

浮动花键抗磨损强度分析与试验

郭梅^{1,2}, 牟佳信^{1,2}, 李锦花^{1,2}, 赵广³, 信琦^{1,2}, 张茂强^{1,2}

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 2. 中国航空发动机集团航空发动机动力传输重点实验室: 沈阳 110015;
3. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁大连 116024)

摘要:为了解决航空发动机附件传动系统花键连接结构在正向设计阶段分析能力薄弱、缺少基础数据支撑,以及在复杂工作条件下齿面磨损严重等问题,开展了浮动花键磨损强度评估方法研究,提出适用于发动机附件传动系统浮动花键的齿面接触应力计算方法。并开展了花键磨损影响因素对比试验,测量不同材料、表面粗糙度、表面处理、润滑条件、偏斜角、齿形条件下的磨损量和齿厚变化量。结果表明:花键表面硬度是决定抗磨损能力的主要因素,硬度大抗磨损能力强;在偏斜状态下工作的花键通过齿形修形改善接触区位置,降低接触应力,可提高抗磨损能力;润滑油润滑可以减小摩擦磨损,减少磨屑产生,是减小花键磨损的首要措施;正确选择齿侧间隙有利于减小磨损发生。

关键词:浮动花键;抗磨损强度;试验;附件传动系统;航空发动机

中图分类号:V232.8

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.03.013

Analysis and Test of Floating Spline Wear Resistance

GUO Mei^{1,2}, MU Jia-xin^{1,2}, LI Jin-hua^{1,2}, ZHAO Guang³, XIN Qi^{1,2}, ZHANG Mao-qiang^{1,2}

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, 2. AECC Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aero-engine: Shenyang 110015, China; 3. School of Energy and Power, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to solve the problems of weak analyzing ability, lack of basic data support, and severe tooth surface wear under complex working conditions in the forward design phase of spline joints aeroengine accessory transmission system, the research on wear resistance evaluating method of floating spline was carried out, a tooth surface contact stress calculating method suitable for floating splines in aeroengine accessory transmission systems was proposed. Comparative tests were carried out to investigate the influencing factors of spline wear, during which measurements of the amount of wear and tooth thickness changes were conducted under the different materials, surface roughness, surface treatment, lubrication conditions, angular misalignment, and tooth profile conditions. The results show that the surface hardness is the main factor affecting wear resistance, the higher the hardness the higher the wear resistance; spline can improve contact zone position by tooth profile changes, and reduce contact stress, hence improving the wear resistance under angular misalignment; the lubrication can reduce frictional wear, decrease ablation, and is the primary measure to reduce spline wear; correct selection of backlash is beneficial for reducing wear.

Key words: floating spline; wear resistance; test; accessory transmission system; aeroengine

0 引言

航空发动机传动系统花键主要用于连接齿轮箱或附件^[1],为适应工作条件下连接部件之间存在的不对中,采用齿侧定心的浮动花键^[2]。浮动花键连接结构具有不对中补偿能力强、承载能力强、自定心性好、结构简单紧凑等优点,因此被广泛应用于发动机传动

系统。传动系统浮动花键工作环境复杂,不仅要承受所传递的扭矩负载,还需承受因不对中、偏心质量、温度等因素引起的附加载荷,且受限于空间结构,有时还需工作在无润滑和冷却条件下,由此对传动系统浮动花键的设计及制造均带来了较高的挑战。长期以来,传动系统浮动花键磨损引发的故障或问题频发,花键磨损造成材料损失和结构尺寸改变,缩短了零件

收稿日期:2023-04-14 基金项目:省部级专项资金资助

作者简介:郭梅(1972),女,自然科学研究员。

引用格式:郭梅,牟佳信,李锦花,等.浮动花键抗磨损强度分析与试验[J].航空发动机,2024,50(3):93-97.GUO Mei, MU Jiaxin, LI Jinhua, et al. Analysis and test of floating spline wear resistance[J]. Aeroengine, 2024, 50(3): 93-97.

