

文章编号:1674-8190(2020)05-657-07

航空锂电池适航审定规章解读及符合性方法研究

马迎坤, 邱毅

(中国民用航空适航审定中心西安航空器审定中心, 西安 710065)

摘要: 锂离子电池作为动力电池有着优异的性能,在民航行业上有广阔的应用前景。但行业对其技术特征和安全风险的认识还不充分,现行的规章条款缺乏足够的安全要求,国外局方针对锂离子电池颁发了专用条件,但回顾相关事故可以发现,锂离子电池的验证和审查环节还不完善,相关条款更新修正的步伐也同锂电池的发展现状和技术水平不相适应。以航空锂电池事故为例,分析航空锂离子电池作为动力电池的安全性风险,从对现有规章条款和专用条件的解读出发,借鉴不同行业近年来积累的锂电池验证和使用经验,针对航空动力电池的适航符合性方法提出一些改进方案,可作为现有锂电池适航符合性方法的有益补充,为自主建立健全适航验证规范体系做出探索。

关键词: 锂离子电池;专用条件;适航;符合性方法;规章

中图分类号: V242.2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.05.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Interpretation of Airworthiness Certification Regulations and Research on Means of Compliance for Aircraft Lithium-ion Battery

MA Yingkun, QIU Tao

(Xi'an Aircraft Certification Center, Airworthiness Certification Center, CAAC, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the best comprehensive performance, Li-ion batteries are widely applied to civil aviation. As the research of its technical characteristics and security risks are defective, and the applicable airworthiness regulations are short of safety standards, foreign administrator issued special conditions, which containing the additional safety standards. Nevertheless, the investigation report of Li-ion batteries fire in aircraft showed that the validation and certification of Li-ion batteries were defective, and the update of standards fell behind the development of Lithium-ion batteries. The risk of Li-ion batteries as an aviation power is analyzed, the existing regulations and special conditions are interpreted, and suggestions for airworthiness means of compliance are provided. Combined with experiences of service and verification, these suggestions will supplement airworthiness means of compliance, improve the verification standard system, and explore the autonomous foundation of standards.

Key words: Li-ion batteries; special conditions; airworthiness; means of compliance; regulations

收稿日期:2020-06-02; 修回日期:2020-08-05

通信作者:马迎坤, mayk_acc@caac.gov.cn

引用格式:马迎坤, 邱毅. 航空锂电池适航审定规章解读及符合性方法研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 657-663.

MA Yingkun, QIU Tao. Interpretation of airworthiness certification regulations and research on means of compliance for aircraft lithium-ion battery[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5): 657-663. (in Chinese)

0 引言

航空蓄电池是民用飞机上的应急电源和辅助备用电源,用于保障机上重要仪表和关键系统在失去主供电能源时的正常运行和地面辅助发电机的启动^[1-3]。传统客机广泛使用镍镉电池作为蓄电池,但镍镉电池存在充放电电流小、能量密度低等缺点,限制了飞机性能的进一步提升。

相比而言,锂离子电池(下文简称锂电池)在上述性能方面有明显优势,民用飞机制造商开始尝试在新产品上使用锂离子电池^[4-5]。其中,波音 787 飞机是全球第一款使用锂离子蓄电池的运输类民航客机。在对波音 787 飞机进行适航审定时,美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration,简称 FAA)认为机上安装的可充电锂电池是新颖独特的设计,现行航空规章《运输类飞机适航标准》^[6]的安全要求不足,因此针对可充电锂电池制定了专用条件 25-359-SC,并列入波音 787 的审定基础^[7]。然而在 2013 年飞机投入运行不久就相继发生多起锂电池起火事故,并导致飞机停飞整改。这一事件暴露出民航业界对锂电池的安全性认识不足,在设计、验证、审查和维护等环节缺乏足够的经验^[8-9]。

