

钛合金榫结构微动疲劳防护 技术研究综述*

杨 启^{1,2}, 付雪松², 周文龙^{2,3}

(1. 许昌学院化工与材料学院, 许昌 461000;

2. 大连理工大学辽宁省凝固控制与数字化制备重点实验室, 大连 116085;

3. 大连理工(营口)新材料工程中心有限公司, 营口 115007)

[摘要] 综述了航空发动机叶片-轮盘榫型连接部位的微动疲劳损伤形式及试验方法,总结了提高钛合金抗微动疲劳性能的表面改性技术,介绍了不同强化手段的处理方式、作用机理以及在提升发动机榫结构微动疲劳性能方面的应用,同时指出了目前该领域内存在的问题,以期对钛合金叶片榫头抗微动疲劳设计提供借鉴。

关键词: 钛合金; 航空发动机; 榫结构; 微动疲劳试验; 表面改性技术

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.23/24.014



杨 启

许昌学院讲师、大连理工大学博士研究生,研究方向为航空钛合金的微动疲劳损伤及表面强化技术、金属材料失效分析及强化处理。

航空发动机作为飞机的动力来源,被誉为飞机的“心脏”,其良好、稳定的运行状态是保障民航安全与战

机性能的关键因素。随着现代科技的迅猛发展,航空工业在国防建设与经济发展领域被赋予了更高使命,航空发动机的经济性、可靠性、安全性要求也日益严苛。然而,航空发动机结构复杂、零件众多,且长期处于高温、高压、高转速和高载荷的严酷条件下,其内部损伤难以避免,不同部位损伤形式亦不尽相同。在多种损伤行为中,叶片的失效断裂最为常见且危害巨大,是导致发动机故障和飞机失事的重要原因之一。叶片断裂可按失效部位分为叶身断裂与根部断裂两类,据有关统计,后者占了所有发动机故障的20%左右^[1],危害尤甚。航空发动机中,叶片与轮盘常采用榫结构连接,叶片根部断裂区恰处于二者连接部位。航空发动机工作过程中,榫头/榫槽连接处受离心力及强烈气动载荷影响,接触表面间存在法向压力,同时产生了小幅相对滑动,属于典型的微动疲劳环境,如图1所示^[2]。除此以外,发动机的其他部件也存在微动疲劳问题,如机

匣的安装边螺栓连接、盘和轴过盈配合连接以及飞机上大量采用的铆钉连接等。但论及危害程度,仍以榫结构的微动疲劳为最,美国空军一直将其作为战机高周疲劳中解决难度最大、花费最高的安全隐患之一^[3]。随着航空技术的不断发展和发动机性能指标的大幅度提高,各类部件的微动疲劳问题越发突出,发动机安全面临着更为严峻的挑战。因此,研究发动机关键构件——榫结构的微动疲劳损伤及防护机理具有重要的理论意义和工程应用价值。

自20世纪50年代以来,钛合金因其比强度高、耐热性好、耐腐蚀性佳等优良特性在航空航天领域得到了广泛应用。采用钛合金制造飞机构件,可提高发动机涡轮前进口燃气温度、减轻飞机整体重量,为发动机推重比、飞机航速和机动性能提升创造了有利条件。现如今,钛合金已成为制造飞机关键结构件的主选材料,其使用量也成为衡量飞机先进性的重要指标之一。以美国空军为例,三代

* 基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902084)。

战机 F/A-18、F-14、F-15 的钛合金用量分别为 15%、24%、27%，而四代战机 F-22 的钛合金用量高达 41%。此外，目前最大的客机波音 787 及空客 A380 钛合金结构质量占比也超过 10%^[4-5]。在先进航空发动机中，钛合金已取代铝合金、镁合金及某些钢材，用于制造风扇叶片、压气机盘、涡轮盘、机匣等重要构件。TC4 钛合金(Ti-6Al-4V)是一种典型的双相合金，自 1954 年研制成功以来，因其出色的综合性能成为航空领域应用范围最广、用量最大的王牌合金。以 F-22 为例，其钛合金用量的 86% 以上为 Ti-6Al-4V 及其改进型合金^[5]。

其中，制造发动机风扇叶片及轮盘榫槽是 TC4 钛合金最为重要的用途之一。然而，TC4 钛合金也存在两个突出问题：硬度稍低和导热性差，易发生热黏着而导致耐磨性能不佳；对表面完整性非常敏感，表面损伤尤其是微动损伤极易诱发疲劳裂纹的萌生与扩展^[6-9]。因此，深入探究 TC4 钛合金榫结构的微动损伤机理，并以此为基础寻找行之有效的微动防护手段，一直是工程领域关注的热点。

榫结构微动疲劳试验装置

为了满足微动疲劳试验条件，学者们曾采用各种简化装置对榫结构

的微动区接触行为进行了模拟试验研究^[10-12]。归结起来看，各类设备的主体设计思路大致相同，均为微动接触装置配以对应的振动载荷施加装置。接触结构可按接触形式分为球-面接触、柱-面接触、桥式接触(面-面接触)3 类，如图 2 所示^[11-13]，振动载荷多由疲劳试验机提供。图 3 展示了微动疲劳试验设备的常规装配形式^[14]，将接触装置通过特制夹具固定于疲劳试验机上，标准疲劳试样通过试验机上下夹头夹持并与微动块紧密接触，通常还需要设置微动块固定部件保证微动块在试样振动过程中不发生位置偏移。作用于试