的使用寿命和传动系统的工作寿命,降低了系统可靠性^[3-4]。

美国早在20世纪六七十年代就开始进行花键磨损机理研究。Ku等^[5-7]开展了持续十多年的花键磨损试验测试,揭示材料、润滑、表面处理、不对中等因素对花键磨损性能的影响,获得了大量的基础数据;Leen等^[8]开展了过载状态下花键疲劳寿命的预测;Dudly^[9-10]在花键损伤模式、强度分析、鼓形花键设计方面的成果被广泛认可,在AGMA 945中形成标准,应用于工程设计中^[11];汽车工程协会标准SAE M-117设计指南在航空工业中也应用普遍;胡正根等^[12]使用有限元方法对航空渐开线花键副磨损进行接触分析,得到花键副的接触应力及相对滑移分布规律;陈卓等^[13]基于GB/T 17855^[14]对渐开线花键齿面压应力、齿根弯曲应力和齿根剪切应力等承载能力进行计算并比较分析,得出几个主要尺寸参数对花键强度的影响,并探讨如何通过改变尺寸参数来提高花键强度的方法。了解不同强度分析方法的适用性和中国加工工艺及结构特点的花键构件磨损规律有重要意义。

本文开展了浮动花键齿面承载能力计算方法研究。

1 浮动花键齿面承载能力计算方法对比分析

花键齿面承载能力依据齿面接触应力水平来判断,对比了机械设计手册、GB/T 17855和AGMA945-A18(Dudley方法)中的花键齿面接触应力计算公式,分析适用于航空发动机传动系统花键的方法。

1.1 机械设计手册中花键齿面强度计算方法

机械设计手册^[15]中的齿面接触强度计算方法

$$p = \frac{2T}{\psi z h l D_m} \leq [p_{pp}] \quad (1)$$

式中: T 为扭矩; ψ 为各载荷不均匀系数; z 为齿数; h 为齿的工作高度; l 为齿的工作长度; D_m 为分度圆直径; p_{pp} 为许用接触应力。

花键齿面许用接触应力见表1。

1.2 GB/T 17855中花键齿面强度计算方法

GB/T 17855中花键强度计算方法

$$\sigma_H = \frac{W}{H_w} \leq [\sigma_H] \quad (2)$$

$$W = \frac{F_t}{Zl \cos \alpha_D} \quad (3)$$

$$[\sigma_H] = \frac{\sigma_{0.2}}{S_H K_1 K_2 K_3 K_4} \quad (4)$$

表1 花键连接许用接触应力 p_{pp}

联接方式	使用和制造情况	p_{pp}/MPa	
		齿面未经热处理	齿面经热处理
不在载荷下移动的动联接	不良	15~20	20~35
	中等	20~30	30~60
	良好	25~40	40~70
在载荷下移动的动联接	不良		3~10
	中等		5~15
	良好		10~20

$$\sigma_H \leq [\sigma_{H1}] \quad (5)$$

$$\sigma_H \leq [\sigma_{H2}] \quad (6)$$

式中: σ_H 为计算接触应力; W 为单位载荷; H_w 为工作齿高; F_t 为名义切向力; Z 为齿数; l 为花键长度; α_D 为标准压力角; $[\sigma_H]$ 为许用接触应力; $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度; S_H 为安全系数; K_1 为使用系数; K_2 为齿侧间隙系数; K_3 为分配系数; K_4 为轴向偏载系数; σ_{H1} 为 10^8 循环次数下的齿面磨损许用应力; σ_{H2} 为长期工作无磨损的许用应力。

齿面磨损许用应力见表2、3。

表2 10^8 循环次数下齿面磨损许用应力 σ_{H1} ^[14] MPa

未经热处理	调质处理		淬火		渗碳(氮)淬火
HRC=20	HRC=28	HRC=40	HRC=45	HRC=50	HRC=60
95	110	135	170	185	205

表3 长期工作无磨损齿面许用应力 σ_{H2} ^[14] MPa

未经热处理	0.028×布氏硬度值
调质处理	0.032×布氏硬度值
淬火	0.3×布氏硬度值
渗碳(氮)淬火	0.4×布氏硬度值

1.3 AGMA945-A18(Dudley方法)花键齿面强度计算方法

AGMA945-A18(Dudley方法)花键齿面接触强度计算方法

$$S_c = \frac{2TK_m}{DNF_e h} \quad (7)$$

$$S_c \frac{K_a}{L_w} \leq [S_c] \quad (8)$$

式中: S_c 为计算接触应力; T 为扭矩; K_m 为载荷分布系数; D 为节圆直径; N 为齿数; F_e 为齿宽; h 为径向接触齿高; $[S_c]$ 为许用接触应力; K_a 为应用系数; L_w 为磨损寿命系数。

齿面许用接触应力见表4。

表 4 齿面磨损许用应力

材料	硬度		许用挤压应力[S _c]/MPa	
	HB	HRC	直齿花键	鼓形花键
钢	160 ~ 200		10.34	41.37
	230 ~ 260		13.79	55.16
	302 ~ 351	33 ~ 38	20.68	82.74
表面硬化钢		48 ~ 53	27.58	110.32
		58 ~ 63	34.47	137.90

