

为改进飞机结构的雷击保护，波音公司模拟了多孔金属箔复合材料的热膨胀

在波音 787 梦想客机这样的现代飞机中，碳纤维复合材料的使用超过了 50%，这种材料通常需要通过添加多孔金属箔来实现雷击保护。波音公司的研究人员通过仿真来验证金属箔上的防护涂层不会由于常规飞行周期产生的热应力而失效。

作者：JENNIFER A. SEGUI

波音 787 梦想客机的创新之处在于它使用了超过 50% 的碳纤维增强塑料 (CFRP)，因为这种材料重量轻且具有极其出色的强度。图 1 显示整架飞机大量使用了复合材料。虽然

CFRP 复合材料本身有很多优点，但它们无法减轻雷击可能产生的破坏性电磁影响。为解决这个问题，通常在复合结构层合板中添加导电多孔金属箔 (EMF)，用以迅速消散过量的电流

和热量，从而实现飞机 CFRP 的防雷击保护。

波音研究与技术中心 (BR&T) 的工程师利用多物理场仿真和物理测量来研究 EMF 设计参数对图 2 左侧所

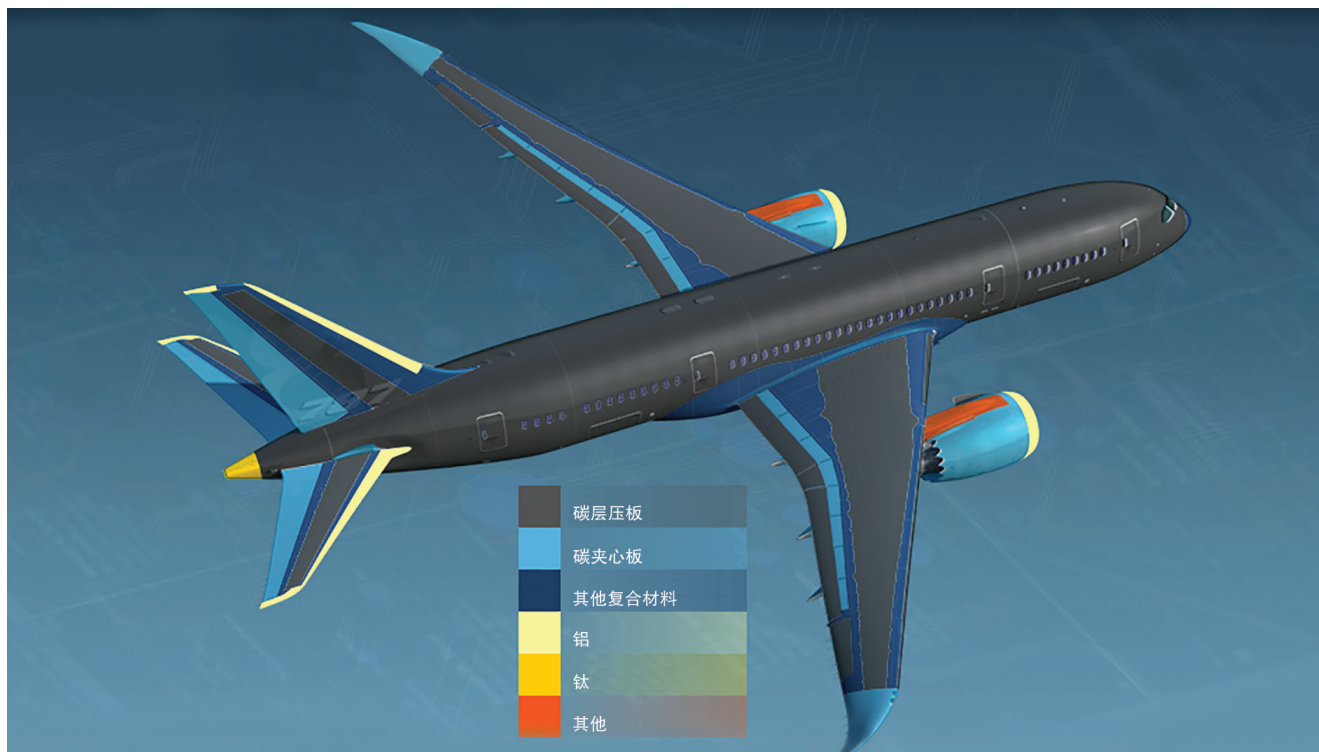


图 1：在整架波音 787 客机中采用的先进复合材料占机体的比例超过了 50%¹。

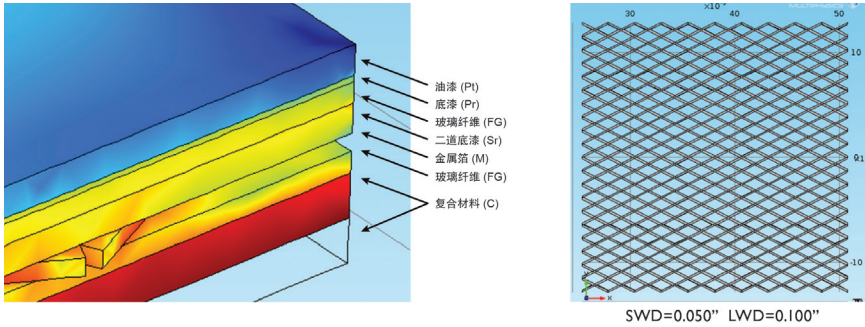


图 2：左侧是来自 COMSOL 模型的复合结构层合板，右侧是多孔金属箔的几何。SWD 和 LWD 对应于菱形的短对角线和长对角线。网格纵横比 SWD/LWD 是在仿真中发生改变的参数之一。