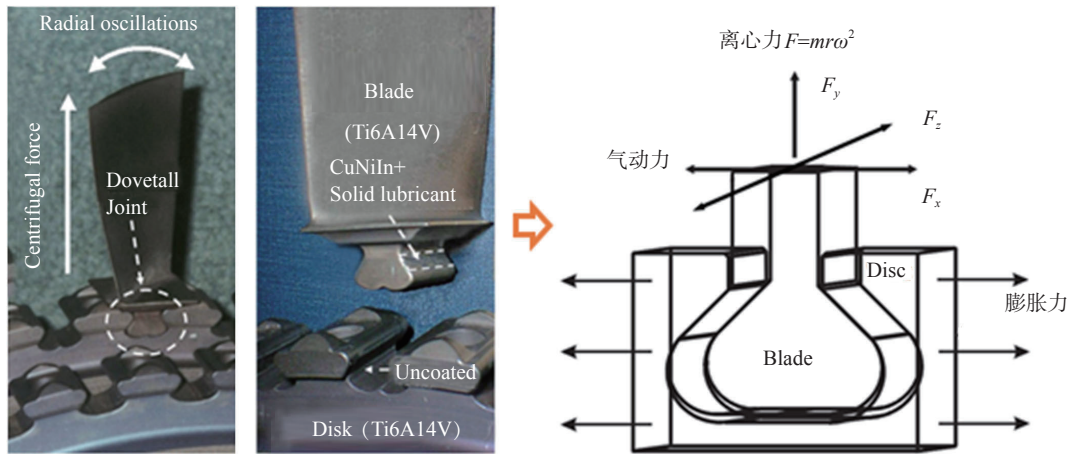


图1 榫结构装配实物图及载荷状态示意图

Fig.1 Photograph of dovetail fixing and schematic diagram of loading condition

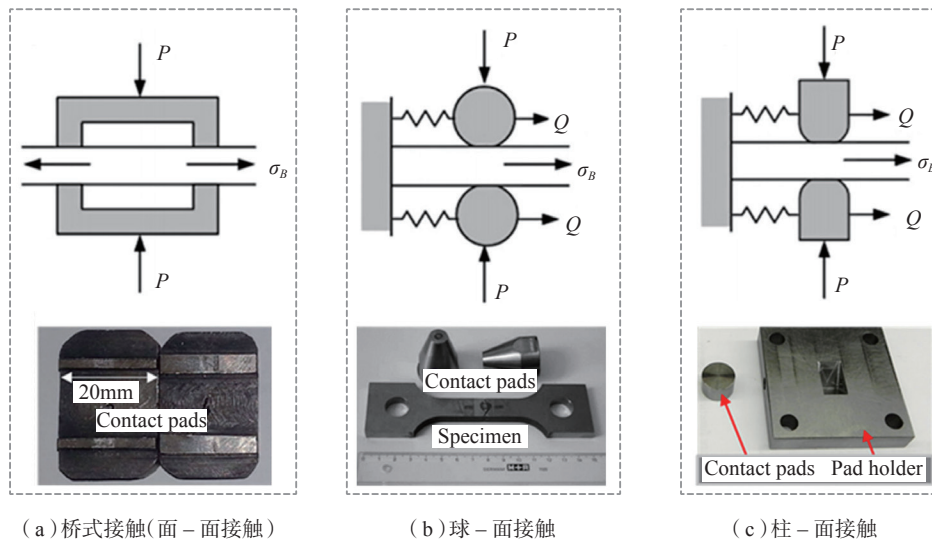


图2 微动接触形式

Fig.2 Illustration of fretting contact types

样的循环应力可使微动块与试样间发生微幅相对位移,实现微动条件。球-面接触相对简单,其微动块调整起来较为方便,接触应力可以通过经典接触分析估测;柱-面接触需注意法向载荷加载的均匀性,以及圆柱与平面接触的完整性等问题;而桥式接触则需合理设计微动块形状和尺寸,尽量避免微动桥在法向压力作用下发生弯曲变形或微动桥上下两脚发生不均匀接触,影响试验效果。此外,为了便于分析,通常需要在基础试验装置外辅以测试设备,对微动过程中接触载荷、位移幅值、裂纹萌生等参数或现象进行实时监控。

然而,简化装置在微动运行模式、应力分布、损伤机制等方面仍与榫型接触存在部分差异,无法全面地反映出榫结构的微动疲劳特性。因此,越来越多的学者选择直接采用榫型试样^[15-17]进行微动疲劳试验研究,其结果对于工程应用更具指导意义。Rajasekaran等^[17]在榫头试样尾部加装了振动装置,同时在榫头与榫槽试样上设置了应力传感器,以模拟和表征发动机工作过程中的叶片振动、离心力和榫槽膨胀力等特征(图4(a));Golden^[16]采用的榫结构装置在试样两侧放置了应力传感器,以实时监测两侧接触压力是否保持对称,同时在接触区域附近设置了散热孔,以满足高温条件下的试验需求。载荷控制方面,多数榫结构装置沿袭了常规试样微动疲劳的设计经验,主要采用各式疲劳试验机施加振动载荷,如此更易实现高、低载荷频率、大、小应力状态及不同应力比的转换,可进行多种载荷条件下的微动疲劳行为研究(图4(b))。

