

航空发动机零部件的 抗疲劳制造技术

Anti-Fatigue Manufacturing Technology of Aeroengine Part

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 石竖鲲 马艳玲 吴伟东



石竖鲲

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司总工艺师,研究员级高级工程师,毕业于北京航空航天大学焊接工程专业,长期从事航空发动机制造技术研究与实践,在大型钛合金热成形与焊接技术、新型材料薄壁机匣加工技术等方面取得突出成就。

航空发动机制造技术是航空工业的关键技术,传统的航空发动机制造技术是以制造成本、时间、空间等为依据,通过工艺控制,形成满足要求的表面特征的制造技术。它关注的是表面机加工形位、表面形貌、表面裂纹等特征,考虑的是低成本、高效率、高精度,对发动机的寿命和可

要将抗疲劳制造技术应用于工程实践中,必须与航空产品的高可靠性及长寿命研究相结合,以典型关键航空产品为载体,先从几项典型表面完整性指标入手,在制造过程中实现控制和检测。

靠性方面关注不足,满足不了航空结构的轻量化、高可靠性要求。

发动机故障统计分析表明,大多数为疲劳失效。失效的主要原因为表面缺陷,尤其潜伏在表层和亚表层的缺陷是产生疲劳失效的隐形杀手。

国内外抗疲劳制造技术发展现状

抗疲劳制造技术是以疲劳性能指标为主要判断依据,通过控制产品表面完整性提高疲劳强度的制造技术^[1]。表面完整性是指产品表面层技术状态的指标和标准。

国外开展抗疲劳制造技术研究很早,某国金切研究协会于1964年首次提出了表面完整性的概念,即描述、鉴定和控制零件加工过程在其加工表面层内可能产生的各种变化及其对表面层工作性能影响的技术指标。从20世纪60年代国外开始对

表面质量和零件抗疲劳及军机寿命设计等方面开展研究,其中某国航空航天局资助航空航天科研机构与其国内知名大学之间开展了10多年的有关抗疲劳制造技术指标即表面完整性体系研究工作。1971年后各国开始军机安全寿命设计和损伤容限及耐久性设计等项目的研究,逐渐完善了抗疲劳长寿命制造技术体系,并已应用于航空产品的制造中。

国内相关研究起步晚,20世纪90年代国内部分行业成立了表面质量研究机构,提出了“无应力集中”抗疲劳制造的概念,2003年由12位院士联名向国务院提出建议,开展《抗疲劳制造与长寿命关键基础构件研究发展》项目研究。中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司(以下简称沈阳黎明)从2009年开始,初步开展了产品表面完整性中相关几何纹理、表面层组织状态两大方面应用研究工作。

抗疲劳技术指标评价体系

表面完整性是评价抗疲劳制造的技术指标,评价体系分3个评价级别:最少数据组、标准数据组、广义数据组;主要包含8项关键技术指标:即表面粗糙度、残余应力、加工硬化、表面形貌、表面缺陷、金相组织、棱边质量及其他特征,具体内容见表1^[2]。

从评价体系可以看出,表面完整性构成了抗疲劳制造完整的技术指标评价体系,抗疲劳制造涉及多学科、产品功能、制造细节和全过程,是全新的制造理念。

抗疲劳技术研发体系

开展抗疲劳制造技术研究主要以疲劳失效原理为基础理论,在此基础上结合其他理论构建了抗疲劳研发体系理论基础。

1 基础理论

零件在循环载荷的作用下,经过一定的循环周次后发生的断裂失效称为疲劳失效,在常见的机械零件失效形式中约占70%,是零件失效的

主要形式之一^[3]。

(1) 疲劳理论。

航空零件的高强合金对疲劳强度应力集中敏感。零件主要失效模式是疲劳失效,失效的主要源头是来自潜伏在零件表层和亚表层的冶金、工艺、环境因素形成的缺陷。

疲劳断裂失效过程分为裂纹形成、裂纹扩展和瞬时断裂3个阶段^[3]。零件总的寿命主要是零件裂纹形成时间与裂纹扩展时间总和。要实现抗疲劳长寿命制造必须从零件控制裂纹缺陷萌生源和延长裂纹扩展寿命2个阶段着手。

在工程实际设计及工程结构失效分析时,要正确应用疲劳失效理论,还需考虑应力集中、零件尺寸、构件表面质量状态、环境介质和零件表面强化状态等因素对疲劳失效的影响。

(2) 其他理论。

西北工业大学等单位将 Griffith 微裂纹理论、应力腐蚀等理论也视为抗疲劳制造的基础理论。

Griffith 微裂纹理论认为材料脆性断裂的基本根源是材料中总存在

许多细小的裂纹或缺陷,在外力作用下,这些裂纹或缺陷附近就会产生应力集中,当应力达到一定程度时,裂纹就开始扩展。影响材料疲劳性能的主要因素为材料的微裂纹尺寸及裂纹表面自由能,因此增加零件的疲劳特性需增加材料表面的韧性和控制微裂纹尺寸。

