

复合材料整体油箱雷电防护试验研究

白晓秋*, 欧霞, 杨霍燕

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 为了验证采用铺贴铝箔网复合材料整体油箱雷电防护设计效果, 设计了雷电防护试验件, 给出了试验方法, 并通过模拟雷电环境, 对整体油箱进行了雷电直接效应试验。结果表明: 做了钉头密封并在结构表面采取了铝箔防护的区域, 没有火花产生, 油箱内部温度均低于 800℃; 入击点直接入击到钉头上时, 破坏性最大, 周边结构烧蚀面积和内部分层面积都比其他情况严重; 在连接件处没有覆盖铝箔网时钉损伤严重, 且部分钉内部有火花产生。采用铺贴铝箔网设计的复合材料整体油箱雷电防护方法有效, 但结构设计一定要保持电连续。

关键词: 雷电防护; 复合材料整体油箱; 铺贴铝箔网; 试验研究

中图分类号: V216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2016) 06-0062-05

复合材料凭借比强度和比模量高、抗疲劳损伤能力强、抗腐蚀能力强、可设计性能好和易于成型等诸多优异特性, 在飞机结构设计中应用越来越广泛。但是复合材料也存在一些固有缺点, 如导电性比金属材料差、不能提供电磁屏蔽、对雷击损伤较敏感等。因此, 复合材料结构的雷电防护问题比金属材料突出, 尤其是复合材料整体油箱, 由于其内所装燃油, 雷击损伤很可能产生比较严重的后果, 所以对复合材料整体油箱的雷电防护是结构设计人员必须考虑的问题之一。

铺设铝箔网是复合材料部件雷击防护的主要方式之一, 目前 B737-800 机型中大部分结构采用了铝箔网防护层。这里通过对设计的铺贴铝箔网雷电防护的复合材料整体油箱进行试验, 对比了不同区域的损伤情况, 通过监测油箱内部是否有火花产生及油箱内温度。依此来判断雷击是否能在油箱内部产生引燃源, 以验证结构的雷电防护设计效果。

1 雷电防护区域的确定

复合材料整体油箱一般安置在遭受雷击概率较小的区域。根据已有的飞机雷击经验、飞机表面不同的雷电附着特

性和传导特性, 将飞机分为 3 个区^[1], 飞机上各区域的位置与飞机的形状有关, 如图 1 (a)、图 1 (b) 所示。

(1) 所有端部 (如机头、机翼和尾翼的端部、尾锥、机翼上安装的吊舱以及其他明显的突出物) 是可能的初始雷电附着点的区域。朝前的端部或前缘是附着点位置随时间变化的概率较高, 应考虑为区域 1A。朝后的端部或后缘是附着点位置随时间变化的概率较低, 应考虑为区域 1B。

(2) 区域 1A 后面的表面是扫掠冲击区域 2A, 区域 2A 的范围通常要延伸到区域后面的整个长度, 如机身、短舱及机翼表面。

(3) 区域 1A 和 2A 后面的后缘应认为是初始附着区域 1B 或扫掠冲击区域 2B。

(4) 区域 1 或 2 的每一侧大约 0.5m 的表面应认为是同一个雷击区域的范围。

(5) 其他部位为区域 3, 在该区域, 雷电弧直接附着的概率很低, 但可能成为雷电流传导的通道。

综合图 1 可知, 油箱一般处于图 1 (a) 的雷击 2 区及图 1 (b) 的雷击 3 区, 本文重点研究整体油箱位于雷击 2 区和雷击 3 区上的复合材料结构防护情况。

收稿日期: 2016-04-20 退修日期: 2016-05-09 录用日期: 2016-05-16

* 通讯作者: Tel: 029-86832754 E-mail: baixiaoqiu@163.com

引用格式: BAI Xiaohu, OU Xia, YANG Huoyan. Experiment study on the lightning strike protection of composite integrated fuel tank [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (06): 62-66. 白晓秋, 欧霞, 杨霍燕. 复合材料整体油箱雷电防护试验研究 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (06): 62-66.