示的复合结构层合板中每一层的热应力和位移的影响。由于典型的地空飞行周期产生的热循环，复合结构的防护涂层中会发生应力累积。随着时间的推移，防护涂层可能会发生开裂，使水分和环境物质进入，导致 EMF 被腐蚀，从而使电导率和防护能力下降。BR&T 的项目主管 Jeffrey Morgan (密封剂与电磁材料)、主管仿真的助理技术研究员 Robert Greegor (应用物理)、主管测试的 Patrice Ackerman 博士 (密封剂与电磁材料) 以及技术研究员 Quynhgio Le 对这项研究作出了重要贡献。通过他们的研究，复合结构中的总体热稳定性得到改善，从而大大降低与防护涂层损坏相关的风险和维护费用。

飞机复合材料中的热膨胀分析

在图 2 左侧所示的表面防护方案中，包括油漆、底漆、腐蚀隔离层、二道底漆、EMF 和底层复合结构在内的每一层都会受冷热循环影响，在防护涂层中逐渐产生机械应力累积。图中的几何来自 Greegor^{2,3} 和他的同事使用 COMSOL Multiphysics® 开发的热膨胀系数 (CTE) 模型，用于评估复

合结构层合板一英寸正方形样品每一层中的热应力和位移。

EMF 层的结构如图 2 右侧所示。在这项研究中，研究人员改变 EMF 高度、网格线宽度、纵横比、金属成分和表面层合结构，评估它们对整个结构热性能的影响。EMF 的金属成分分为铝或铜；通常铝制 EMF 要求在 EMF 和复合材料之间额外添加玻璃纤维，防止发生电偶腐蚀。

如图 3 所示，每层的材料属性包括热膨胀系数、热容、密度、导热系数、杨氏模量和泊松比，这些材料属性以用户自定义的形式添加到 COMSOL 模型中。油漆层的热膨胀系数通过一个阶跃函数定义，它表示在材料的玻璃化转变温度下热膨胀系数所发生的突变。

在 CTE 模型中，热应力多物理场接口通过耦合固体力学与传热来仿真热膨胀，并求解整个结构中的位移。仿真仅限于飞机降落时遇到的复合结构层合板的加热过程，模型中定义了最终温度和初始温度，分别代表地面温度和高空温度。

