

doi: 10.7690/bgzdh.2018.07.014

## 冲击载荷下复合材料干涉连接的应力分析

李思可, 戴劲松, 王茂森

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 针对复合材料在某地面机动武器系统中的应用, 对冲击载荷下复合材料干涉连接的应力进行分析。在复合材料经典层合板理论假设的基础上, 建立冲击载荷下复合材料层合板、金属板与螺栓 3 种不同干涉量的干涉连接有限元模型, 并利用有限元分析软件对其进行应力分析。分析结果表明: 3 种不同干涉量下, 模型受到冲击载荷时的应力集中情况, 根据复合材料层合板 Tsai-Wu 破坏准则, 确定在冲击载荷下复合材料与紧固件的最佳干涉量值为 1.4%。

**关键词:** 复合材料; 干涉连接; 冲击载荷; 有限元分析

**中图分类号:** TJ304 **文献标志码:** A

## Interference Connection Stress Analysis of Composite Materials Under Impact Loading

Li Sike, Dai Jinsong, Wang Maosen

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Aiming at the application of composite material in certain ground maneuvering weapon system, analyze the interference connection stress of composite materials under impact loading. Based on composite material typical laminate theory hypothesis, establish the interference connection finite element models of composite material laminate, metal plate and bolt under impact loading. Then, use finite element analysis software to carry out stress analysis. The analysis results show that the stress integration situation of impact loading on model under 3 different interference value. According to the composite material laminate Tsai-Wu destroy principle and ascertain that the optimal interference value of composite material and fastener is 1.4% under impact loading.

**Keywords:** composite material; interference connection; impact loading; finite element analysis

### 0 引言

随着 21 世纪高新技术的发展, 现代战争对地面武器装备的性能要求、打击精度越来越高。为提高武器装备的轻量化和机动性, 复合材料在武器装备上的用量有显著增加, 但在许多关键的传力部件上仍然是金属与金属连接居多<sup>[1]</sup>。与传统金属材料相比, 复合材料无法通过承载区域的局部塑性变形来实现应力的重分布<sup>[2]</sup>, 再结合其各向异性与非均质性的材料特性, 在复合材料连接处的结构设计过程中, 应当尽量避免间隙配合<sup>[3]</sup>, 而适当的干涉量却可以减小应力集中, 提高其疲劳寿命<sup>[4]</sup>。

干涉连接在复合材料接头中应用得非常广泛, 这种连接形式可以有效减少复合材料在其连接处存在的较大应力集中。相关研究表明: 复合材料与紧固件之间的干涉量对连接处的应力集中有较大影响, 在静载荷下的最佳干涉比为 1%~1.4%, 而动载荷下的最佳干涉量值要高于静载荷。

在某小口径速射炮的供输弹系统中, 弹箱作为

储弹供弹机构, 高强度、轻质量一直是武器研发工作者所追求的目标。复合材料在航空航天领域的广泛应用使研究人员得到启发, 将其应用在小口径速射炮的供弹弹箱上, 大大减轻了弹箱的整体质量, 同时提高了火炮系统的机动性和精确打击效率。此弹箱系统环形分布, 均采用碳纤维包覆金属板的结构, 并在其关键承力部位采用螺栓紧固连接, 在小口径速射炮火炮供输弹系统运行的过程中, 弹链带高速运动, 每一个弹箱中的弹丸输送完成后, 弹箱出口处的弹簧板快速弹起, 形成下一个弹箱输弹的通道。经过试验分析, 在弹簧板弹起的过程中, 会对弹箱顶部产生过大的冲击载荷, 由此在顶部结构产生应力集中, 对其疲劳寿命产生一定影响<sup>[5]</sup>。

为了减小冲击载荷对弹箱顶部造成的应力集中, 增强弹箱结构强度, 可通过改变螺栓与复合材料、金属板的紧固连接方式来实现。笔者针对弹箱中复合材料与金属板的螺栓紧固连接方式, 建立干涉连接有限元模型, 施加冲击载荷, 通过有限元仿真分析不同干涉量下复合材料在其连接处所产生的

收稿日期: 2018-02-10; 修回日期: 2018-03-17

作者简介: 李思可(1993—), 男, 安徽人, 硕士, 从事武器装备结构设计与仿真分析技术研究。

应力集中，经比较，确认出最佳干涉量值。

### 1 理论分析

#### 1.1 干涉配合的定义及应用

干涉配合即有较大过盈量的配合方式。干涉配合和过盈配合在形式上是相同的，但在应用范畴上二者有很大区别：过盈配合一般只应用于定位和传载，而干涉配合是为了提高疲劳寿命<sup>[6]</sup>。

