http://myfj.cnjournals.com myfj\_sadri@comac.cc (021)20866796

**DOI**: 10. 19416/j. cnki. 1674 – 9804. 2022. 02. 003

# 金属与复材混杂连接结构的热应力研究

杨俊清\*

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

**摘 要:**随着民用飞机的不断发展,复合材料在民用飞机上的使用比例越来越高,复材与金属的混杂连接结构细节也越来越 多。民用飞机使用的环境温度包线大,在-75 ℃~55 ℃之间,研究金属与复合材料混杂连接结构的热应力及应变具有必要 性。使用控制变量法和对比法,通过有限元建模计算,研究不同厚度的铝合金和钛合金与同一种复合材料连接的结构热应力 与应变。结果表明,在相同温度载荷及金属厚度在 3 mm ~6 mm 之间时,复合材料的热应变与钛合金结构厚度成反相关,且钛 合金框的热应力比复合材料蒙皮的热应变对钛合金框厚度的变化更敏感;复合材料的热应变与铝合金结构的厚度变化成正 相关;钛合金框结构的热应力与自身厚度成反相关,铝合金框结构的热应力与自身厚度成反相关。研究结果具有一定借鉴意 义和价值。

关键词:复合材料;钛合金;铝合金;热应力;热应变;控制变量法

中图分类号: TB33; V257

#### 文献标识码:A



### 0 引言

随着全球民机事业的不断前进和发展,复合材料在民用飞机中的重量占比越来越高。波音787的复合材料重量占比为50%,A350XWB-900的复合材料重量占比达51%,而中国的CR929也将大量使用复合材料。

民用飞机的使用环境温度包线大,热应力对其 静强度和疲劳强度的影响不可忽视。吴琳琳<sup>[1]</sup>研 究了不同季节,大气温度和太阳辐射对飞机表面温 度场的影响。顾威等<sup>[2]</sup>研究了不同对流换热条件 下复合材料层合板的固化温度场和热应力。李建 璞<sup>[3]</sup>利用动态网格划分技术,提出了一种新的温度 场快速计算方法,但却牺牲了一定的计算精度。李 军鹏<sup>[4]</sup>通过研究发现,珠状波纹板对热应力的减缓 作用非常明显,带主动冷却前缘的温度明显低于一 般前缘的温度,同时结构凸起对临近空间飞行器热 应力减缓效果并不明显。王遵<sup>[5]</sup>等使用解析法和 有限元数值分析两种方法分别对复合材料单面补强 试件中的残余热应变/应力大小及分布进行预测,并 得到试验结果的验证。王刚等<sup>[6]</sup>通过一个"标准球 淬火"的热应力计算实例来验证自己的计算方法是 否正确,进而旁证其他工程问题处理方法的合理性。 耿湘人等<sup>[7]</sup>研究发现,多种材料组成的热结构其热 应力远远高于单一材料,热应力特征也与单一材料 有很大不同,此外还发现在多材料热结构中使用柔 性应变隔离垫能大大降低热应力水平,可用于指导 热结构设计。李双等<sup>[8]</sup>运用 ABAQUS 研究了某整 流罩的装配应力和热应力,提高了分析效率。李丽 霞<sup>[9]</sup>从理论角度推导了线性温度条件下热障涂层 多层结构内的热应力分布情况。李志生<sup>[10]</sup>等从修 订的傅里叶定律出发,研究了介质的热量传播速度 为有限值时的热传导问题。

复合材料比强度大、重量轻、结构效率高,在民 用飞机上得到广泛应用。对于民用飞机而言,复合 材料蒙皮加金属框是一种典型的混杂连接形式。通 过大量使用复合材料蒙皮,可以减轻飞机的结构重 量,减小运营成本,同时带来较高的运营效益。复合

\* 通信作者. E-mail: yangjunqing@ comac. cc

**引用格式:**杨俊清.金属与复材混杂连接结构的热应力研究[J].民用飞机设计与研究,2022(2):15-20. YANG J Q. Study on thermal stress of hybrid joint structure of composite and metal[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(2):15-20(in Chinese).