榫结构微动防护技术分类及应用

20世纪90年代后,榫结构微动疲劳研究已取得阶段性进展,学者们对其接触状态、损伤形式、疲劳机理

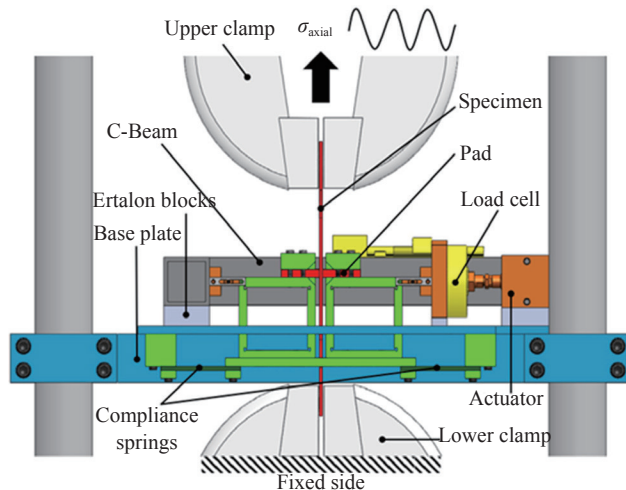


图3 微动疲劳试验装置装配示意图
Fig.3 Schematic view of fretting fatigue additional fixture

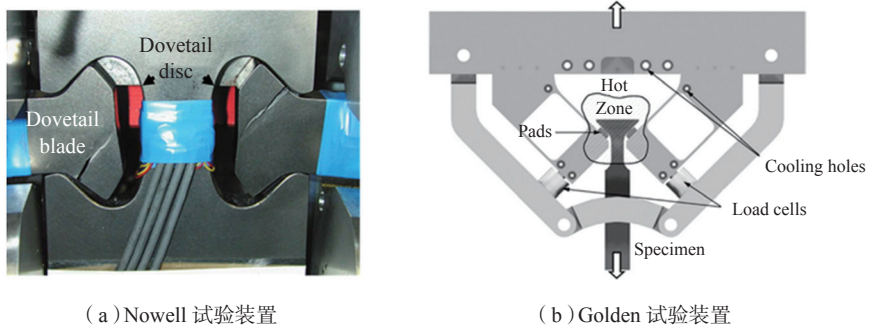


图4 榫结构微动疲劳试验装置示意图
Fig.4 Dovetail joint configurations

等有了初步认识,相关的防护技术研究也随之展开。目前常用的防护手段可根据技术原理分为以下几大类别。

1 表面机械强化

表面机械强化^[18-25]包括喷丸、滚压等。尤其是喷丸强化技术,作为典型的形变强化手段,其工艺简单、易于实现,且不受场地和工件尺寸的限制,既能显著改善钛合金微动疲劳抗力,又能大幅提高材料的常规疲劳性能,在工程领域得到了广泛应用。其主要原理为:(1)引入一定深度的残余应力场,抵消了部分微动过程中产生的拉应力,可有效阻碍裂纹的萌生及早期扩展;(2)形成表面应变硬化层,提升其抗微动磨损性能;(3)表面粗糙度增加,关于该因素作用,学界尚未形成统一认识。有学者认为粗糙度提升后,可增加接触面积,

降低真实接触应力^[21],或通过粗糙表面微凸体间空隙储存微动磨屑,避免磨屑堆积引起的局部应力集中和磨粒磨损^[22],进而提升微动疲劳性能。也有学者提出粗糙度的存在易导致微动裂纹萌生^[23-24],从而降低微动疲劳抗力。还有学者研究表明,粗糙度对微动疲劳行为无显著影响^[25]。近年来,为了适应更加复杂的工况条件,多道次喷丸^[26-27]、喷丸与其他表面处理的复合强化技术^[28]已被更多学者所关注,并将成为未来喷丸技术应用的发展趋势。

2 表面热处理与化学热处理

表面热处理与化学热处理^[29-33]包括渗N、渗Zr、渗CrN、渗Mo等,也是一种常用的抗微动损伤的技术手段。此类技术主要强化原理为:通过大幅提升表层硬度增加局部屈服

强度,增强抗微动磨损性能,同时引入一定层深的残余压应力,降低外加拉应力影响,从而提升微动疲劳寿命。

3 表面涂层与镀膜

表面涂层与镀膜^[34-39]包括等离子喷涂、超音速火焰喷涂、爆炸喷涂、气相沉积(物理/化学/离子束)、磁控溅射、电镀等。涂层是材料微动防护的重要手段,该技术的主体思路是在材料表面形成保护层,通过保护层的减小摩擦、对抗磨损、缓和应力集中等功能,实现较好的微动损伤防护作用。保护层材料分为金属和非金属两大类,金属层材料包括Cu、Ni、Cu-Al、Cu-Ni-In、Zn-Ni、Cr-Ni等,非金属层材料包括TiC、TiO₂、TiN、TiAlN、CrN、CrC、MoS₂等。软质金属涂层(Cu、Ni、Cu-Al、Cu-Ni-In)屈服强度和剪切强度低,涂层厚度一般为100μm以上,主要通过变形协调能力缓和应力集中,保护基体表面,但一般与基体结合性较差,容易在微动过程中消耗;硬质金属类涂层(Zn-Ni、Cr-Ni)硬度高,抗黏着性能好,厚度多在40μm以下,抗微动磨损损伤效果较好,但韧性差,容易引起表面开裂,且形成的硬质磨屑易产生磨粒磨损。非金属涂层也有软、硬之分,软质非金属涂层主要指固体润滑剂涂层(MoS₂)及有机涂层等,其特点是韧性好、摩擦系数低,主要以减摩擦为主;硬质非金属涂层主要为陶瓷类涂层及类金刚石涂层(TiC、TiO₂、TiN、TiAlN、CrN、CrC、DLC),其硬度一般比硬质金属涂层更高,耐磨性更佳,但同样存在韧性差、易开裂等问题。总体上看,硬质涂层一般用于微动磨损环境,而软质涂层多在微动疲劳条件下使用。

4 高能粒子束处理

高能离子束处理^[40-42]包括激光喷丸处理、电子束表面处理、离子注入等。三束(激光束、电子束、离子束)表面处理技术是20世纪80年代开始发展的技术,近年来激光和离子束

表面处理常被用于提高材料微动疲劳性能。激光喷丸(LSP)与常规喷丸类似,可使金属材料表层组织细化、硬度提高,并能在表面引入很高的残余压应力,因而能有效提高材料微动疲劳抗力。Liu等^[43]研究表明,激光喷丸引入的残余应力层更深,因此高应力条件下更有利于提升微动疲劳寿命。但是低应力条件下激光喷丸的强化效果反而不如常规喷丸,其原因是前者处理后试样表面在微动条件下更易产生裂纹。离子注入的强化原理为:(1)注入元素阻碍表面层位错的运动,延缓了裂纹的早期扩展;(2)离子注入能起到固溶强化的作用,提高表层硬度;(3)离子注入可在表层造成一定的残余压应力。离子注入表面改性层不存在结合力问题,但是其改性层深度太浅(一般小于100nm),且耐久性较差,这是离子注入在工业上应用受限的主要原因。此外,Liu等^[44]采用离子束增强沉积(IBED)技术在溅射镀膜或蒸发镀膜的同时,借助辅助离子束轰击沉积的膜层使膜基界面共混,所获膜层致密度高、晶粒细化、孔隙率低,与基体结合强度高,既克服了一般镀膜技术中膜基结合强度不高的缺点,又将膜层厚度从离子注入的100nm左右提高到了几μm甚至几十μm。采用该技术制备的CuNiIn膜与MoS₂固体润滑剂共同作用,有效提高了钛合金的微动疲劳抗力。

