

Composites Stress Analysis of Conductive Coating on Composite Surface

Licheng Zhou¹, Xiaoli Liu^{1,2*}, Shenghu Wu², Tianpeng Li¹, Yan Li¹

¹Yuling University, Yuling Shaanxi

²Lanzhou Institute of Physics, Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Gansu

Email: zhou_licheng@126.com, *shantianzi@126.com

Received: Mar. 21st, 2019; accepted: Apr. 8th, 2019; published: Apr. 15th, 2019

Abstract

In order to study the stress distribution and influencing factors of conductive coating on composite surface, the stress distribution of aluminized film and copper film on fiber reinforced composite substrate, and the stress variation trend of transition layer conductive coating were used to investigate by finite element analysis. The results show that after the transition layer is added, the "conductive coating/transition layer/composite substrate" structure has strong resistance to cold and heat shock, and theoretically can withstand cold and thermal shock for a long time (125°C - -180°C) in the test environmental. It can meet the requirement for the use of space cold and heat alternating environments. It is concluded that the process test is carried out on the basis of the thermal stress simulation of the thermal-impact resistant conductive coating on the surface of the resin-based composite material, which can further improve the adhesion of the coating, reduce the coating stress and optimize the structural design of the coating.

Keywords

Conductive Coatings, Aluminum Film, Stress Changes, Cold and Hot Alternation

复合材料表面导电涂层的应力分析研究

周利成¹, 刘孝丽^{1,2*}, 武生虎², 李天鹏¹, 李岩¹

¹榆林学院, 陕西 榆林

²兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州

Email: zhou_licheng@126.com, *shantianzi@126.com

收稿日期: 2019年3月21日; 录用日期: 2019年4月8日; 发布日期: 2019年4月15日

*通讯作者。

摘要

为研究复合材料表面导电涂层的应力分布及影响因素,通过有限元分析方法研究了纤维增强的复合材料基底上镀铝膜和铜膜的应力分布,以及有过渡层导电涂层的应力变化趋势。结果表明:增加过渡层后,形成的“导电涂层/过渡层/复合材料基底”结构具有较强的抗冷热冲击能力,理论上可以长时间承受冷热冲击(125℃~-180℃)的环境考验,满足空间冷热交替环境的使用要求。可见在树脂基复合材料表面抗冷热冲击导电涂层热应力仿真基础上开展工艺试验,能够进一步提高涂层附着力,降低涂层应力,优化涂层的结构设计。

关键词

导电涂层, 铝膜, 应力变化, 冷热交替

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

纤维增强的复合材料质轻、比强度和比刚度远优于铝材料,是星载各类天线、雷达头罩及波导轻量化的首选材料。当前,为了满足不同的应用需求,已经形成了多种结构的星载复合材料结构件,主要包括赋形抛物面天线、喇叭天线、波导缝隙天线、相控阵天线和螺旋天线、微波辐射计和天线头罩[1]等。如图1所示。

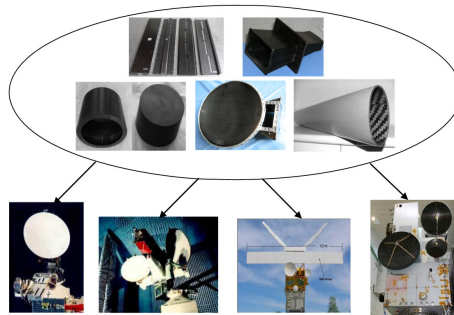


Figure 1. Types of spaceborne antennas and their applications

图1. 星载天线种类及其应用

随着卫星通讯技术向高性能、多频段(或多频段共用)和大容量方向的发展,碳纤维、石英等纤维增强的复合材料凸显出表面导电性能差、电磁波反射率低且存在各向异性等问题,致使天线增益损耗非常严重[2] [3] [4],无法满足未来星载天线的使用要求,为此必须在碳纤维等纤维增强的复合材料表面制备导电涂层。

涂层与基底之间,一方面通过接触界面间的结合强度附着在一起,同时涂层也承受着来自基底的约束作用。前者即为涂层的附着力,后者则为涂层的应力。应力在作用方向上有拉应力和压应力之分,如图2(a)、图2(b)所示。

