

圆弧端齿对涡轮螺栓连接影响的数值研究

罗 莉,施一长,李 杰,王克菲,陈亚龙
(中航商用航空发动机有限责任公司,上海 201108)

摘要:为验证某型民用航空发动机涡轮总体设计方案的可行性和安全性,以该型航空发动机涡轮的圆弧端齿连接结构为研究对象,利用有限元数值模拟方法研究了涡轮第 1 级盘与前轴之间采用圆弧端齿连接的设计对结构强度和疲劳失效的影响,分析了在高温及不同预紧力载荷工况下对圆弧端齿连接强度、疲劳等性能的影响规律。研究表明:该设计存在涡轮第 1 级盘与高压涡轮轴连接的外端齿分离而导致振动的风险,而增大预紧力可以提高螺栓连接传递荷载的能力,但螺栓孔边存在局部高应力问题。研究结果为圆弧端齿的设计方案提供了有效理论支撑和参考。

关键词:圆弧端齿;预紧力;强度;疲劳;螺栓;涡轮;航空发动机

中图分类号: V232.7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.04.012

Numerical Study on the Influence of Curvic Couplings on Turbine Bolt Connection

LUO Li, SHI Yi-chang, LI Jie, WANG Ke-fei, CHEN Ya-long

(AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd, Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to verify the feasibility and safety of a certain type of civil aviation turbine engine overall design scheme, turbine curvic couplings syndeton in the aero engine was set up as the research object. Using finite element numerical simulation method, the influence of the curvic couplings on structure strength and fatigue failure was carried out, and the influence law of the strength and fatigue properties of the curvic couplings under high temperature and different pretightening force load were analyzed between the first stage turbine disk and the front axle. Results show that the end of the tooth of the first stage turbine disk connected to the high-pressure turbine shaft may separate and then cause risk of vibration, and the preload increasing improves the ability of the bolt connection of load transfer, but local high stress problems occur on the bolt holes. The result also provide an effective theoretical support and reference for the design of the curvic couplings.

Key words: curvic couplings; pretension; strength; fatigue; bolt; turbine; aeroengine

0 引言

航空发动机涡轮转子的盘、轴连接结构直接影响涡轮转子的性能和可靠性^[1-2]。圆弧端齿连接具有精度高、自动定位、装拆方便等优点^[4-5],广泛应用于航空发动机、地面燃气轮机、铁路机车驱动系统等领域^[6-7]。国内外研究人员对圆弧端齿连接结构应用于航空发动机涡轮转子的盘、轴连接开展了一些基础研究^[8-14],如尹泽勇提出综合考虑多因素的轴向预紧力确定准则并由此建立了预紧力优化的数学模型等。但总体上圆弧端齿连接应用于航空发动机的技术累积较为薄弱,

在航空发动机领域内开展针对圆弧端齿强度分析及优化改进的研究报道较少^[15]。

本文以某型民用航空发动机涡轮的圆弧端齿连接结构为研究对象,采用有限元方法对圆弧端齿连接结构在不同预紧力工况下进行热结构耦合计算,分析不同预紧力载荷变化对圆弧端齿连接强度、疲劳等性能的影响规律,并提出设计改进意见。

1 物理模型

某型航空发动机高压涡轮盘与高压涡轮轴采用圆弧端齿连接结构,共 30 个端齿、20 组螺栓紧固件。

收稿日期:2016-01-21

作者简介:罗莉(1983),女,工程师,主要从事航空发动机涡轮强度分析工作;E-mail: lianlian20012@163.com。

引用格式: 罗莉,施一长,李杰,等.圆弧端齿对涡轮螺栓连接影响的数值研究[J].航空发动机,2016,42(4):60-63. LUO Li, SHI Yichang, LI Jie, et al. Numerical study on the influence of curvic couplings on turbine bolt connection[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 60-63.