5 复合表面处理

复合表面处理^[45-47]指两种或两种以上表面强化技术的复合。微动疲劳的特点是既有接触条件下的微动磨损作用,又承受动态疲劳载荷,提高微动疲劳抗力的难点在于磨损性能与疲劳性能的强化因素之间存在矛盾之处。因此,单一的表面处理常常难以取得理想效果,需要考虑多种技术的复合途径,其中采用最多的就是喷丸与其他表面技术的复合处理。其强化思路为:通过喷丸引入残

余压应力层,通过其他表面处理技术改变材料表层硬度、韧性、腐蚀性能、摩擦磨损性能、表面粗糙度等特征,二者有机结合,以期达到协同提高材料表层综合性能,抑制微动裂纹萌生和扩展的目的。Liu等^[48]研究了各种表面处理方式对TC4微动疲劳性能影响,结果表明喷丸与CrN、TiN、CuNiIn等涂层复合处理,有效提升了试样微动疲劳强度。但也有研究表明,喷丸与其他方法复合处理时,效果可能不及单独喷丸。其原因为:若喷丸在前,则后续处理技术的高温过程常造成喷丸引入的表层残余压应力衰减;若喷丸在后,则表面改性层将难以承受喷丸过程冲击,导致自身破坏或失效^[49]。因此,复合表面处理的效果应视具体工况和处理工艺而定,不可一概而论。

由于表面强化工艺种类繁多,在实际应用中,可根据不同的基体材料、使用环境和工作参数选择合适的强化手段。1995年,Chakravarty等^[50]针对发动机燕尾榫连接部位钛合金构件的微动疲劳失效行为,采用简化微动疲劳装置(桥式接触),研究了喷丸、涂层(CuNiIn、CuNiIn+MoS₂)、表层离子注入(C、N)、复合处理技术等不同强化方法对Ti-6Al-4V试样微动疲劳性能的影响。其结果表明,单独采用离子注入处理时,C离子注入效果较好;单独采用涂层防护时,CuNiIn涂层与MoS₂固体润滑剂配合使用效果更佳;但前两者效果均不及单独喷丸处理。采用复合技术时,喷丸+CuNiIn涂层+MoS₂固体润滑剂效果与单独喷丸相近,但优于喷丸+离子注入或喷丸+离子注入+涂层。作者认为,离子注入对于表面光滑试样效果较好,而对于喷丸处理后形成的粗糙表面则并不适用。此外,喷丸引入的高残余压应力可能是促进试样微动疲劳性能提升的重要因素。若想进一步提升疲劳性能,可考

考虑提升现有涂层耐久性或开发新型耐磨涂层。2005年, Ravindranath等^[51]通过在榫结构试样表面预制一定深度的微裂纹来模拟萌生初期的微动疲劳裂纹,并采用激光喷丸(LSP)对试样表面进行强化处理,使残余压应力层深超过预制裂纹深度。强化后试样微动疲劳寿命明显增加,从而再次验证了残余压应力对于提升微动疲劳性能的重要作用。不久后, Conner等^[52]研究发现, Cu-Al涂层和低塑性抛光(LPB)技术均可有效提升TC4榫结构试样的微动疲劳寿命,后者提升幅度更大。Golden等^[53]通过试验评估了4类硬质涂层和2种表面改性技术的微动疲劳防护效果,其研究同样表明,激光喷丸(LSP)与低塑性抛光(LPB)技术是增强TC4榫结构微动疲劳抗力的有效手段。而几类硬质涂层中,表层等离子渗N、Ni-B化学镀层、等离子喷涂Mo等均使试样微动疲劳性能产生了不同程度恶化,仅类金刚石涂层(DLC)一定程度改善了试样微动疲劳抗力。由此可见,尽管多数硬质涂层具有摩擦系数低、耐久性高等优点,在抗微动磨损方面表现良好,但并不一定适用于微动疲劳防护。Fu等^[54]在大量试验研究基础上,综述了不同表面处理技术对材料微动磨

损及微动疲劳抗性的影响,结果表明,大多数可有效提升表层硬度的处理技术都将使材料微动疲劳抗性得到明显提升,但却并不一定适用于微动疲劳防护,其原因可能是表面硬度的增加将伴随表层残余拉应力的增大和表层韧性的降低,从而削弱微动疲劳抗力,如表1所示^[54]。

总体上看,尽管学者们一直在尝试开发可应用于榫结构的新型微动防护技术,但强化效果显示各类新技术在与传统喷丸处理的对比中并无明显优势。加之榫结构外形特殊,给大多新型技术的实施带来了一定困难,且新技术的高成本也造成了其工业应用中的又一壁垒。目前,喷丸强化技术因价格低廉、效果显著、易于实施,仍然是工程领域榫结构微动防护的主力,且喷丸作为一种良好的前处理手段,在新型复合处理技术的开发中占有重要地位。

近年来,学界已逐步认识到Cu-Al、CuNiIn等软质涂层在提升各类钛合金,尤其是TC4合金的微动疲劳性能方面更具优势。因此,学者们围绕软质涂层微动条件下的磨损行为、作用机理、防护效果等关键点开展了一系列研究^[55-58]。其中不少研究都以榫结构微动防护为背景(图5^[57-58]),且以CuNiIn涂层的表征与

分析居多。多数学者的研究肯定了CuNiIn涂层的强化效果,其强化机理可归结为:通过自身塑性变形缓和接触区应力集中效应,形成磨屑第三体层降低磨损损伤两方面。但Mary等^[59]也提出,微动过程中涂层与摩擦对偶表面的黏着作用可能加速对偶的磨损,在榫结构中,榫槽表面作为对偶面很可能面临更严峻的损伤趋势,且损伤后难以修复。这是CuNiIn涂层工程应用存在的隐患,也是未来要解决的问题之一。考虑到喷丸在钛合金微动疲劳强化中的良好表现,喷丸+CuNiIn涂层的复合技术也成为学者们心中较为理想的防护途径。遗憾的是,尽管目前关于喷丸+CuNiIn涂层复合处理的研究常以榫结构微动防护为背景,但试验中均采用微动磨损或常规试样微动疲劳装置,应用于榫结构试样的研究尚未出现,对应条件下的涂层损伤机理及复合作用机制也需进一步丰富和完善。