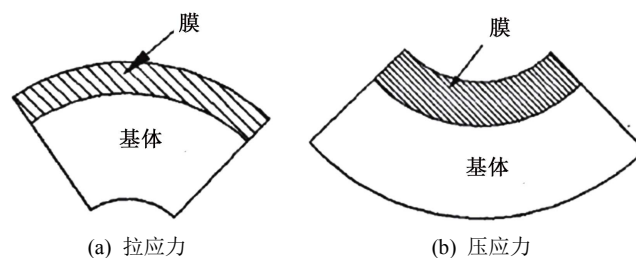


Figure 2. Diagram of coating subjected to stress deformation
图 2. 涂层受到应力形变示意图

过大的应力都会导致涂层失效[5] [6]。通常当基底与涂层之间附着不牢固时，过大的拉应力会使涂层与基底之间分离，如图 3(a)；而当基底与涂层附着牢固，应力不足以使涂层与基底之间分离时，过大的拉应力会导致涂层产生裂纹，如图 3(b)；过大的压应力会导致涂层产生鼓包或皱褶，如图 3(c)。所以，抗冷热冲击导电涂层在结构设计时，一方面要提高涂层与复合材料之间的附着力，另一方面要降低涂层的应力。

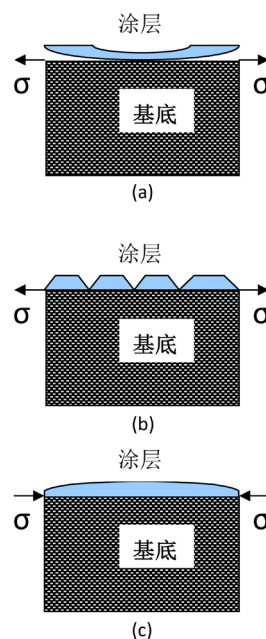


Figure 3. Failure modes of coatings under different adhesion and stress
图 3. 不同的附着力和应力作用下涂层失效模式

一般认为，涂层的应力主要由三部分组成：内应力、热应力和由水诱发而产生的应力，如公式(1)。

$$\sigma_{tot} = \sigma_{inter} + \sigma_{th} + \sigma_w \quad (1)$$

其中内应力(σ_{inter})和水诱发产生的应力(σ_w)都与涂层沉积的方法、内部形成的固有缺陷等有关，在涂层沉积过程中就已形成，但与温度变化之间的关系较小。热应力是由于涂层与基底之间的不匹配(热胀系数差异)造成的，在涂层冷热交变过程中，随着与零热应力之间的温差增大而增加[7] [8] [9]。

为此，首先需要对树脂基复合材料表面抗冷热冲击导电涂层进行热应力仿真，分析冷热交变条件下涂层热应力变化规律，开展复合材料表面导电涂层的结构设计；在此基础上开展工艺试验，进一步提高涂层附着力，降低涂层应力，优化涂层的结构设计。

2. 复合材料表面导电涂层热应力模拟仿真分析

采用有限元分析软件, 以卫星天线常用的高模量碳纤维增强的环氧复合材料为基底, 对不同结构的导电涂层进行热应力仿真分析, 相关材料参数见表 1。

Table 1. Related material performance parameters

表 1. 相关材料性能参数

材料	密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量(GPa)	热胀系数($\times 10^{-6}/\text{k}$)	泊松比
Al	2.7	62	23.5	0.33
Cu	8.96	128	16.7	0.31
Cr	7.1	248	6.5	0.12
碳纤维复合材料	1.6	290	1	0.35

2.1. 模型的建立

建立模型过程, 为了保证模拟结果的准确性, 需要结合实际激光刻蚀的相关情况, 进行合理的简化。

由于复合材料表面镀导电涂层结构简单、规则, 采用有限元分析软件中的 SOLID226 六面体单元结构直接耦合分析。建立的模型具有全对称性, 大小为: 基底复合材料材料尺寸为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, 导电涂层尺寸为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 10\text{ }\mu\text{m}$, 导电涂层均匀分布在基底上, 如图 4。

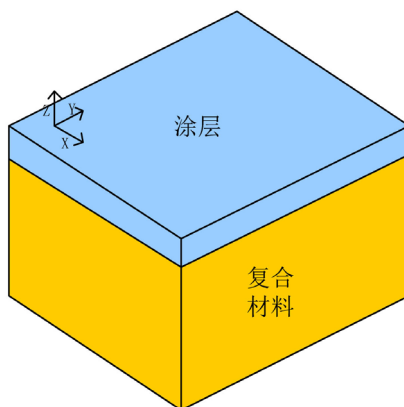


Figure 4. Thermal stress simulation model of conductive coating/composite material

图 4. 导电涂层/复合材料热应力仿真模型

假设条件:

- 1) 涂层沉积温度为涂层零热应力温度;
- 2) 基底无涂层面约束固定, 其他面均无约束条件;
- 3) 不同涂层之间不可分离。

2.2. 仿真结果分析

2.2.1. 单层结构导电涂层热应力仿真分析

边界条件为 -180°C 持续时间 2 分钟, 125°C 持续时间 5 分钟, 复合材料表面不同厚度的铜和铝导电涂层的热应力进行模拟仿真, 涂层内部最大热应力随涂层厚度变化趋势如图 5, 其中 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时, 复合材料表面铜和铝涂层热应力的仿真结果如图 6 和图 7。

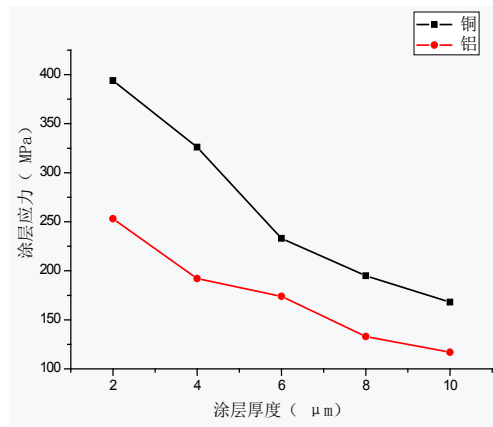


Figure 5. Simulation results of thermal stress of aluminum and copper coating on composite surface changing with thickness
图 5. 复合材料表面铝和铜涂层热应力随厚度变化的仿真结果

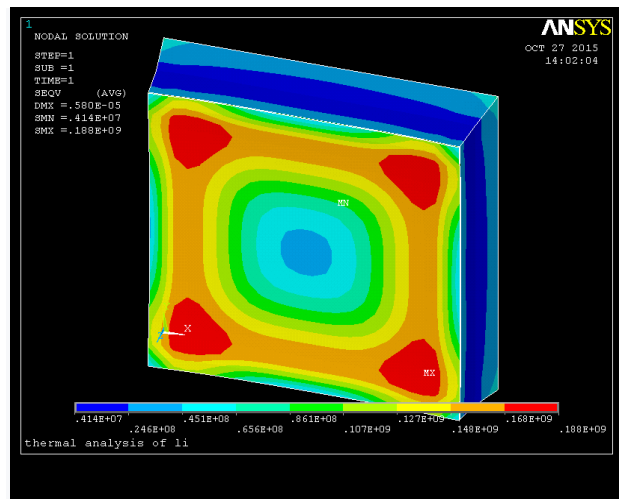


Figure 6. 10 μm copper/composite material thermal stress distribution
图 6. 10 μm 铜/复合材料热应力分布

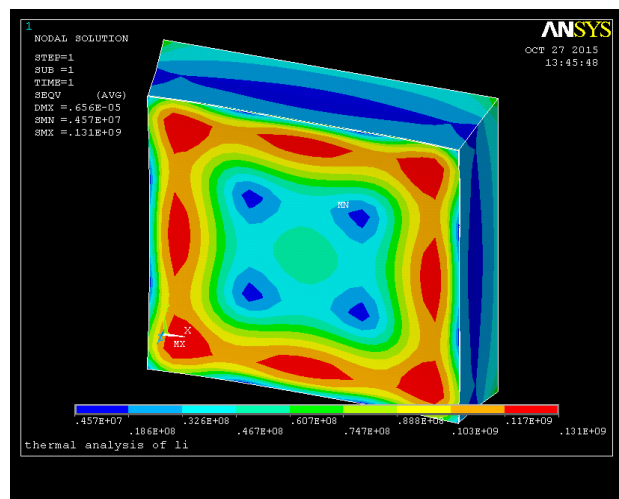


Figure 7. 10 μm aluminum/composite material thermal stress distribution
图 7. 10 μm 铝/复合材料热应力分布

对比分析上述的仿真结果，可以看出：

- 1) 随着涂层厚度的增加，涂层内部热应力呈降低趋势；
- 2) 相同条件下，复合材料表面铜涂层产生的热应力远大于铝涂层；
- 3) 热应力分布呈现出明显的边界效应，在边界处达到了最大，在冷热交替时，铝涂层热应力集中在46~88 MPa，边界处可达117 MPa，而铜涂层热应力集中在41~127 MPa，边界处可达168 MPa。

2.2.2. 增加过渡层后涂层热应力仿真分析

实验的研究结果表明，由于铝和铜导电涂层与基底之间热胀系数差异大，匹配性不好，选择合适的过渡层材料，有助于提高导电涂层的附着力。为此，选择热胀系数介于导电涂层和复合材料之间的铬作为过渡层材料，并仿真-180℃到125℃冷热交替时过渡层对涂层热应力的影响，结果如图8。