中国拥有丰富的锂矿产资源和完整的锂电池产业链,是全球最大的锂电池生产基地和消费市场,在交通运输、消费电子、移动基站等领域,锂电池都有广泛的应用,装机容量和技术水平居于全球领先地位。技术的进步和经验的积累推动着国内锂电池行业的安全性标准和验证规范不断完善。在安全性标准上,V. Ruiz 等^[10]、邵杰等^[11]、杨杰等^[12]和祝夏雨等^[13]分别对锂电池行业众多现行标准进行解读对比,并结合各自行业的实际经验,对锂电池的试验验证规范明确了改进方向;在验证规范上,对于关键的锂电池热特性试验和安全性评估方法,林深^[14]和王莉等^[15]通过深入研究,提出了新的思路。

在民用航空领域,对于锂电池安全性标准和验证规范的研究相对较少,吴浩文^[16]、曹涛等^[17]在参考借鉴国外局方审定经验的基础上,对航空蓄电池的适航规章和非充电锂电池的专用条件进行了解读;隋立军等^[9]则从规章角度出发,对锂电池安

装提出了适航验证要求。目前关于航空锂电池符合性验证方法的研究还是以参考和借鉴国外局方审定经验为主,现有验证方法在充分性、完整性和可追溯性上存在的问题未得到有效改进,相关技术标准更新也相对滞后。

尽早利用我国锂电池的产业优势和技术实力,自主完善航空锂电池相关规范,对于新技术的应用和国际标准话语权的提升都有促进作用。本文以波音 787 客机动力电池燃烧事故为例,分析航空锂离子电池作为动力电池的安全性风险,从对现有规章条款和专用条件的解读出发,借鉴锂电池行业最新积累的验证和使用经验,针对航空动力电池的环境试验、电气安全性测试、热稳定性测试和功能性测试等符合性验证试验方法提出完善和改进方案。

1 锂电池及其安全性风险

1.1 锂电池性能

锂离子电池是由正极材料、负极材料、隔膜、电解液和其他一些附件构成的。锂电池的电解液与传统电池(铅酸电池、镍镉电池等)不同,为有机溶剂,电解质材料为无机阴离子锂盐,是离子导体、电子绝缘体。隔膜位于正负电极之间,起隔断电子和透过离子的作用,使电子必须从外电路迁移,而离子则可以通过电解液移动,保证外电路有电流通过,防止电池内短路。锂离子电池的正极材料一般选择嵌锂的金属氧化物,常见的正极材料有钴酸锂、锰酸锂、磷酸铁锂和镍钴锰酸锂等,不同的正极材料使锂电池在充放电功率、成本、高低温稳定性、循环寿命、能量密度等性能上表现差异,因此需要根据应用场合的不同,选用不同性能的锂电池。

虽然不同种类的锂电池性能也有较大差距,但是同现有的镍镉电池比较,锂电池的明显优势表现在^[18]:

(1) 高能量密度:现阶段不同种类锂电池单体的能量密度可以达到 150~300 Wh/kg,且性能还在不断提升,而镍镉电池的能量密度约为 60 Wh/kg。

(2) 功率密度大,连续放电电流高:锂电池的功率密度是镍镉电池的 2 倍以上,相同容量下,锂

电池充放电电流远远高于镍镉电池,采用锂电池可以满足更大的负载。

(3) 工作温度范围宽:锂电池的工作温度区间为充电 $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,放电 $-30\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$;镍镉电池的工作温度区间为充电 $0\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$,放电 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而锂电池可以在更极端的环境下工作。

(4) 自放电率低,无记忆效应:锂电池没有记忆效应,自放电率比镍镉电池低 50% 以上,可以长时间保存,降低维护成本。

1.2 锂电池安全性风险

锂电池存储了大量的能量,一旦电池发生安全性失效导致意外的能量释放,则可能引发严重的安全事故。锂电池安全性失效模式主要表现为燃烧爆炸、发热起火、膨胀变形、漏气漏液等,失效的核心原因是电池发生热失控。目前发生的多起航空动力电池燃烧事故,根据调查显示,其原因即为电池单体出现内短路,电流升高产生热量并不断积累,引发发热失控,最终导致整个电池系统失效并起火燃烧^[4]。电池在过充电、过放电、短路或极端温度下都有可能引发热失控,且锂电池含有活泼的锂金属物质和具有可燃性的有机电解液,一旦起火,对整机危害极大。因此大容量的锂电池通常采用多重安全保护措施,锂电池系统的典型结构如图 1 所示^[19],除了电池单体,电池系统箱体内通常还要集成过流保险、热管理装置和电池管理系统等,从而实现监控电池单体状态、预警安全风险、管理充放电电流、调节系统温度等功能。