目前存在的问题

随着世界各国对微动损伤研究的重视程度以及对相关领域投入力度的增加,学界在微动损伤,尤其是榫结构微动损伤的行为、机理及防护研究方面均取得了较大进展,但总体

表1 不同表面处理技术抗微动损伤效果

Table 1 Different surface treatment technology anti-fretting damage effect

表面改性方法	降低摩擦系数	引入残余应力	增加表面硬度	增加表面粗糙度	涂层耐久性	微动磨损抗性	微动疲劳抗性
Carburizing	√	√	√	D	√√	√	D
Nitriding	√	√√	√√	D	√√	√	D
Electroplating (Cr, Ni)	D	××	√	D	×	√	××
Plasma sprayed coating (Soft)	D	D	×	√	××	×	√
Solid lubricated coatings	√√	×	×	×	D	√	√
Ion implantation	√	√√	√	×	×××	√	D
IBED hard films	√	√	√	××	D	√	√
PVD and CVD hard coatings	√	D	√	×	D	√	D
Shot peening	D	√√	√	√√	-	√√	√√

注: D表示与具体情况有关。

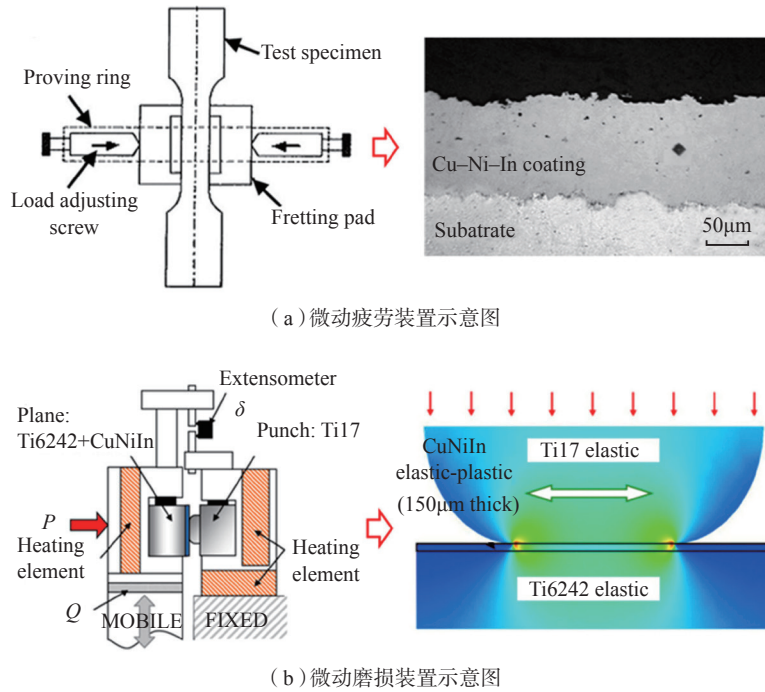


图5 基于榫结构微动防护的CuNiIn涂层件微动磨损及微动疲劳性能研究
 Fig.5 Schematic drawings of fretting wear and fretting fatigue test device for Ti alloy specimens with CuNiIn coating, which are related to fretting palliative of dovetail joint components

上看,目前榫结构的微动疲劳研究尚存在以下问题:

(1) 喷丸强化是公认的提升构件微动疲劳性能的有效手段,然而提及喷丸对微动磨损的影响,不同学者则观点各异。对于Ti-6Al-4V合金,刘道新等^[60]认为,喷丸处理降低了试样摩擦系数,降低了表层剪切强度,从而增强了其微动磨损抗力;罗建军等^[61]提出,喷丸使材料脆化,横向结合力减弱,试样微动磨损性能反而变差;Fridrici等^[62]的研究则表明,喷丸处理对试样微动磨损性能影响不大。喷丸对钛合金微动磨损作用如何,尚需进一步研究证实。

(2) 众所周知,喷丸引入了3个主要因素:表面粗糙度、表层应变硬化及表层残余压应力。但关于各因素对微动疲劳行为(运行机制、损伤形式、裂纹行为)的影响机理,尚缺乏系统研究和统一认识。目前仅有残余压应力抑制疲劳裂纹扩展得到了学界公认,而有关表层应变硬化及

残余压应力对裂纹萌生行为影响机理,学界鲜有报道,偶有提及也是言之泛泛,缺乏深入探讨。

(3) 尽管目前关于喷丸+CuNiIn涂层复合处理的研究常以榫结构微动防护为背景,但试验中均采用微动磨损或常规试样微动疲劳装置,应用于榫结构试样的研究尚未出现,其防护效果仍需进一步验证,对应条件下的涂层损伤机理及复合作用机制也需进一步丰富和完善。

(4) 此外,近年来关于表层微观组织对材料抗微动损伤影响的研究日益增加,学者们采用多种分析技术对表面改性处理后,材料表层微观组织演变行为进行了表征。研究重点集中于形变层的微结构观察、位错数半定量分析以及组织改变引起的抗微动损伤性能差异。对于前两点,多数学者研究结论较为一致,可施加剧烈塑性应变的表面改性技术能够引入大量位错、孪晶等结构,并通过组织演变最终形成具有一定梯度特征的微、

纳米层,如图6所示(a为剧烈喷丸处理后TC4钛合金变形层反极图(IPF);b~e, b₁~e₁为变形层不同区域微观组织透射图(TEM))^[63-65]。但关于表面纳米化对材料抗磨损及抗微动损伤性能影响,学界仍存在争议。

