

# 飞机燃油管路安装间隙闪电击穿电压研究

姜亮<sup>1</sup>, 刘春阳<sup>2</sup>, 姚永杰<sup>3</sup>

(1. 中国商用飞机有限责任公司上海飞机设计研究院, 上海, 201210; 2. 中国民用航空上海航空器适航审定中心, 上海, 200335;  
3. 西安爱邦电磁技术有限责任公司, 西安, 710077)

**摘要** 闪电击穿电压是飞机遭遇闪电雷击时会不会在燃油箱内产生电火花的重要评判指标。为研究飞机燃油箱内典型燃油管路安装间隙下的闪电击穿电压, 搭建了闪电击穿电压测试台架, 并采用可调冲击电压发生器模拟出符合标准《SAE ARP5412B》要求的闪电电压波形。实验发现: 安装间隙为 3 mm 时, 实验室环境下测得的最小临界耐受击穿电压值为 9.0 kV, 飞机燃油箱内燃油管路周围部件的种类和燃油管路的安装形式对闪电击穿电压的影响不大, 燃油管路的管径大小以及管路表面的油漆层对闪电击穿电压的影响可忽略不计, 保持 3 mm 安装间隙不变, 在部件表面涂覆 1 mm 厚密封胶, 耐受击穿电压值从 9.9 kV 跃增至 22.5 kV, 安装间隙击穿所需的电压幅值大幅提高。实验结果表明: 在燃油管路表面涂覆密封胶是减缓小间隙处发生闪电击穿风险的一种有效措施, 可为飞机燃油管路安装间距选取和闪电防护设计提供参考和依据。

**关键词** 飞机燃油箱; 燃油管路; 闪电防护; 击穿电压

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.04.005

**中图分类号** V216 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)04-0028-05

## Study on the Lightning Breakdown Voltage of Small Gaps in Aircraft Fuel Pipes Installation

JIANG Liang<sup>1</sup>, LIU Chunyang<sup>2</sup>, YAO Yongjie<sup>3</sup>

(1. COMAC Shanghai Aircraft Design & Research Institute, Shanghai 201210, China;  
2. CAAC Shanghai Airworthiness Certification Center, Shanghai 200335, China;  
3. Xi'an Airborne Electromagnetic Technology Co. Ltd, Xi'an 710077, China)

**Abstract** Lightning breakdown voltage is a significant parameter in judging whether lightning spark is enabled to generate in the fuel tank when an aircraft is struck by lightning. To investigate the lightning breakdown voltage of small gaps in aircraft fuel pipes installation, a test setup is built, and an adjustable impulse voltage generator is adopted to generate the lightning voltage waveform in accordance to the standard SAE ARP5412B. The test results show that the minimum value of critical withstood breakdown voltage measured in the laboratory environment is 9.0 kV at the installation gap of 3 mm. The types of components around the fuel pipes in fuel tank and the installation forms of the fuel pipes are almost not affected by the lightning breakdown voltage of the installation gap. The effects of the lightning breakdown voltage on the fuel pipes in diameter and on the surface of fuel pipes paint layer are negligible. The installation gap of 3 mm should be in good keep. The withstood breakdown voltage value increases from 9.9 kV to 22.5 kV by applying 1 mm thick sealant on the component surface, showing that the voltage amplitude re-

**收稿日期:** 2024-03-09

**基金项目:** 国家重大科技专项(大型飞机专项)

**作者简介:** 姜亮(1989-), 男, 江苏南通人, 高级工程师, 研究方向为飞机燃油箱闪电防护研究。E-mail: jiangliang2@comac.cc

**引用格式:** 姜亮, 刘春阳, 姚永杰. 飞机燃油管路安装间隙闪电击穿电压研究[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(4): 28-32. JIANG Liang, LIU Chunyang, YAO Yongjie. Study on the Lightning Breakdown Voltage of Small Gaps in Aircraft Fuel Pipes Installation[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(4): 28-32.

quired for gap lightning breakdown is greatly increased. The researches indicate that coating sealant on the surface of fuel pipes is an effective measure to reduce the risk of lightning breakdown in small gaps. The tests results and research conclusions of this paper are available for reference and basis.

