热载荷信息采集,如图 2 所示。采用 KEYSIGHT B2901A 电源为实验提供 0~10 A 精细控制直流/交流电源加载到试验件两端,精度为 0.1 mA。试验件两端采用喷砂处理,使其表面漏出纤维,再采用火焰喷涂系统在试样端面喷涂致密的铝导电层(厚度

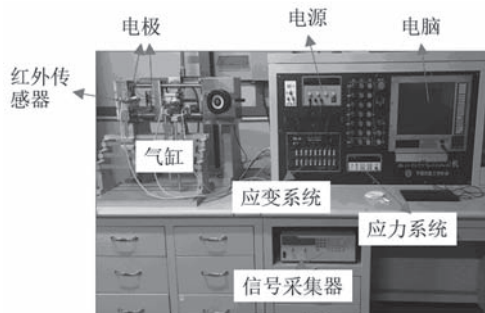
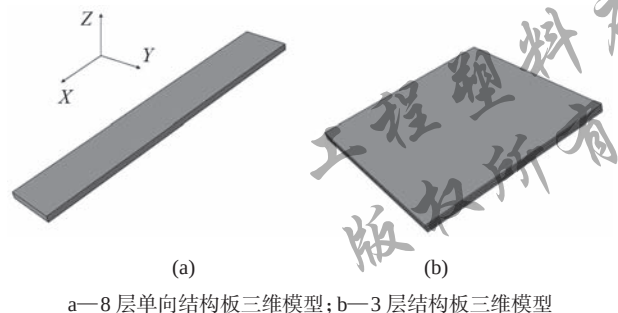


图2 复合材料电-热实验平台

约 0.16 mm),保证通电处理时,减少试样和电极的接触电阻。通过 OMEGA OS136 红外线温度传感器测量试验件表面温度变化。

1.5 有限元模型的建立

在有限元软件 ANSYS 中建立 CFRP 复合材料层合板的三维有限元模型如图 3 所示,采用 8 节点六面体电-热耦合单元 SOLID69 和三维表面效应单元 SURF152 作为模型分析单元。模型铺层结构与试验件结构相同;模型一为 8 层单向结构板,尺寸为 200 mm×20 mm×1.3 mm,主要用于对比验证模型的可靠性;模型二为 3 层结构板,尺寸为 100 mm×100 mm×0.5 mm,用于分析不同铺层角度对电热温度场的影响及电热作用热应力的变化。采用混合建模方式(根据层合板各层性质的差异将层合板等效成若干部分的一种建模方法),将层板等效为多个单层的组合,相邻单层通过 GLUE 功能粘合。模型 6 个外表面设置热对流边界和热辐射边界,环境温度为 20℃,在 X 轴方向两端加载电流。



a—8 层单向结构板三维模型; b—3 层结构板三维模型
图 3 温度场分析有限元模型

2 结果与讨论

2.1 CFRP 单向层板电热温度测试及有限元模型验证

CFRP 复合材料单向层板模拟计算模型的参数设置及边界条件见表 1,固定参数为比热容 957 J/(kg·℃),密度 1530 kg/m³,热对流系数 10 W/(m²·℃),辐射率 0.99,斯蒂芬-玻尔兹曼常数 5.67×10⁻⁸ W/(m²·K⁴)。图 4 为试验测试和模拟计算试验件在不同强度直流电流作用下表面稳态温度结果。可以看出,随着电流强度增加,CFRP 复合材料单向层板电热作用产生的焦耳热随之增加,模拟计算和试验测试表面稳态温度大小基本吻合;在电流强度大于 4 A 时,模拟计算温度略高于试验测试温度,这是因为模拟计算定义接触电阻不存在,且试样与环境热对流及热辐射条件相对理想,因此笔者采用 ANSYS 建立的 CFRP 复合材料三维电热模型

是可靠的。

表 1 单向层板模拟参数

项目	X 轴方向	Y 轴方向	Z 轴方向
电阻率/(Ω·m)	2.38×10 ⁻⁵	1 013	1 013
热导率/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	6.1	0.61	0.61