因此,学者们仍需以机理挖掘为出发点,贴合工程应用需求,进一步深入开展微动损伤研究工作。

结论与展望

目前,微动防护技术正朝着高效率、精细化、复合化的方向发展,涌现出许多新型表面处理方法。其中,激光加工技术因其优良的加工与处理精度、较高的加工与处理效率、良好的工艺可控性与稳定性等优势,受到了学界的普遍关注,并在工程应用领域获得了蓬勃发展。以激光喷丸、激光熔覆、激光表面合金化等为代表的强化手段,在抗磨损、抗疲劳、抗腐蚀、抗微动损伤等方面得到了广泛应用。发动机榫型构件外形特殊,如何实现叶片-轮盘配合部位的高效、精细、定域化处理,是微动防护中需要解决的关键性问题。激光加工的技术优势恰好与上述需求相契合,只是在表面微观形貌构建方面尚有不足。如能良好解决其表面形貌造成的局部接触应力集中问题,改善微动环境,则有望发挥其在提升榫结构微动疲劳性能方面的巨大潜力,大幅提升强化效果。此外,微动疲劳具备微动磨损和常规疲劳的耦合特性,单一强化技术很难做到统筹兼顾,如何通过多技术复合达到理想强化效果,是目前微动疲劳研究的前沿课题,也必将是未来微动防护技术的发展方向。

参考文献

[1] 马刚. 压气机燕尾榫联接结构微动疲劳寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
 MA Gang. Fretting fatigue life of dovetail joint of compressor[D]. Nanjing: Nanjing

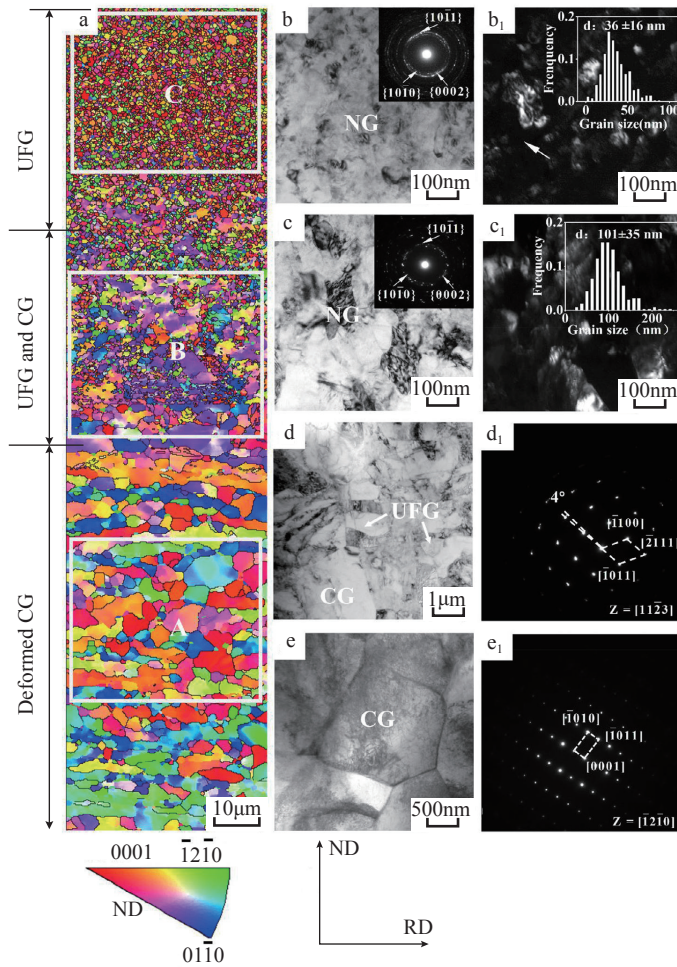


图6 TC4钛合金表面剧烈喷丸处理后晶粒分布及微观组织特征示意图

Fig.6 Schematic diagram of grain distribution and microstructure characteristics of TC4 titanium alloy after severe surface shot peening treatment

University of Aeronautics and Astronautics, 2004.

[2] ARAÚJO J A, NOWELL D. Mixed high low fretting fatigue of Ti6Al4V: Tests and modelling[J]. Tribology International, 2009, 42(9): 1276–1285.

[3] NICHOLAS T. Critical issues in high cycle fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21: S221–S231.

[4] 陶春虎. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2013.

TAO Chunhu. Failure and prevention of aeronautical titanium alloy[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.

[5] 赵永庆, 陈永楠, 张学敏. 钛合金相变及热处理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.

ZHAO Yongqing, CHEN Yongnan, ZHANG Xuemin. Phase transformation and heat treatment of titanium alloys[M]. Changsha: Central South University Press, 2012.

[6] 夏明莉, 刘道新, 杜东兴, 等. 喷

丸强化对TC4钛合金表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(8): 1349–1353, 1358.

XIA Mingli, LIU Daoxin, DU Dongxing, et al. Effects of shot peening on surface integrity and fatigue properties of TC4 titanium alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(8): 1349–1353, 1358.

[7] 高玉魁. 不同表面改性强化处理对TC4钛合金表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(8): 915–922.

GAO Yukui. Influence of different surface modification treatments on surface integrity and fatigue performance of TC4 titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(8): 915–922.

[8] 王科昌, 罗学昆, 刘克辉, 等. 表面加工方法对TC4钛合金表面完整性及高周疲劳性能的影响[J]. 钛工业进展, 2018, 35(3): 39–44.

WANG Kechang, LUO Xuekun, LIU

Kehui, et al. Effect of surface processing methods on surface integrity and high-cycle fatigue property of TC4 titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35(3): 39–44.

[9] 阴晓宁. TC4钛合金喷丸强化表面完整性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

YIN Xiaoning. Surface integrity study on shot peened Ti-6Al-4V titanium alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

[10] LI X, YANG J W, LI M H, et al. An investigation on fretting fatigue mechanism under complex cyclic loading conditions[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 88: 227–235.

[11] MAJZOUBI G H, ABBASI F. On the effect of contact geometry on fretting fatigue life under cyclic contact loading[J]. Tribology Letters, 2017, 65(4): 125.

[12] ALFREDSSON B, CADARIO A. A study on fretting friction evolution and fretting fatigue crack initiation for a spherical contact[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(10): 1037–1052.

[13] WALVEKAR A A, LEONARD B D, SADEGHI F, et al. An experimental study and fatigue damage model for fretting fatigue[J]. Tribology International, 2014, 79: 183–196.

[14] HOJJATI-TALEMI R, ABDEL WAHAB M, DE PAUW J, et al. Prediction of fretting fatigue crack initiation and propagation lifetime for cylindrical contact configuration[J]. Tribology International, 2014, 76: 73–91.

