



飞机防火技术丛书

# 飞机防火技术概论

Introduction to aircraft fire  
prevention technology

张和平 陆松 张丹 刘长城 付阳阳 编著



科学出版社

飞机防火技术丛书

# 飞机防火技术概论

张和平 陆松 张丹 刘长城 付阳阳 编著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要介绍了现代飞机防火技术的基本概念和技术发展的概况,以及近年来国内外的研究成果。主要包括:飞机防火技术基础理论,飞机动力装置舱被动、主动防火技术和灭火剂浓度探测技术,飞机货舱、行李舱防火技术,飞机客舱防火技术和人员疏散研究,其他舱室防火技术,以及飞机上多种可燃物的火灾特性研究等。

本书可以作为飞机设计人员、飞机防火研究人员的参考书籍,也可以用于安全工程、飞机设计相关专业等专业研究生、高年级本科生的教学。

### 图书在版编目(CIP)数据

飞机防火技术概论/张和平等编著. —北京:科学出版社, 2017.12  
(飞机防火技术丛书)

ISBN 978-7-03-055619-6

I. ①飞… II. ①张… III. ①飞机防火-概论 IV. ①V328.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第290710号

责任编辑:胡凯 许蕾/责任校对:彭涛

责任印制:张克忠/封面设计:许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

河北鹏润印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年12月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年12月第一次印刷 印张:34 1/4

字数:812 000

定价:199.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

近年来,中国航空运输业和制造业得到了迅猛发展。作为国家战略行业,中国民航自 2012 年以来,全行业运输总周转量、旅客运输量和货邮运输量年均分别增长 12.1%、11.2%和 5.2%。截至 2016 年底,我国航空运输规模连续 12 年稳居世界第二位,仅次于美国;民航旅客周转量在综合交通运输体系中的比重达到 26.8%。在航空制造业方面,我国自行研制的支线客机 ARJ21 已经交付使用,C919 大型客机正在试飞,蛟龙 600 等型号也稳步推进,多型军用飞机的研发与生产也取得了迅猛的发展。随着飞机使用量的剧增,飞机火灾事故频发,飞机的防火安全性问题越来越凸显,引起了社会各界的关注。

安全与生存能力要求促进了飞机对防火的需求。安全主要是缓解系统或组件故障或人为错误带来的危险,而飞机生存能力往往对军用飞机而言,与飞机对威胁的敏感性和易损性相关。例如,如果没有防火措施的保护,在飞机上弹片击中的区域很可能发生火灾甚至爆炸。飞机防火设计的目标是尽可能减少火灾发生的可能性,并将火灾发生后的危害最小化。

飞机火灾的孕育、发生和发展包含着湍流流动、相变、传热传质和复杂化学反应等物理化学作用,是一种涉及物质、动量、能量和化学组分在复杂多变的环境条件下相互作用的三维、多相、多尺度、非定常、非线性、非平衡态的动力学过程,该动力学过程还与作为外部因素的飞机使用者、飞机材料、机舱环境及其他干预因素等发生相互作用。由于火灾现象自身的复杂性和随机性,以及飞机构造和运行环境的多样性,飞机防火技术涉及总体布置、结构、动力系统、燃油系统、环控系统、飞控系统、液压系统、起落架系统、航电系统、电气系统等多个专业。航空工业发达的美国,从 20 世纪初期就逐步认识到飞机防火技术的重要性,美国军方至少早在 1927 年就已经开始涉及飞机防火领域。但是,在民机领域,国外厂商只愿提供产品,却在技术输出上设置壁垒,拒绝合作;在军机领域,欧美发达国家对我国实施严格的技术封锁。相比较而言,我国在航空防火领域的起步较晚,从产品性能到技术标准都落后于西方发达国家,飞机防火技术的薄弱已经制约了我国飞机防火能力的提高以及航空运输和制造业的发展。因此,自主创新,是改变我国航空防火技术落后局面的唯一出路。

为了更好地提高对飞机防火技术的认识,本书以火灾科学、化学反应热力学、安全系统工程理论、飞机防火设备工作原理为基础,对飞机火灾的危险性、飞机火灾探测和灭火机理、飞机材料火灾危险性、飞机防火技术试验验证方法等方面取得的最新研究成果进行全面论述。其中,本书作者在飞机灭火剂浓度测试设备和技术、飞机货舱火灾动力学、飞机干舱固体推进式灭火技术、航空锂电池和镁合金的火灾安全问题等方面的研究属国内独创性工作。