应力腐蚀理论认为零件材料在特定的环境介质中,若存在拉应力,经过一定时间将出现裂纹或疲劳源,最终发生断裂失效。据统计,应力腐蚀失效几乎在所有的零件材料中都存在过。

2 抗疲劳实施途径

依据抗疲劳理论,要实现零件的抗疲劳途径主要有以下几种途径。

(1) 通过制造工艺形成不同的变质层,使裂纹萌生阶段控制在变质层内。当前的应用研究主要集中在喷丸、光整及振动光饰等工艺方法,改善表面层应力状态,提高表面层抗疲劳特性,消除表面拉应力腐蚀源。研究工艺方法对零件表面状态的影响。

(2) 通过制造工艺改变变质层的微结构、微力学性能和表面完整

表1 表面完整性评价标准级别及评价标准的内容

最少数据组	标准数据组	广义数据组
几何形状误差 (1) 表面粗糙度测量值或微观形貌图 (2) 表面纹理组织数据	“最少数据组”数据	“标准数据组”数据
微观组织(一) (1) 表面缺陷(如裂缝、擦伤、毛刺等) (2) 某些化学元素作用的痕迹(如氢、氧等) (3) 使用扫描电子显微镜所摄制的一系列放大照片 (4) 切削瘤或残渣沉积等	物理力学性能试验 (1) 表面层残余应力的大小,方向和分布情况 (2) 强度试验(如疲劳强度、极限强度等)	特定环境下的应力腐蚀试验
微观组织(二) (1) 金相组织的变化 (2) 微观裂缝 (3) 晶间腐蚀 (4) 微观缺陷(如夹杂、皱折等) (5) 塑性变形 (6) 表面层局部腐蚀 (7) 再结晶 (8) 变质层的影响 (9) 再沉积		各种补充机械试验数据 (1) 蠕变试验 (2) 裂纹扩展试验 (3) 扭矩试验 (4) 应力破坏试验 (5) 材料韧性试验 (6) 低频疲劳试验 (7) 抗拉试验 (8) 表面化学试验 (9) 其他特殊试验
热影响层		
加工硬度的变化		
棱边质量		

性,延缓表面缺陷或微裂纹的扩展速率,延长裂纹萌生寿命。利用特种工艺对零件表面的微结构进行硬化或钝化处理,或引进特种元素增加表面微力学性能。

(3)通过抗疲劳设计减少零件应力集中区。从设计源头解决零件应力集中问题。

以上这些技术途径是抗疲劳制造技术研究和发展的方向。要将抗疲劳制造技术应用于工程实践中,必须与航空产品的高可靠性及长寿命研究相结合,以典型关键航空产品为载体,先从几项典型表面完整性指标入手,在制造过程中实现控制和检测。在此基础上,建立典型件可靠性、产品寿命数据库,逐渐完善并建立相关抗疲劳、长寿命、高可靠性分析评价标准或模型。之后以标准及分析模型重新分析评估现有工艺流程中影响疲劳、寿命和可靠性的关键环节。最后针对现工艺影响疲劳的关键环节进行改进和完善。以此不断提高航空产品的抗疲劳寿命和可靠性。

抗疲劳制造技术应用

从2009年开始,沈阳黎明开展了有关抗疲劳长寿命制造技术理论和应用研究,先后对机匣、涡轮盘、叶片和整体叶盘4种类型的零件抗疲劳关键技术指标进行了试验和应用,取得良好效果。应用研究主要集中在表面几何纹理、表面层组织状态控制2个方面。

1 表面质量改进技术

发动机盘类件故障率高,表面应力状态、表面孔边缘的粗糙度及转接R处的表面粗糙度是影响零件疲劳的关键因素。常规工艺方法是在车削加工的基础上,采用手工抛修提高表面粗糙度,改善表面应力状态。相比国外同类产品,零件表面粗糙度一致性差,存在二次抛修划痕,表面应力状态不一致。国外产品表面质量状态一致性好,无人工加工痕迹。从