[15] MURUGESAN J, MUTOH Y. Fretting fatigue strength prediction of dovetail joint and bolted joint by using the generalized tangential stress range-compressive stress range diagram[J]. Tribology International, 2014, 76: 116–121.

[16] GOLDEN P J. Development of a dovetail fretting fatigue fixture for turbine engine materials[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(4): 620–628.

[17] RAJASEKARAN R, NOWELL D. Fretting fatigue in dovetail blade roots: experiment and analysis[J]. Tribology International, 2006, 39(10): 1277–1285.

[18] 张新华, 付雪松, 盖鹏涛, 等. 湿喷丸处理Ti-6Al-4V合金微动磨损行为影响[J]. 航空制造技术, 2017, 60(13): 44–47, 59.

ZHANG Xinhua, FU Xuesong, GAI Pengtao, et al. Investigation on the fretting wear of Ti-6Al-4V alloy treated with wet peening[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(13): 44–47, 59.

- [19] ZHANG X H, LIU D X. Effect of shot peening on fretting fatigue of Ti811 alloy at elevated temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(5): 889–893.
- [20] MALL S, JAIN V K, FADAG H A. Effects of shot-peening on fretting fatigue crack growth behavior in Ti–6Al–4V[J]. *Strain*, 2011, 47: e305–e318. DOI:10.1111/j.1475–1305.2008.00591.x.
- [21] VÁZQUEZ J, NAVARRO C, DOMÍNGUEZ J. Experimental results in fretting fatigue with shot and laser peened Al 7075–T651 specimens[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 40: 143–153.
- [22] HIGOUNENC O. Correlation of shot peening parameters to surface characteristic[C]//*Proceedings of ICSP–9: Shot Peening*. Paris, 2005.
- [23] KASAREKAR A T, SADEGHI F, TSEREGOUNIS S. Fretting fatigue of rough surfaces[J]. *Wear*, 2008, 264(7–8): 719–730.
- [24] PROUDHON H, FOUVRY S, BUFFIERE J. A fretting crack initiation prediction taking into account the surface roughness and the crack nucleation process volume[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(5): 569–579.
- [25] AGGARWAL M L, KHAN R A, AGRAWAL V P. Effect of surface roughness on the fretting fatigue behaviour of EN45A spring steel[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2006, 220(8): 1325–1331.
- [26] MAJZOABI G H, AHMADKHANI A R. The effects of multiple re-shot peening on fretting fatigue behavior of Al7075–T6[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205(1): 102–109.
- [27] MAJZOABI G H, KAZEMI M A. A new investigation on the effect of Re-shot peening on fretting fatigue behavior of Al7075–T6[J]. *Tribology Transactions*, 2013, 56(6): 943–952.
- [28] 李瑞冬, 付雪松, 周文龙, 等. 喷丸强化与涂层复合表面处理改善 Ti–6Al–4V 钛合金抗微动磨损性能[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(17): 96–99.
- [29] LI Ruidong, FU Xuesong, ZHOU Wenlong, et al. Improvement of fretting wear resistance of Ti–6Al–4V by application of shot peening and coating[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(17): 96–99.
- [30] MUBARAK ALI M, GANESH SUNDARA RAMAN S. Plain fatigue and fretting fatigue behaviour of plasma nitrided Ti–6Al–4V[J]. *Materials Letters*, 2008, 62(16): 2473–2475.
- [31] VADIRAJ A, KAMARAJ M. Fretting fatigue behavior of surface modified biomedical titanium alloys[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2010, 63(2–3): 217–223.
- [32] 刘道新, 汤金钢, 张晓化, 等. 离子渗 Zr 及其与喷丸强化复合对钛合金常规疲劳和微动疲劳行为的影响 [C]//*第十七届全国疲劳与断裂学术会议论文集*. 桂林, 2014.
- [33] LIU Daoxin, TANG Jingang, ZHANG Xiaohua, et al. Effect of ion-infiltration Zr and its composite with shot peening on normal fatigue and fretting fatigue behavior of titanium alloy[C]//*Proceedings of the 17th National Conference on Fatigue and Fracture*. Guilin, 2014.
- [34] ZHANG Y Y, DESCARTES S, VO P, et al. Cold-sprayed Cu–MoS₂ and its fretting wear behavior[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(3): 473–482.
- [35] CHAUDHRY V, KAILAS S V. Damage mechanisms in stainless steel and chromium carbide coatings under controlled environment fretting conditions[J]. *Wear*, 2015, 334–335: 75–81.
- [36] LEE L, RÉGIS É, DESCARTES S, et al. Fretting wear behavior of Zn–Ni alloy coatings[J]. *Wear*, 2015, 330–331: 112–121.
- [37] FRANCO STEIER V, KALOMBO BADIBANGA R, ROBERTO MOREIRA DA SILVA C, et al. Effect of chromium nitride coatings and cryogenic treatments on wear and fretting fatigue resistance of aluminum[J]. *Electric Power Systems Research*, 2014, 116: 322–329.
- [38] YANG J, AN Y L, ZHAO X Q, et al. Influence of phase composition on fretting wear behavior of thermally sprayed aluminum bronze coatings[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2013, 227(9): 1030–1037.
- [39] ZALNEZHAD E, SARHAN A A D, HAMDY M. Investigating the fretting fatigue life of thin film titanium nitride coated aerospace Al7075–T6 alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 559: 436–446.
- [40] SRINIVASAN S, GARCIA D B, GEAN M C, et al. Fretting fatigue of laser shock peened Ti–6Al–4V[J]. *Tribology International*, 2009, 42(9): 1324–1329.
- [41] HE W F, LI Y Q, NIE X F, et al. A study of the microstructure and hardness of Ti–5Al–2Sn–2Zr–4Mo–4Cr by laser shock peening[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 84–85: 471–475.
- [42] KING A, STEUWER A, WOODWARD C, et al. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 435–436: 12–18.
- [43] LIU K K, HILL M R. The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti–6Al–4V coupons[J]. *Tribology International*, 2009, 42(9): 1250–1262.
- [44] LIU D X, TANG B, ZHU X D, et al. Improvement of the fretting fatigue and fretting wear of Ti6Al4V by duplex surface modification[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 116–119: 234–238.
- [45] RIPOLL M R, SIMIČ R, BRENNER J, et al. Friction and lifetime of laser surface-textured and MoS₂-coated Ti6Al4V under dry reciprocating sliding[J]. *Tribology Letters*, 2013, 51(2): 261–271.
- [46] KUBIAK K, FOUVRY S, MARECHAL A M, et al. Behaviour of shot peening combined with WC–Co HVOF coating under complex fretting wear and fretting fatigue loading conditions[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(7): 4323–4328.
- [47] XU G H, ZHU M H, LIU J J, et al. The effect of pre-treatment of substrate on fretting tribological behavior of MoS₂ coatings[J]. *Wear*, 2003, 255(1–6): 246–252.
- [48] LIU D X, ZHU X D, TANG B, et al. Fretting fatigue improvement of Ti6Al4V by coating and shot peening[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2005, 21(2): 246–250.
- [49] 杜东兴. 表面改性对钛合金疲劳行为的影响[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [50] DU Dongxing. Effects of surface modification and integrity on fatigue behaviors of titanium alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.

