

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.002

航空齿轮弯曲疲劳试验综述

唐朋^{1,2}, 朱如鹏¹, 唐鑫^{1,2}, 李发家^{2,3}

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国航发湖南动力机械研究所 直升机传动技术重点实验室, 湖南 株洲 412002;

3. 济南大学 机械工程学院, 山东 济南 250022)

摘 要:航空齿轮研发中,对新材料航空齿轮弯曲疲劳强度进行试验是提高航空传动系统强度的关键之一。针对现在国内外新材料航空齿轮的弯曲疲劳试验方法和失效原理的研究现状进行总结,阐述典型的新材料航空齿轮弯曲疲劳试验方法和破坏断口形貌及常见的失效特征,给出现行的齿轮弯曲疲劳试验和损伤研究方法。根据新材料航空齿轮不同试验工况选择合理的试验方法,解决新材料航空齿轮的设计边界,为新材料航空齿轮弯曲疲劳强度试验提供理论依据和技术参考。

关键词:航空齿轮;弯曲疲劳;试验方法;损伤原理;强度

中图分类号:TH132 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0011-06

A Review of Aviation Gear Bending Fatigue Tests

TANG Peng^{1,2}, ZHU Rupeng¹, TANG Xin^{1,2}, LI Fajia^{2,3}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China; 3. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract:In the research and development of new materials for aviation gears, the bending fatigue tests on gears using new material is one of the key factors in improving the strength of the aviation transmission system. Based on the review of the current research status of gear bending fatigue test methods and failure mechanisms, this study summarizes the typical gear bending fatigue test methods and the fracture appearances and common failure characteristics, and the actual gear bending fatigue test and damage research methods are given. The reasonable test methods are selected according to different test conditions freeing the gear design from limits given by aviation materials, which provides theoretical and technical reference for bending fatigue tests of new gear materials.

Keywords:aviation gear; bending fatigue; test method; failure mechanisms; strength

0 引言

提高齿轮的承载能力、疲劳寿命是航空传动系统的重要研究方向之一。在国内直升机传动系统设计中,现有航空齿轮材料的能力挖掘已达到了极限,开展航空齿轮新材料的研发,成为提高直升机传动系统强度的重要突破口,航空传动系统的不断发展,对齿轮钢强度及性能提出了更高的要求。

航空齿轮材料中使用最广泛的以第一代航空齿轮钢 9310 钢、第二代航空齿轮钢 EX-53(AMS6308)钢为代表,目前第三代航空齿轮钢 15Cr14Co12Mo5Ni2WA 钢、C61 钢仍处于研发阶

段,缺乏相关的应用研究^[1]。应用新材料的齿轮需验证齿面的接触强度、轮齿弯曲强度、齿面胶合强度,对其 3 大强度进行大量试验及分析^[2]。

轮齿的疲劳失效是十分常见的突出问题,相较于齿面失效,轮齿弯曲疲劳失效造成的危险性更大,对传动系统造成的破坏更为严重^[3~4]。我国齿轮弯曲疲劳试验采用新国标 GB/T 14230—2021《齿轮弯曲疲劳强度试验方法》实行,采用常规成组法和升降法组合测定齿轮的 R-S-N 疲劳寿命曲线,通过成组法试验检测齿轮疲劳寿命曲线的倾斜段,升降法测定齿轮寿命极限。国外采用 ISO 6336、AGMA 908B89 等标准中的方法对对称齿轮的齿根强度进行分析。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51975274);济南市“新高校 20 条”资助项目(202228116)

第一作者简介:唐朋(1987—),女,湖南邵阳人,高级工程师,硕士,研究方向为直升机传动系统主减速器设计,273361465@qq.com。

本文对航空齿轮弯曲疲劳破坏原理的研究现状进行综述,并总结现有齿轮弯曲疲劳试验的方法与成果,为新材料航空齿轮传动系统的弯曲疲劳试验奠定了研究基础。

1 齿轮弯曲疲劳试验

目前,齿轮弯曲疲劳试验机就加载形式可分为单齿加载型与双齿加载型,就齿轮试验形式可分为非运转式与运转式。其试验原理都是对齿面进行重复载荷直至齿轮发生弯曲疲劳失效。

国标 GB/T 14230—2021 规定的“A 试验法”单齿加载方式常应用于工作过程中承受单向弯曲载荷,疲劳源区发生于轮齿受拉侧表面。“B 试验法”双齿加载方式应用于工作过程中承受双向弯曲应力下产生的疲劳断裂,疲劳源区位于轮齿两侧。对于旋转变曲疲劳断裂,采用运转式疲劳试验机,存在多个疲劳源区。