材料的力学性能和金属存在一定差异,其弹性模量 可通过不同的铺层顺序进行定量设计,具有较强的 设计性。同时,复合材料的热学性能呈现出各向异 性,纤维方向和垂直纤维方向呈现出较大差异。目 前,人们对复合材料与金属混杂连接结构已做了大 量研究,而关于复合材料不同铺层顺序与金属混杂 连接的热应力应变仍可进行进一步的研究。

本文通过使用有限元模型建模计算,建立复合 材料蒙皮与金属框典型结构,控制复合材料的铺层 顺序即铺层厚度和铺层性能,并将其与两种不同的 典型金属进行连接,计算其热应力在金属框厚度变 化时金属和复合材料的热应力变化,得出复合材料 和金属混杂连接结构的热应力变化及其与金属厚度 变化的关系。

### 1 模型简介

### 1.1 结构简介

本文所使用的模型为民用飞机典型复合材料蒙 皮加金属材料框的形式。金属与复合材料混杂连接 结构中,复合材料蒙皮铺层的单层厚度为0.187 mm, 共32 层对称铺层,铺层顺序为[-45/45/-45/45/ -45/45/0/90/-45/45/-45/0/90/0/90/45]s。钛 合金和铝合金框厚度共有3 mm、4 mm、5 mm、6 mm 四种形式,共建立8个模型。复合材料和钛合金、铝 合金的结构材料性能参数见表1,表中A<sub>1</sub>表示复合 材料铺层纤维方向的热膨胀系数,A<sub>2</sub>表示垂直纤维 方向热膨胀系数。从表1中可以看出复合材料铺层 纤维方向的热膨胀系数小于零,而垂直纤维方向的 热膨胀系数大于零;表明当温度升高时,复合材料纤

序号	参数	复材铺层	钛合金	铝合金				
1	弹性模量 E1	158 000	111 699	71 016				
2	弹性模量 E2	9 650						
3	泊松比 NU12	0.31	0.31	0.33				
4	剪切模量 G12	4 600	42 633	26 697				
5	热膨胀系数 $A_1$	– 1.60E-06	9.50E-06	2.30E-05				
6	热膨胀系数 A <sub>2</sub>	5.30E-05						

#### 表1 材料关键性能参数表

### 1.2 有限元模型简介

有限元模型如图1所示,红色区域为复合材料 蒙皮结构,蓝色区域为金属框结构,采用粗网格模 型。模型中,复合材料蒙皮和框腹板简化为膜元,长 桁、框内缘简化为杆元,框外缘简化为梁元。通过建 立图1所示的有限元模型,来模拟大比例使用复合 材料的民用飞机的典型机身结构复合材料蒙皮与金 属框混杂连接局部构型,使蒙皮带有一定弧度来模 拟圆形机身筒段局部构型。



图1 有限元模型

图 2 为有限元模型约束示意图,将有限元模型 的边界节点的 6 个自由度均放开,即 6 个自由度均 设置为 0。约束模型中间节点(图 1 中红色圈中的 节点)的 6 个自由度,使模型在温度载荷下可以向 四周自由膨胀。



图2 模型约束

混杂结构的初始温度场为20℃,即模型中所有 节点均设置初始温度20℃,建立初始温度场时热应 力计算分析具有完整性。图3为有限元模型的初始 温度场示意图。



图 3 初始温度场 20 ℃

金属的热应力和复合材料的热应变随温度场变 化呈线性关系,本文在复合材料蒙皮有限元模型节 点上施加-75℃,模拟飞机运行过程中机身蒙皮可 能遇到的极低温环境温度;机身框认为在机身内部, 施加20℃的室温,研究极端寒冷条件下的热应力。 图4为有限元模型的温度场示意图。



图 4 温度载荷蒙皮 - 75 ℃, 框 20 ℃

### 2 分析结果

钛合金框与复合材料蒙皮混杂连接的有限元模 型计算结果如图 5 和图 6 所示,其中复材蒙皮的考 核区为整个蒙皮,取其应变为考核参数;钛合金框的 考核区为中间位置的框,取其应力为考核参数。 将计算结果进行汇总整理,并计算出复合材料蒙皮 应变和钛合金框应力随温度变化的梯度,如表 2 所示。