全书共6章,由张和平、陆松、张丹、刘长城、付阳阳等共同编写,张和平对全书进行了统稿。其中,第1章主要介绍飞机火灾事故、燃烧学和灭火基础理论,以及飞机防火设计的主要技术措施,由张和平、陆松、袁伟、曹承阳编写。第2章主要论述飞机动力装置舱防火技术和灭火剂浓度测试设备,由陆松、陈龙、管雨、胡洋、袁伟、曹承阳编写。第3章论述飞机货舱和行李舱防火技术,由刘长城、王洁、杨慎林、郑荣、程元、陶能、赵军超、陈祝桥编写。第4章讲述飞机客舱防火技术,由张丹、付阳阳、钱汉杰、程元、杨维华编写。第5章介绍飞机其他舱室防火技术,并简介直升机防火技术,由付阳阳、张丹、刘长城、陈阳、赵军超、陶能编写。第6章介绍飞机典型可燃物火灾特性研究的情况,由付阳阳、刘长城、张丹、龚伦伦、陈龙编写。程旭东、杨晖、周勇、龚伦伦、赵建华、秦俊等对全书进行了校审。王民强、余达恒、杨维华、刘鑫、陈龙等对本书编写工作给予了指导和支持。

本书作者在撰写过程中,引用了国内外同行的相关研究成果,在此一并表示感谢。本书是作者团队多项科研项目研究成果的结晶,得到了火灾科学国家重点实验室自主研究课题“飞机火灾动力学与防控关键技术及装备研究”(SA1301),中央高校基本科研业务费专项资金项目“飞机货舱环境火灾烟气热物理特性与颗粒形貌研究”(WK2320000028)、“航空固体推进式灭火装置内推进剂的制备与性能研究”(WK2320000030)、“一种用于固体推进式灭火装置内的新型推进剂的制备与性能研究”(WK6030000030),中国科学技术大学先进技术研究院创新基金重点研发项目“先进飞机货舱火灾探测技术研究与应用”,中航工业天津航空机电有限公司“飞机防火系统四项大型非标试验设备研发项目”(ES2320000239)、“光学火警探测器性能综合测试装置”(ES2320000246)等项目的资助。在此衷心感谢科技部、中科院、教育部等部门和中航工业天津航空机电有限公司在研究经费上给予的大力资助。

虽然作者在编写过程中尽了最大努力,但由于水平能力有限,疏漏或不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2017年9月

## 缩 略 词 表

### A

|      |            |
|------|------------|
| AIAA | 美国航空航天工业协会 |
| AIMS | 飞机飞行监控系统   |
| ALPA | 美国飞行员协会    |
| AMAD | 机身安装辅助驱动器  |
| APU  | 辅助动力装置     |

### C

|      |           |
|------|-----------|
| CAA  | 美国民用航空管理局 |
| CAAC | 中国民航总局    |
| CACP | 客舱区域控制面板  |
| CCAR | 中国民用航空规章  |
| CFD  | 计算流体动力学   |
| CFR  | 美国联邦航空法规  |
| CHF  | 临界点燃热流    |
| CMS  | 中央监控系统    |
| CSCP | 客舱系统控制面板  |

### D

|            |                  |
|------------|------------------|
| DIRRACS I  | 第一代差分红外快速灭火剂测试设备 |
| DIRRACS II | 第二代差分红外快速灭火剂测试设备 |
| DMU        | 滤湿调节器            |
| DNS        | 直接数值模拟           |
| DSC        | 差示扫描量热法          |
| DSP        | 数字信号处理           |
| DTG        | 微商热重             |
| EFB        | 电子飞行包            |

### E

|       |              |
|-------|--------------|
| EICAS | 发动机指示和机组报警系统 |
| EWIS  | 电气线路互联系统     |