陈地发等^[5]采用国标中的“B 试验法”,研究 18CrNiMo7-6 喷丸齿轮的误差对弯曲疲劳实验结果的影响,以单齿加载的方式在 Zwick Vibrophore 1 000 kN 弯曲疲劳试验机上进行弯曲疲劳试验,齿轮试验机如图 1 所示。该试验机刚度大,试验频率高,可适用的齿轮范围较大,研究结果表明对于弯曲疲劳结果来说,齿轮的精度对寿命有很大的影响。

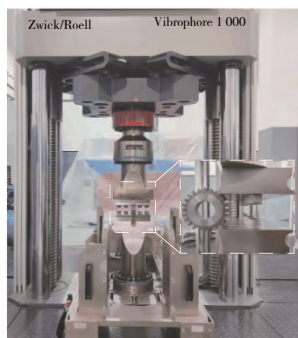


图 1 Zwick Vibrophore 1 000 kN 弯曲疲劳试验机

杨广明^[6]采用升降法对 20CrMoH 渗碳齿轮开展单齿弯曲疲劳强度试验研究,试验设备采用德国 Zwick/Amsler 250 HFP 5100 电磁谐振疲劳试验机,齿轮试验装夹如图 2 所示。通过升降法测试的试验结果经过分析符合要求。轮齿裂纹和断齿形态如图 3 所示,分别采用平截面法和折截面法计算齿轮齿根弯曲应力,结合试验过程中齿轮的裂纹扩展方向及断口形貌,采取折截面法分析效果更好。

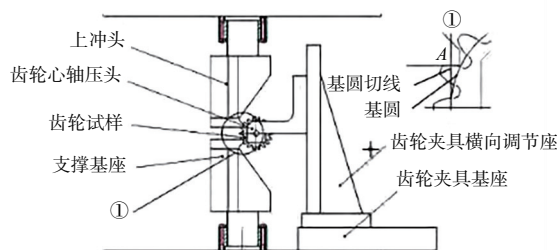


图 2 齿轮试验装夹示意图

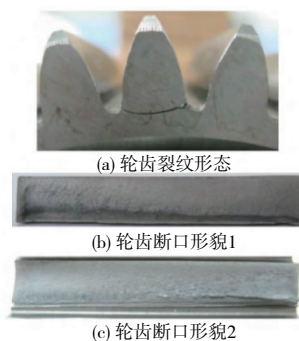


图 3 轮齿裂纹和断齿形态

张霞等^[7]结合柴油发动机齿轮的实际受力工况,进行齿轮单齿脉动加载的弯曲疲劳试验,采用 PLG 系列高频疲劳试验机,通过刚度较大的钢块对齿轮齿面进行加载,单齿加载夹具如图 4 所示,齿轮疲劳试验如图 5 所示。结合有限元仿真分析弯曲疲劳试验,通过滚压技术可以有效提高齿轮的弯曲疲劳极限。

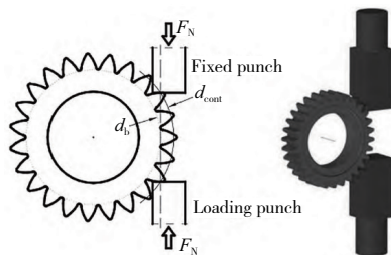


图 4 单齿加载夹具



图 5 齿轮疲劳试验

李贞子等^[8]采用双齿加载的形式,对 20CrMoH 渗碳淬火齿轮进行弯曲疲劳试验,分析喷丸工艺对齿轮弯曲疲劳寿命的影响。使用 ZWICK 公司生产的 HFP5100-400 kN 高频疲劳试验机,如图 6 所示,用常规成组法及升降法测定齿轮弯曲疲劳强度。结果表明,强化喷丸能提高齿轮的弯曲疲劳强度约 10%。

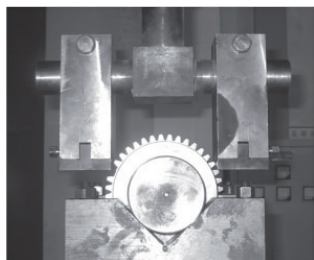


图 6 齿轮双齿加载

李志林等^[9]使用英国产 STRON1603 型电磁谐振疲劳试验机,对 40Cr 圆柱直齿轮进行疲劳寿命实验分析,试件夹具如图 7 所示,给出了 40Cr 圆柱齿轮寿命的分布预测结果。