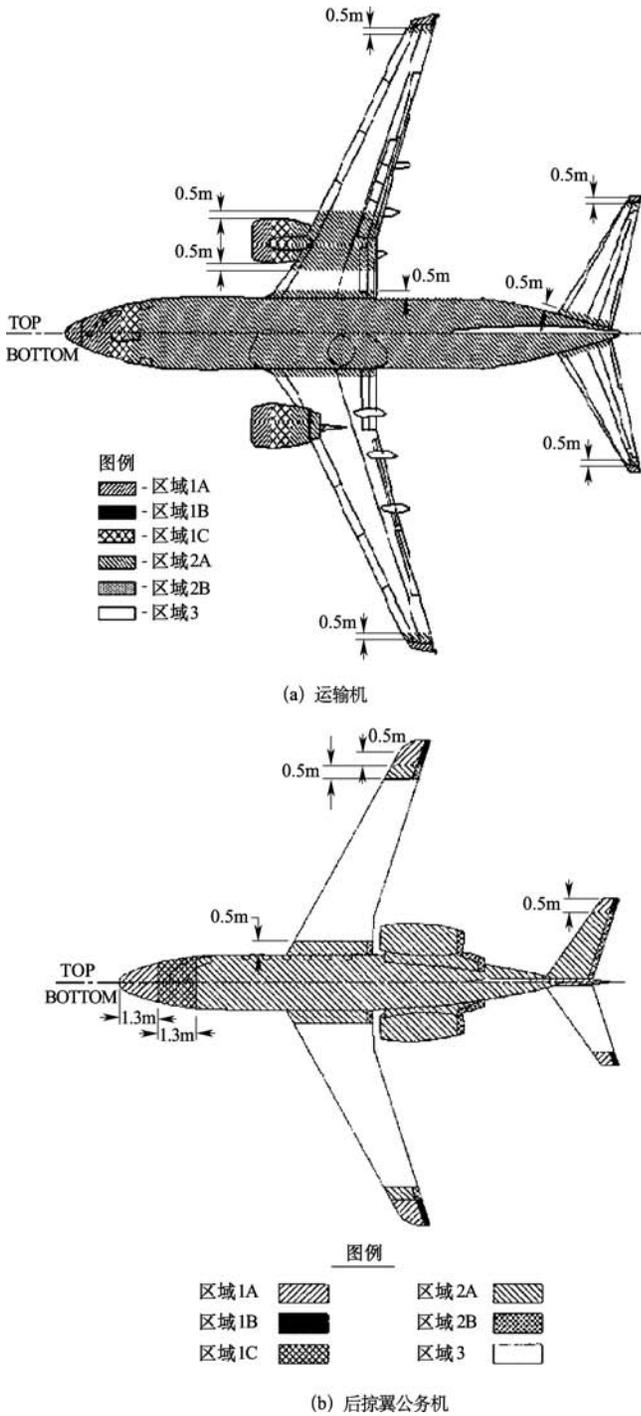


图 1 雷击分区示意图
Fig.1 The partition area of lightning strike on aircraft

2 试验件设计

2.1 试验件选取

试验件为典型复合材料机翼盒段,共 1 件。该盒段取自机翼盒段的 9~12 肋处(马鞍区外),上下壁板均为复合材料整体加筋结构,下壁板在两肋之间开有维修口。翼梁为

复合材料“J”剖面整体梁,翼肋为金属结构。盒段 9~10、11~12 肋之间分别定义为 1#、2# 整体油箱,整体油箱试验件为绝对级密封,如图 2 所示。

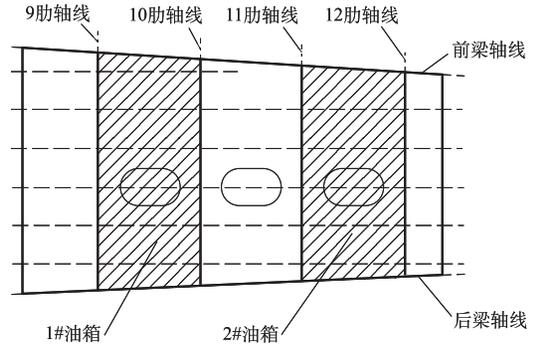


图 2 盒段整体油箱位置示意
Fig.2 The drawing of Integrated fuel tank structural structure layout