FAA 美国联邦航空局

## F

FDS 火灾动力模拟  
FEAS 灭火剂浓度探测器  
FED 有效剂量分数  
FGI 火势增长指数  
FM 美国工厂联合保险商实验室  
FMECA 故障模式、影响及危害性分析  
FMU 燃油计量单元  
FPI 火灾性能指数  
FRACAS 故障报告、分析与纠正措施系统  
FTIR 傅氏转换红外线光谱分析仪

## G

GEM 绿色高能化合物  
GTC 燃气轮机压缩机  
GWP 全球暖化潜势

## H

HRD 高速释放  
HRR 热释放速率

## I

IATA 国际航空运输协会  
ICAO 国际民航组织  
IFE 飞行娱乐系统  
IR 红外

## J

JAA 美国联合航空局  
JAR 美国联合适航要求  
JFS 喷气燃料启动器

## K

KPP 性能关键参数

**L**

|       |            |
|-------|------------|
| LES   | 大涡模拟       |
| LFL   | 燃烧下限       |
| LOAEL | 最低可见有害作用水平 |
| LOI   | 氧指数        |
| LRD   | 低速释放灭火瓶    |

**M**

|        |            |
|--------|------------|
| MCA    | 英国海事和海岸警备局 |
| MFHBF  | 平均故障间隔飞行小时 |
| MLR    | 质量损失速率     |
| MMH/FH | 每飞行小时的维护人时 |
| MTBF   | 平均故障间隔时间   |

**N**

|        |                      |
|--------|----------------------|
| NACA   | 美国国家航空咨询委员会          |
| NAFEC  | (美国) 国家航空设备试验中心      |
| NASA   | 美国国家航空航天局            |
| NAVAIR | 美国海军司令部              |
| NAWCWD | 美国海军空战中心武器分部武器战斗力实验室 |
| NGP    | 美国下一代灭火技术研究中心        |
| NIST   | 美国国家标准技术研究院          |
| NOAEL  | 无明显损害作用水平            |
| NTSB   | 美国交通运输安全委员会          |

**O**

|     |         |
|-----|---------|
| ODP | 臭氧消耗潜能值 |
| OEU | 天花板电子单元 |

**P**

|      |              |
|------|--------------|
| PCB  | 印制电路板        |
| PED  | 便携式电子设备      |
| PHHR | 热释放速率峰值      |
| PMLR | 质量损失速率峰值     |
| PRF  | Purdue 研究基金会 |

## R

|      |               |
|------|---------------|
| RANS | 雷诺平均和纳维斯托克斯方程 |
| RH   | 相对湿度          |

## S

|      |             |
|------|-------------|
| SEI  | 固体电解质界面膜    |
| SEM  | 场发射扫描式电子显微镜 |
| SNAP | 美国环保局新替代物政策 |
| SOC  | 荷电状态        |
| SPGG | 固体推进式气体发生器  |
| SPS  | 二次能源系统      |

## T

|     |            |
|-----|------------|
| TDP | 哈龙替代技术发展项目 |
| TG  | 热重分析       |
| THR | 总释放热       |
| TMO | 过渡金属氧化物    |
| TSB | 加拿大运输安全委员会 |
| TTI | 点燃时间       |

## U

|      |          |
|------|----------|
| UFL  | 燃烧上限     |
| UL   | 美国保险商实验室 |
| UN   | 联合国      |
| USAF | 美国空军     |
| USN  | 美国海军     |
| UV   | 紫外线      |

## W

|      |               |
|------|---------------|
| WADC | Wright 空气开发中心 |
|------|---------------|