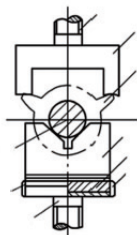


图 7 齿轮双齿加载夹具

KARTHIK 等^[10]使用功率封闭式齿轮试验台进行恒定频率弯曲疲劳试验,试验台如图 8 所示。在 SAE J1619 推荐的弯曲疲劳夹具中,轮齿由连接到加载臂的上砧座插件加载。对对称齿轮和非对称齿轮进行弯曲疲劳试验,施加重复正弦循环荷载,荷载振幅在 6~12 Nm 范围内变化。疲劳试验后,使用立体显微镜 (Nikon, SMZ25) 和 FESEM (Zeiss, SIGMA 300) 在根部区域进行失效后断口分析。

颜天晓等^[11]使用功率流封闭式齿轮试验机,采用罗卡提法研究齿轮修形参数对弯曲疲劳寿命的影响,齿轮试验台架如图 9 所示。试验齿轮在 3×10^6 的循环基数下均发生弯曲疲劳失效,齿轮失效如图 10 所示。通过试验结果对比,适当的齿顶修形可以有效提高齿轮弯曲疲劳强度。

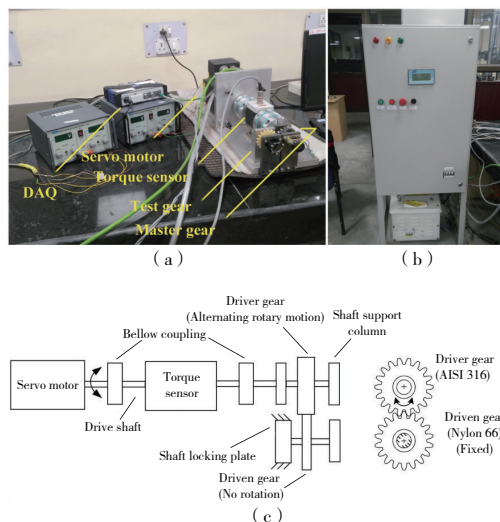


图 8 封闭式齿轮试验台

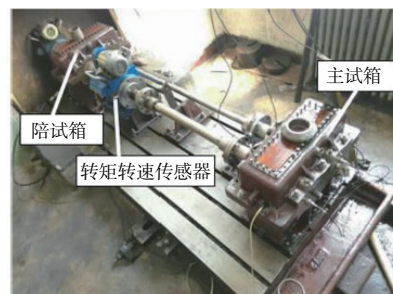


图 9 封闭功率流试验台架

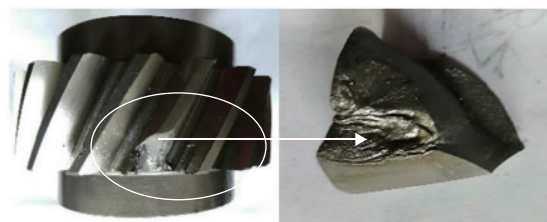


图 10 齿轮失效图

BONAITI 等^[12]在申克机械波轮上进行了齿轮弯曲疲劳测试,试验方案如图 11 所示,通过负载弹簧对齿轮齿面施加载荷,齿轮试验机如图 12 所示。齿轮对称地定位在两个砧座之间,并且两个齿在相同的高度上加载,从而在齿根处产生相同的应力。