2.2 试验件雷电防护设计措施

铺设铝箔网是在复合材料制造过程中,预埋铝网,从而起到闪电防护作用的一种技术。整体油箱盒段采用下列雷电防护设计措施:

- (1) 在翼盒上蒙皮外表面采用了铺铝网的方式。安装连接件后,在连接件处再铺贴一层铝网,以保证导电的连续性。
- (2) 碳纤维复合材料之间,及复合材料与金属零件之间,用大量的紧固件连接,形成良好的导电通路。
- (3) 在油箱区有密封措施,连接件端部封包,端部封包图如图 3 所示,防止电火花产生。

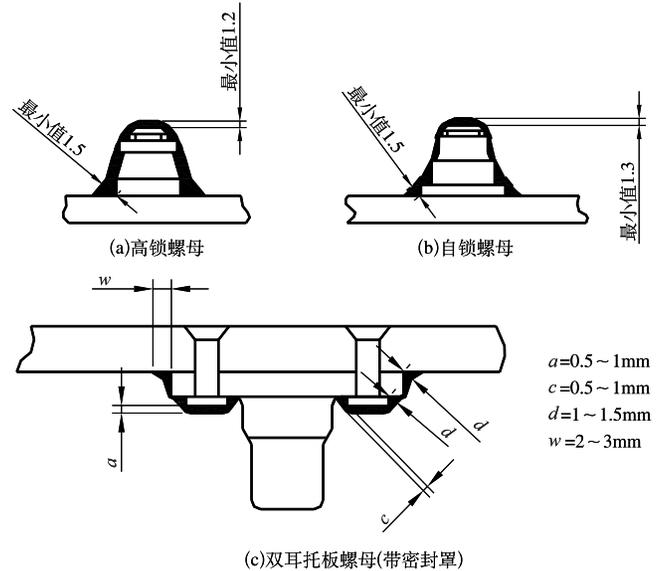


图 3 紧固件封包密封的形状及尺寸(单位: mm)
Fig.3 The form and dimension of the connector sealing (unit: mm)

盒段能真实反映油箱口盖、壁板对缝等结构细节及其连接,真实模拟整体油箱区域的雷电特性。

2.3 铝箔网铺贴方法

试验件采用铝箔网作为雷电防护措施,铝箔网与复合材料蒙皮一次固化成形,铺贴方式如图4所示,其中第一层为全覆盖层,网的L向(菱形孔长边)沿长桁轴线方向。第二层为网格状,在装配完之后铺贴第二层,用于提高连接部位的导电连续性,网的L向(菱形孔长边)沿条带长度方向,如图5所示。