## X

|     |        |
|-----|--------|
| XRD | X 射线衍射 |
|-----|--------|

# 目 录

前言

缩略词表

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1 概述 .....                     | 1  |
| 1.1 飞机火灾事故 .....               | 3  |
| 1.1.1 飞机火灾事故的危害 .....          | 3  |
| 1.1.2 飞机火灾事故发生位置和所处的飞行阶段 ..... | 9  |
| 1.1.3 飞机火灾事故发生的影响因素 .....      | 13 |
| 1.1.4 飞机火灾事故特点 .....           | 15 |
| 1.2 燃烧学基础理论 .....              | 16 |
| 1.2.1 燃烧条件 .....               | 16 |
| 1.2.2 燃烧类型及其特点 .....           | 20 |
| 1.2.3 燃烧方式与燃烧产物 .....          | 23 |
| 1.2.4 飞机火灾的燃烧特性 .....          | 28 |
| 1.3 飞机灭火基础理论 .....             | 32 |
| 1.3.1 飞机火灾等级划分 .....           | 32 |
| 1.3.2 灭火原理与灭火剂 .....           | 33 |
| 1.3.3 卤代烷灭火机理 .....            | 35 |
| 1.3.4 卤代烷灭火剂 .....             | 36 |
| 1.3.5 卤代烷灭火剂灭火效率测定 .....       | 44 |
| 1.4 飞机防火技术基本知识 .....           | 45 |
| 1.4.1 飞机防火设计简介 .....           | 45 |
| 1.4.2 飞机火灾风险区域 .....           | 47 |
| 1.4.3 防火系统的功能与设计简介 .....       | 50 |
| 1.4.4 防火系统特性 .....             | 65 |
| 本章参考文献 .....                   | 69 |
| 2 飞机动力装置舱防火技术 .....            | 70 |
| 2.1 飞机动力装置舱 .....              | 72 |
| 2.1.1 发动机短舱 .....              | 72 |
| 2.1.2 其他动力装置舱室 .....           | 73 |
| 2.1.3 动力装置舱火灾 .....            | 73 |
| 2.2 被动防火系统 .....               | 75 |