1.4 对比分析结果

3种方法的齿面接触应力计算公式是相似的,均在基础公式“力/接触面积”的基础上增加了修正系数,机械设计手册通过载荷不均匀系数 ψ 修正;GB/T17855标准将切向力除以 $\cos\alpha_0$ 转换为沿齿面法向力;Dudley标准通过载荷分布系数 K_m 修正压应力,即通过此系数考虑不同偏斜量的影响,并且在公式中用磨损寿命系数修正计算齿面应力,即考虑工作时间对磨损程度的影响。3种方法的齿面许用压应力存在差异,机械设计手册中的许用压应力按照花键齿面硬度来确定许用接触应力。GB/T17855在计算应力公式中未体现不对中影响,但在齿面许用压应力中通过偏载系数体现不对中的影响,还通过齿侧间隙系数考虑了齿侧间隙的影响,另外该标准除了依据 $\sigma_{0.2}$ 规定许用齿面压应力外,还以硬度为基本条件,规定了齿面耐磨损能力,分为 10^8 以下和与长期使用无磨损2种情况。AGMA945-A18(Dudley方法)标准中齿面压应力许用值与材料硬度相关,当标准渐开线花键不满足时提出了鼓形花键设计方法和强度校核方法。

2 花键抗磨损能力试验

在花键磨损设备上开展了各种影响因素的磨损对比试验,试验设备如图1所示;试验件如图2所示,花键齿数19,模数1.5,压力角 20° ;花键尺寸如图3所示。试验设备能够设定花键偏斜角,喷射润滑和试验件加热。每组试验时间为50h,加载扭矩 $(200\pm 10)\text{N}\cdot\text{m}$ 。

进行不同组合条件下各影响因素(材料、表面粗

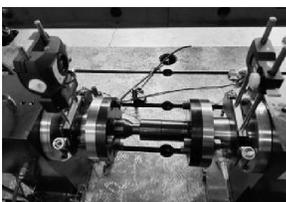


图1 花键磨损试验设备

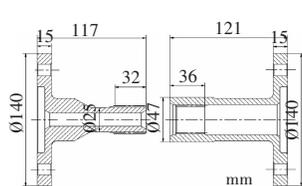


图2 花键试验件

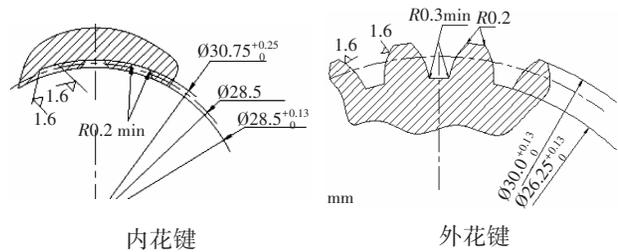


图3 花键尺寸

糙度、表面处理、润滑、偏斜、齿侧间隙、齿形)的抗磨损能力对比试验,对比材料是 $15\text{Cr}_{14}\text{Co}_{12}\text{Mo}_5\text{Ni}$ 、 $16\text{Cr}_3\text{NiWMoVbNbE}$ 、 $18\text{Cr}_2\text{Ni}_4\text{WA}$;表面粗糙度是 $R_a=0.8、1.6、3.2$;表面处理是氰化;润滑形式是脂润滑和油润滑;偏斜角和齿侧间隙是根据航空发动机典型参数;齿形是渐开线和鼓形。磨损量使用齿厚变化和重量变化来表征。

2.1 材料影响

内外花键材料分别为 $15\text{Cr}_{14}\text{Co}_{12}\text{Mo}_5\text{Ni}$ - $15\text{Cr}_{14}\text{Co}_{12}\text{Mo}_5\text{Ni}$ 、 $15\text{Cr}_{14}\text{Co}_{12}\text{Mo}_5\text{Ni}$ - $16\text{Cr}_3\text{NiWMoVbNbE}$ 、 $16\text{Cr}_3\text{NiWMoVbNbE}$ - $16\text{Cr}_3\text{NiWMoVbNbE}$ 、 $16\text{Cr}_3\text{NiWMoVbNbE}$ - $18\text{Cr}_2\text{Ni}_4\text{WA}$ 这4种组合下进行试验,试验结果如图4所示。图中材料组合牌号为内花键-外花键简称。内外花键材料均为 $15\text{Cr}_{14}\text{Co}_{12}\text{Mo}_5\text{Ni}$ 时,磨损量最小,且花键副磨损程度接近;内外花键材料均为 $16\text{Cr}_3\text{NiWMoVbNbE}$ 时花键副磨损程度接近;内外花键材料为 $15\text{Cr}_{14}\text{Co}_{12}\text{Mo}_5\text{Ni}$ - $16\text{Cr}_3\text{NiWMoVbNbE}$ 时花键副磨损程度差异较大。从图中可见,花键材料硬度大磨损小,相同材料磨损能力一致性好。