- [50] CHAKRAVARTY S, ANDREWS R G, PAINAIK P C, et al. The effect of surface modification on fretting fatigue in Ti alloy turbine components[J]. JOM, 1995, 47(4): 31–35.
- [51] PREVÉY P S, JAYARAMAN N, RAVINDRANATH R A. Use of residual compression in design to improve damage tolerance in Ti–6Al–4V aero engine blade dovetails[C]//Proceedings of the 10th National Turbine Engine HCF Conference. New Orleans, 2005.
- [52] CONNER B P, NICHOLAS T. Using a dovetail fixture to study fretting fatigue and fretting palliatives[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2006, 128(2): 133–141.
- [53] GOLDEN P J, HUTSON A, SUNDARAM V, et al. Effect of surface treatments on fretting fatigue of Ti–6Al–4V[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(7): 1302–1310.
- [54] FU Y Q, WEI J, BATCHELOR A W. Some considerations on the mitigation of fretting damage by the application of surface-modification technologies[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99(1–3): 231–245.
- [55] REN W J, MALL S, SANDERS J H, et al. Evaluation of coatings on Ti–6Al–4V substrate under fretting fatigue[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 192(2–3): 177–188.
- [56] GANESH SUNDARA RAMAN S, RAJASEKARAN B, JOSHI S V, et al. Influence of substrate material on plain fatigue and fretting fatigue behavior of detonation gun sprayed Cu–Ni–In coating[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(4): 571–579.
- [57] RAJASEKARAN B, RAMAN S G S, JOSHI S V, et al. Performance of plasma sprayed and detonation Gun sprayed Cu–Ni–In coatings on Ti–6Al–4V under plain fatigue and fretting fatigue loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 479(1–2): 83–92.
- [58] MARY C, FOUVRY S, MARTIN J M, et al. High temperature fretting wear of a Ti alloy/CuNiIn contact[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 203(5–7): 691–698.
- [59] MARY C, FOUVRY S, MARTIN J M, et al. Pressure and temperature effects on fretting Wear damage of a Cu–Ni–In plasma coating versus Ti17 titanium alloy contact[J]. Wear, 2011, 272(1): 18–37.
- [60] 刘道新, 何家文. 经不同表面改性处理的钛合金的微动疲劳和微动磨损行为对比研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 13–17.
- LIU Daoxin, HE Jiawen. Comparative study on the fretting fatigue and fretting wear behaviors of titanium alloy subject to various surface modifications[J]. Tribology, 2005, 25(1): 13–17.
- [61] 罗建军, 王世洪, 沈桂琴, 等. Ti–6Al–4V 合金微动磨损的表面防护[J]. 稀有金属材料与工程, 1995, 24(4): 53–58.
- LUO Jianjun, WANG Shihong, SHEN Guiqin, et al. Surface protection technique against fretting-wear of Ti–6Al–4V titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1995, 24(4): 53–58.
- [62] FRIDRICI V, FOUVRY S, KAPSA P. Effect of shot peening on the fretting wear of Ti–6Al–4V[J]. Wear, 2001, 250(1–12): 642–649.
- [63] LU J Z, WU L J, SUN G F, et al. Microstructural response and grain refinement mechanism of commercially pure titanium subjected to multiple laser shock peening impacts[J]. Acta Materialia, 2017, 127: 252–266.
- [64] YAN C K, FENG A H, QU S J, et al. Dynamic recrystallization of titanium: Effect of pre-activated twinning at cryogenic temperature[J]. Acta Materialia, 2018, 154: 311–324.
- [65] WANG C L, YU D P, NIU Z Q, et al. The role of pyramidal $\langle c + a \rangle$ dislocations in the grain refinement mechanism in Ti–6Al–4V alloy processed by severe plastic deformation[J]. Acta Materialia, 2020, 200: 101–115.

通讯作者: 周文龙, 教授、博士生导师, 研究方向为材料强化调控、材料微动损伤与防护、混杂纤维增强摩擦材料, E-mail: wlzhou@dlut.edu.cn。

Review of Fretting Fatigue Palliative Technology for Dovetail Joint of Titanium Alloy

YANG Qi^{1,2}, FU Xuesong², ZHOU Wenlong^{2,3}

(1. College of Chemical and Materials Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China;

2. Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology (Liaoning Province), Dalian University of Technology, Dalian 116085, China;

3. Dalian University of Technology (Yingkou) Advanced Materials Engineering Center Ltd., Yingkou 115007, China)

[ABSTRACT] The fretting fatigue failure form and testing approach of blade-disk dovetail joint in the turbine engine are reviewed, the latest research progress of surface modification technology for improving the fretting fatigue properties of titanium alloys is summarized. The treatment process, strengthening mechanism of different technology and their applications in improving the fretting fatigue performance of titanium alloy blade are introduced. The existing problems in the research field are proposed.

Keywords: Titanium alloy; Aero-engine; Dovetail joint; Fretting fatigue test; Surface modification technology

(责编 逸飞)