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 2.2.1 | 火区                    | 75  |
| 2.2.2 | 防火墙                   | 77  |
| 2.2.3 | 发动机舱内的可燃液体及其输送组件      | 79  |
| 2.2.4 | 发动机舱其他结构              | 81  |
| 2.2.5 | 飞机辅助动力装置被动防火技术        | 82  |
| 2.3   | 主动防火系统                | 83  |
| 2.3.1 | 火灾探测系统                | 83  |
| 2.3.2 | 灭火系统                  | 95  |
| 2.4   | 灭火剂浓度测试技术             | 114 |
| 2.4.1 | 基于压差原理的灭火剂浓度测试技术      | 115 |
| 2.4.2 | 基于红外吸收的灭火剂浓度测试技术      | 125 |
| 2.4.3 | 基于热线/热膜原理的灭火剂浓度测试技术简介 | 146 |
| 2.4.4 | 飞机发动机舱灭火剂用量试验验证与优化研究  | 148 |
|       | 本章参考文献                | 153 |
| 3     | 飞机货舱和行李舱防火技术          | 155 |
| 3.1   | 货舱和行李舱火灾              | 155 |
| 3.1.1 | 货舱和行李舱火灾案例            | 156 |
| 3.1.2 | 货舱和行李舱火灾特点            | 157 |
| 3.2   | 被动防火系统                | 163 |
| 3.2.1 | 货舱等级分类                | 163 |
| 3.2.2 | 货舱和行李舱材料              | 166 |
| 3.2.3 | 通风以及烟气蔓延的控制           | 167 |
| 3.3   | 火灾探测系统                | 170 |
| 3.3.1 | 系统功能与组成               | 170 |
| 3.3.2 | 飞机货舱火灾探测系统相关规定        | 173 |
| 3.3.3 | 探测器抗干扰性能              | 179 |
| 3.3.4 | CFD 软件在火灾探测系统设计中的应用   | 213 |
| 3.4   | 灭火系统                  | 217 |
| 3.4.1 | 系统功能与组成               | 217 |
| 3.4.2 | 低速灭火系统滤湿调节器研制         | 221 |
| 3.4.3 | 货舱/行李舱哈龙替代灭火技术试验方法    | 238 |
|       | 本章参考文献                | 251 |
| 4     | 飞机客舱防火技术              | 253 |
| 4.1   | 客舱火灾简介                | 253 |
| 4.1.1 | 客舱防火简介                | 255 |
| 4.1.2 | 客舱典型火灾案例              | 257 |
| 4.1.3 | 客舱火灾特点及危险性评价标准        | 260 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 4.1.4 客舱火灾研究现状 .....          | 262 |
| 4.2 被动防火系统 .....              | 263 |
| 4.2.1 客舱材料防火性能要求 .....        | 264 |
| 4.2.2 客舱材料防火性能研究 .....        | 265 |
| 4.3 火灾探测系统 .....              | 272 |
| 4.3.1 客舱火灾探测 .....            | 272 |
| 4.3.2 盥洗室火灾探测 .....           | 273 |
| 4.4 灭火系统 .....                | 274 |
| 4.4.1 客舱手提式灭火器 .....          | 274 |
| 4.4.2 盥洗室自动灭火器 .....          | 275 |
| 4.4.3 不同灭火系统灭客舱火灾的有效性研究 ..... | 277 |
| 4.5 人员疏散 .....                | 280 |
| 4.5.1 人员疏散设计要求 .....          | 280 |
| 4.5.2 人员疏散的计算机模拟研究 .....      | 280 |
| 4.5.3 人员疏散的影响因素 .....         | 283 |
| 4.5.4 客舱应急出口 .....            | 285 |
| 4.6 客舱火灾计算机模拟 .....           | 290 |
| 4.6.1 客舱火灾模拟技术 .....          | 290 |
| 4.6.2 客舱火灾模拟研究现状 .....        | 290 |
| 本章参考文献 .....                  | 292 |
| 5 飞机其他舱室防火技术与直升机防火系统简介 .....  | 295 |
| 5.1 轮舱防火技术 .....              | 295 |
| 5.1.1 轮舱火灾危险性 .....           | 295 |
| 5.1.2 轮舱简介 .....              | 296 |
| 5.1.3 轮舱探测技术 .....            | 296 |
| 5.2 干舱防火技术 .....              | 299 |
| 5.2.1 干舱火灾危险性 .....           | 299 |
| 5.2.2 干舱简介 .....              | 300 |
| 5.2.3 干舱遭受射弹袭击后的引火源计算 .....   | 302 |
| 5.2.4 干舱灭火技术 .....            | 306 |
| 5.3 设备舱防火技术 .....             | 356 |
| 5.3.1 设备舱简介 .....             | 356 |
| 5.3.2 设备舱火灾探测技术 .....         | 357 |
| 5.3.3 设备舱环境的特殊控制系统 .....      | 359 |
| 5.4 直升机防火系统简介 .....           | 360 |
| 5.4.1 直升机固定式防火系统组成 .....      | 360 |
| 5.4.2 直升机固定式灭火系统性能要求 .....    | 362 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 5.4.3 灭火实施系统 .....                    | 365 |
| 5.4.4 固定装置 .....                      | 366 |
| 本章参考文献 .....                          | 367 |
| 6 飞机典型可燃物火灾特性研究 .....                 | 373 |
| 6.1 飞机典型可燃材料概述 .....                  | 373 |
| 6.1.1 飞机隔热/隔音材料简介 .....               | 374 |
| 6.1.2 飞机座椅材料简介 .....                  | 374 |
| 6.1.3 飞机其他材料简介 .....                  | 375 |
| 6.2 飞机材料火灾特性试验方法 .....                | 379 |
| 6.2.1 飞机隔热/隔音材料的可燃性和火焰蔓延特性的试验方法 ..... | 379 |
| 6.2.2 飞机隔热/隔音材料抗烧穿性的试验方法 .....        | 387 |
| 6.2.3 飞机座椅材料 .....                    | 395 |
| 6.2.4 货舱衬垫抗火焰烧穿性试验方法 .....            | 399 |
| 6.2.5 热辐射下客舱材料热释放速率的试验方法 .....        | 402 |
| 6.3 航空电缆 .....                        | 407 |
| 6.3.1 电缆相关规范和适航要求 .....               | 407 |
| 6.3.2 航空电缆燃烧特性 .....                  | 408 |
| 6.3.3 电缆火防治技术 .....                   | 412 |
| 6.4 锂电池 .....                         | 413 |
| 6.4.1 航空电池分类 .....                    | 413 |
| 6.4.2 锂电池航空运输安全规范和适航要求 .....          | 414 |
| 6.4.3 锂电池火灾危险性 .....                  | 418 |
| 6.4.4 锂电池可燃性评估 .....                  | 469 |
| 6.4.5 锂电池火灾探测技术 .....                 | 474 |
| 6.4.6 锂电池火灾灭火技术 .....                 | 476 |
| 6.5 镁合金 .....                         | 480 |
| 6.5.1 镁合金材料在飞机上的应用 .....              | 480 |
| 6.5.2 镁合金材料的火灾危险性 .....               | 481 |
| 6.5.3 镁合金火灾防治技术 .....                 | 493 |
| 6.5.4 镁合金座椅框架燃烧器测试 .....              | 495 |
| 6.6 航空煤油和液压油 .....                    | 512 |
| 6.6.1 航空煤油 .....                      | 512 |
| 6.6.2 航空液压油 .....                     | 516 |
| 本章参考文献 .....                          | 519 |
| 索引 .....                              | 529 |