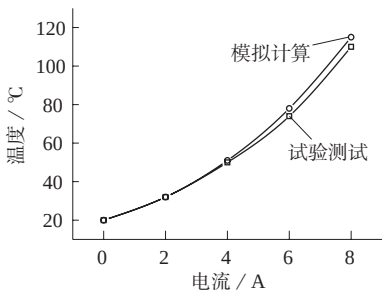


图 4 试验测试与模拟计算在不同强度电流作用下试样表面温度

2.2 CFRP 单向铺层层板温度场分析

表 2 为 8 种直流电流强度作用下 CFRP 复合材料单向层板试样稳态温度场分布的最高温度和最低温度大小。最高温度位于试验件中心区域,最低温度在试样边缘区域。图 5 为 1 A 电流作用下试样上表面的温度云图。

表 2 温度模拟结果

项目	电流强度/A							
	1	2	3	4	5	6	7	8
最高温度	21.14	25.25	32.11	41.71	54.05	69.13	86.95	107.75
最低温度	21.04	24.74	30.91	39.55	50.65	64.23	80.27	98.98
最高温度与最低温度差	0.10	0.51	1.20	2.16	3.40	4.90	6.68	8.77

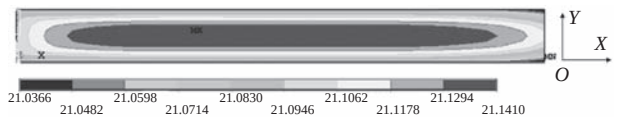


图 5 CFRP 单向层板电热作用模拟试样上表面温度云图

由表 2 可知,随着电流强度增加,CFRP 复合材料试样稳态温度也相应增加。电热作用 CFRP 复合材料产生的焦耳热达到稳态时,单位时间内产生的焦耳热与其和空气间的对流散热和辐射散热的总和相等。当温度低于 400℃时,CFRP 复合材料试样散热以热对流为主^[11],即:

$$RI^2 = \alpha A(\Delta T) \quad (1)$$

式中:R——层合板电阻,Ω;

I——通过层合板的电流强度,A;

α——热对流系数,W/(m²·℃);

A——层合板与空气接触面积,m²;

ΔT——层合板与环境的温度差,℃。

由式(1)可知,当电流由 1 A 变为 2 A 后,焦耳

热将增加到 1 A 情况下的 4 倍,也将增加至原本的 4 倍。仿真过程中环境温度恒定,1 A 时最高温度与空气的温度差为 1.141℃,计算出各电流强度作用下的值并与模拟结果相比较,如表 3 所示,其结果吻合度较好,最大偏差 0.69℃。

表 3 与空气的温差计算与模拟结果值

项目	电流强度 / A							
	1	2	3	4	5	6	7	8
模拟值	1.14	5.25	12.12	21.71	34.05	49.13	66.95	87.75
计算值		4.56	11.82	21.54	33.92	49.03	66.87	87.45

由表 3 可知,CFRP 复合材料单向试样温度场具有温度梯度,但是其温差均小于最高温度的 5%,因此仍可以将其视为均匀温度场。板内的温度梯度是因为板的边缘效应而产生的,在板的内部大部分区域的温度都比较均匀,80% 左右的区域的温度差都不超过 3℃,这种温度差相对于板的温度来说是可以忽略的。另外,在 CFRP 复合材料层板的实际工程应用中,其层板结构的尺寸远大于模拟模型的尺寸,所以在研究一定区域的某一强度电流作用产生的焦耳热时可认为其产生的温度场是均匀的。

2.3 铺层角度对 CFRP 层板温度场影响分析

CFRP 复合材料层合板的性能是由板内所有单层共同决定的,而影响单层性能的主要因素包括碳纤维和树脂的种类以及铺层方向。在纤维和树脂的种类以及层数确定后,层合板性能的影响因素主要为各单层的铺层方向。

CFRP 复合材料层板电热作用铺层方向直接影响其导电性能和导热性能。碳纤维具有良好的导电导热能力,而环氧树脂的导电能力极差,且其导热能力也远不如碳纤维。受碳纤维影响,CFRP 复合材料在纤维方向上导电能力很强,其电阻率约为 $10^{-5} \Omega \cdot m$ 数量级;在垂直于碳纤维方向上则为树脂主导,其电阻率可达 $10^{13} \Omega \cdot m$,可认为是绝缘的。