**Key words** aircraft fuel tank; fuel pipe; lightning protection; breakdown voltage

闪电雷击是民航飞机安全运营中的一项重大威胁<sup>[1-3]</sup>。当飞机遭遇闪电雷击时,闪电将在飞机燃油箱结构和油箱内的燃油管路上传导并产生感应电流和电压。如果飞机燃油管路设计未保持合适的闪电防护隔离间距,将可能在充满燃油蒸气的燃油箱内发生电压击穿产生电火花,导致飞机燃油箱爆炸,进而引发严重的航空事故<sup>[1,3-6]</sup>。因此,国内外各航空监管机构均对飞机燃油箱点火源防护提出了严格的适航要求<sup>[6-9]</sup>。

飞机燃油箱内燃油管路大多沿飞机翼展方向布置,连接跨距大,在穿舱过肋时产生的安装间隙多。因此,燃油管路与其周围肋板、支架、管路以及其他部件之间容易产生电势差,是飞机燃油箱内发生电压击穿产生电火花的高危区域。国内外机构学者均对此开展了相应研究,空客、波音以及日本三菱等公司开展了燃油箱闪电仿真计算和分析研究<sup>[10-12]</sup>。文献[6]指出小间隙电压击穿实验是表明飞机燃油系统闪电防护适航符合性的方法之一。文献[13]指出飞机闪电防护设计是现代飞机设计的一个重要组成部分,必须通过可靠的闪电防护保证飞机的飞行安全。文献[14]指出飞机燃油管路安装布置设计中需确保燃油管路与其附近设备、管路和结构之间的间隙。文献[15~16]采用仿真分析与实验相结合的方法对飞机油箱内部结构和燃油管路的闪电电流和电压分布进行了初步研究。但上述研究均未针对燃油管路安装间隙及闪电击穿电压开展进一步的深入研究。本文针对飞机燃油箱内典型的燃油管路安装间隙开展闪电击穿电压研究,以期为飞机燃油管路安装隔离和闪电防护设计提供参考和依据。

## 1 研究内容

1)研究燃油管路穿过油箱肋板结构通孔安装形式下间隙的闪电击穿电压,燃油管路外周面与肋板结构通孔边缘的实验间距为3 mm。

2)研究燃油管路与燃油管路贴近安装形式下间

隙的闪电击穿电压,2根燃油管路外周面之间的实验间距为3 mm。

3)研究通气管路端口贴近油箱蒙皮结构安装形式下间隙的闪电击穿电压,其中,通气管路端口平整,无翻边,也没有加装隔离衬垫,管口边缘与上蒙皮的实验间距为3 mm。

4)研究燃油管路贴近油箱结构支架安装形式下间隙的闪电击穿电压;燃油管路外周面与结构支架之间的实验间距为3 mm。

5)研究燃油管路与油箱结构支架之间涂覆密封胶后间隙的闪电击穿电压,其中,结构支架表面均匀涂覆1 mm厚度的密封胶,结构支架上密封胶外表面与管路外周面的实验间距为2 mm。