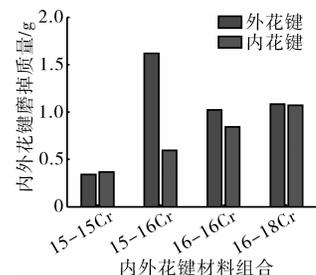


图4 磨损质量随材料变化曲线

2.2 表面粗糙度影响

脂润滑条件下3种表面粗糙度试验结果如图5所示。从图中可见,采用脂润滑条件下 $R_a=1.6$ 次之, $R_a=0.8\sim 1.6$ 最大。这与常规的观点存在异常,分析原因是表面表面粗糙度较大时,表面存储润滑脂能力强,提高了耐磨损能力。

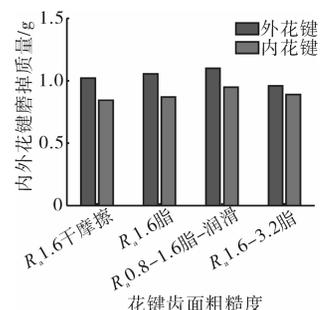


图5 磨损质量随表面粗糙度变化曲线

2.3 表面处理影响

进行内外花键均氰化、增强液态氮化、仅外花键氰化和表面无硬化4种情况的试验,试验结果如图6所示。从图中可见,内外花键均氰化时,花键磨损量最小,再次说明内外花键硬度接近时抗磨损能力强。

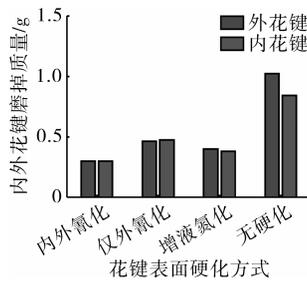


图6 磨损质量随表面硬化方式变化曲线

2.4 齿侧间隙影响

对比了在 0.15° 不对中状态下,齿侧间隙等级为H-h, H-e和H-d这3种情况下的磨损对比试验,齿侧间隙实测值分别为0.059、0.09、0.11 mm,试验结果如图7所示。从图中可见,当侧隙为0.059 mm时,花键磨损量最小,侧隙为0.11 mm时磨损量最大。试验结果表明在相同偏斜情况下齿侧间隙越小抗磨损能力越强。

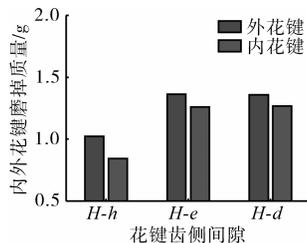


图7 磨损质量随齿侧间隙变化曲线

2.5 偏斜影响

进行偏斜角为 0.15° 、 0.20° 和 0.25° 情况下的花键磨损能力对比,试验结果如图8所示。从图中可见,随着花键倾角不对中的增加,花键磨损质量先略有增加而后急剧增大。

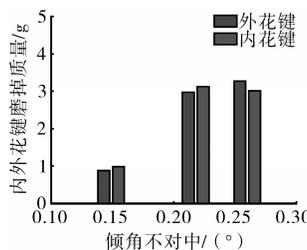


图8 磨损质量随偏斜角变化曲线

2.6 齿形影响

进行鼓形量为40、60、80 μm 情况下的花键磨损试验,试验结果如图9所示。从图中可见,随着修形量增加,先略有增加,而后降低到最小值,然后又增加。试验结果表明合理的修形量可以大大延缓花键磨损,但当修形量较大时,则反而加剧花键磨损。