工程上常采用 0° 和 90° 标准铺层角^[10],为避免层数过多而使得铺层角所产生的影响被弱化,同时层合板铺层需满足对称铺层的要求(关于中面对称且至少要有 3 层单层),因此笔者以 $[0/0/0]$, $[0/90/0]$ 和 $[90/0/90]$ 三种层板作为研究对象,如图 6 所示为三种板的铺层示意图,其模型如图 3b 所示,研究其铺层角度对电热作用温度场分布的影响。

表 4 为 CFRP 复合材料不同角度铺层层板的电热作用分析参数。对 X 方向通 2 A 直流电流。图 7 为 CFRP 复合材料不同铺层方向层板电热作用达到稳态温度场后其上表面的温度分布云图。

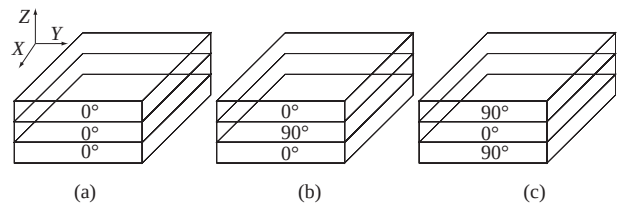
a— $[0/0/0]$; b— $[0/90/0]$; c— $[90/0/90]$

图 6 三种层合板铺层示意图

表 4 层层合板的模拟参数

项目	X 轴方向	Y 轴方向	Z 轴方向
0° 层	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	2.38×10^{-5}	10^{13}
	热导率/ $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	6.1	0.61
90° 层	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	10^{13}	2.38×10^{-5}
	热导率/ $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	0.61	6.1

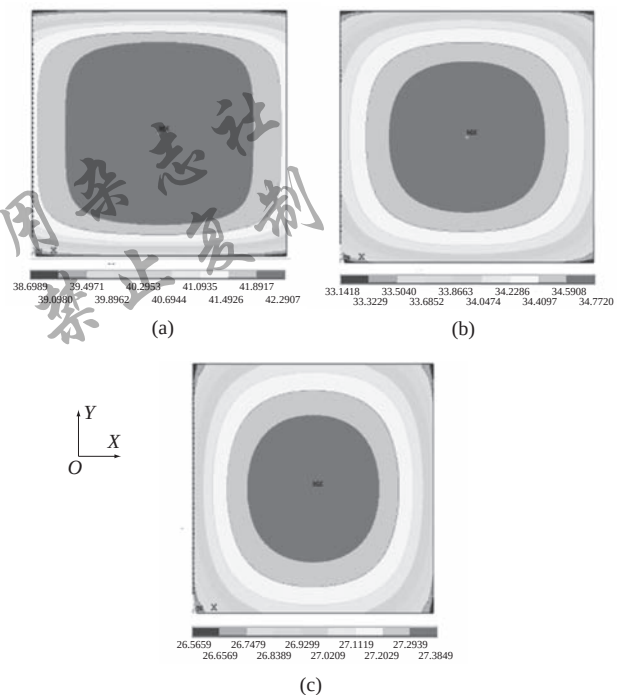
a— $[0/0/0]$; b— $[0/90/0]$; c— $[90/0/90]$

图 7 不同方向铺层 CFRP 复合材料层板电热温度场分布云图

由图 7 可知,由于板的中间散热能力不如四周的散热能力,所以这三者的温度云图都呈现出中间温度高而四周温度低的现象。而且从温度数值来看,层合板的大部分区域的温度差都不超过 $5^\circ C$,温度分布较为均匀。对比三者的温度值可以看出, $[0/0/0]$ 板 $> [0/90/0]$ 板 $> [90/0/90]$ 板,这是因为对三块板在 X 轴方向通入相同的电压差时, 0° 单层板是完全导通的, 90° 单层板由于通电方向垂直于纤维方向,而树脂的电阻率达到了 10^{13} 数量级^[16],因而 90° 单层板可以认为是绝缘的,所以 $[0/0/0]$ 板三层均导通, $[0/90/0]$ 板第一层和第三层