EMF 对应力和位移的影响

研究人员对 COMSOL 仿真的结果进行了分析，以量化不同属性的多孔金属箔在加热时每层中产生的应力和位移。仿真结果的示例如图 4 所示。

通过图 4 上方的油漆层，可以

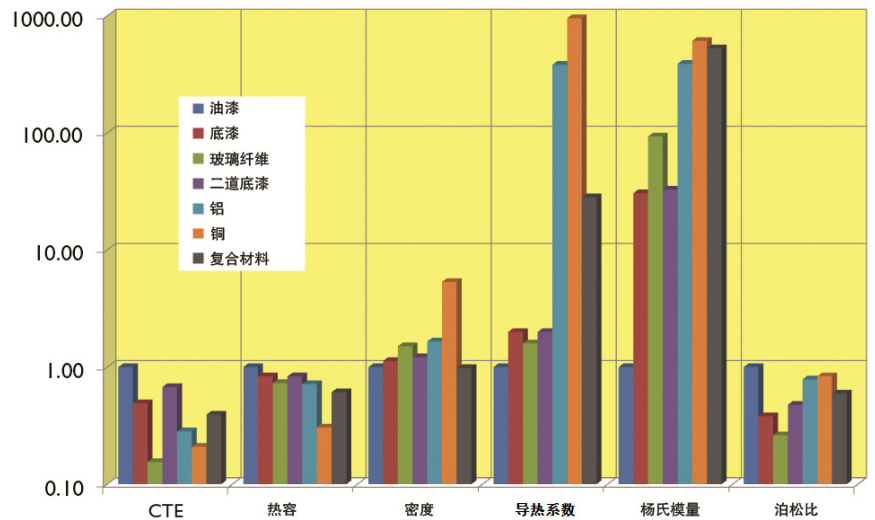


图 3：每种材料参数相对于油漆层的比率。油漆层显示出较高的 CTE 值、热容和泊松比，表明它在加热和冷却时将承受压应力与拉伸应变。

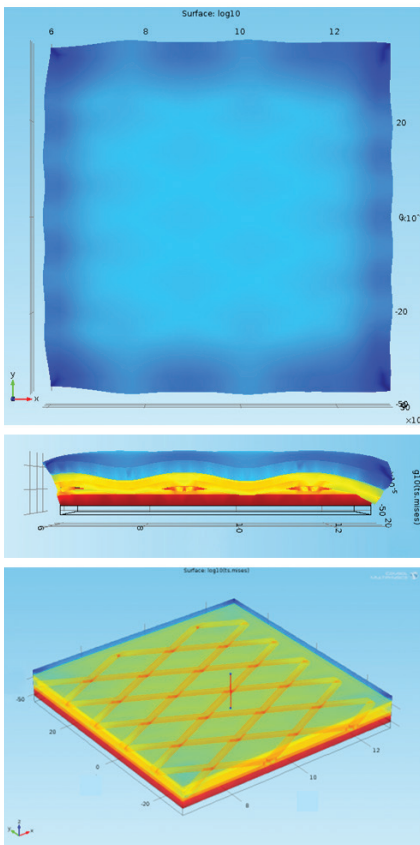


图 4：上、中：复合结构层合板一英寸方形样品中 von Mises 应力和位移的俯视图与侧视图。下图使用透明度来表示复合结构和 EMF 中的高应力。应力沿垂直线、按样品深度方向延伸进行评估。

观察到底层 EMF 的位移模式。放大后的侧视图清楚显示了网格和网孔上方的位移变化，以及最上方防护层中的应力下降趋势。图 5 显示了采用铜制或铝制 EMF 的表面防护方案中每层的相对应力。铝制 EMF 所需的玻璃纤维腐蚀隔离层会起到缓冲作用，使铝制 EMF 中的应力低于铜制 EMF。

虽然铝制 EMF 中的应力较低，但不同 EMF 设计参数的仿真结果表明，与铜制 EMF 相比，采用铝制 EMF 表面防护方案的共同趋势是会产生较高位移。通常，铝制 EMF 产生的位移较大可部分归因于铝的 CTE 相对较高。

研究人员进一步对 EMF 设计参数的影响进行了分析，确定不同的高度、宽度和网格纵横比对防护层中位移的影响。当改变网格纵横比时，可以发现纵横比升高会导致铜制和铝制 EMF 的位移降低大约 2%，而纵横比值较高时，对应的网格结构会更空旷。对于任何 EMF 设计参数，工程师都需要在载电流容量、位移和重量

“对于提高 EMF 载电流容量来实现雷击保护而言，增大网格宽度或减小纵横比是更好的策略。”