# 1 | 概 述

从航空历史的初期开始,飞行中的火灾就成为严重的航空安全隐患<sup>[1]</sup>。航空业最早的致命事故就是由一起不可控的飞行中火灾引起的。1785年6月15日,奇埃和罗曼乘坐氢气和热空气并用的气球跨越英吉利海峡,不幸在空中失火坠毁,成为航空史上最早的殉难者,人类的“飞天之路”从起步就交织着浪漫与悲壮。随着航空运输业的发展,飞机火灾事故造成的损失也日益增大。根据1972~2012年发生的7类危险事件共345次事故/事故征候数据<sup>[2]</sup>,火灾/烟雾是发生次数最多的危险事件,造成的死亡人数也最多。发生火灾/烟雾时,往往引起较为严重的事故,并且有较高的事故死亡率,发生火灾/烟雾的事故平均单次死亡人数为35.65人。

安全与生存能力要求促进了飞机对防火的需求。安全主要是缓解系统或组件故障或人为错误带来的危险,而生存能力与飞机对威胁的敏感性和易损性相关。当火灾是由于组件损坏造成的,即认定为安全相关的火灾,这可能是由于设计不当,或是机械故障,比如机械疲劳或维护过失,导致易燃液体接触一个一直暴露的引火源,或是自身同时具有易燃液体和引火源。飞机生存能力往往对军用飞机而言。例如,飞机生存能力有关的火灾是指如果没有防护措施,在飞机上弹片击中的区域很可能发生火灾甚至爆炸。

飞机防火设计的目标是尽可能减少火灾发生的可能性,并将火灾发生后的危害最小化<sup>[3]</sup>。飞机设计主要考虑的因素是重量、性能和成本。飞机性能关键参数(KPP)包括高度、速度和阻力,这些都受到重量的影响。飞机项目负责人和飞机设计工程师一直在为飞机上的任何系统寻求最低的重量。例如,建立防火系统规范可能需要建立额外的防火能力。实际情况下,飞机能不能在结构上兼容安装额外的灭火剂容器,需要进行风险交易分析评估未安装灭火瓶的风险,包括导致飞机失事的失控火灾的概率分析(换句话说,也就是使用了灭火瓶,没有减轻飞机重量的风险)。如果认为风险可接受,那么提供灭火瓶的要求将被移除或放弃。飞机上火灾的发生和抑制都是概率性的。这种概率性的评估在确定以下几点设计中发挥了重要作用:是否采用该灭火系统;或者如果采用了,系统的类型是主动还是被动;以及如果采用了该系统,是否将在所有飞行和任务条件下提供防火保护。显然,只有对飞机防火技术和飞机的火灾分析有足够充分的认识,才能在飞机关键性能和飞机防火措施的取舍中做出正确的选择。

航空工业发达的美国,从20世纪初期就逐步认识到飞机防火技术的重要性。美国国家航空咨询委员会(NACA)对大量文献汇编进行了总结调查,包括飞机火灾难点,防火措施,火灾探测,火灾抑制,燃料箱爆炸危险和惰化。这表明美国陆军部至少早在1927年就已经开始涉及飞机防火领域。1938年,刚好在第二次世界大战之前,空中发动机舱引起的火灾问题使得美国民用航空管理局(CAA)扩大其飞机防火、灭火的测试程序。

根据第二次世界大战的实战数据,按事故数量由多到少的顺序排列,发动机损坏,冷却和润滑子系统,燃油系统和飞行控制系统更有可能造成飞机失事,并且大多数飞机失事是由着火引起的。第二次世界大战后进行的调查结果表明,为了抑制火灾的发生明显需要较低挥发性的燃料,并将传送易燃液体的部件与引火源分离。此外还认识到,在飞行期间燃料箱内的燃料-空气混合物有时候是可燃的,有时候却是不可燃的,这取决于飞行条件。调查结果特别强调了发动机为主要引火源。发动机故障仍然是飞行中点燃易燃液体的最常见原因。由于我国航空工业发展较晚,从技术积累上看,我国与航空工业发达的美国相比,在飞机防火技术研究体系和防火系统设计上还存在较大差距。