在螺栓干涉连接中，螺栓与孔干涉配合的干涉量计算公式为：

$$I = d - D \tag{1}$$

其中： $I$  为螺栓与孔的干涉量，mm； $d$  为螺栓公称直径，mm； $D$  为孔径，mm。为方便比较，通常用干涉量与螺栓公称直径的比值来表示，即干涉比：

$$I\% = \frac{d - D}{d} \times 100\% \tag{2}$$

在结构上，采用螺栓连接的接头，在受到载荷作用时，孔的周围会产生很大的应力集中，更容易发生疲劳破坏<sup>[6]</sup>，如图 1 所示。

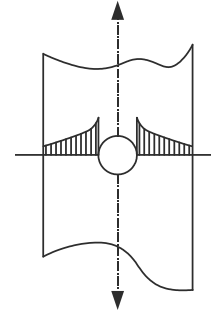


图 1 螺栓孔周围的应力集中示意图

这种应力集中会对接头的使用寿命产生不利影响，而干涉配合可以改善这种一般连接方式的缺点。

#### 1.2 复合材料层合板理论

从宏观力学的角度，一般将复合材料看作均匀的各向异性弹性体。在小变形线弹性条件下，各向异性弹性体及各项同性弹性体的力平衡微分方程和几何关系的表达形式相同，本质区别在于物理关系及应力-应变关系不同。

在各向异性体中，应力-应变关系为：

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{(1+\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{(1+\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix} \tag{3}$$

由材料力学可知：

$$\tau = G_A \gamma, \sigma = E \varepsilon \tag{4}$$

故

$$\frac{T_1}{t_1} = E_1 \frac{du_1}{dx}, \frac{T_2}{t_2} = E_2 \frac{du_2}{dx} \tag{5}$$

根据力平衡可得，

$$\frac{dT_1}{dx} - \tau = 0, \frac{dT_2}{dx} + \tau = 0 \tag{6}$$

#### 1.3 层合板强度失效准则

目前常用的复合材料破坏准则主要有最大应力准则、最大应变准则、Tsai-Wu 准则和 Tsai-Hill 准则。其中在工程实践中 Tsai-Wu 准则应用的相对广泛。

Tsai-Wu 失效准则认为材料不发生破坏的临界条件是：

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{66} \tau_{12}^2 = 1 \tag{7}$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= (X_c - X_t) / X_c X_t \\ F_2 &= (Y_c - Y_t) / Y_c Y_t \\ F_{11} &= 1 / X_c X_t \\ F_{22} &= 1 / Y_c Y_t \\ F_{66} &= 1 / S^2 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

式中： $X_c, X_t$  是纵向拉伸或压缩强度； $Y_c, Y_t$  是横向拉伸或压缩强度。

### 2 仿真分析

#### 2.1 有限元建模

由于实际工程问题的复杂几何结构会增大有限元分析的计算量和不收敛概率<sup>[7]</sup>，因此笔者根据分析对象的几何结构进行了合理简化。结合工程实践可知：在螺栓干涉连接过程中层合板开孔的出口处最容易出现应力集中，因此采用相关有限元软件建立如图 2 所示的简化模型，并对几何模型进行规则

的单元划分。其中，上板为复合材料选用碳纤维环氧树脂层板 HTA/6376，对称均匀铺层，层合板尺寸为 80 mm × 20 mm × 4 mm，铺层方式 [45°/0°-45°/90°]s，每层单层板的厚度为 0.4 mm，其力学性能： $E_x=E_y=54.25$  GPa， $X、Y$  面内剪切模量  $G_{xy}=20.27$  GPa，泊松比  $\mu_{xy}=0.309$ 。下板为结构钢板，尺寸为 80 mm × 20 mm × 5 mm。根据工程需要，螺栓公称直径  $d$  为 5 mm，材料为钛合金，螺栓的弹性模量  $E_1=113$  GPa，泊松比  $\mu=0.34$ 。

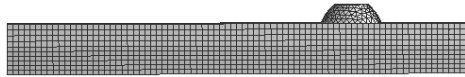


图 2 复合材料螺栓干涉连接有限元模型

根据螺栓干涉连接的定义<sup>[8]</sup>，确定 3 种不同孔径的复合材料板，孔径大小分别为 4.94、4.93、4.92 mm，由 2.2 节可知，对应的干涉比分别为 1.2%、1.4%、1.6%。

### 2.2 施加载荷并仿真

以某地面火炮系统的关键承载部位为例，主要承载类型为冲击载荷，在此模拟仿真过程中简化为如图 3 所示的瞬态载荷，施加在远端金属板底部。整个作用时间为 0.2 s，峰值为 1 000 N。