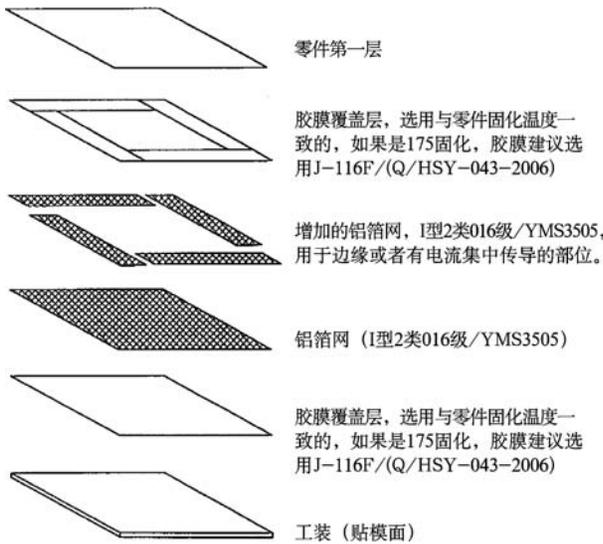


图4 局部铺贴两层铝箔网铺层设计

Fig.4 The paving design of two laminates alum-net

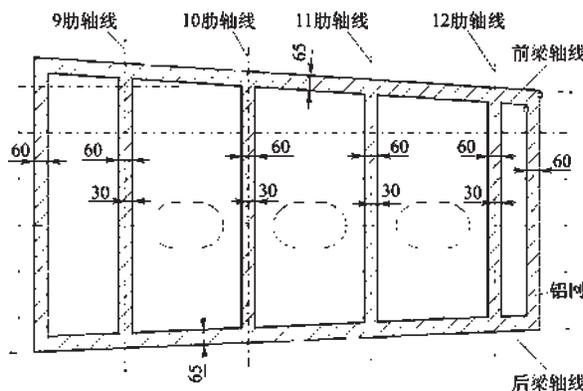


图5 上壁板第二层铝网分布示意(单位: mm)

Fig.5 The sketch of the second Alum-net distribution on the upper panel (unit: mm)

3 试验方法

按照 SAE ARP5416 中规定的雷电流直接效应试验方法,分别采用 SAE ARP5412 中规定的电流分量进行试验。

电流以等离子弧的形式注入,模拟大气雷电对试验件的雷电冲击。使用耐电弧烧蚀的金属良导体制成的棒电极或球电极作为放电电极,其距试验件表面距离至少 10mm。为了便于冲击电流进入试验件,允许在间隙处接入约 $\phi 0.2\text{mm}$ 的铜线,用于帮助触发电流。试验过程中监控油箱内部是否产生电火花,监测入击点附近温度,并且试验后用无损检测设备进行损伤情况检查。

3.1 试验点选取

上翼面对不同雷电分区,厚度区域,连接区,非连接区,油箱区等选取入击点进行防护试验,选取入击点位置如图6及表1所示。

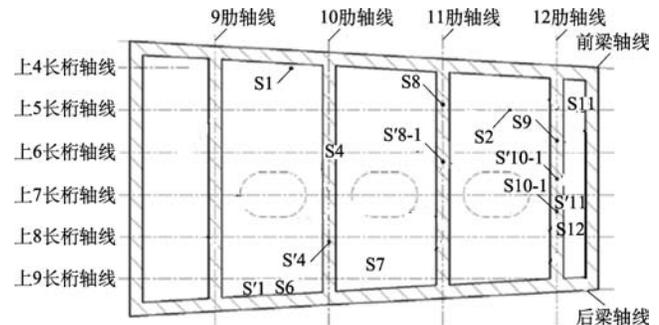


图6 上翼面入击点示意图

Fig.6 The location of striking points on the upper wing panel

表1 入击点选取

Table 1 The positions of striking points on the upper wing panel

入击点	雷击分区	入击位置	数量	波形
S1	2A	前梁连接件之间	1	D.B.C*
S' 1	2A	后梁连接件之间	1	D.B.C*
S2	2A	2# 油箱区、上5长桁中部	1	D.B.C*
S4	2A	10肋上连接件	1	D.B.C*
S' 4	2A	10肋上连接件	1	D.B.C*
S6	2B	前梁连接件上	1	D.B.C
S7	3	10-11肋之间,测2#油箱传导	1	A.B.C.D
S8	2B	11肋连接件上	1	D.B.C*
S' 8-1	2B	11肋连接件上	1	D.B.C*
S9	2A	12肋上连接件之间	1	D.B.C*
S10-1	2B	12肋上连接件上	1	D.B.C
S' 10-1	2B	12肋上连接件上	1	D.B.C
S11	1A	翼尖最薄弱处(非验证点)	1	A.B.C*
S' 11	1A	翼尖最薄弱处(非验证点)	1	A.B.C*
S12	3	翼尖,测传导	1	A.B.C.D