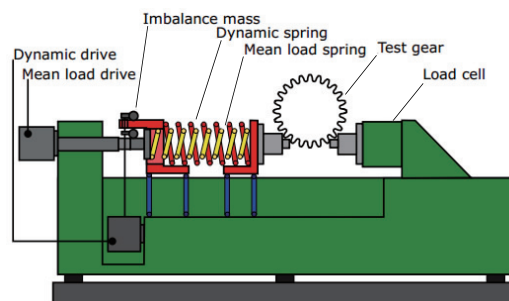


图 11 申克机械波轮试验方案

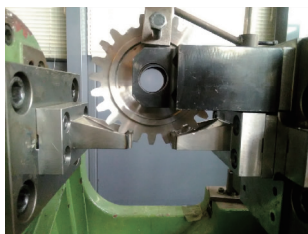


图 12 申克机械波轮试验台

DEMET 等^[13]通过专利申请设计的 Instron 齿轮弯曲疲劳试验台,用于其研制的对称或非对称齿轮单齿弯曲疲劳试验,Instron 疲劳试验台如图 13 所示。选取齿轮的其中一个轮齿做试验齿,固定另外两个齿,将载荷从载荷施加装置传递到试验齿上。与齿面接触的压力夹头,具有与试验齿轮相同的渐开线轮廓和压力角,在加载过程中,模拟了齿轮的实际加载状态。在疲劳试验期间, R 应力比为 0.1。测试在 50 Hz 频率下进行。

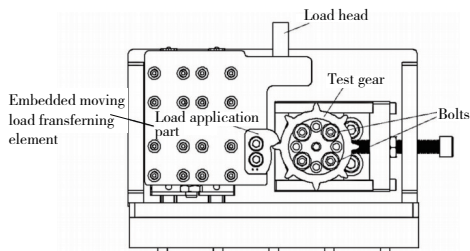


图 13 Instron 齿轮弯曲疲劳试验台

齿轮弯曲疲劳试验过程周期较长,目前的弯曲疲劳试验采用非运转形式,谐振式疲劳试验机较多。根据实际工况及齿轮失效形式,可采取不同的加载方式进行试验。

2 齿轮弯曲疲劳失效原理

齿轮在工作过程中,轮齿近似悬臂梁,齿轮根部受到的弯曲应力较大,在循环载荷下产生疲劳裂纹,最终引起轮齿弯曲疲劳失效。

邓书彬等^[14]通过 ABAQUS 有限元仿真,对齿轮双齿加载进行有限元模拟,并通过试验后的齿轮断面 SEM 图对断齿分别进行宏观、微观的失效分析。通过宏观分析齿轮断面的疲劳区和瞬断区产生原理,通过微观分析齿轮断面疲劳区及瞬断区的形貌特征,探究了齿轮弯曲断裂失效的过程和原理。分析发现,齿轮的疲劳区由齿根裂纹缓慢扩展形成,形貌平整光亮,瞬断区由裂纹快速扩展,齿轮有效面积无法承受载荷从而发生瞬间断

裂,形貌粗糙不平整。

刘滨春^[15]对航空齿轮的弯曲疲劳、振动疲劳及接触疲劳的失效原理进行了详细的剖析,并对其损伤特征、失效产生的原因进行了总结。通过分析弯曲疲劳的基本特征,其失效过程可分为:1) 裂纹起源,加载侧根部圆角表面;2) 裂纹萌生,由一个齿上萌生向理论零应力点处扩展;3) 裂纹扩展,裂纹扩展至下一个齿的圆角。

王志远^[16]针对重载传动齿轮的弯曲疲劳失效原理、测试方法进行了大量研究,并设计新型啮合式弯曲疲劳试验机对重载齿轮进行试验。设计的新型啮合式齿轮弯曲疲劳试验机可以高效进行齿轮在双齿啮合状态下发生的弯曲疲劳试验,并通过托臂设计提高试验过程中齿轮可加载应力。利用扫描电镜分析不同试验机测试的齿轮断口,结果如图 14 所示。不同试验机通过夹杂物产生的应力集中,呈现经典断裂 3 个区域分别如图 14(a)、图 14(b) 所示,从裂纹源观察可以发现,大面积挤压面的产生与齿轮实际的受力相关。

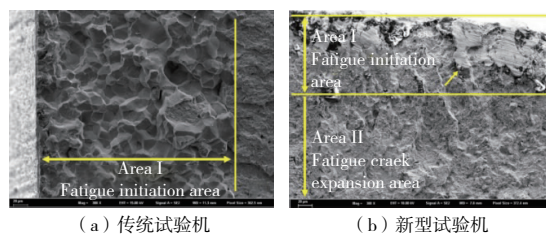


图 14 不同试验机测试的断齿 SEM 结果

唐鑫等^[17]采用“B 试验法”对第三代航空齿轮—新型高温渗碳不锈钢圆柱齿轮开展了齿轮弯曲疲劳试验,并对轮齿断裂的失效原理进行了研究。通过实验发现新型齿轮失效原因主要由表面碳化物、表面缺陷和内部碳化物造成,分别占失效总数的 52.4%、9.5%、38.1%。表面碳化物起裂是导致齿轮早期断裂的主要原因;由内部碳化物起裂引起的疲劳破坏占比也相对较高。表面碳化物的存在和表面加工缺陷是产生弯曲疲劳破坏的主要原因,其中齿轮表面碳化物的存在对降低齿轮弯曲寿命尤为突出。