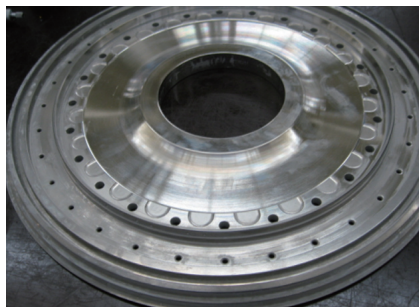


图1 光饰前的涡轮盘表面



图2 光饰8h后的涡轮盘表面

该类件国外相关表面质量标准看,其强调表面质量的一致性(包括外观形状的每一细节),主要目的是提高转动件在高速旋转中的稳定性和抗疲劳寿命。在国外普通的表面吹砂技术标准中,为了严格控制零件表面应力状态,标准中对湿吹砂的压力、砂的粒度和配比、喷嘴的内径尺寸控制和喷射角度、喷射时盘的转速、盘与喷嘴距离、检测项目等均做了严格而明确的规定。为了提高零件抗疲劳寿命,沈阳黎明开展了利用振动光饰和光整工艺代替手工抛修,以改善其表面粗糙度、硬度、应力等技术状态。在光饰设备上采用120#专用磨料,对盘件进行了光饰加工,光饰

前后的效果见图1和图2。光饰后盘的所有棱边角圆光滑一致,目视看不出明显的加工刀痕。盘的表面应力、粗糙度和硬度在光饰前后的变化见图3~5,其中应力状态改善效果最佳。应力由车加工的拉应力均改变为压应力状态,平均压应力值为-458MPa,压应力层厚度平均为0.02mm,粗糙度平均提高一个等级,硬度也有所提高,改善了涡轮盘表面抗疲劳性能指标,提高了盘的使用寿命和可靠性。

2 表面强度增强技术

轴类零件也是发动机中故障率较高的部件,国外其他行业的相关标准中对轴表面质量要求苛刻,除了常规的几何尺寸精度及粗糙度要求外,

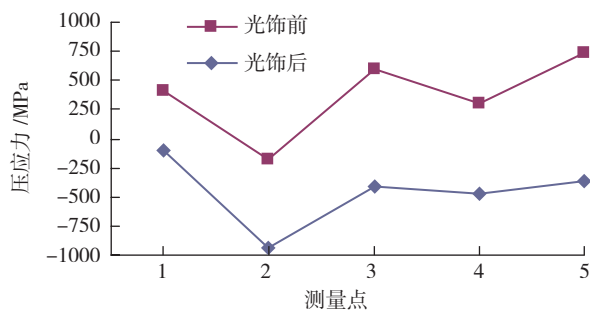


图3 表面应力状态变化曲线

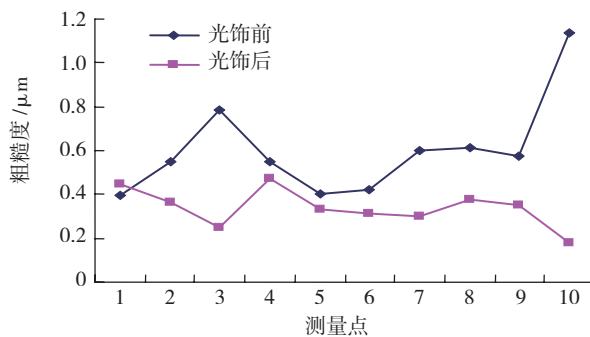


图4 粗糙度变化曲线

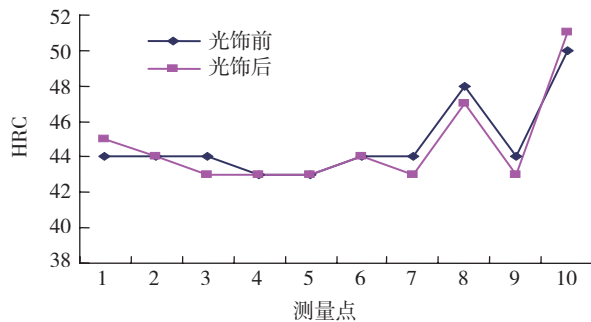


图5 洛氏硬度变化曲线

还包括表面应力状态控制,对光整加工的表面,除了要求在40倍的放大镜下检测其表面纹理外,还要求采用电子扫描显微镜,对放大500倍的表面检查是否存在碰伤、磨伤、晶间氧化或腐蚀等缺陷,检测要求明显高于国内同类产品。采用光整工艺对轴进行表面精整处理,以改善其表面关键抗疲劳技术指标(见表2),在装配和使用过程中取得了明显的效果。由于粗糙度值降低、显微硬度提高、消除了残余拉应力,使变成均匀的压应力,从而增强了轴的疲劳强度和耐磨性,延长了使用寿命;由于消除了毛刺,保证了装配精度,同时提高了产品的清洁度。