由于圆周对称,取 1/10 模型进行分析,如图 1 所示。图中靠近轴心的圆弧端齿为内端齿,靠近外周的为外端齿。

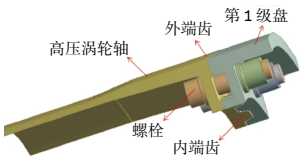


图 1 高压涡轮盘、轴螺栓连接模型

2 材料性能

轮盘的材料为 FGH96 合金,密度 $\rho=8.32 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.311。轴和螺栓的材料为 GH4169 合金,密度 $\rho=8.24 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3。2 种材料不同温度下的力学性能见表 1。

表 1 FGH96、GH4169 的不同温度下的力学性能

材料	温度 /℃	弹性模量 /	线胀系数 /	屈服强度 /	抗拉强度 /
		kPa	$\times 10^{-5}$	MPa	MPa
FGH96	20	217	1.149	1150	1527
	200	200	1.247	1085	1473
	400	179	1.342	1142	1483
	600	168	1.440	1065	1438
	800	154	1.486	1007	1220
GH4169	20	195	1.180	1170	1430
	200	182.5	1.300	1040	1310
	400	170.5	1.410	1010	1260
	600	162	1.480	975	1210
	800	154	1.700	945	1170

3 计算模型及工况

计算模型如图 2 所示。实体模型采用 20 节点的 solid186 单元,单元数为 48711,节点数为 207131;涡轮盘、轴之间建立接触对,由于圆弧端齿靠侧面传力,在端齿侧面建立接触单元,单元类型为 CONTA174 和 TARGE170;螺杆与法兰之间建立接触类型设置为 STANDARD;螺栓与螺母之间为绑定接触。螺栓处建立预应力单元,单元类型为 PRETES179。考虑各部件之间的接触因素^[6],摩擦计算模型采用经典库仑摩擦模型,摩擦系数为 0.2。

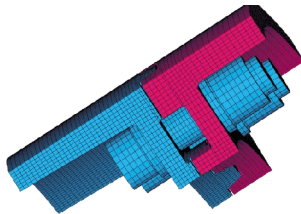


图 2 有限元模型

坐标轴定义如下:x 轴为旋转轴方向,顺气流方向为正;z 轴为径向方向,指向外机匣为正。

在轮盘和高压涡轮轴周向两侧建立循环对称边

界,转速为 16000 r/min。轮盘和高压涡轮轴的端面分别施加轴向和周向位移场,轴向位移为 1.48~1.50 mm,周向位移为 2.97~2.98 mm,如图 3 所示。根据热分析得到的温度场分布作为温度载荷加载至计算模型,温度场范围为 500~600 ℃,如图 4 所示。

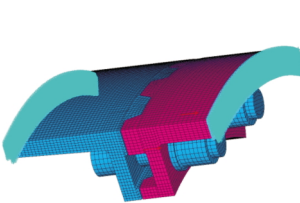


图 3 位移场

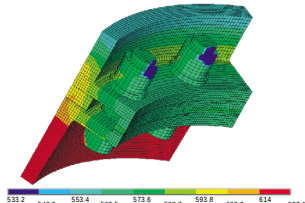


图 4 温度场分布

按工程需要,计算工况定义为螺栓上施加预紧力分别为 20、30、40 和 50 kN,在各工况下分析端齿接触、盘孔应力分布及螺栓应力分布等结构特性。

4 计算结果及分析

4.1 端齿位移及接触分析

对各工况进行静力分析,通过提取齿边缘线上的位移点,获得计算模型的总变形分布如图 5、6 所示。从图中可见,随着预应力的增大,内侧端齿间隙由 0.072 mm 减少至 0.004 mm,提高了连接处的密封性能;但随着预应力的增大,外端齿间隙由 0.071 mm 增加至 0.115 mm,而当预紧力超过 40 kN 时,外端齿间隙将超过 0.1 mm,而且随着齿间间隙增加,也直接增加了共振风险。这是由温度场的分布情况导致的,外端齿部位的温度较高,内端齿部位的温度较低,导致外端齿膨胀,而内端齿收缩,从而外端间隙随着预应力增大,而内端间隙则随之减小。因此,在该处的设计优化应以减少外端齿的分离而导致的振动风险为主要目的。为缩小内端与外端间隙的差距,可以尝试改变温度场分布,使内外侧温差减小,达到缩小内端与外端间隙差距的目的;或结构改为外止口设计,使得外端齿分离程度减小。