## 2 闪电击穿电压实验装置及方法

### 2.1 实验装置及实验件布置

将实验件放置在绝缘实验台上,并用绝缘支撑块、绝缘支架和绝缘夹具进行固定,图1~图3为几种典型的实验布置示意图。

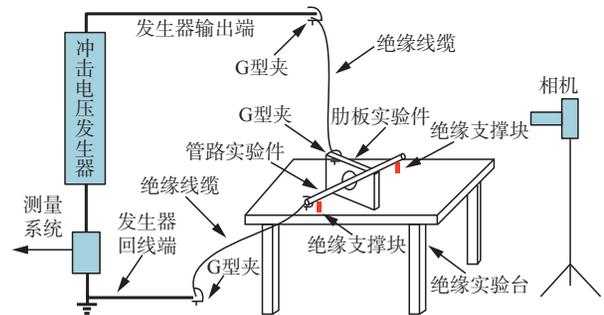


图1 燃油管路穿过油箱肋板通孔的实验布置

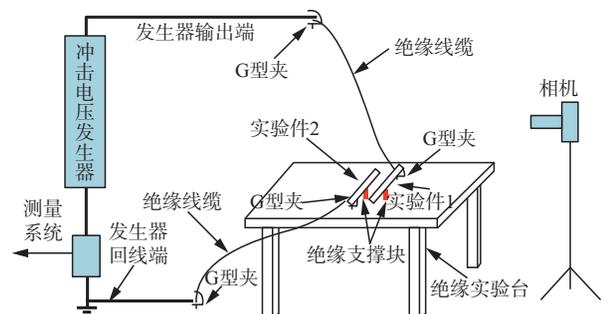


图2 燃油管路与燃油管路贴近安装的实验布置

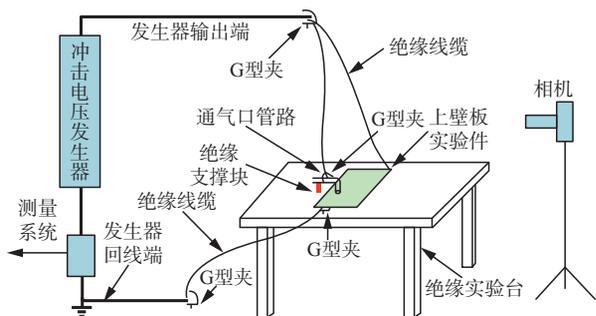


图3 通气管口贴近蒙皮结构安装的实验布置

采用可调冲击电压发生器模拟出符合实验标准《SAE ARP5412B》要求的闪电电压波形<sup>[17]</sup>,将冲击电压发生器的高压输出端通过线缆连接至其中一个实验件,将冲击电压发生器的接地端通过线缆连接至另一个实验件。实验前,使用楔形塞尺测量和调整好2个实验件的安装间隙距离并调整好相机的参数设置和拍摄角度,采用延时曝光模式对实验件之间小间隙处可能产生的电压火花进行捕捉拍摄。实验过程中,使用测量系统对实际作用在实验件上的电压波形进行采集和记录。

## 2.2 闪电电压波形及实验要求

参照标准《SAE ARP5416A》的实验要求,小间隙闪电击穿电压实验采用的电压波形分别为电压波形2和电压波形4,每个电压波形的正极性和负极性各进行5次实验<sup>[18]</sup>。实验过程中,通过逐步升高电压波形的幅值,直到2个实验件之间的小间隙处发生电压击穿。此时,可检测到实验电压波形产生畸变,同时相机可拍摄到小间隙处的电压火花。实验前后,需分别测量和记录实验室内的温度、湿度、大气压和海拔高度等数据;实验时,需清理和确保实验区域周围2 m范围内无不相关的金属物体,防止闪电感应影响实验结果的准确性。此外,在闪电实验放电过程中不允许实验室内同时开展其他闪电放电实验,以减少电磁干扰。

## 2.3 实验过程

闪电击穿电压实验的布置实物图,如图4所示。

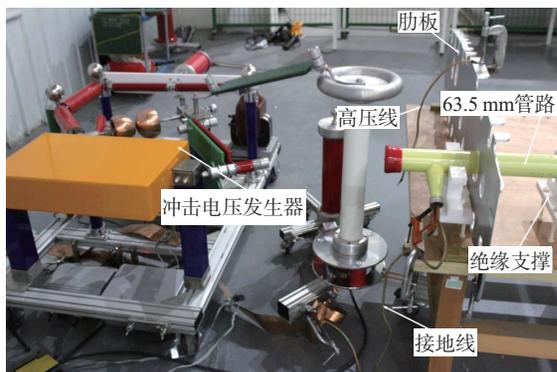


图4 管路穿过肋板通孔实验布置实物图

实验过程如下:

1) 打开可调冲击电压发生器进行参数设置,启动实验波形测量系统。

2) 控制冲击电压发生器进行充电和空载放电,对电压波形2(正极性和负极性)和电压波形4(正极性和负极性)进行实验波形校准。若电压波形不符合实验标准《SAE ARP5412B》规定的要求,则需对冲击电压发生器进行参数调节和重新校准,直到符合标准要求。