表面耐磨性指标也是影响高速转动轴疲劳因素之一,通过对该类型

表面光整精加工,轴表面轮廓支撑率 T_p 值明显提高,同时轴的跳动值也有改善。图6和图7分别是 T_p 值和光整前后的跳动值。

轴类件表面 T_p 值的增加表明,经过光整处理后,零件转动的接触面积平均增加20%左右,明显地增加了零件装配配合的可靠性,跳动值的降低改善了零件工作中振动状况,有利于提高零件的抗疲劳寿命。

3 结构件棱边光整技术

机匣件是静子承力件,零件棱边多,影响其抗疲劳寿命的因素之一是棱边应力集中。同时棱边尖角在高压气流作用下也是产生金属粉削的源头,手工抛修存在二次棱边现象,有很多手工抛光盲区,棱边质量的一致性差。因此,沈阳黎明开始利用光饰工

艺对成品机匣件表面进行了处理,见图8。除了改善表面粗糙度外,所有机匣表面的棱边,特别是手工抛修困难区域的棱边,倒角光滑,一致性好,减少了应力集中的质量隐患。同时每件机匣因光饰倒角质量平均减轻了26g,避免了机匣件在高压气流的作用下,尖边毛刺形成粉尘造成对发动机关键部件的危害。光滑的棱边质量可以降低气流产生的噪声和振动,增加了机匣件的抗疲劳性能。

结束语

以上开展的抗疲劳制造技术应用研究还需深入推广,特别是技术指标对产品疲劳寿命影响程度,各种典型结构件因其使用特点,主要抗疲劳技术指标侧重点不同,需要进行系统研究和试验,也需要与国内各大院校开展联合攻关,借鉴和学习民用产品中相关技术成果,特别是汽车内燃机行业引进的相关技术和标准,完成关键典型件抗疲劳技术指标的量化。

在典型零件抗疲劳制造技术应用的基础上,逐步形成系统地涵盖各专业领域的抗疲劳长寿命制造技术

评价标准体系,以抗疲劳长寿命制造理念为引领,精化三代机和四代机制造工艺,提高零部件质量和使用寿命,最终实现降低发动机的故障率,提高产品综合使用寿命及整机制造质量。

参考文献

- [1] 赵振业. 高温合金应用与抗疲劳制造. 功能材料信息, 2009(2): 15-16.
- [2] 王贵成, 洪泉, 朱云明, 等. 精密加工中表面完整性的综合评价. 兵工学报, 2005(6): 820-823.
- [3] 刘瑞堂. 机械零件失效分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003: 23-31.

表2 光整前后轴的表面特性对比表

工序	显微硬度 HV	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	凸轮表面应力 /MPa		毛刺状况
			切向	轴向	
光整前	289	1.60	-117	-329	毛刺、锐边
光整后	436	0.65	-458	-577	无毛刺、锐边倒圆

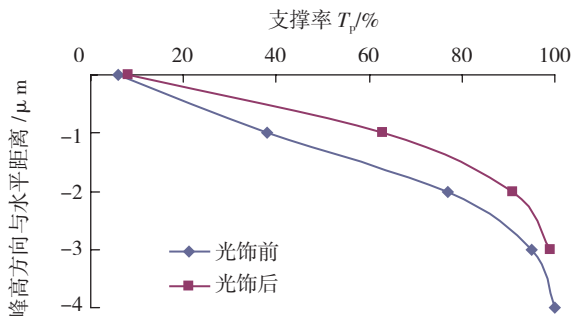


图6 轴颈 T_p 曲线

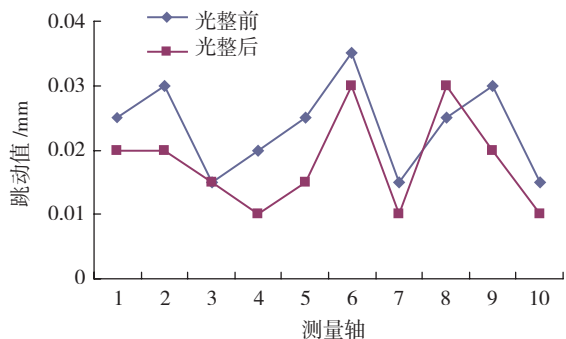
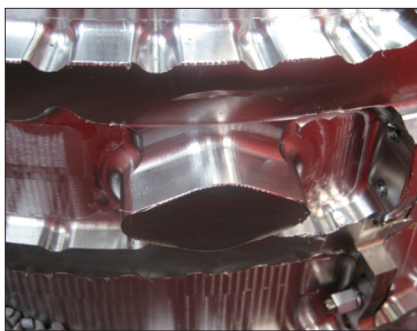


图7 轴的跳动值变化对比



(a) 光饰前



(b) 光饰后

图8 光饰前后机匣局部状态

(责编 良辰)