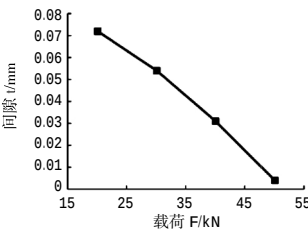


图 5 不同预紧力下内端齿轴向间隙

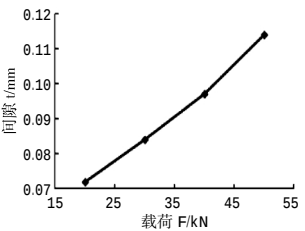


图 6 不同预紧力下外端齿轴向间隙

为考察转速对外端齿间隙的影响,在预紧力为 20 kN 的工况下,分别对不同比转速下外端齿间隙进行分析,如图 7 所示。从图中可见,随着转速的增加,端齿承受的载荷增大,使得外端齿的间隙不断增大。

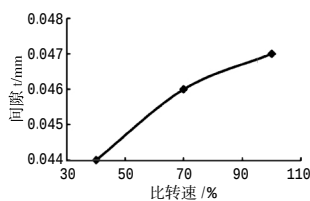


图 7 不同比转速下

外端齿间隙

4.2 盘和孔等效应力及疲劳分析

在高温、高转速的工况下螺栓孔与端齿之间存在传递荷载,因此必须分析涡轮盘、轴孔的承载情况。在 20 kN 工况下,第 1 级盘和涡轮轴孔的等效应力分布如图 8、9 所示,从等效应力分布来看,第 1 级盘和涡轮轴的孔边和端齿的根部都存在高应力区域。在 20

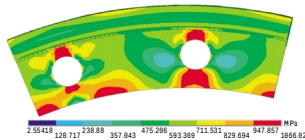


图 8 第 1 级盘孔的等效应力分布

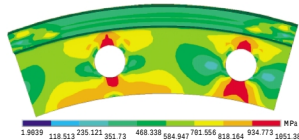


图 9 涡轮轴孔的等效应力分布

kN 工况、不同比转速下的第 1 级盘和涡轮轴孔的最大等效应力变化曲线如图 10 所示。从图中可见,第 1 级盘和涡轮轴孔承受的载荷随着转速的增加而增大。

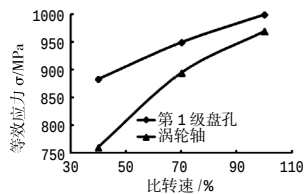


图 10 不同比转速下等效应力分布

结合表 1 中 FGH96、GH4169 合金在不同温度下的屈服强度可知,在不同预紧力工况下,第 1 级盘孔边最大等效应力均小于屈服强度,而高压涡轮轴孔边最大等效应力均大于屈服强度。

发动机的工作荷载是交变变化的,而结构失效的 1 个常见原因是疲劳,并与重复加载密切相关。低周疲劳是在循环次数相对较低时发生的,而塑性变形常常伴随低周疲劳。根据第 4.1 节静力分析的结果,高压涡轮轴螺栓孔周围局部已达到屈服状态,应采用应变疲劳理论来计算低周疲劳寿命。选取局部区域应力较大点位置作为低周疲劳寿命分析区域。根据 GH4169 合金在 500、650 °C 下的低循环疲劳性能及应变寿命曲线拟合公式,采用 Manson-Coffin 进行平均应力修正^[7],可以求得关键点的低周疲劳寿命见表 2。从低周寿命的循环数来看,满足发动机工作要求。

表 2 高压涡轮轴局部危险点的寿命

序号	温度 / ℃	等效应力 / MPa	应变	低周寿命(-3σ) / 循环数
1	595.31	1047	0.00320	12000
2	595.11	1025	0.00316	19000

4.3 螺栓应力及接触状态分析

螺栓与螺杆连接的根部为危险位置,取螺栓根部的横截面计算平均等效应力和轴向拉伸应力,如图 11 所示。结合表 1 可见,在不同预紧力工况下,螺栓根部的等效应力和轴向拉伸应力均小于螺栓的屈服强度。