3) 按照实验布置要求对实验件和实验设备进行安装布置和电连接。

4) 根据经验,预估一个闪电击穿电压值,调节设置好冲击电压发生器的电压波形和电压幅值,进行闪电实验充、放电,读取实验采集的电压波形,并记录实验数据。

5) 通过相机拍摄的照片检查小间隙是否发生电压击穿,若发生电压击穿,则减小实验电压值,重复进行充、放电实验5次,直到连续5次实验中小间隙均未发生电压击穿,并将该电压值作为实验初始电压值 $V_0$ ;若小间隙在连续5次放电中未发生击穿,则将该电压值直接作为实验初始电压值 $V_0$ 。

6) 按照实验初始电压值20% $V_0$ 的步进提高冲击电压发生器的输出电压,并重复进行5次充、放电实验。

7) 通过相机照片检查小间隙是否发生电压击穿。若5次实验中均未发生电压击穿,则记录实验电压,并重复步骤6,直至5次充、放电实验中至少发生1次电压击穿;若5次实验中发生至少1次电压击穿(击穿电压值记为 $V_1$ ),则减小实验电压,减小幅值为初始电压值 $V_0$ 的10%,并进行5次放电实验;若5次实验中均未发生电压击穿,则将该电压值 $V_1 - 10\%V_0$ 记录为最大耐受电压值;否则,将该间隙下5次未击穿时的实验电压值 $V_1 - 20\%V_0$ 记录为最大耐穿电压值。

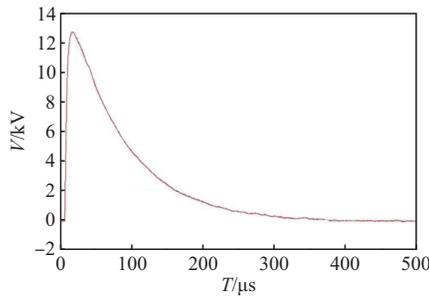
8) 分别将冲击电压发生器输出调整为电压波形2负极性、电压波形4正极性和电压波形4负极性,重复实验步骤4~步骤7。

## 3 实验结果及讨论

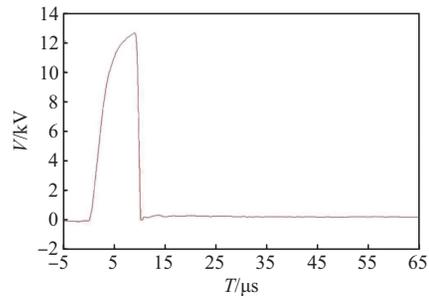
### 3.1 实验波形记录及实验现象

以燃油管路穿过油箱肋板通孔安装形式下的闪电击穿电压实验为例。波形测量系统对可调冲击电压发生器的校准电压波形和发生电压击穿时的实验

波形采集记录,如图 5 所示。



(a)校准电压波形(电压波形 4 正极性)



(b)电压击穿时电压波形(电压波形 4 正极性)

图 5 闪电电压击穿实验波形

实验过程中闪电电压击穿瞬间高速相机捕捉拍摄的电火花如图 6 所示,电压击穿实验后的燃油管路外观照片如图 7 所示。

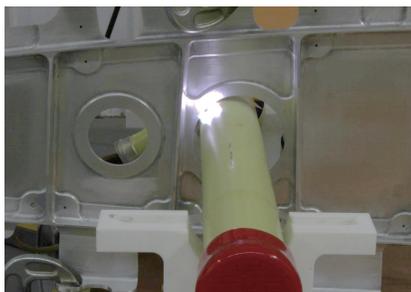


图 6 电压击穿瞬间拍摄的电火花

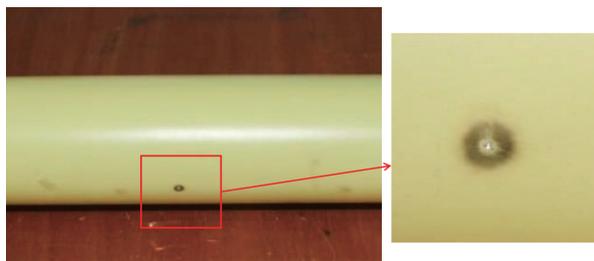


图 7 电压击穿实验后燃油管路外观

### 3.2 闪电击穿电压实验数据

将本文研究内容的实验数据及结果汇总如表 1 所示。其中,最大耐受电压值是在不同电压波形的正、负极性下分别测得的不会导致安装间隙发生击穿的最大电压,将其中的较小值记为临界耐受击穿电压值;当安装间隙的电压超过临界耐受电压值时,意味着在闪电环境下安装间隙处将有可能因电压击穿而产生电火花。