结合图 5 和表 2 可以看出,随着钛合金框厚度 的增加,复合材料蒙皮的温度场应力以非线性关系 在降低。钛合金框的厚度越厚,复合材料蒙皮的温 度场应力减小的越缓慢。由此可以得出,相同温度 载荷下,当钛合金框与复合材料蒙皮连接时,增加钛 合金框的厚度可降低复合材料蒙皮的温度场应变。



#### 图 5 钛合金框厚度变化时的蒙皮应变云图



图6 钛合金框厚度变化时的框应力云图

表2 钛合金计算结果

序号	钛合金框 厚度/mm	位移 /mm	金属框 应力/Mpa	复材蒙皮 应变/μ	金属应力 梯度/Mpa	复材应变 梯度/μ
1	3	2.104	31.2	430	$\sigma_{t+1}$ - $\sigma$	$\mu_{t+1} - \mu_t$
2	4	2.107	28.67	421	-2.53	-9
3	5	2.109	26.55	414	-2.12	-7
4	6	2.108	24.74	408	-1.81	-6

结合图 6 和表 2 可以看出, 钛合金框考核区域 的最大应力出现在框外侧腹板单元, 随着钛合金框 厚度的增加, 钛合金框的温度场应力在降低。钛合 金框的厚度越厚,其自身热应力越小。由此可以得 出,当钛合金框与复合材料蒙皮连接时,增加钛合金 框的厚度可降低钛合金框的温度场应力。

从表 2 中可以看出,当钛合金框与复合材料蒙 皮混杂连接时,钛合金框的热应力比复合材料蒙皮 的热应变与金属框厚度的变化呈负相关。

铝合金框与复合材料蒙皮混杂连接的有限元模型计算应力结果如图 7 和图 8 所示,蒙皮和框的考核区域及参数同复材与钛合金框连接模型。将计算结果进行汇总整理,并计算出复合材料蒙皮应变和铝合金框应力随温度变化的梯度,如表 3 所示。



图 7 铝合金框厚度变化时的蒙皮应变云图



图 8 铝合金框厚度变化时的框应力云图

铝合金框 厚度/mm	位移 /mm	金属框 应力/Mpa	复材蒙皮 应变/μ	金属应力 梯度/Mpa	复材应变 梯度/μ
3	2.611	38.2	490	$\sigma_{i+1} - \sigma_i$	$\mu_{\iota+1} - \mu_{\iota}$
4	2.627	37.59	497	-0.61	7
5	2.637	36.98	504	-0.61	7
6	2.642	36.39	511	-0.59	7

表 3 铝合金计算结果

结合图 7 和表 3 可以看出,随着铝合金框厚度 的增加,复合材料蒙皮的温度场应变增加。由此可 以得出,相同温度载荷下,当铝合金框与复合材料蒙 皮连接时,增加铝合金框的厚度会增加复合材料蒙 皮的温度场应变。

结合图 8 和表 3 可以看出,铝合金框考核区域 的最大应力在框外侧腹板单元,随着铝合金框厚度 的增加,铝合金框的温度场应力降低。铝合金框的 厚度越厚,其自身热应力越小。由此可以得出,当铝 合金框与复合材料蒙皮连接时,增加铝合金框的厚 度可降低其自身的温度场应力。

从表 3 中可以看出,当铝合金框与复合材料蒙 皮混杂连接时,复合材料蒙皮的热应变和铝合金框 的热应力与铝合金框厚度变化不同。

将复材蒙皮热应力、钛合金和铝合金的热应力 与金属的厚度变化之间的关系整理成图 9 和图 10, 可以看出,其呈现出一种定性变化趋势。



### 3 结论

本文通过建模计算研究了复合材料蒙皮与钛合 金或铝合金框混杂连接结构的热应力应变相关性 能,其中复合材料厚度参数、铺层顺序等不变,也使 得文章具有一定局限性,后续将通过控制复材铺层