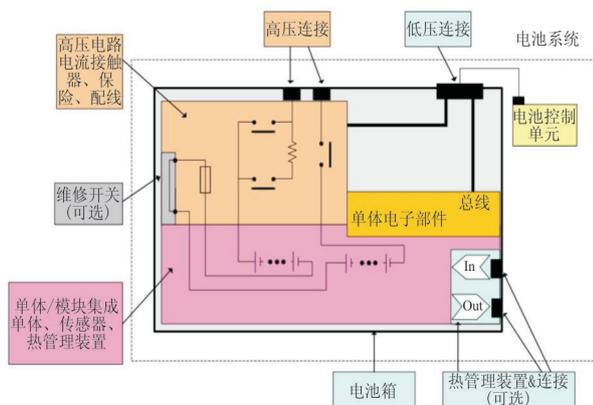


图 1 含电池控制单元的电池系统典型结构

Fig. 1 Typical configuration of battery system with battery control unit

2 锂电池适航规章

2.1 条款解读

在针对蓄电池进行适航审定时,现阶段主要参考 FAA 针对机上安装的可充电锂电池制定的专用条件 25-359-SC^[7]。该专用条件包含 9 条具体要求,将航空规章《运输类飞机适航标准》第 25.1353 条款的要求引申到锂电池上,并做了进一步明确,各专用条件的要求和内涵解读如下:

第一条对应 25.1353(b)(1) 条款,是针对电池单体温度和压力的要求。在预期的充放电过程中,要确保锂电池系统内的电池单体发生自持的、不可控的温度或压力升高的概率为极微小(10^{-7}),在各种失效情况下,电池的安装能够防止其发生爆炸。

第二条则是针对锂电池系统温度和压力的要求。无论锂电池系统内发生何种故障,要确保系统发生自持的、不可控的温度或压力升高的概率为极不可能(10^{-9})。

第三条同 25.1353(b)(3) 条款的要求基本一致,是对电池排放易燃易爆或有毒气体的要求。无论在正常使用过程中,还是系统失效时,要求锂电池系统除通过专门的泄压装置以外,不得向外释放爆炸性的或有毒的气体或烟雾;要求锂电池系统必须能够承受由于失效而产生的压力,或者能够通过泄压装置安全的释放压力;锂电池排放的物质达到一定浓度后,可能会引起燃烧、爆炸或具有毒性,因此要求锂电池排放的气体如果在飞机内聚集时,其浓度不致产生危害。

第四条是对锂电池电解液防火的要求。由于锂电池电解液可能为可燃液体,锂电池系统及其安装需要符合规章 25.863 条——可燃液体防火的要求。

第五条对应 25.1353(b)(4) 条款,规定了锂电池排放物如果具有腐蚀性时,对机体结构和机载设备影响的要求。要求确保从锂电池内排放的腐蚀性气体或液体不得对锂电池安装位置附近的结构、系统、设备或电缆等造成重大安全损害,其设计保证水平要符合 25.1309(b) 的要求。

第六条参考 25.1353(b)(5) 条款对镍镉电池发生短路时的要求,明确了对锂电池的要求。当锂电池系统短路或电池单体发生内短路时,会产生很

大的热量,要求锂电池的安装能够避免这些热量对结构和关键系统产生危害。

第七条对应 25.1353(b)(6)条款,是对锂电池报警功能的要求。锂电池系统本身必须具备自动的安全保护系统,这个系统可以通过温度监测或故障检测的方式控制充电电流的大小,或者能够直接切断充电电流,确保锂电池充电时不会过热超温。

第八条要求安装动力锂电池的飞机需要具备电池荷电状态的指示和报警功能,可以向机组人员实时提供电池的准确状态信息,且当电量低于签派要求时,可以向机组告警。

第九条是对持续适航文件的要求。锂电池的使用、保养和维护同传统镍镉电池存在较大差别,因此持续适航文件必须包含如下信息:锂电池充电间隔等正确的保养信息,确保锂电池的电量不会过快衰减;电池备件的存储要求,防止电池备件长期不合理存放导致电量过快衰减;维修和更换锂电池的程序和要求等。

