

# 航空紧固件失效机理及模式探索

张文文 陈建奎

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

**摘要:** 航空紧固件的失效直接威胁飞机安全运行。本文深入探究其失效机理及模式,剖析材料性能、制造工艺和设计原则等基础理论,阐述疲劳断裂、应力集中和表面完整性对失效的影响。详细分析螺纹紧固件、铆钉等不同类型紧固件的失效模式,以及振动载荷下的失效表现。最后,从材料、工艺、设计、环境防护和维护检查等方面提出预防措施,为保障航空紧固件可靠性提供理论参考。

**关键词:** 航空紧固件;失效机理;失效模式;疲劳断裂;应力集中

## 1 航空紧固件失效的基础理论

航空紧固件失效的基础理论是理解其失效行为的基石,涵盖材料性能、制造工艺与设计原则等关键维度。材料的力学性能和疲劳强度对紧固件失效影响深远。高强度合金钢强度高但韧性欠佳,低温下易脆断;钛合金综合性能优良,却存在加工和应力腐蚀风险;铝合金轻质但强度与疲劳性能有限。而材料的化学成分、组织结构和表面状态,共同决定疲劳强度,杂质易引发裂纹,细晶组织可阻碍裂纹扩展,表面粗糙度与残余应力也会左右疲劳性能。制造工艺同样关键,锻造、机械加工和热处理工艺参数把控不当,会降低紧固件疲劳性能。设计方面,需综合考量载荷、连接方式和安装空间,合理设计以控制应力集中,同时借助有限元分析优化设计,才能有效提升航空紧固件的可靠性,减少失效风险。

## 2 航空紧固件失效的机理分析

### 2.1 疲劳断裂的机理

疲劳断裂是航空紧固件最常见的失效形式之一,其机理较为复杂。疲劳断裂通常经历裂纹萌生、裂纹扩展和最终断裂三个阶段。在裂纹萌生阶段,由于材料内部存在缺陷,如杂质、气孔、夹杂物等,或者在紧固件的表面存在加工缺陷、划痕等,在交变载荷的作用下,这些部位会产生应力集中,当应力集中达到一定程度时,就会萌生微裂纹。材料的晶界、相界等也是裂纹萌生的敏感区域。随着交变载荷的不断作用,微裂纹逐渐长大,进入裂纹扩展阶段<sup>[1]</sup>。在裂纹扩展阶段,裂纹会在交变应力的作用下不断向前扩展,扩展速率与应力幅值、材料性能、裂纹尺寸等因素有关。一般来说,应力幅值越大,裂纹扩展速率越快;材料的韧性越好,裂纹扩展速率越慢。当裂纹扩展到一定尺寸后,紧固件的剩余承载能力不足以承受外加载荷,就会发生最终断裂,导致紧固件失效。

### 2.2 应力集中的影响

应力集中是导致航空紧固件失效的重要因素之一。在紧固件的结构中,由于几何形状的突变、截面尺寸的变化等原因,会不可避免地产生应力集中现象。应力集中会使局部区域的应力水平远高于平均应力水平,从而加速裂纹的萌生和扩展。例如,在螺纹紧固件中,螺纹根部是应力集中的敏感部位。螺纹的牙型、螺距、螺纹升角等参数都会影响螺纹根部的应力集中程度。尖锐的螺纹牙型会导致较大的应力集中,而采用圆弧形牙型或特殊设计的螺纹牙型可以降低应力集中。螺栓头部与杆部的过渡圆角、铆钉孔边缘等部位也容易产生应力集中。应力集中不仅会降低紧固件的疲劳强度,还会影响其静强度和韧性。在应力集中区域,材料更容易发生塑性变形和断裂,从而缩短紧固件的使用寿命。