图 10 复材蒙皮与铝合金连接应力应变曲线

顺序、铺层方向比例、铺层数量等变量研究其与金属结构连接的热应力应变。

本文经计算研究发现,当复合材料结构固定而 两种金属结构厚度在3 mm~6 mm之间时,在相同 温度载荷下,经建模计算分析,得到如下结论:

 1)复合材料蒙皮与钛合金框连接时,其热应变 与钛合金框的厚度成反相关,增加钛合金金属框厚 度可降低复材蒙皮的热应变;

 2)复合材料蒙皮与铝合金框连接时,其热应变 与铝合金框的厚度变化成正相关,增加铝合金金属 框厚度会增加复材蒙皮应变;

- 3) 钛合金框的热应力与自身厚度成负相关;
- 4) 铝合金框的热应力与自身厚度成负相关。

#### 参考文献:

- [1] 吴琳琳. 飞行器表面温度场及其相似性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018: 8-9.
- [2] 顾威,陈淑仙.不同对流换热条件下复合材料层合板 固化温度场与热应力分析[J].复合材料科学与工 程,2020,20(1):5-11.
- [3] 李建璞. 温度场的快速计算[D]. 上海:上海师范大学, 2010: 4-5.
- [4] 李军鹏.数值仿真在临近空间飞行器热应力减缓中的应用[C]//2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(下册).北京:中国科学技术出版社,2017:62-67.
- [5] 王遵,肖加余,曾竟成,等.复合材料单面补强铝合金板中的残余热应力[C]//第十六届全国复合材料学术会议.复合材料:创新与可持续发展(下册).北京:中国科学技术出版社,2010:1213-1214.
- [6] 王刚,杨永刚. 热应力计算方法正确性的验证[C]// 中国宇航学会结构与环境工程专委会暨中国航天第 八专业信息网 2007 年度技术信息交流会. [S.l.:s.
  n.], 2007: 30-32.

- [7] 耿湘人,桂业伟,徐庆新,等. 多种材料热结构的热应 力计算研究[C]//中国工程热物理学会. 中国工程 热物理学会 2004 年传热传质学学术会议论文集(下 册).[S.l.:s.n.], 2004: 1241-1245.
- [8] 李双,高庆,吴艳红. 某整流罩装配应力及热应力计 算分析[C]//中国宇航学会结构与环境工程专委会 暨中国航天第八专业信息网 2007 年度技术信息交 流会. [S.l.;s.n.], 2007: 308-311.
- [9] 李丽霞. 温度梯度引起的热障涂层热应力分析[G]. 中国航空学会第八届动力年会(2014年)论文摘要汇

编. [S.l.:s.n.], 2014: 37-37.

 [10] 李志生,姜任秋.周期震荡导热热应力的 Non-Fourier 分析[C]//中国工程热物理学会.中国工程热物理学 会传热传质学学术会议论文集.[S.l.;s.n.],2002; 21-24.

作者简介

杨俊清 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计分析。E-mail: yangjunqing@ comac. cc

## Study on thermal stress of hybrid joint structure of composite and metal

#### YANG Junqing \*

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: With the continuously development of civil aircraft, the ratio of composite used is growing higher and hybrid connection between composite and metal is growing. The range of environment temperature is large and varies from -75 °C to 55 °C, it is necessary to study the thermal strain of composite and stress of metal hybrid connection structure. Control variable and comparison methods were used to study thermal stress of different titanium alloy and aluminum alloy thicknesses connected with the same composite by FEM computation. Results show that for the same composite structure and specific metal thickness range between 3 mm and 6 mm, composite thermal strain decreases when the thickness of titanium alloy increases and it is more sensitive to the thickness increases for the same temperature. Thermal stress of titanium alloy decreases when its thickness increases. The research results have certain kinds of meaning and value for reference. Keywords; composite; titanium alloy; aluminum alloy; thermal stress; thermal strain; control variable method

<sup>\*</sup> Corresponding author. E-mail: yangjunqing@comac.cc