专用条件 25-359-SC 主要覆盖 4 方面安全性要求:①规章 25.1353 条中对蓄电池性能和安装的一些通用性要求;②由于锂电池电解液具有可燃性,锂电池及其安装应满足适航规章中可燃液体防火相关条款的要求;③对锂电池的过度充放电提出专门的要求;④对锂电池的保养和维护提出专门的要求。

2.2 符合性验证试验方法

2015 年,FAA 发布咨询通告 AC20-184《飞机可充电锂电和电池系统试验和安装指南》^[20],明确了机载可充电锂电池的典型适航要求,并引用航空无线电委员会(Radio Technical Commission for Aeronautics,简称 RTCA)DO-311^[21]和 RTCA DO-160G^[22]等标准作为可接受的验证试验方法。而标准中引用的验证规范体系形成于 2010 年之前,同锂电池行业飞速发展的状况不相适应。目前在航空锂电池的试验验证和适航审查等环节存在诸多问题^[8],主要表现为:

(1) 在试验验证环节,针对锂电池的安全性验证不够充分,试验判据不够清晰明确,特别是对热失控的设计缺陷未能进行充分验证。

(2) 在安全性分析环节,由于验证不完整,使得分析方法、数据来源和假设缺乏依据,不能充分评估锂电池内短路可能产生的严重后果,从而未能针对锂电池明确足够的设计保证水平。

(3) 在审查环节,由于验证环节缺乏可追溯性,审查过程也就难以识别验证环节的遗漏。

因此锂电池验证试验的完整性、充分性、可追溯性是适航审查关注的重点。

2.3 符合性验证试验方法改进建议

国内外主要标准化组织,如国际标准化组织(International Organization for Standardization,简称 ISO)、欧洲经济委员会(Economic Commission for Europe,简称 ECE)、中华人民共和国国家标准(GB)和 RTCA 等规范体系中,关于锂电池系统的技术要求包含多种机械安全性测试、环境安全性测试和电气安全性测试项目,如表 1 所示,但是各行业在对锂电池进行此类验证时,在试验样本的状态、试验参数设置、符合性判定依据等方面均有所差异,得到的结论也不尽相同^[10-13,22-24]。在未来的研究中,应注重逐步形成更加明确的试验方法,提高验证试验的充分性和可重复性。波音 787 锂电池事故也体现出已有标准对热失控等关键故障的模拟和验证在充分性和完整性上还存在不足。特别需要关注的是锂电池系统的循环寿命、状态监控、安全保护、故障诊断等性能和功能,它们将直接影响到电池系统的安全性,并且随着技术的不断进步,此类安全性功能的作用也愈发显著。目前标准更新的趋势也表明行业已更加注重系统层级的安全性能和功能的验证。相比而言,RTCA DO-311A《可充电锂电池最低运行性能标准》(以下简称 DO-311A)的验证方法主要还是针对电池单体的性能验证,虽对电池系统的安全性功能和在飞机上的安装提出了一系列要求,但在标准中并未给出明确的验证方法。此外,现有验证方法的判据还比较宽泛,多为描述性语言,如“无泄漏”“不起火”“不爆炸”等,缺乏可量化的指标,符合性验证试验方法研究的一个重要方向便是将电池的危害程度细化。因此,借鉴不同体系的锂电池安全性标准和测试方法,可以为 DO-311A 标准航空锂电池适航符合性验证试验方法提供有益补充。

表 1 验证标准体系试验项目对标

Table 1 Test items for each standard system

试验项目	ISO	ECE	GB	RTCA
振动	✓	✓	✓	✓
机械冲击	✓		✓	✓
碰撞	✓	✓	✓	✓
挤压	✓	✓	✓	
跌落				✓
温度冲击	✓	✓	✓	✓
湿热循环			✓	✓
高海拔			✓	✓
盐雾			✓	✓
浸水	✓		✓	✓
热扩散	✓		✓	✓
外部火烧	✓	✓	✓	
过温保护	✓	✓	✓	✓
短路保护		✓	✓	
过充保护	✓	✓	✓	
过放保护	✓	✓	✓	
告警功能			✓	
状态监控			✓	