表 1 实验数据及结果统计

序号	实验类别	电压 波形	极性	最大耐受 电压值/kV	临界耐受击穿 电压值/kV
1	管路穿肋	波形 2	+	10.8	10.8
			-	11.7	
	板通孔	波形 4	+	11.7	
			-	10.8	
2	燃油管路贴	波形 2	+	11.7	10.8
			-	11.7	
	近燃油管路	波形 4	+	10.8	
			-	10.8	
3	通气管路端	波形 2	+	10.8	9.0
			-	9.0	
	口贴近蒙皮	波形 4	+	9.9	
			-	9.0	
4	管路(6.35 mm)	波形 2	+	11.7	9.9
			-	11.7	
	贴近结构 支架	波形 4	+	9.9	
			-	9.9	
5	管路(63.5 mm)	波形 2	+	11.7	9.9
			-	10.8	
	贴近结构 支架	波形 4	+	9.9	
			-	9.9	
6	管路(63.5 mm)	波形 2	+	22.8	22.5
			-	22.5	
	贴近结构 支架(1 mm 密封胶)	波形 4	+	22.5	
			-	22.5	

### 3.3 实验结果讨论

1)对比表 1 中不同实验类别下测得的临界耐受击穿电压值发现,实验 1~实验 5 的临界耐受击穿电压值基本相当,最大为 10.8 kV,最小为 9.0 kV,表明飞机燃油箱内燃油管路与其周围肋板、管路、蒙皮和支架等部件的安装间隙相同时,则临界耐受击穿电压值基本相当,周围部件的种类和管路安装形式的变化对闪电击穿电压值的影响不大。

2)对比表 1 中实验 4 和实验 5 发现,直径为 6.35 mm 的燃油管路和直径为 63.5 mm 的燃油管路分别贴近结构支架(安装间隙 3 mm)测得的临界耐受击穿电压值相同,表明燃油管路的管径大小对闪电击穿电压影响极小,可忽略不计。

3)如图 8 所示,是在实验 5 基础上,将结构支架表面均匀涂覆 1 mm 厚度密封胶后电压击穿瞬间相机拍摄的电火花。



图 8 涂覆密封胶后电压击穿瞬间相机拍摄的电火花

对比表 1 中实验 5 和实验 6, 可以发现在相同的隔离间距下, 当在燃油管路结构与结构支架的安装间隙中涂覆 1 mm 厚度的密封胶后, 临界耐受击穿电压值从 9.9 kV 跃增为 22.5 kV, 使相同的安装间隙耐受闪电击穿电压的能力翻倍, 表明涂覆密封胶是减缓闪电电压击穿风险的一种有效措施。

4) 对多组发生电压击穿现象的实验数据比对发现, 5 次重复实验中的电压击穿值非常接近, 例如实验 2, 在电压为 -12.6 kV 的电压击穿实验中, 5 次重复实验均发生电压击穿现象, 击穿电压分别为 -12.38 kV、-12.38 kV、-12.46 kV、-12.42 kV、-12.50 kV。其中, 第 1 次发生电压击穿前管路表面油漆层完好, 第 2~5 次电压击穿发生前管路上击穿点的油漆层已被高温熔解, 而 5 次重复实验的击穿电压值基本相同, 表明燃油管路表面的油漆层对闪电击穿电压的大小无影响。

5) 此外, 本文在实验室环境(气压为 97.2 kPa)下对极限安装间隙(3 mm)测得的最小临界耐受击穿电压值为 9.0 kV。参照标准《SAE ARP5416A》关于飞行高度和气压修正的指导, 将实验测得值转化为飞机最大飞行高度(约 12 km)对应气压下的临界耐受击穿电压值为 2.3 kV。