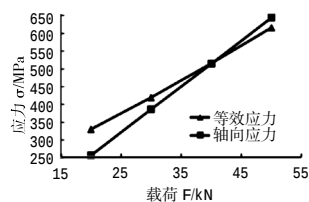


图 11 不同工况下螺栓根部的平均应力

为考察不同预紧力工况下螺栓和第 1 级盘的接触情况,提取螺栓和第 1 级盘接触面的位移分布,如图 12 所示,图中标尺均为 -0.1~0 mm。从图中可见,随着预紧力增大,螺栓连接位置的接触面不断增大,但存在滑动。

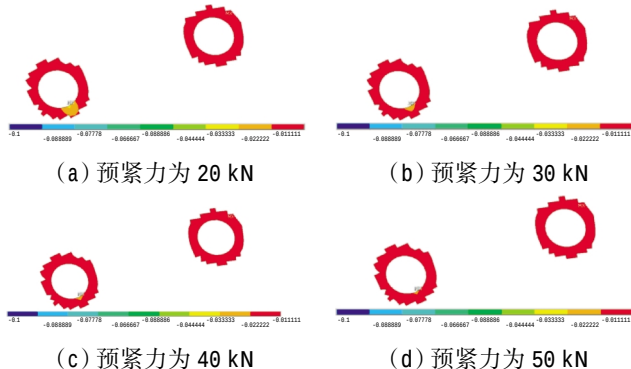


图 12 不同预紧力工况下的接触面

5 结论

本文以某型民用航空发动机涡轮的圆弧端齿连接结构为研究对象,通过有限元热结构耦合的分析方法研究了该涡轮第 1 级盘与前轴之间采用圆弧端齿连接的设计对结构强度和疲劳失效的影响,得到以下结论:

(1)在不同预紧力工况下,该圆弧端齿连接结构的内端齿闭合,满足气密性要求。但随着预紧力的增大,外端齿间隙呈增大趋势,导致齿间分离增大,增加了振动产生的风险。因此,应修改圆弧端齿局部设计以减少外端齿的齿间间隙,进而降低振动的风险。

(2)在不同预紧力工况下,由于采用圆弧端齿连接结构,使得第1级盘孔局部应力满足强度要求,但高压涡轮轴螺栓孔局部存在屈服风险。

(3)基于应变疲劳理论的低周疲劳寿命计算结果表明,虽然高压涡轮轴螺栓孔存在局部屈服,但其疲劳寿命满足该发动机工作要求。

(4)在不同预紧力工况下,圆弧端齿结构的连接螺栓都能满足强度要求,螺栓和螺母的接触状态良好,表明该处设计合理有效。

参考文献:

- [1] 聂晶,杨瑾,童悦. 大型民机发动机关键技术现状与发展趋势[J]. 航空制造技术,2012(21):34-37.
NIE Jing,YANG Jin,TONG Yue. Key technology and development of large civil aircraft engine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(21):34-37. (in Chinese)
- [2] 汤凤,成晓鸣,钟滨涛. 某型航空发动机燃气涡轮转子组件有限元分析[J]. 航空发动机,2005,31(2):32-33.
TANG Feng,CHENG Xiaoming,ZHONG Binta. Finite element analysis of turbine rotor assembly of an aero-engine [J]. Aeroengine, 2005,31(2):32-33(in Chinese)
- [3] 顾天胜. 关于圆弧端齿数控加工技术的分析 [J]. 新技术新工艺, 2011(11):46-47.
GU Tiansheng. Analysis on the technology of circular end gear NC machining[J]. New Technology and New Process,2011(11):46-47. (in Chinese)
- [4] 蔺志强,张森堂,吴志新,等. 圆弧端齿数控加工技术研究[J]. 装备制造,2009(12):184-186.
LIN Zhiqiang,ZHANG Sentang,WU Zhi xin,et al. Research on NC machining technology of curvic couplings [J]. China Equipment,2009 (12):184-186.(in Chinese)
- [5] 吴鸿雁,李剑锋,王青云,等. 端面弧齿齿盘的齿面方程及齿面磨削加工仿真[J]. 机械传动,2007,31(3):75-78.
WU Hongyan,LI Jianfeng,WANG Qingyun,et al. Tooth surface equation and tooth surface grinding simulation of curvic couplings[J]. Journal of Mechanical Transmission,2007,31(3):75-78.(in Chinese)
- [6] 李业明,钟文生,张红军. 大功率机车驱动系统圆弧端齿联结性能分析[J]. 内燃机车,2010(11):1-4.
LI Yeming,ZHONG Wensheng,ZHANG Hongjun. Performance analysis of curvic couplings of high power locomotive drive system[J]. Diesel Locomotives,2010(11):1-4.(in Chinese)
- [7] 李业明,张红军,姚远. 大功率机车驱动系统联轴器弧齿端齿盘结构性能分析及参数优化[J]. 铁道机车车辆,2009,29(6):31-33.
LI Yeming,ZHANG Hongjun,YAO Yuan. Structure performance analysis and parameter optimization for the arc tooth transverse teeth gear of high-power locomotive drive system coupling [J]. Railway Locomotive and Car,2009,29(6):31-33.(in Chinese)
- [8] Bannister R H. Methods for modeling flanged and curvic couplings for dynamic analysis of complex rotor constructions[J]. ASME, Transactions Journal of Mechanical Design,1980,102(1):130-139.(in Chinese)
- [9] 尹泽勇,欧园霞,胡柏安,等. 端齿连接及变轴力的影响[J]. 航空动力学报,1994,9(2):20-23.
YIN Zeyong,OU Yuanxia,HU Baian,et al. Influence of curvic couplings connection and variable axial force [J]. Journal of Aerospace Power,1994,9(2):20-23.(in Chinese)
- [10] 尹泽勇,胡柏安,吴建国,等. 端齿连接转子轴向预紧力的确定[J]. 航空动力学报,1996,11(4):20-22.
YIN Zeyong,HU Baian,WU Jianguo,et al. Determination of axial preloads of rotor with curvic couplings [J]. Journal of Aerospace Power,1996,11(4):20-22.(in Chinese)
- [11] 胡柏安,尹泽勇,徐友良. 两段预紧的端齿连接转子轴向预紧力的确定[J]. 机械强度,1999,21(4):274-277.
HU Baian,YIN Zeyong,XU Youliang. Determination of axial preloads of rotor with curvic couplings pretightened into two segments [J]. Journal of Mechanical Strength,1999,21(4):274-277.(in Chinese)
- [12] Pisani S R,Rencis J J. Investigating curvic coupling behavior by utilizing two- and three-dimensional boundary and finite element methods [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements,2000,24 (3):271-275.
- [13] Richardson I J,Hyde T H,Becker A A,et al. A validation of the three-dimensional finite element contact method for use with curvic couplings [C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. SAGE,2002:63-75.
- [14] Richardson I J,Hyde T H,Becker A A,et al. A three-dimensional finite element investigation of the bolt stresses in an aero-engine curvic coupling under a blade release condition[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. SAGE,2000:23-24.
- [15] 王秋允,张红军. 端齿盘的载荷分布对其接触状态的影响[J]. 机车电传动,2006(2):33-35.
WANG Qiuyun,ZHANG Hongjun. Effect of load distribution on contact state of the crown wheel [J]. Electric Drive for Locomotive, 2006(2):33-35.(in Chinese)
- [16] 古远兴,温卫东. 摩擦系数对燕尾榫微动疲劳特性的影响[J]. 宇航材料工艺,2007(4):78-81.
GU Yuanxing,WEN Weidong. Effect of friction coefficient on fretting fatigue performance of dovetail joint [J]. Aerospace Materials and Technology,2007(4):78-81.(in Chinese)
- [17] 杨兴宇,阎晓军,赵福星,等. 某型航空发动机涡轮盘低循环疲劳寿命分析[J]. 机械强度,2004,26(S1):229-233.
YANG Xingyu,YAN Xiaojun,ZHAO Fuxing,et al. Low cycle fatigue life of an aeroengine gas turbine disk [J]. Journal of Mechanical Strength,2004,26(S1):229-233.(in Chinese)

(编辑:栗枢)