### 2.3 表面完整性的作用

表面完整性对航空紧固件的失效行为有着重要影响。表面粗糙度直接影响紧固件表面的应力集中程度,表面粗糙度越大,表面微观几何形状的起伏越大,在交变载荷作用下,这些起伏部位会产生应力集中,成为疲劳裂纹的萌生源。降低表面粗糙度可以减少应力集中,提高紧固件的疲劳强度。表面残余应力对紧固件的疲劳性能也有显著影响。表面残余压应力可以提高紧固件的疲劳强度,因为它能够抵消一部分外加拉应力,延缓疲劳裂纹的萌生和扩展。而表面残余拉应力则会降低紧固件的疲劳强度,加速裂纹的形成和扩展。可以通过喷丸、滚压等工艺在紧固件表面引入残余压应力,提高其疲劳性能。表面冶金状态也会影响紧固件的失效行为,表面脱碳、氧化等冶金缺陷会降低紧固件的表面硬度和强度,增加疲劳裂纹的敏感性。

## 3 航空紧固件失效的主要模式

### 3.1 螺纹紧固件的失效模式

螺纹紧固件在航空领域应用广泛,其失效模式主要包括疲劳断裂、松动、滑牙和腐蚀失效等。疲劳断裂是螺纹紧固件最常见的失效模式之一,如前文所述,在交变载荷的作用下,螺纹根部、螺栓头部与杆部过渡处等应力集中部位容易萌生疲劳裂纹,随着裂纹的不断扩展,最终导致螺栓断裂。螺栓与螺母的配合精度、预紧力的大小等因素也会影响螺纹紧固件的疲劳性能<sup>[2]</sup>。如果预紧力不足,螺栓在工作过程中容易产生松动,导致螺纹间的摩擦力减小,进一步加剧应力集中,加速疲劳裂纹的形成和扩展。松动也是螺纹紧固件常见的失效模式,在飞机飞行过程中,由于振动、冲击等动态载荷的作用,螺纹紧固件可能会发生松动。松动会导致连接部位的可靠性下降,甚至引发严重的安全事故。螺纹紧固件的松动与螺纹的类型、防松措施、安装工艺等因素有关。滑牙是指螺纹在使用过程中,由于过载、磨损等原因,导致螺纹牙型损坏,无法正常旋合。滑牙会使螺纹紧固件失去连接功能,造成部件分离。滑牙的发生与螺纹的材料性能、加工质量、使用条件等因素有关。如果螺纹材料的强度不足,在较大载荷作用下容易发生塑性变形,导致滑牙;加工精度不高,螺纹牙型不准确,也会增加滑牙的风险。腐蚀失效是指螺纹紧固件在腐蚀环境中,由于化学或电化学作用,导致材料性能下降,最终发生失效。航空紧固件所处的环境较为复杂,可能会受到大气、海水、燃油等介质的腐蚀。

### 3.2 铆钉等其他紧固件的失效模式

铆钉是航空领域常用的紧固件之一,其失效模式主要有疲劳断裂、剪切失效和腐蚀失效。疲劳断裂在铆钉中也较为常见,在交变载荷的作用下,铆钉头部与杆部过渡处、铆钉孔边缘等部位容易产生应力集中,从而萌生疲劳裂纹。随着裂纹的扩展,铆钉最终会发生断裂。铆钉的疲劳性能与铆钉的材料、尺寸、安装工艺等因素有关。例如,采用高强度材料制造的铆钉,其疲劳强度相对较高;合理的铆钉尺寸设计和精确的安装工艺可以降低应力集中,提高铆钉的疲劳寿命。剪切失效是指铆钉在剪切载荷的作用下,发生剪断破坏。在飞机结构中,铆钉主要承受剪切力,当剪切载荷超过铆钉的剪切强度时,就会发生剪切失效。铆钉的剪切强度与铆钉的材料、直径等因素有关。一般来说,铆钉直径越大,剪切强度越高;采用高强度材料制造的铆钉,其剪切强度也更高。腐蚀失效同样会影响铆钉的性能和可靠性,铆钉在腐蚀环境中,表面会发生腐蚀,导致材料变薄、强度降低。例如,在沿海地区飞行的飞机,其铆钉容易受到海水盐雾的腐蚀,发生电化学腐蚀,影响飞机结构的