与民用飞机相比,作战环境使军用飞机遭受弹片击中和更高级别的风险。这些风险可能是燃烧的或非燃烧的。下面以美军为例,美军在韩国和东南亚的军事冲突以及对这些冲突中的飞机作战失事数据的分析表明<sup>[4]</sup>,由于燃油系统相关损坏造成的火灾占据了主要部分,飞机失事主要是由于击中了燃油系统。对越南冲突造成的飞机失事原因分析表明,一半是由于燃油火灾和爆炸造成的,其中一半是由于飞机上干舱的燃料爆炸造成的。根据美国空军(USAF)的估计,1966至2025年间,由于火灾原因造成运营和战斗飞机的失事,预计造成超过300亿美元的损失。而同一时期用于飞机防火的费用估计低于10亿美元。因此,应该进一步加大对飞机防火技术研究与应用投入。

如果飞机配备完善的飞机防火系统,不仅可以减少火灾事故的发生,即使发生火灾后,还应该可以延缓飞机从发现火灾到飞机降落的时间。加拿大运输部(Transportation Safety Board of Canada, TSB)和美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)对飞行中烟火事件的时间特征做过专项研究。研究显示,当一起飞行中烟火事件发生时,可用来控制和消灭火源的时间非常短暂,一般从发现火源到飞机撞击水面或地面的时间为5~35min。TSB选取了1964年1月至1989年9月的15起飞行中火灾事故,这些事故主要都发生于机身内部(货舱、客舱、驾驶舱),不包括发动机起火和爆炸等。结果显示,从一起飞行中火灾被发现到飞机实施紧急迫降,飞机安全着陆或不幸坠毁的平均时间为17min。如果飞机装备有完善的防火系统就可以延长机组控制和消灭火源的可用时间,进而减少灾难的发生。

对军用飞机而言,飞机防火系统对提高战斗人员安全方面的意义是非常明显的。据估计,在降落地点和救援地点之间的时间差异一般为5min飞行时间。因此,如果能够提高飞机的防火能力,处理主要的运行故障风险以及战斗风险,可能会提高机组人员生存和救援的概率。

综上所述,发展飞机防火技术对我国民用和军用航空工业的发展都是非常必要的,本书将通过6章的内容对现代飞机防火技术进行系统的介绍,希望有助于读者了解飞机防火的技术原理、研究方法和发展趋势,进而为推动我国飞机防火技术的发展做出微薄的贡献。

## 1.1 飞机火灾事故

### 1.1.1 飞机火灾事故的危害

#### 1.1.1.1 航空器事故与事故征候

飞机火灾事故属于航空器事故的一种,下面首先介绍航空器事故与事故征候的定义。

##### 1. 航空器事故

世界各国民用航空对航空器事故的定义都依照国际民航组织(ICA0)的定义。《国际民用航空公约》附件 13《航空器事故和事故征候调查》对航空器事故定义如下:在任何人登上航空器准备飞行直至所有这类人员下了航空器为止的时间内,所发生的与该航空器的运行有关的事件,在此事件中造成了:人员遭受致命伤或重伤、航空器受到损害或结构故障或者造成航空器失踪或处于完全无法接近的地方。

根据国标 GB14648—1993《民用航空器飞行事故等级》将飞行事故分为特别重大飞行事故、重大飞行事故和一般飞行事故三个等级。

##### (1) 特别重大飞行事故

凡属下列情况之一者为特别重大飞行事故:①人员死亡,死亡人数在 40 人及以上者;②航空器失踪,机上人员在 40 人及以上者。

##### (2) 重大飞行事故

凡属下列情况之一者为重大飞行事故:①人员死亡,死亡人数在 39 人及以下者;②航空器严重损坏或迫降在无法运出的地方(最大起飞重量 5.7t 及以下的航空器除外);③航空器失踪,机上人员在 39 人及以下者。