导通, $[90/0/90]$ 板仅有第二层导通。因此在温度的数值上可看出 $[0/0/0]$ 板的总体温度最高, $[0/90/0]$ 板总体温度次之, $[90/0/90]$ 板温度最低。另外,对比三者的温度场, $[0/0/0]$ 板和 $[0/90/0]$ 板的温度场在 X 方向的温度梯度要略小于在 Y 方向的温度梯度。而 $[90/0/90]$ 板的温度场在 X 方向的温度梯度要略大于 Y 方向的温度梯度。这是因为对于 0° 单层板,它在 X 轴方向的热导率要大于 Y 轴方向的热导率,所以板的内部在 X 方向的热交换能力要比在 Y 方向的强,使得其 X 方向温差较小;而 90° 单层板的情况正好与其相反,从而造成 Y 方向的温度梯度要小于 X 方向的温度梯度。

3 复合材料层板的电-热-力分析

利用 ANSYS 有限元软件以四边简支作为层合板边界条件建立 CFRP 复合材料层合板三维模型^[12],如图 8 所示,模型尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$,为了排除铺层方向 and 不对称上下铺层方式对应力场的影响,铺层方式为 $[0/90]_s$,表 5 为模拟计算模型参数。研究其在 2,4,6,8 A 电流作用下上表面中线即线 ab 、线 cd 上的热应力变化。

图 9 为 CFRP 复合材料层板在 2 A 直流电流作用下上表面中线上的热应力值。四边简支条件下平

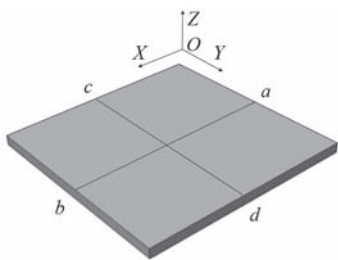
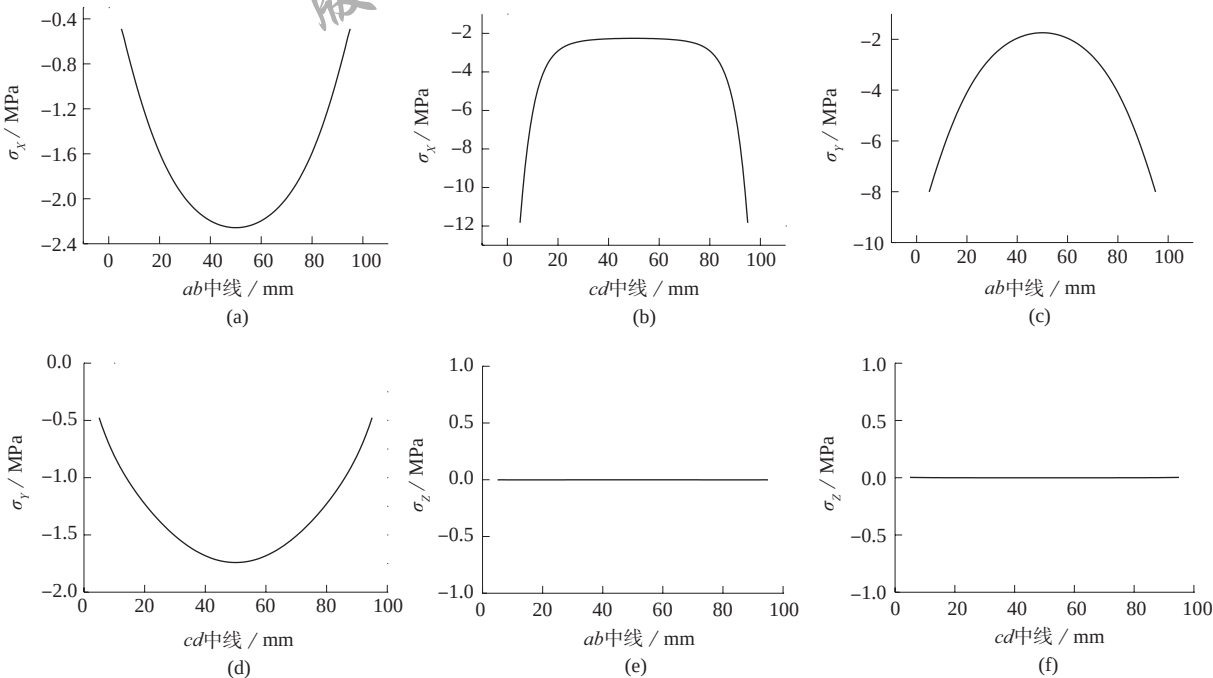