对于采用传统铝合金油箱结构的飞机, 油箱内燃油管路安装间隙的电势差通常不超过  $100 \text{ V}^{[17]}$ , 远小于上述临界耐受击穿电压值。因此, 在金属燃油箱内燃油管路的闪电防护隔离间距保持在 10 mm 以上, 具有较大的安全裕度。

## 4 结论

1) 飞机燃油箱内燃油管路周围部件的种类和燃油管路的安装形式对安装间隙的闪电击穿电压影响较小。

2) 实验结果表明, 燃油管路管径的大小以及管路表面的油漆层对安装间隙闪电击穿电压的影响极小, 可忽略不计。

3) 在金属部件表面涂覆密封胶, 可以大幅提高安装间隙击穿所需的电压幅值。涂覆密封胶是减缓安装间隙闪电击穿风险的一种有效措施。

4) 在燃油系统闪电防护安装设计中需重点关注和控制闪电防护隔离间隙的大小, 当因空间受限导致燃油管路安装间隙无法满足闪电防护隔离间距要求(通常为  $12.7 \text{ mm}^{[16]}$ )时, 可通过在间隙处涂覆密封胶减缓小间隙闪电击穿风险。

## 参考文献

[1] 王晓春, 胡挺. 飞行器雷击防护技术综述[J]. 产业与科技论坛, 2020, 19(1): 48-50.

- [2] 何征, 杨有为, 熊秀, 等. 飞机新型抗雷击复合材料研究进展[J]. 飞机设计, 2021, 41(1): 31-35.
- [3] 张起浩. 复合材料飞机雷电间接效应电磁屏蔽及影响因素分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.
- [4] 姜亮, 刘春阳, 姚永杰, 等. 飞机燃油系统闪电试验可燃气体配比研究[J]. 海军航空大学学报, 2024, 39(1): 167-172.
- [5] 李林. 大型民机复合材料整体油箱雷电、静电防护设计[J]. 民用飞机设计与研究, 2019(1): 29-33.
- [6] 熊秀, 姚永杰. 大型运输类飞机燃油系统闪电防护适航符合性试验验证方法[J]. 飞机设计, 2023, 43(1): 74-80.
- [7] 田玉雯, 张斌, 李燕. 民用飞机燃油系统闪电防护分析方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2022(2): 76-81.
- [8] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4-2011[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- [9] Department of Transportation Federal Aviation Administration. Transport Airplane Fuel System Lightning Protection: AC 25.954-1[S]. USA: Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2018.
- [10] POUT A. Lightning Protection of Fuel Tanks-A350 Certification Approach[C]//International Conference on Lightning and Static Electricity. Toulouse: ICOLSE, 2015: 201-204.
- [11] SATAKE K, YAMAMOTO S, YAMAKOSHI H, et al. Development of Electromagnetic Simulation Supporting Lightning Protection Design of Mitsubishi Regional Jet[J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2012, 49(4): 79-84.
- [12] LALONDE D, KITAYGORSKY J, TSE W, et al. Computational Electromagnetic Modeling and Experimental Validation of Fuel Tank Lightning Currents for a Transport Category Aircraft[C]//International Conference on Lightning and Static Electricity. Toulouse: ICOLSE, 2015: 115-119.
- [13] 隋立军, 马健, 邱毅. 民用飞机复合材料结构闪电防护的符合性验证[J]. 民航学报, 2020, 4(4): 65-68.
- [14] 刘德刚, 王澍, 朱德轩. 民用飞机燃油系统管路设计研究[J]. 装备制造技术, 2014(8): 223-225.
- [15] 马恬华, 代继刚. 民用飞机翼盒结构闪电环境仿真验证试验方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(4): 22-27.
- [16] 赵毅. 大型客机油箱结构雷电点火源防护验证[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1432-1437.
- [17] SAE International. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms: SAE ARP5412B-2013[S]. Washington D. C.: SAE International, 2013: 43-46.
- [18] SAE International. Aircraft Lightning Test Methods: SAE ARP5416A-2013[S]. Washington D. C.: SAE International, 2013: 94-96.

(编辑: 陈斐)