安全性。除了铆钉,还有一些其他类型的紧固件,如销钉、卡箍等,它们也有各自的失效模式。销钉的失效模式主要有剪切失效、弯曲失效和磨损失效;卡箍的失效模式主要有疲劳断裂、松动和腐蚀失效等。

### 3.3 振动载荷下的失效模式

在飞机飞行过程中,紧固件会受到各种振动载荷的作用,这些振动载荷会加速紧固件的失效。在振动载荷下,紧固件的失效模式主要包括疲劳断裂、松动和磨损。疲劳断裂是振动载荷下紧固件最主要的失效模式之一,振动载荷会使紧固件承受交变应力,导致应力集中部位更容易萌生疲劳裂纹。而且,振动的频率和幅值对疲劳裂纹的扩展速率有重要影响。一般来说,振动频率越高、幅值越大,疲劳裂纹的扩展速率越快。例如,在飞机发动机附近的紧固件,由于受到发动机振动的影响,其疲劳失效的风险较高。松动也是振动载荷下常见的失效模式,振动会使紧固件之间的摩擦力减小,导致螺纹紧固件松动、铆钉松动等。松动后的紧固件无法正常发挥连接作用,会影响飞机结构的稳定性和安全性。为了防止振动引起的松动,通常会采用各种防松措施,如使用防松螺母、弹簧垫圈、螺纹锁固剂等。磨损是指在振动载荷作用下,紧固件与被连接件之间、紧固件相互之间发生相对运动,导致表面材料磨损。磨损会使紧固件的尺寸减小、表面质量下降,影响其连接性能和使用寿命。例如,在飞机机翼的连接部位,由于振动的作用,铆钉与铆钉孔之间可能会发生磨损,导致铆钉松动、连接强度降低<sup>[3]</sup>。

## 4 航空紧固件失效的预防措施

### 4.1 材料选择与改性

合理选择材料是预防航空紧固件失效的首要环节。在选择材料时,需要综合考虑紧固件的使用环境、载荷条件等因素。对于在高温环境下使用的紧固件,应选择高温性能好的材料,如镍基合金、钛合金等;对于在腐蚀环境下使用的紧固件,应选择耐腐蚀性强的材料,如不锈钢、铝合金等。同时,要根据载荷大小和类型,选择具有合适强度和韧性的材料。例如,在承受较大交变载荷的部位,应选择疲劳强度高的材料。除了选择合适的材料,还可以通过材料改性的方法提高材料的性能。例如,通过合金化的方法,向材料中添加合金元素,改善材料的力学性能、耐腐蚀性等。向铝合金中添加铜、镁等合金元素,可以提高铝合金的强度和硬度;向不锈钢中添加钼、钛等合金元素,可以提高不锈钢的耐腐蚀性,还可以采用表面处理技术,如渗碳、渗氮、镀覆等,改变材料的表面性能,提高材料的耐磨性、耐腐蚀

性和疲劳强度。

#### 4.2 制造工艺优化

优化制造工艺是提高航空紧固件质量和可靠性的关键。在锻造工艺方面,要严格控制锻造温度、锻造比等工艺参数,确保锻造后的材料组织均匀、致密,消除内部缺陷。采用先进的锻造技术,如等温锻造、精密模锻等,可以提高锻造件的精度和质量,降低生产成本。在机械加工过程中,要合理选择切削参数,控制刀具磨损,提高加工表面质量。采用先进的加工工艺,如数控加工、高速切削等,可以提高加工精度和效率,减少加工缺陷。同时要注意加工过程中的冷却和润滑,防止因切削热和摩擦导致的表面质量下降。热处理工艺的优化也至关重要,要根据材料的特性和使用要求,制定合理的热处理工艺规范,严格控制淬火温度、回火温度、保温时间等工艺参数,确保紧固件获得良好的综合力学性能。采用先进的热处理技术,如真空热处理、可控气氛热处理等,可以提高热处理质量,减少氧化、脱碳等缺陷。