##### (3) 一般飞行事故

凡属下列情况之一者为一般飞行事故:①人员重伤,重伤人数在 10 人及以上者;②最大起飞重量 5.7t(含)以下的航空器严重损坏,或迫降在无法运出的地方;③最大起飞重量 5.7~50t(含)的航空器一般损坏,其修复费用超过事故当时同型或同类可比新航空器价格的 10%(含)者;④最大起飞重量 50t 以上的航空器一般损坏,其修复费用超过事故当时同型或同类可比新航空器价格的 5%(含)者。

##### 2. 航空器事故征候

《国际民用航空公约》附件 13《航空器事故和事故征候调查》对事故征候做出如下定义:事故征候不是事故,而是与航空器的操纵使用有关、会影响飞行安全的事件。中国民用航空行业标准 MH/T2001—2013《民用航空器事故征候》中关于航空器事故征候的定义为:在航空器运行阶段或在机场活动区内发生的与航空器有关的,不构成事故但影响或可能影响安全的事件,分为运输航空严重事故征候、运输航空事故征候、通用航

空事故征候和航空器地面事故征候。

### 1.1.1.2 飞机火灾事故/事故征候

由于载油量大、载客量大、逃生困难,火灾是民用飞机最大的安全威胁之一。飞机防火安全是适航当局、飞机制造商和运营商最为关注的安全问题。多年来,FAA 定期更新的“运输类飞机关注问题清单”中一直将飞行结构防火、复合材料机身防火、货舱防火、易燃液体防火等防火安全问题作为飞机型号合格审定的重点关注问题。美国交通运输安全委员会(NTSB)于 2014 年再次将“改进交通运输防火安全”列入其“最希望得到改进的问题清单”。

根据航空安全网(Aviation Safety Network)对 13 个方面造成事故的主要因素的分类,13 个因素包括:飞机、空管和导航、货物、碰撞、外部因素、飞行机组、火灾、起飞/着陆、维修、意外结果、安保、天气、未知因素。有货物和火灾两个因素和飞机火灾事故相关。货物(cargo occurrences)因素是指造成事故的包括货物装配、起火、过载等因素。火灾是指包括机库、地面及飞行中发生的火灾。

根据王敏芹和郭博智<sup>[2]</sup>所收集的 345 次事故/事故征候数据,数据统计了 1972~2012 年发生的 7 类危险事件,如表 1-1 所示。发生危险的 65 次事故/28 次事故征候,其中特别重大事故 8 次、重大事故 21 次、一般事故 36 次。统计发生火灾烟雾的事故征候 6 次、事故 20 次,其中特别重大事故 5 次、重大事故 5 次、一般事故 10 次,重大和特别重大事故共占事故发生总数的 50%。可以看出死亡人数最多的是火灾/烟雾危险。火灾/烟雾是发生次数最多的危险事件。发生火灾/烟雾时,往往引起较为严重的事故,并且有较高的事故死亡率(发生火灾/烟雾的事故平均单次死亡人数为 35.65 人)。

烟雾事件作为飞行中火灾事故的初期征兆,其防范的重要性受到航空业的普遍关注,如果不能及时有效地控制烟气蔓延,就很可能造成重大火灾事故。国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)收集的数据显示,平均每年有大于 1000 起飞行中烟气事件发生,导致大于 350 起非正常或预防性的着陆事件。

表 1-1 危险事件发生统计

| 危险事件    | 事故征候次数 | 事故次数 |      |        | 死亡人数 |
|---------|--------|------|------|--------|------|
|         |        | 一般事故 | 重大事故 | 特别重大事故 |      |
| 火灾/烟雾   | 6      | 10   | 5    | 5      | 713  |
| 客舱失压    | 9      | 5    | 3    | 1      | 356  |
| 雷击      | 1      | 1    | 1    | 0      | 0    |
| 轮胎爆破    | 5      | 9    | 0    | 0      | 2    |
| 鸟撞      | 0      | 1    | 2    | 0      | 0    |
| 擦尾      | 4      | 1    | 3    | 0      | 0    |
| 发动机空中停车 | 3      | 9    | 7    | 2      | 281  |
| 合计      | 28     | 36   | 21   | 8      | 1352 |