胡小其等^[18]针对齿轮失效原理进行了分析,失效件断口宏观照片如图 15 和图 16 所示。失效的断口为典型的弯曲疲劳断裂,具有明显的疲劳源区、疲劳裂纹扩展区、瞬时断裂区。通过金相分析失效齿轮断面,与未失效件金相组织进行对比,失效件金相组织硬度较低,其原材料较差,金相组织对比如图 17 和图 18 所示。



图 15 齿轮局部断面及位置

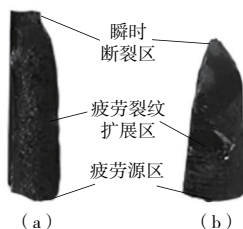


图 16 齿轮断齿断裂失效形态

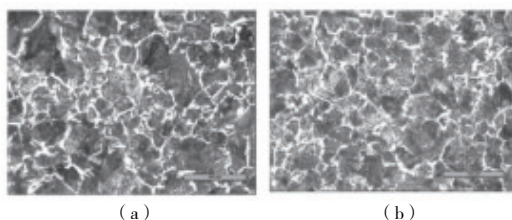


图 17 失效件金相组织

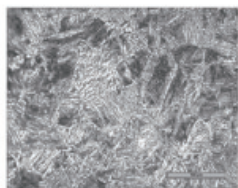


图 18 未失效件金相组织

罗权等^[19]根据某型压裂泵使用过程中小齿轮的疲劳失效情况,从齿轮设计、断口分析、力学分析、硬化层检测、齿轮装配进行分析。其破坏形式为从齿根一直扩展到内锥面的贯穿式裂纹,断齿如图 19 所示。断口呈现为典型的疲劳断裂形貌,存在明显的贝壳花纹,如图 20 所示。通过扫描电镜分析,齿轮断面的疲劳源区严重磨损,扩展区能观察到疲劳辉纹,如图 21 所示。

孙小可等^[20]根据煤矿机械设备的齿轮失效原理及预防措施进行分析。煤矿机械常用的渗碳合金钢齿轮发生轮齿折断问题突出,主要为疲劳断齿及过载断齿。疲劳断齿是由于重复载荷及应

力集中造成,过载断齿是由于齿根强度不够或轮齿磨损削弱齿根强度,过大的载荷折断轮齿。提高轮齿弯曲疲劳寿命的有效方法需避免齿根处的应力集中,并采用合理的工艺提高齿轮弯曲强度。



图 19 小齿轮破坏照片

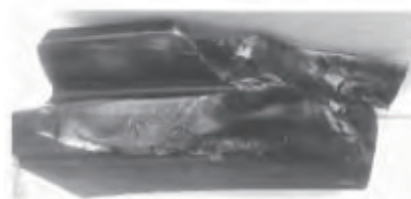
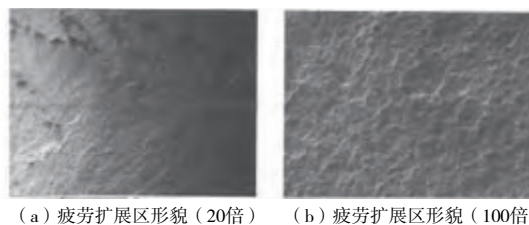


图 20 断口局部图



(a) 疲劳扩展区形貌 (20倍) (b) 疲劳扩展区形貌 (100倍)

图 21 断口扫描电镜图

综上所述,齿轮弯曲疲劳失效原理理论研究已趋于完善,典型的齿轮弯曲疲劳失效断面具有明显的疲劳源区、裂纹扩展区、瞬时断裂区,其中裂纹扩展区表面呈光滑平整的形貌,瞬时断裂区表面粗糙。通过有限元仿真与试验结合的方式,利用金相分析、电镜分析等对齿轮断面进行辅助分析,能有效地对齿轮弯曲疲劳失效原因进行探究。