3.2 试验件安装

试验件安装在试验台上。设计一个金属板连接在根部蒙皮上,试验件置于绝缘体上,机翼根部连接的金属板接地。试验件安装如图7所示。

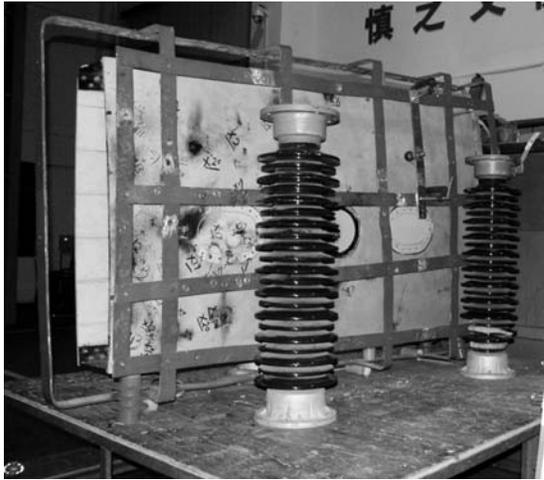


图7 复合材料机翼油箱雷电防护试验安装示意
Fig.7 Installation of the article for lightning strike protection test of the composite wing fuel tank

3.3 试验判据

雷电附着点的熔蚀和烧伤、阻抗导致的温度升高、磁力效应、声冲击波效应、粘接或铰合等连接处的电弧和火花、燃油箱内的蒸汽引燃^[2]都为雷电对飞机的直接效应的具体形式。

雷电直接效应试验中,如果检测不到电火花,且热斑温度不超过 800℃^[3],且复合材料结构无穿孔,即可认为结构强度的降低不会影响飞机的安全飞行,满足雷电防护要求,否则试验件不满足雷电防护要求。

4 试验结果及分析

4.1 试验结果

雷电流注入和传导试验对复合材料油箱不同位置、不同结构的具体损伤情况和损伤范围见表 2。

表 2 上翼面雷击试验结果
Table 2 The experiment results of striking points on the upper wing panel

入击点	雷击分区	目测	超声无损检测	有无火花或亮光	测试温度 /℃
S1	2A	注入到连接金属钉处,表面电弧烧蚀轻微	无明显损伤	无	/
S' 1	2A	注入点处金属钉轻微烧蚀,表面烧黑	损伤尺度: 80mm × 50mm, 深度: 1/5	无	低于 180
S2	2A	漆层烧蚀面积约为 40mm × 45mm, 金属网露出	/	无	/
S4	2A	表面轻微烧蚀, 金属表面露出	表面轻微烧蚀, 金属表面露出	有	/
S' 4	2A	注入点附近烧蚀发黑, 螺钉轻微烧熔	损伤尺寸: 230mm × 70mm, 深度: 1/7	无	约 220
S6	2B	铝网烧蚀向外扩散, 螺钉烧蚀, 无亮光	无明显损伤	无	/
S7	3	2# 油箱内部无火花。		无	
S8	2A	螺钉表面烧蚀变形, 损伤轻微	损伤尺寸: 80mm × 40mm, 深度: 贯穿	有	/
S' 8-1	2A	表面烧蚀轻微, 有烧黑痕迹	损伤尺寸: 30mm × 20mm, 深度: 贯穿	无	低于 180
S9	2A	表面轻微烧蚀, 损伤较小, 连接钉有轻微烧蚀	/	无	/
S10-1	2B	注入点处金属网断裂烧穿, 表面烧蚀发黑	/	无	380
S' 10-1	2B	铆钉有一定烧蚀, 铝网在注入点处烧蚀	/	无	/
S11	1A	注入点漆层烧蚀, 金属网露出	损伤尺寸: 120mm × 120mm, 深度: 1/6	有	/
S' 11	1A	表面烧蚀发黑, 金属网露出, 周围有电弧路	损伤尺寸: 150mm × 750mm 深度: 1/10	无	/
S12	3	下表面分担了约 5% 电流		无	