图 8 应力场分析模型

表 5 应力场分析参数

项目	X 轴方向	Y 轴方向	Z 轴方向
拉伸弹性模量 / GPa	207.94	18.98	18.98
剪切弹性模量 (G) / GPa	$G_{xy}=5.29$	$G_{yz}=6.7786$	$G_{xz}=5.29$
泊松比	0.2	0.4	0.2
热膨胀系数 / K^{-1}	2.2×10^{-6}	1.02×10^{-5}	1.02×10^{-5}

行于 Z 轴的 4 条侧棱为固定边,这些固定边将阻碍板的热膨胀。由于受到侧棱的约束作用,板的受力以压应力(表现为负应力)为主,仅在边缘处有些不稳定。此外,由图 9 可知应力的分布关于中心点 $(50,50,1)$ 对称,这是因为四边简支的约束也是关于该点对称的。板的 Z 轴方向自由度仅在板的边缘处有所限制,板的上下表面相当于应力自由面。因此其 σ_z 趋近于 0,仅在边缘处有较大的压应力。四边简支对于热膨胀的阻碍在边缘处尤为明显,因此线 ab 上的 σ_y 和线 cd 上的 σ_x 均呈现由中心处向边



a— ab 中线上的 σ_x 曲线; b— cd 中线上的 σ_x 曲线; c— ab 中线上的 σ_y 曲线;
d— cd 中线上的 σ_y 曲线; e— ab 中线上的 σ_z 曲线; f— cd 中线上的 σ_z 曲线

图 9 CFRP 复合材料在 2 A 直流电流作用下的上表面中线应力模拟结果

缘处增加的趋势。

当电流强度变化时,温度场也随之变化,层板的热膨胀程度改变进而使得热应力值也发生改变。以图8的中线 ab 为研究对象,考虑在不同电流强度作用下CFRP复合材料层板热应力值的变化情况。图10为不同电流强度下的热应力曲线。由于边缘处的应力变化较为不稳定,因此不考虑边缘处的应力。

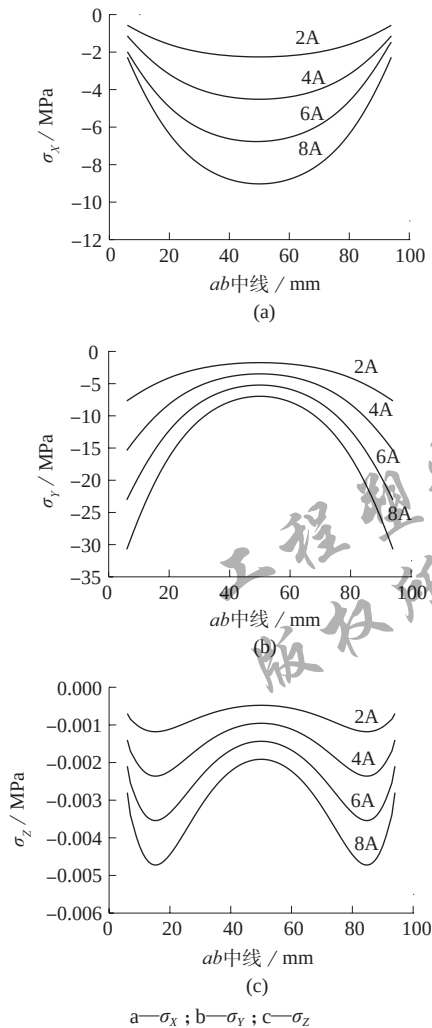


图10 不同电流强度下CFRP复合材料的应力变化曲线

由图10可知,电流强度增大时CFRP复合材料层板热应力随之增大,同时各个电流强度下的应力曲线变化趋势相似。

单独绘制 $X=50$ mm处的电流-应力曲线,如图11所示,应力值与电流值具有良好的线性关系。呈现这种线性关系主要是因为板的热膨胀量与电热温度之间具有线性关系,而应力值与应变值又具有线性关系,因此应力会随着电流强度的增加而线性增加。