2.3.1 环境试验

在广泛应用于锂电池安全性测试的项目中,振动、冲击、碰撞、湿热循环、浸水、温度冲击、盐雾和高海拔等环境试验项目,可参照 DO-160G《机载设备的环境条件和试验程序》(以下简称 DO-160G)进行试验,但其通过性判据除了要求在试验完成后锂电池系统功能正常,无泄漏、外壳不破裂,电池不起火、不爆炸等,还应增加对试验后电池绝缘电阻值的明确要求。不同状态的锂电池,其试验结果会有所不同,例如锂电池的荷电状态(State of Charge,简称 SOC)对测试结果就有较大的影响,不同的锂电池安全性测试标准中,对试验样品的 SOC 有不同的规定,一般要求取 50%~100%之间。而 DO-160G 中并未规定锂电池试验件的 SOC,实际测试时,应当选取不同荷电状态的锂电池进行试验,以确保环境试验结果具有普遍性。

2.3.2 电气安全性测试

电气安全性测试主要包括外部短路试验、过充电试验和过放电试验。这三项试验广泛应用于评估电池单体在短路、过度充电或深度放电情况下的安全性,要求电池单体在试验过程中不起火、不爆炸。不过随着电池系统功能和设计的逐步完善,通

过系统层级的安全保护功能可以有效防止单体电滥用的发生,因此进行系统层级的功能安全性验证比现有的针对单体的电气安全性验证更有意义。

2.3.3 热稳定性试验

热稳定性试验是用于评估锂电池高温稳定性和安全性的重要试验。为了使热稳定性试验完整、充分并具有可重复性,参考国内外研究组织对热稳定性试验方法进行的探索,建议进行 3 种类型的热稳定性试验^[19]:第一类试验是通过高温加热或直接燃烧的方式,评估锂电池在高温下的稳定性,要求锂电池在高温下不发生爆炸;第二类试验是通过逐步升温的方式缓慢加热锂电池,直至引发电池热失控,从而确定电池热失控的温度;第三类试验是热失控乘员保护分析验证试验,根据锂电池热失控机理和触发方式的最新研究成果,明确对锂电池采用针刺或加热的方式引发热失控(如图 2 所示),进而评估锂电池系统对热失控的监测功能,并要求锂电池系统可以在危险发生前一定时间提供报警信号,以便机组采取相应措施。

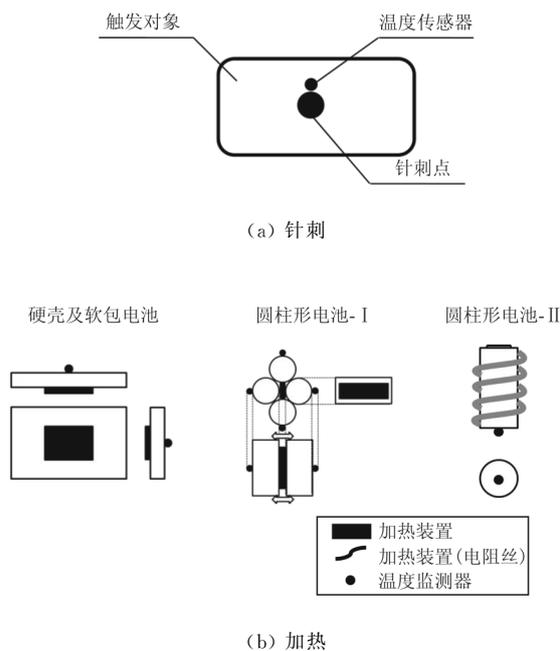


图 2 针刺或加热触发热失控的监控和触发装置布置图
Fig. 2 Arrangement diagram for thermal runaway via nail penetration and overheating

2.3.4 功能安全性验证

功能安全性验证的目的是确定电池系统功能安全要求的完整性和正确性,确保满足规章和专用

条件的安全要求。目前锂离子电池系统的安全性功能通过电池管理系统(Battery Management System,简称 BMS)实现,其功能主要包括:

(1) 监测电池系统内总电压、总电流,单体电压、单体电流和内部温度等状态参数。

(2) 对电池系统进行故障诊断,并对具体故障内容进行处理,如告警、故障保护等。

(3) 具有防止电池系统过充电、过放电、过温、过流等保护功能。

(4) 具有 SOC 估算功能,并能达到精度要求。

锂电池系统的安全性功能需要分别通过对应的试验检验:

(1) 状态参数测量精度检测。将电池系统按照正常工作要求安装,连接检测电压、电流、温度等参数的检测设备,将 BMS 的监测结果同检测设备检测的对应数据进行比较。

(2) 故障诊断功能验证。通过模拟系统建立故障项目触发条件,根据 BMS 的故障诊断结果进行功能确认。

(3) 安全防护功能验证。使电池系统处于过温、过充电、过放电、过流甚至短路状态时,BMS 能够进入安全状态,提供降温、限流、断电等安全保护措施,并提供报警信号或降级的提示信息给机组成员。

(4) 将电池系统按照正常工作要求安装,测试不同环境温度条件下电池系统的 SOC,并同 BMS 的估算结果进行对比,计算系统估算精度。

电池的安全性试验不是完全孤立的,应当要求同一试验样本完成环境试验后,依然能够通过功能安全性试验的验证,以此作为判定满足 25.1309(e)条款连续安全使用的标准;同一试验项目,选择不同状态的电池(如不同的荷电状态、循环寿命状态、储存状态等),或设定不同的试验参数(如过充电的电流、电压,升温速率等),结果也会不尽相同,需要通过全面的验证,确定合理的试验参数,覆盖尽可能多的试验件状态。所有的安全性试验结论相互验证,共同保障对适航条款的符合性。

3 结 论

(1) 为保证符合性验证的充分性,应针对不同状态(寿命状态、荷电状态、储存状态等),选择合理

的试验参数进行试验验证,并形成规范的试验方法。

(2) 相比单体电池的验证,符合性验证试验应特别注重对锂电池进行系统层级的电气安全性和功能安全性的验证,并根据不同试验的结果相互印证锂电池对条款的符合性。

(3) 为了确保锂电池的热稳定性和安全性,应开展充分的热稳定性试验,通过三种类型的热稳定性试验全面评估锂电池单体和系统的高温稳定性和安全性。

此外,现有验证标准的判据还比较宽泛,多为描述性的语言,缺乏可量化的指标,因此将电池的危害程度细化也是未来验证方法研究的一个重要方向。

参考文献

- [1] 刘春明,金英,张岚岚.波音 787 锂电池问题研究[J].航空制造技术,2016(10):106-109.
LIU Chunming, JIN Ying, ZHANG Lanlan. Research on Boeing 787 lithium batteries problems[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(10): 106-109. (in Chinese)
- [2] 闫金定.锂离子电池发展现状及其前景分析[J].航空学报,2014,35(10):2767-2775.
YAN Jinding. Current status and development analysis of lithium-ion batteries[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2767-2775. (in Chinese)
- [3] 赵长辉,卢黎波,陈立玮,等.飞机的电动力系统技术概述[J].航空工程进展,2011,2(4):449-458.
ZHAO Changhui, LU Libo, CHEN Liwei, et al. Overview of electric propulsion system technology for aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(4): 449-458. (in Chinese)
- [4] 张青松,姜乃文,罗星娜,等.锂离子电池热失控多米诺效应实证研究[J].科学技术与工程,2016,16(10):252-256.
ZHANG Qingsong, JIANG Naiwen, LU Xingna, et al. Lithium-ion battery thermal runaway domino effect experimental verification research[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(10): 252-256. (in Chinese)
- [5] 赵志朋.新能源飞机仿真系统研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2019.
ZHAO Zhipeng. Research on new energy aircraft simulation system[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019. (in Chinese)
- [6] 中国民用航空局.运输类飞机适航标准:CCAR-25-R4[S].北京:中国民用航空局,2011.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness

- standard of transport aircraft; CCAR-25-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [7] Special conditions; Boeing model 787-8 airplane; FAA, 25-359-SC lithium ion battery installation[M]. Washington: FAA, 2007.
- [8] NTSB. Auxiliary power unit battery fire Japan airlines Boeing 787-8[EB/OL]. [2020-06-02]. 2014. <https://www.ntsb.gov/investigations/accidentreports/reports/air1401.pdf>.
- [9] 隋立军, 孙有朝, 李孟杰, 等. 锂离子电池在民用飞机上的适航验证要求[J]. 电池, 2020, 50(1): 75-81.
SUI Lijun, SUN Youchao, LI Mengjie, et al. Airworthiness certification requirements for Li-ion battery in civil aircraft[J]. Battery Bimonthly, 2020, 50(1): 75-81. (in Chinese)
- [10] RUIZ V, PFRANG A, KRISTON A, et al. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1427-1452.
- [11] 邵杰, 谢信宏, 赵奕凡, 等. 车用动力电池测试标准存在的问题及发展趋势[J]. 标准科学, 2017(9): 82-89.
SHAO Jie, XIE Jihong, ZHAO Yifan, et al. Existing problems and development trend of power battery test standards for electric vehicle[J]. Standard Science, 2017(9): 82-89. (in Chinese)
- [12] 杨杰, 张凯庆. 国内外锂离子动力电池安全性技术标准对比分析[J]. 客车技术与研究, 2015, 37(2): 48-50.
YANG Jie, ZHANG Kaiqing. Comparative analysis on safety standards of lithium-ion power battery at home and abroad[J]. Bus & Coach Technology and Research, 2015, 37(2): 48-50. (in Chinese)
- [13] 祝夏雨, 金朝庆, 赵鹏程, 等. 国内外动力锂电池安全性测试标准及规范综述[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(2): 428-441.
ZHU Xiayu, JIN Zhaoqing, ZHAO Pengcheng, et al. A review of international safety testing standards and regulations for lithium ion power batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(2): 428-441. (in Chinese)
- [14] 林深. 动力锂离子电池热特性及热安全的试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
LIN Shen. The experimental study on thermal characteristics and thermal safety for power lithium-ion batteries[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] 王莉, 冯旭宁, 薛钢, 等. 锂离子电池安全性评估的 ARC 测试方法和数据分析[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1261-1270.
WANG Li, FENG Xuning, XUE Gang, et al. ARC experimental and data analysis for safety evaluation of Li-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1261-1270. (in Chinese)
- [16] 吴浩文. 运输类飞机非充电式锂电池系统安装专用条件研究[J]. 科技创新导报, 2017, 14(29): 23-26.
WU Haowen. Research on special conditions for installation of non-rechargeable lithium battery system for transport aircraft[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017, 14(29): 23-26. (in Chinese)
- [17] 曹涛, 吴善永, 邱俊杰. 民用飞机蓄电池系统设计分析研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2013(4): 71-74.
CAO Tao, WU Shanyong, QIU Junjie. Research on the battery system design for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2013(4): 71-74. (in Chinese)
- [18] 梁栋滨. 电动汽车用锂离子电池典型安全问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
LIANG Dongbin. Study of typical safety issues of lithium-ion battery used in electric vehicles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用动力电池安全要求; GB38031-2020[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2020: 36.
Ministry of Industry and Information Technology. Electric vehicles traction battery safety requirements; GB38031-2020[S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, Standardization Administration, 2020: 36. (in Chinese)
- [20] FAA. Guidance on Testing and Installation of Rechargeable Lithium Battery and Battery Systems on Aircraft; FAA AC No: 20-184[S]. Washington, D. C. : FAA, 2015.
- [21] RTCA. Minimum operational performance standards for rechargeable lithium battery systems; RTCA. DO-311[S]. Washington, D. C. : RTCA, 2008.
- [22] RTCA. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment; RTCA. DO-160G[S]. Washington, D. C. : RTCA, 2010.
- [23] DUBANIEWICZ T H, DUCARME J P. Further study of the intrinsic safety of internally shorted lithium and lithium-ion cells within methane-air[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 32: 165-173.
- [24] RTCA. Minimum operational performance standards for rechargeable lithium battery systems; RTCA. DO-311A[S]. Washington, D. C. : RTCA, 2017.

作者简介:

马迎坤(1985—),男,博士,工程师。主要研究方向:民用航空器适航审定。

邱 骏(1963—),男,学士,正高级工程师。主要研究方向:民用飞机结构适航审定技术。

(编辑:马文静)