试验后上翼面情况如图 8 所示。

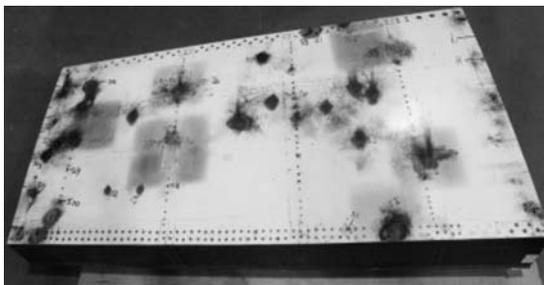


图 8 试验后上翼面
Fig.8 The image of test article upper panel after testing

从表 2 可以看出: 2A 区损伤多为注入点烧蚀发黑, 螺

钉烧蚀轻微, 少数情况金属网露出。

直接入击到连接钉上造成的损伤较其他情形更为严重。

S11 和 S'11 两点处于同样厚度区, 入击波形相同, 但是造成损伤不同, 且 S11 出现火花而 S'11 没有火花。

S4 和 S'4 两点同处于肋连接件上, 入击波形相同, 但是造成损伤不同, 且 S4 出现火花而 S'4 没有火花。

4.2 试验分析

连接钉处损伤较为严重, 这是因为: 直接入击到连接件上, 电流会沿着连接件传走, 一般连接件会和周边结构有间隙, 就会造成周边结构损伤严重。

S11 和 S'11 两点同处于翼尖结构厚度最小的区域,且入击了 1A 区电流,比实际情况严重得多,此种情况仅作研究不做验证。两种情况结果差异较大可能跟入击点周边结构不同电通路不同有关,也说明在设计时 1A 区如果用本文中的防护是不适当的。

S4 和 S'4 两点同处于肋连接件上而结果不同,经检查, S4 点入击时入击点滑至相邻区域未覆盖铝网的钉头上,而此区域电不连续,和试验设置情况不符,故此点应为无效点。

5 结论

通过对设计的复合材料整体油箱进行雷电试验,可以得出以下结论:

(1) 不论雷击 2A 区还是 3 区,做了钉头密封并在结构表面采取了铝网防护的,没有火花产生,油箱内部温度也都低于 800℃。

(2) 入击点直接入击到钉头上时,破坏性最大,周边结构烧蚀面积和内部分层面积都比其他情况严重。

(3) 在连接件处没有覆盖铝箔网时钉损伤严重,且部分钉内部有火花产生,所以在今后的设计中应注意连接区域的电连接设计,保证连接件与结构本体的电连续性。 **AST**

参考文献

- [1] 王天顺. 飞机雷电防护 [J]. 飞机设计, 2001 (4): 48-52.
WANG Tianshun. Lightning protection for aircraft[J]. Aircraft Design, 2001 (4): 48-52. (in Chinese)
- [2] Rupke E. Lightning direct effects handbook[R]. GATE-WP3.1-031027-043, 2002.
- [3] 季涛. 航空器复合材料燃油箱雷电防护 [C]// 第 17 届全国复合材料学术会议论文集. 北京: 中国航空学会, 2012: 561-564.
JI Tao. Lightning protection for aircraft fuel tanks made of composite material[C]//The thesis of 17th sampe China forum. Beijing: China Aviation Institute, 2012: 561-564. (in Chinese)

作者简介

白晓秋 (1983—) 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机系统设计。

Tel: 029-86832754

E-mail: baixiaoqiu@163.com

欧霞 (1978—) 女, 高级工程师。主要研究方向: 飞机系统设计。

杨霍燕 (1985—) 女, 工程师。主要研究方向: 飞机系统设计。

Experiment Study on the Lightning Strike Protection of Composite Integrated Fuel Tank

BAI Xiaoqiu*, OU Xia, YANG Huoyan

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: In order to verify the effect of anti-lightning strike by using alum-net covering on the composite integrated fuel tank, a test article was designed, and the experiment under simulated lightning environment was carried out. The test result indicates that: There is no sparking emerging in the zone where alum-net covering protection and sealing on the caps of bolts are adopted, and the inside temperature of fuel tank is lower than 800℃; when lightning stroke on the cap of connector, the damaged area is the largest, and the burning area of ambient structure as well as the inside delaminating area are larger than any other situation; the connections are severely damaged accompanying with inner sparking, when the connector caps are not protected. This method, adopting alum-net covering protection for the composite integrated fuel tank area is effective, however it is necessary that the structural continuity of electrical conductivity should be taken into account during design phase.

Key Words: lightning strike protection; composite integrated fuel tank; alum-net covering; experiment study

Received: 2016-04-20; Revised: 2016-05-09; Accepted: 2016-05-16

*Corresponding author. Tel.: 029-86832754 E-mail: baixiaoqiu@163.com