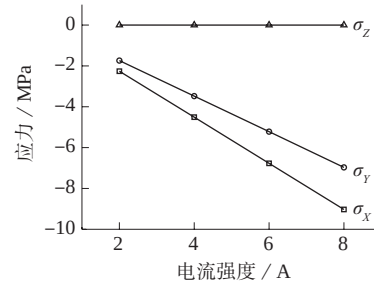


图11 $X=50$ mm处的电流-应力曲线

4 结论

(1) CFRP复合材料层板电载荷流经时,产生焦耳热,随着电流强度增加,电热作用产生的焦耳热随之升高;

(2) 电热作用使得CFRP复合材料层板温度场达到稳态时,层板存在温度梯度,但其大部分区域温度差均不超过最高温度的5%,因此可近似认为温度场为均匀分布;

(3) CFRP复合材料铺层方向对其电热作用温度场的温度高低和分布影响明显;

(4) CFRP复合材料电热作用使得其内应力增大,电热作用产生的热应力与电流强度具有较好的线性关系,并且随着温度升高CFRP复合材料层板内应力增大。

参考文献

- [1] Kayhani M H, Norouzi M, Amiri A D. A general analytical solution for heat conduction in cylindrical multilayer composite laminates[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 52:73-82.
- [2] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001:75-76.
China Aviation Research Institute. Design manual for composite structures[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001:75-76.
- [3] Gigliottia M, Lafarie-Frenot M C, Grandier J C. Development of experimental and modelling tools for the characterisation of the thermal-electro-mechanical behaviour of composite materials for aircraft applications[J]. M'ecanique & Industries, 2011, 12:87-101.
- [4] 马莉娅,熊联友,刘立强,等. 用于碳纤维复合材料的电热除冰技术实验研究[J]. 航空学报, 2012, 33(1):54-61.
Ma Liya, Xiong Lianyou, Liu Liqiang, et al. Experimental study on electrothermal deicing technology for carbon fiber composites[J]. Journal of Aeronautics, 2012, 33(1):54-61.
- [5] 王志平,梁吉勇,张国尚,等. CFRP复合材料电热特性及力学性能测试与分析[J]. 中国民航大学学报, 2013(1):63-66, 72.
Wang Zhiping, Liang Jiyong, Zhang Guoshang, et al. Testing and analysis of electrothermal properties and mechanical properties of CFRP composites[J]. Journal of Civil Aviation University of China,