之间作出权衡。对于网格纵横比，虽然选择空旷的网格结构可以减小位移和重量，但同时也要考虑到这会导致对 EMF 防护功能至关重要的载电流容量下降。

网格宽度也有类似情况，将网格宽度增为三倍时，铜制和铝制 EMF 的位移会稍微相对增加大约 3%。但是，将 EMF 高度增为四倍时，铜制和铝制 EMF 的位移均增加大约 60%。图 6 显示了对于不同高度的铜制和铝制 EMF，表面防护方案每一层的相对位移值。由于对位移的影响较小，对于提高 EMF 载电流容量来实现雷击保护而言，增大网格宽度或减小纵横比是更好的策略。

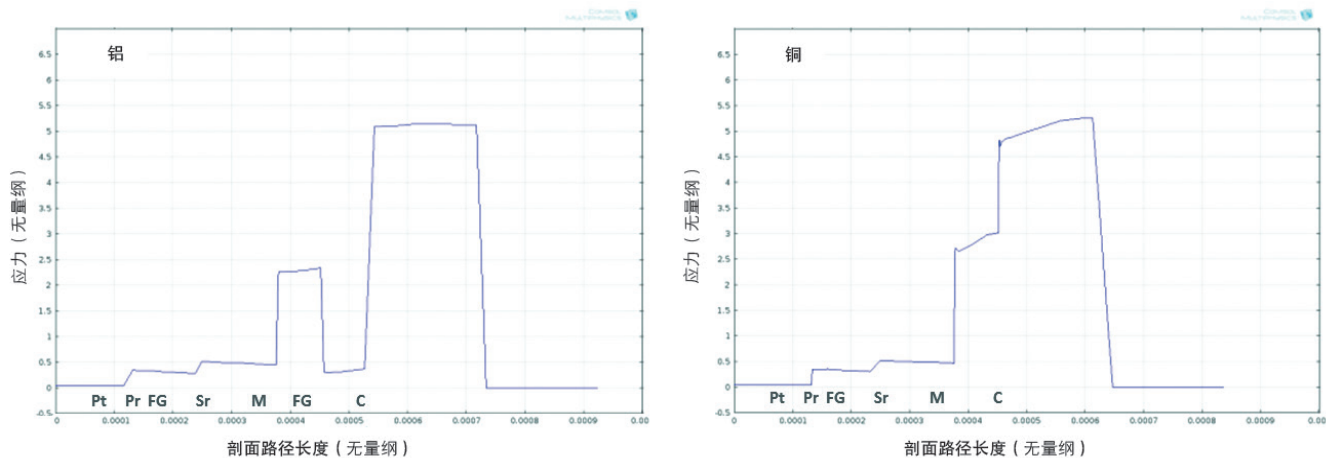


图 5：以无量纲表示的相对应力，沿包含铝制（左）或铜制 EMF（右）的复合结构层合板的深度方向绘制。

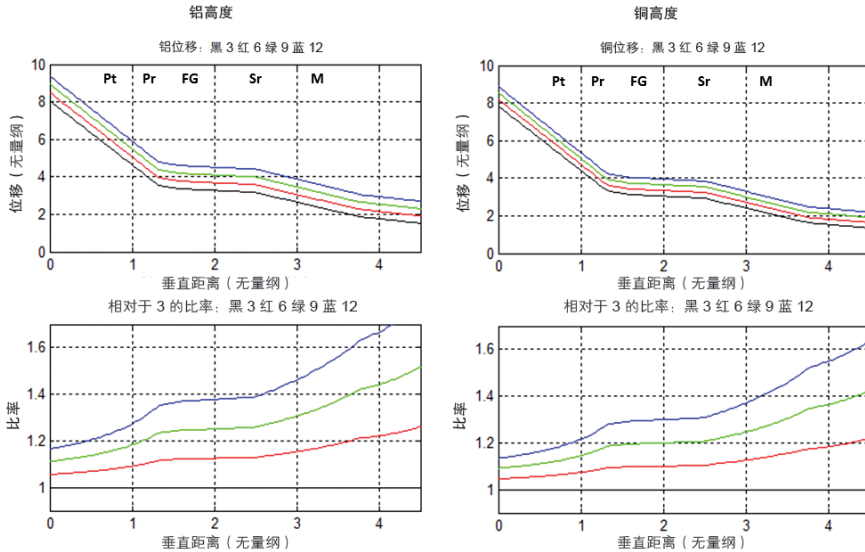


图 6：不同 EMF 高度对表面防护方案中每一层位移的影响。上方的图形显示了以无量纲表示的位移；在下方，比率为对于每种高度计算的位移除以最小高度的位移所得到的归一化比率。