3 结语

目前,齿轮弯曲疲劳试验及失效原理的理论研究已趋于完善,现有的试验方式主要由脉冲激励法和运转法,两种方法都有所应用,其中脉冲激励法在试验时间、费用等方面具有先天的优势,应用更加广泛,同时针对弯曲疲劳轮齿断裂的原理开展大量的研究,探索轮齿断裂的原因。

1) 齿轮弯曲疲劳试验原理都是对齿面进行重

复施加载荷直至齿轮发生弯曲疲劳失效。齿轮弯曲疲劳试验依据国标 GB/T 14230—2021,结合实际工况对齿轮弯曲疲劳试验方案进行设计,为齿轮新材料的研发提供可靠的数据支持,具有重大意义。

2)典型的弯曲疲劳失效断面具有明显的疲劳源区、裂纹扩展区、瞬时断裂区,结合有限元仿真、金相分析等辅助手段,能有效分析齿轮弯曲疲劳失效原因,热处理产生的碳化物对齿轮寿命具有较大的影响。

参考文献:

- [1] 唐鑫,朱如鹏,廖梅军,等. 第三代航空齿轮钢圆柱齿轮弯曲疲劳强度性能测试分析[J]. 航空动力学报, 2021,36(8):1756-1764.
- [2] 樊毅嵩. 齿轮弯曲疲劳强度影响因素分析及试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [3] OSMAN T, VELEXP. A model for the simulation of the interactions between dynamic tooth loads and contact fatigue in spur gears[J]. Tribology International, 2012, 46(1):84-96.
- [4] 王振,陈龙,郑楠,等. 基于残余应力的轮齿齿根强化对弯曲疲劳强度影响研究综述[J]. 机械传动, 2019, 43(12):161-168.
- [5] 陈地发,刘怀举,朱加赞,等. 低碳合金钢 18CrNiMo7-6 齿轮弯曲疲劳试验研究与误差分析[J]. 重庆大学学报, 2023,46(1):1-15.
- [6] 杨广明. 升降法测定齿轮的弯曲疲劳极限[J]. 机械传动, 2015,39(8):176-180.
- [7] 张霞,陈飞,贾璐,等. 滚压强化齿轮的疲劳强度分析[J]. 内燃机与配件, 2022(15):72-74.
- [8] 李贞子,何才,王云龙,等. 20CrMoH 齿轮弯曲疲劳强度研究[J]. 汽车工艺与材料, 2011(9):21-24.
- [9] 李志林,林壮,陈利强. 矿用渐开线圆柱直齿轮疲劳试验研究[J]. 煤矿机械, 2011,32(6):72-74.
- [10] KARTHIK PANDIAN A, GAUTAM S S, SENTHILVELAN S. Experimental and numerical investigation of the bending fatigue performance of symmetric and asymmetric polymer gears [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2020,234(6):819-834.
- [11] 颜天晓,张瑞亮,王铁,等. 修形齿轮弯曲疲劳寿命对比试验研究[J]. 机械传动, 2016, 40(1):110-112,131.
- [12] BONAITI L, CONCLI F, GORLA C, et al. Bending fatigue behaviour of 17-4 PH gears produced via selective laser melting [J]. Procedia Structural Integrity, 2019,24:764-774.
- [13] DEMET S M, ERSOYÖĞ LU A S. Fatigue fracture behaviour of asymmetric spur gear tooth under cyclic loading [J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 13: 2030-2035.
- [14] 邓书彬,马朝平,胡建军,等. 基于 ABAQUS 的齿轮弯曲疲劳失效机理研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(18):253-255.
- [15] 刘滨春. 航空齿轮疲劳失效机理探究[J]. 中国科技信息, 2011(12):108-109.
- [16] 王志远. 基于材料特征的 20Cr2Ni4A 重载齿轮弯曲疲劳失效机理研究[D]. 天津:河北工业大学,2019.
- [17] 唐鑫,朱如鹏,杨卯生,等. 新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢齿轮的弯曲疲劳失效机理[J]. 航空动力学报, 2022,37(3):589-599.
- [18] 胡小其,秦昊. 齿轮断裂失效机理分析[J]. 装备制造技术, 2012(10):168-170.
- [19] 罗权,易文君,胡亮,等. 压裂泵传动小齿轮失效机理研究[J]. 内江科技, 2022,43(11):74-76,65.
- [20] 孙小可,刘玮. 煤矿齿轮传动机械设备失效机理及应对策略研究[J]. 机电工程技术, 2012,41(9):90-92.

收稿日期:2023-11-02