- 2013(1):63–66, 72.
- [6] 蔺越国, Macro G, Marie C L, 等. 电-热耦合对航空复合材料拉伸及疲劳性能的影响[J]. 航空学报, 2014, 12:3 315–3 323.
- Lin Yueguo, Macro G, Marie C L, et al. Effect of electro-thermal coupling on tensile and fatigue properties of aerospace composites[J]. Journal of Aeronautics, 2014, 12:3 315–3 323.
- [7] Hirano Y, Katsumata S, Iwahori Y, et al. Artificial lighting testing on graphite epoxy composite laminate[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(8):973–981.
- [8] Marco G, Marie C L, Jean C G. Development of experimental and modelling tools for the characterisation of the thermo-electro-mechanical behaviour of composite materials for aircraft applications[J]. Mecanique & Industries, 2001(12):87–101.
- [9] 杨正林, 陈浩然. 层合板热弹性问题混合状态 Hamilton 半解析法[J]. 大连理工大学学报, 1997(3):17–22.
- Yang Zhenglin, Chen Haoran. Laminated plate thermoelastic problem mixed state Hamilton semi-analytical method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1997(3):17–22.
- [10] 于祺, 陈平, 陆春. 碳纤维/双马树脂基复合材料在热循环过程中热应力分布的数值模拟[J]. 材料研究学报, 2012(6):583–589.
- Yu Qi, Chen Ping, Lu Chun. Numerical simulation of thermal stress distribution of carbon fiber / BMW composites during thermal cycling[J]. Journal of Materials Research, 2012(6):583–589.
- [11] 郭云力. 碳纤维增强树脂基复合材料雷击损伤的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- Guo Yunli. Study on lightning damage of carbon fiber reinforced resin matrix composites[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [12] 中国航空研究院. 复合材料结构稳定性分析指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002:5–12.
- China Aviation Research Institute. Composite structural stability analysis guide[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002:5–12.
- [13] Zhang X L, Guo Y D, Su J F, et al. Investigating the electrothermal self-healing bituminous composite material using microcapsules containing rejuvenator with graphene / organic hybrid structure shells[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187(8):1 158–1 176.
- [14] Singh A, Das S, Craciun E M. Thermal stress intensity factor for an edge crack in orthotropic composite media[J]. Composites Part B, 2018, 153(7):130–136.
- [15] 高剑虹, 陈佳彬. 短纤维增强橡胶复合材料热应力及热-结构耦合的数值研究[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(3):386–391, 380.
- Gao Jianhong, Chen Jiabin. Numerical study on stress and thermal structure coupling should be short fiber reinforced rubber composite heat[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2018, 36(3):386–391, 380.
- [16] 李乐坤, 李曙林, 常飞, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料的热膨胀行为[J]. 机械工程材料, 2016, 40(7):97–101.
- Li Lekun, Li Shulin, Chang Fei, et al. Thermal expansion behavior of carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. Mechanical Engineering Materials, 2016, 40(7):97–101.
-
- (上接第 109 页)
- [4] 齐晓杰, 余五新, 毕凤阳, 等. 塑料成型工艺及模具设计[M]. 北京: 机械工程出版社, 2012:87–197.
- Qi Xiaojie, Yu Wuxin, Bi Fengyang, et al. Plastic forming process and die design[M]. Beijing: Mechanical Engineering Press, 2012:87–197.
- [5] 董湘怀. 金属塑性成型原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- Dong Xianghuai. Principles of metal plastic forming [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.
- [6] 王卫兵, 李金国. Moldflow 注塑流动分析案例导航视频教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014:14–70.
- Wang Weibing, Li Jinguo. Moldflow injection molding flow analysis case navigation video course[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014:14–70.
- [7] 屈华昌, 张俊, 吴梦陵, 等. 塑料成型工艺与模具设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007:93–252.
- Qu Huachang, Zhang Jun, Wu Mengling, et al. Plastic forming process and die design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007:93–252.
- [8] 王锦红, 田晶, 李海林, 等. 浅谈注射模抽芯机构的设计[J]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010:34–36.
- Wang Jinhong, Tian Jing, Li Hailin, et al. Brief discussion on the design of core-pulling mechanism of injection mould[J]. Beijing: China Light Industry Press, 2010:34–36.
- [9] 杨军, 曾霞文, 王雪红, 等. 烟花塑料底座多向斜抽芯注射模设计[J]. 模具工业, 2016, 42(12):45–47.
- Yang Jun, Zeng Xiawen, Wang Xuehong, et al. Design of multi-directional inclined core-pulling injection mould for fireworks plastic base[J]. Mold Industry, 2016, 42(12):45–47.
- [10] 张燕琴, 黄科勤. 迷你音响外壳注射模设计[J]. 模具工业, 2016, 42(4):48–51.
- Zhang Yanqin, Huang Keqin. Design of injection mold for mini audio shell[J]. Mold Industry, 2016, 42(4):48–51.
- [11] 陈鹏. 注塑模斜向分型与抽芯机构的设计及应用[J]. 机床与液压, 2014(2):30–32.
- Chen Peng. Design and application of oblique parting and core pulling mechanism for injection mould[J]. Machine Tools and Hydraulic Pressures, 2014(2):30–32.