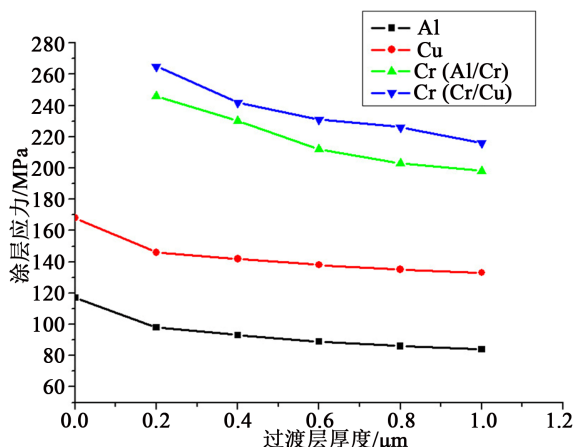


Figure 8. Simulation results of thermal stress of copper and aluminum coatings varying with the thickness of transition layer
图8. 铜和铝涂层热应力随过渡层厚度变化的仿真结果

从上述的仿真结果可以看出：

- 1) 增加过渡层，过渡层的热应力较大，但是导电涂层的热应力明显降低；
- 2) 随着过渡层厚度的增加，过渡层及导电涂层内部热应力均呈降低趋势；
- 3) 当Al涂层为10 μm ，过渡层厚度为0.2 μm 时，Al涂层常温下的最大热应力约为25，-180℃到125℃冷热交替后最大热应力约为100 MPa；
- 4) 当Cu涂层为10 μm ，过渡层厚度为0.2 μm 时，Cu涂层常温下的最大热应力约为35 MPa，-180℃到125℃冷热交替最大热应力约为150 MPa。金属的抗拉强度受温度的影响非常大，数据资料表明，常温条件下铝的抗拉强度在40~50 MPa，在-180℃时，金属铝的抗拉强度可超过150 MPa，而常温条件下铜的抗拉强度为209 MPa，在-180℃时抗拉强度接近240 MPa。对比上述的模拟仿真结果来看，增加过渡层后，形成的“导电涂层/过渡层/复合材料基底”结构具有较强的抗冷热冲击能力，无论是常温还是在-180℃下，表面铝或铜涂层产生的最大热应力均在该材料相应温度下的抗拉强度范围内，理论上可以长时间承受冷热冲击(125℃~-180℃)的环境考验，满足空间冷热交替环境的使用要求。

3. 结论

根据有限元模拟的仿真结果，采用热胀系数介于导电涂层和复合材料基底之间的铬作为过渡层，形成的“导电涂层/过渡层/复合材料基底”结构理论上具有抗冷热冲击能力，可满足空间冷热交替环境的使用要求。然而，涂层的应力既包括热应力，还包括涂层内部存在的缺陷引起的内应力(或称本征应力)和其

他应力。涂层内部缺陷直接与涂层的制备技术相关，同时涂层的制备技术还影响涂层的附着力、致密性等其他性能，相关还需进一步深入研究。

基金项目

陕西省教育厅自然科学资助项目基金(18JK0912)和榆林高层次科研启动基金项目(17GK09)资助。

参考文献

- [1] 路志勇. 用于卫星通信的平面抛物面天线[J]. 无线电通信技术, 2007, 33(5): 27-28.
- [2] Draper, D.W., *et al.* (2015) The Global Precipitation Measurement Microwave Imager: Instrument Overview and Early On-Orbit Performance. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **8**, 3452-3462. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2403303>
- [3] 董晓阳, 郭金海. 纤维增强树脂基复合材料表面金属化研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(2): 93-99.
- [4] 黄晓莉. 泡沫 Fe-Ni 电磁屏蔽材料的设计与屏蔽机理研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 14-22.
- [5] 倪莉娟. 柔性环氧树脂基覆膜制备技术及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [6] 武生虎. 树脂基复合材料表面金属化及膜基界面研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [7] Wu, S., Ma, Z., Xiao, G., Zhao, D. and Ren, N. (2011) Study on Properties of Al Film on CFRP after Cryogenic-Thermal Cycling. *Physics Procedia*, **18**, 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.095>
- [8] Zhao, D.C., Xiao, G.J., Ren, N., Ma, Z.J. and Wu, S.H. (2011) Interfacial Studies for Improving the Adhesion of Cr/Al Films on Composites. *Surface and Interface Analysis*, **43**, 1392-1396. <https://doi.org/10.1002/sia.3729>
- [9] Zhao, D.C., Xiao, G.J., Ma, Z.J., *et al.* (2010) Surface Modification of Carbon-Fiber Reinforced Plastics with Aluminum Coatings. *Journal of Vacuum Science and Technology*, **30**, 51.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org