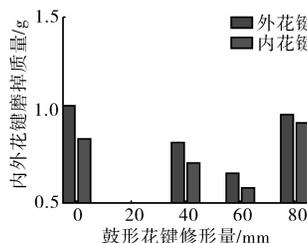


图9 磨损质量随鼓形量变化曲线

2.7 润滑影响

进行干摩擦、脂润滑和油润滑的花键磨损试验,试验结果如图10所示。从图中可见,与脂润滑对抑

制磨损作用不明显,油润滑抑制磨损能力作用显著。

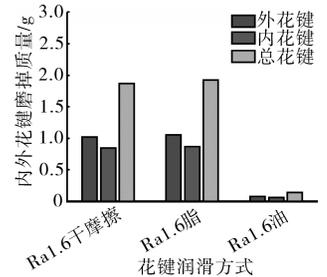


图10 磨损质量随润滑方式变化曲线

3 结论

(1)浮动花键主要破坏模式是齿面磨损,设计时应重点关注磨损强度,计算接触应力要考虑不同心及齿侧间隙的影响。许用接触应力影响评估结果的准确性,应开展相似工作环境及条件下的试验测试。

(2)花键抗磨损工作能力受多种因素的综合影响,设计时应根据各因素对花键工况进行统筹,当受条件限制时,应综合考虑硬度匹配、润滑方式和齿形优化来抑制过度磨损。

参考文献:

- [1] 刘振侠,江平.航空发动机机械系统设计[M]北京:科学出版社,2022:3-4.
LIU Zhenxia, JIANG Ping. Aeroengine machine system design[M] Beijing: Science Press, 2022: 3-4. (in Chinese)
- [2] 机械工业标准化研究所. GB/T 3478.1—1995 圆柱直齿渐开线花键(齿侧配合)模数 基准齿形 公差[S]. 北京:国家标准局, 1995:1-4.
Engineer Industry Standardization institute. GB/T 3478.1—1995 Straight cylindrical involute splines (side fit) -Modules, basic rack profiles and toletance[S]. Beijing: Chinese standard China State Bureau of Standard, 1995: 1-4. (in Chinese)
- [3] Valtierra J R M L, Brown H W, Kupm. A critical survey and analysis of aircraft spline failure[R]. San Antonio: Southwest Research Institute, 1975.
- [4] 娄鹏,张涛,章焕章.带辅助支撑的传动杆动态特性试验和仿真[J].航空发动机,2022(4):82-87.
LOU Peng, ZHANG Tao, ZHANG Huanzhang. Test and simulation of dynamic characteristics of drive shaft with assistant support[J]. Aeroengine, 2022(4): 82-87. (in Chinese)
- [5] Weatherford W D, Valtierra M L, Kd P M. Experimental study of spline wear and lubrication effects[J]. ASLE Transactions, 1966(1): 171-178.
- [6] Weatherford D, Valtierra M L, Ku P M. Mechanisms of wear in misaligned splines[J]. Transactions of the ASME, 1968(1): 42-48.
- [7] Ku P M, Valtierra M L. Spline wear-effects of design and lubrication[J]. Journal of Engineering for Industry, 1975(4): 1257-1263.
- [8] Leen S B, Mccoll I R, Ratsimba C H H, et al. Fatigue life prediction for a barrelled spline coupling under torque overload[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2003(3): 123-142.
- [9] Dudley D W. When splines need stress control[J]. Product Engineering, 1957(1): 56-61.

- [10] Dudley D W. How to design involute Spline. [J]. Product Engineering, 1957(1):75-80.
- [11] American Gear Manufacturers Association. AGMA 945-A18 Spline-Design and Application. [S]. New York: NIST, 2018:59-63.
- [12] 胡正根, 朱如鹏. 航空渐开线花键副微动摩擦接触参数分析[J]. 中南大学学报, 2013(5):1822-1828.
HU Zhenggen, ZHU Rupeng. Analysis of fretting frictional contact parameters of aviation involute spline couplings[J]. Journal of Central South University, 2013(5):1822-1828. (in Chinese)
- [13] 陈卓, 朱如鹏. 航空发动机渐开线花键强度分析[J]. 机械工程与自动化, 2009(4):90-92.
CHEN Zhuo, ZHU Rupeng. Strength analysis of involute spline of aeroengine[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2009(4):90-92. (in Chinese)
- [14] 全国机器轴与附件标准化技术委员会. GB/T 17855-1999 花键承载能力计算方法[S]. 北京: 国家质量技术监督局, 1999:8-10.
Shaft for Machinery and Accessories. GB/T 17855-1999 Calculation of load capacity of splines[S]. Beijing: The state bureau of quality and technical supervision, 1999:8-10. (in Chinese)
- [15] 成大仙. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004:205.
CHENG Daxian. Machine design handbook[M]. Beijing: Chemistry industry Press, 2004:205. (in Chinese)

(编辑: 程海)