#### 4.3 设计优化与应力集中控制

设计优化是预防航空紧固件失效的重要手段。在设计过程中,要充分考虑紧固件的载荷情况、使用环境和安装空间等因素,选择合适的紧固件类型、规格和连接方式。例如,对于承受较大拉伸载荷的部位,应选择高强度的螺栓连接;对于需要密封的部位,应选择铆钉连接或采用密封胶等密封措施。同时,要优化紧固件的结构设计,降低应力集中程度。通过合理设计螺纹牙型、增大过渡圆角半径、优化截面形状等方法,可以减少应力集中。例如,采用圆弧形螺纹牙型可以降低螺纹根部的应力集中;在螺栓头部与杆部过渡处采用较大的圆角半径,可以减小应力集中系数。还可以运用有限元分析等方法,对紧固件的应力分布进行模拟和分析,为设计优化提供依据。

#### 4.4 环境适应性设计与防护

航空紧固件所处的环境复杂多变,因此需要进行环境适应性设计和防护。针对不同的环境因素,如高温、低温、潮湿、腐蚀等,采取相应的设计和防护措施。对于高温环境,可采用耐高温材料制造紧固件,并采取隔热、散热等措施,降低紧固件的工作温度。对于低温环

境,要选择在低温下具有良好韧性和强度的材料,防止紧固件发生脆性断裂<sup>[4]</sup>。在腐蚀环境中,可采用耐腐蚀材料制造紧固件,或者对紧固件表面进行防护处理,如涂覆防腐涂层、采用电镀等方法,隔离腐蚀介质,提高紧固件的耐腐蚀性。还可以通过设计合理的排水结构、通风系统等,减少环境因素对紧固件的影响。

#### 4.5 定期维护与检查

定期维护与检查是及时发现航空紧固件潜在问题、预防失效的重要措施。制定科学合理的维护检查制度,定期对飞机上的紧固件进行检查,检查内容包括紧固件的外观、连接状态、表面质量等。通过目视检查,可以发现紧固件表面是否有裂纹、腐蚀、磨损等缺陷;通过测量紧固件的预紧力、尺寸等参数,可以判断紧固件是否处于正常工作状态。对于发现的问题,要及时进行处理。对于轻微的缺陷,如表面划痕、轻微腐蚀等,可以采取修复措施,如打磨、补漆等;对于严重的缺陷,如裂纹、松动等,要及时更换紧固件。同时要做好维护检查记录,对紧固件的使用情况进行跟踪分析,为后续的维护和改进提供依据。

#### 结束语

航空紧固件失效研究关乎航空安全。本文系统梳理了失效基础理论、机理、模式及预防措施,但随着航空技术发展,新材料、新工况不断涌现。未来需持续关注前沿技术,深化对失效问题的研究,优化预防策略,进一步提升航空紧固件可靠性,确保航空飞行安全,推动航空领域稳健发展。

#### 参考文献

- [1]李红进,王伟,汪亦凡,等.航标类紧固件十字槽发纹问题分析及解决措施[J].四川有色金属,2020(1):47-49.
- [2]张玲玲,李常业,李祥军,等.紧固件裂纹无损检测技术[J].金属加工(冷加工),2020,No.826(05):39-41.
- [3]陈明,吴艳.紧固件旋转方式对连接结构疲劳性能的影响实验研究[J].机械研究与应用,2020,34(1):40-45.
- [4]徐昊,马艳云,袁娅,等.航空用Ti-6Al-4V紧固件抗剪性能数值模拟分析[J].组合机床与自动化加工技术,2023(9):35-38.DOI:10.13462/j.cnki.mmtamt.2023.09.008.