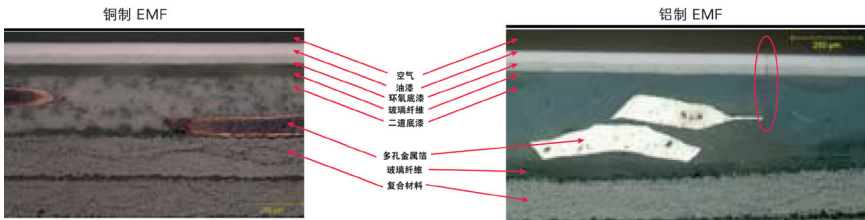
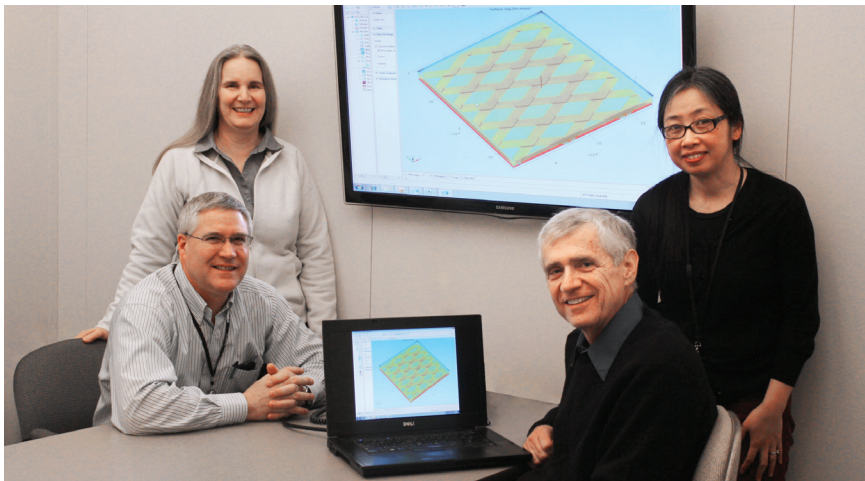


图 7：暴露于湿气并经过热循环后的复合结构层合板的显微照片。左侧为铜制 EMF 的结果，右侧为铝制 EMF 的结果。



波音研究与技术部的研究团队，从左到右：Patrice Ackerman、Jeffrey Morgan、Robert Greigor 和 Quynhgio Le。

将位移与裂纹形成相关联

Greigor 和他在 BR&T 的同事定性地认为，当预测的位移增加时，由于热循环逐渐累积产生的机械应力在防护层中形成裂纹的风险会上升。

实验证据支持这种推测，如图 7 所示，该图是采用铝制和铜制 EMF 的表面防护方案在环境试验箱中长时间暴露在湿气和热循环下之后的截面显微图像。采用铜制 EMF 的层合板未显示任何裂纹，而采用铝制 EMF 的层合板则在底漆中发生开裂，产生可见的边缘和表面裂纹，并在网格重叠区域中产生大量裂纹。

在相同的温度范围下，实验结果与仿真结果具有很好的关联度，在铝制 EMF 的防护层中都显现出较高的位移。仿真和实验均表明对于飞机复合结构的雷击保护，铜制 EMF 是更好的选择。因此，多物理场仿真是一种可靠的手段，用于评估 EMF 设计参数对应力和位移的相对影响，帮助工程师更好地理解并降低裂纹形成的可能性。

参考文献

这篇文章中介绍的信息基于以下公开资料来源：

- 波音公司。787 Advanced Composite Design. 2008-2013. www.newairplane.com/787/design_highlights/#/visionary-design/composites/advanced-composite-use
- J.D. Morgan, R.B. Greigor, P.K. Ackerman, Q.N. Le, Thermal Simulation and Testing of Expanded Metal Foils Used for Lightning Protection of Composite Aircraft Structures, SAE Int. J. Aerospace 6(2):371-377, 2013, doi:10.4271/2013-01-2132.
- R.B. Greigor, J.D. Morgan, Q.N. Le, P.K. Ackerman, Finite Element Modeling and Testing of Expanded Metal Foils Used for Lightning Protection of Composite Aircraft Structures, Proceedings of 2013 ICOLSE Conference; Seattle, WA, September 18-20, 2013.18-20, 2013.