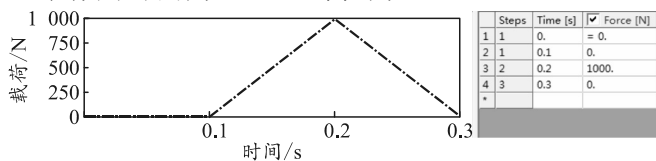


图 3 载荷施加形式

对螺栓与各层板之间添加接触，并将两板靠近螺栓的一端作为固定约束，远端施加载荷，经相关有限元分析软件仿真计算，得出的层合板应力云图，如图 4 所示。

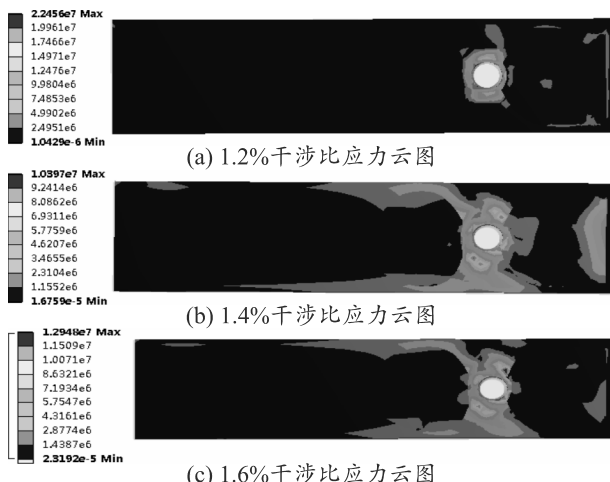


图 4 层合板应力云图

由图中可以看出，在孔周围一定范围内存在明

显的应力集中。表 1 总结了干涉比分别为 1.2%、1.4%、1.6%的情况下各层合板上的最大应力。

表 1 不同干涉量下复合板的应力值

干涉比/%	孔/mm	载荷/N	最大应力/MPa
1.2	4.94	1 000	22.45
1.4	4.93	1 000	10.40
1.6	4.92	1 000	12.95

从表中可以看出：施加同样大小的冲击载荷，当干涉比为 1.4%时，层合板上的最大应力值最小，即在弹箱顶部螺栓紧固连接处产生的应力集中也相对最小。因此在复合材料许用应力的条件下，干涉比为 1.4%时层合板可以承受更大的冲击载荷。

### 3 结束语

基于复合材料层合板理论、Tsai-Wu 失效准则和有限元分析方法，笔者考虑了在冲击载荷下，螺栓与复合材料不同干涉量的干涉连接方式，针对该研究对象，运用相关有限元仿真软件，逆向分析了相同大小的冲击载荷下，不同干涉量的连接方式对复合材料应力集中的影响，确定了在干涉比为 1.4%时，复合材料能承受更大的冲击载荷，是 3 种情况中的最佳干涉量值。

笔者所研究对象取材于某小口径自动火炮系统，对于工程实践来说，确定工件所能承受的极限载荷尤为重要。在整个冲击工况分析过程中，各零部件包括复合材料、结构钢材料等都会受到冲击作用。通过对连接方式的分析，为以后关于紧固件连接极限受载的情况提供了基础和依据。

### 参考文献：

- [1] 李建利, 赵帆, 张元, 等. 碳纤维及其复合材料在军工领域的应用[J]. 合成纤维, 2014, 43(3): 33-35, 40.
- [2] 段元欣, 钟衡, 张开富. 复合材料螺栓干涉连接结构压钉过程轴向力建模[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(8): 1302-1307.
- [3] 廖海浪. 复合材料结构干涉连接[D]. 南昌: 南昌大学建筑工程学院力学系, 2011: 3-4.
- [4] 于雷, 卜泳, 赵庆云. 复合材料与金属混合夹层的干涉连接技术研究[J]. 装配工艺, 2011, 22(2): 90-93.
- [5] 马宁, 陈松, 蒋浩龙, 等. 共振声混合技术在含能材料领域应用研究进展及展望[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 20-24.
- [6] 张昕. 复合材料干涉配合连接有限元分析[D]. 西安: 西安电子科技大学机械制造及其自动化系, 2011: 15-17.
- [7] 宋丹龙, 张开富, 钟衡, 等. 层合板干涉螺接分层损伤及其临界干涉量[J]. 航空学报, 2016, 37(5): 1677-1688.
- [8] 董妹言, 杨扬, 齐涛, 等. 基于周期对称模型的 MW 级风电机组变桨轴承连接螺栓强度计算[J]. 机电工程, 2017, 34(4): 357-360.