

3J40轴尖受压破坏过程及失效机理研究

袁建宇 褚洪杰 王 影 逢锦程 谢国君

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 基于3J40轴尖与红刚玉平面接触受压开裂失效分析案例,对3J40轴尖受压破坏过程及机理进行了研究。通过体视显微镜、扫描电镜等手段对3J40轴尖开裂特征及断口形貌进行了观察,同时采用有限元分析手段对轴尖服役状态下的应力分布和破坏机理进行了分析。结果表明,3J40轴尖球形表面在红刚玉平面的压应力作用下被压平,形成 $\Phi 220\text{ }\mu\text{m}$ 的平面区域,轴尖与红刚玉压紧后发生塑性变形,轴尖与平面接触边缘剪应力最大,成为开裂源区,发生剪切破坏;随后裂纹继续沿轴向扩展至轴尖腰部附近,扩展方向发生 90° 偏转,最终断裂。基于Hertz接触理论对上述接触问题进行了计算,结合有限元分析结果发现,高硬度3J40球头材料内部存在较大的剪应力和应变,因此在服役过程中容易发生剪切破坏,该结果对球头材料性能优化和结构设计均有重要意义。

关键词 3J40合金,轴尖,剪切破坏,塑性变形,有限元分析

中图分类号:TH133.2

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.02.013

Study on the Deformation Process and Failure Mechanism of 3J40 Shaft Tine Under Compressing Load

YUAN Jianyu CHU Hongjie WANG Ying PANG Jincheng XIE Guojun

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract 3J40 alloy is a kind of high-strength, high-hardness, wear and corrosion-resistant alloy with high Cr and Al content used in precision instruments industry. This paper studies the deformation process and failure mechanism of 3J40 shaft tine under compressing load based on a failure analysis case in which 3J40 shaft tine and red corundum compress with each other. The crack and fracture morphology were investigated by stereoscopic microscope and scanning electron microscope (SEM). The stress distribution and failure mechanism were also analyzed for shaft tine serving state using finite element analysis. The results indicate that the spherical surface of 3J40 shaft tine was compressed to a plane under compressing load of red corundum surface, forming a $\Phi 220\text{ }\mu\text{m}$ plain zone. The shaft tine fracture is ductile, and the shear stress peaks at the contacting rim of shaft tine and plane. Thereafter cracks form at the shear source and expand in axial direction and then turn around 90° at waist zone of the shaft tine. Theoretical estimation and finite element analysis were conducted based on Hertz contacting theory. The results show that large shear stress and strain exist in the 3J40 material which results in a shear failure mechanism. The results are significant for the performance optimization and structure design of shaft tine materials.

Key words 3J40 alloy, Shaft tine, Shear failure, Ductile deformation, Finite element analysis

0 引言

3J40合金属于沉淀强化型镍基合金,Cr含量达40%,具有较高的硬度、强度和极好的耐蚀性,可用作耐磨、无磁、高强度弹性元件,在航空航天等领域精密仪表中有着广泛的应用^[1-2]。3J40合金使用状态下的组织为奥氏体基体+富Cr的 α 相+ γ' (Ni_3Al)强化相,经历了固溶+时效处理后,可以获得较高的硬

度^[3]。由于该材料极高的硬度和强度,主要用于轴尖、张丝、发条、弹簧和膜片等航空航天弹性元件。

3J40合金在制备成轴尖过程中,由于球头圆度、尺寸及表面质量要求极高,因此一般采用粗磨、精磨、研磨以及抛光的方法来进行加工^[4]。在生产实践中,3J40合金主要问题在于合金塑性较差,在变形后易于发生开裂。许多研究人员均对此合金开展过研

收稿日期:2022-12-28

第一作者简介:袁建宇,1988年出生,博士,主要从事材料分析检测技术和机械产品失效分析研究。E-mail:yuanjianyu-2006@163.com

究工作。邓世平等人^[5]对该合金丝材的相组成进行了分析,并对其失效强化机理进行了探讨;张荣等人^[6]重点分析了不同热处理工艺下合金组织,特别是 α -Cr 相对强化效果的贡献;杨晨星等人^[7]对该材料的组织、强化相、耐磨、抗疲劳性能等进行了系统研究,并给出了合金组织演变、高温塑性变形析出强化机理、磨损机理。

由于该 3J40 轴尖在使用过程中一般处于弹性阶段,因此目前对该合金受载状态下的塑性失效研究较少。特别是在实际工况下(大部分为压应力条件),该合金的开裂模式及机理少有人研究。即使将范围扩大至其它精密合金,目前大部分研究文献均是针对合金的组织、性能、析出相等进行研究^[8-10],少有从失效分析角度针对受压破坏过程进行的研究。

实际上,上述问题同球与平面的 Hertz 接触问题较为接近。Hertz 弹性接触理论在保证不影响分析可靠性的前提下,将接触问题进行简化,在保证满足:(1)材料均质;(2)变形在弹性极限范围内;(3)接触表面切应力的影响忽略;(4)接触区域的尺寸远小于物体尺寸等前提的条件下,对于分析一般的弹性接触工程实践问题具有较好的适用性^[11-12]。然而,对于轴尖受压失效问题而言,轴尖材料变形已经超过弹性极限范围,接触区域的尺寸也并非远小于物体尺寸,因此,本文首先基于 Hertz 接触理论进行理论分析,其次采用有限元模拟手段进行验证,对其服役状态下的应力分布和破坏机理进行研究,从而对轴尖材料性能优化和结构设计提供借鉴。

1 产品结构与试验方法

1.1 产品结构

3J40 轴尖用于某设备精密结构,经过固溶+时效处理,硬度要求 780 HV 以上。热处理条件为 1 190~1 200 °C 保温 13~15 min,水淬,抗拉强度 ≤ 814 MPa。服役状态下,轴尖与红刚玉表面接触,轴尖球头受较大的压应力作用,其服役状态示意图如图 1 所示。

试验过程中,轴尖发生断裂,其断裂形态较为特别,大致沿轴尖中轴线分为两半,并在腰部横向裂

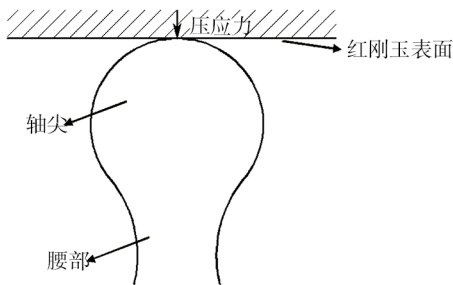


图1 轴尖服役状态示意图

Fig. 1 Schematic view of the service state of the shaft tine

开。由于红刚玉的硬度和弹性模量远超轴尖,因此红刚玉可视为刚性体,在服役过程中表面形态尺寸几乎不发生变化。

1.2 试验方法

采用 Keyence 体视显微镜对 3J40 轴尖进行宏观观察,采用 Quanta FEG 650 场发射扫描电镜对轴尖断口形貌进行微观观察,加速电压为 20 kV。

2 结果及分析

2.1 宏观观察结果

轴尖断裂宏观形貌见图 2,目视观察,轴尖整体呈银白色,未见腐蚀特征。体视显微镜下观察,轴尖球头部位存在挤压变形,球头弧面已被压平;轴尖沿中轴线分为两半,端部“半月形”区域断面较为光滑;轴向断面较平,与“半月形”区域断面相比更为粗糙,可见自“半月形”区域向外扩展的棱线;轴向断面扩展至轴尖腰部后扩展方向发生 90° 偏转,偏转后断面特征与轴向断面相似,球头断口宏观形貌见图 2。

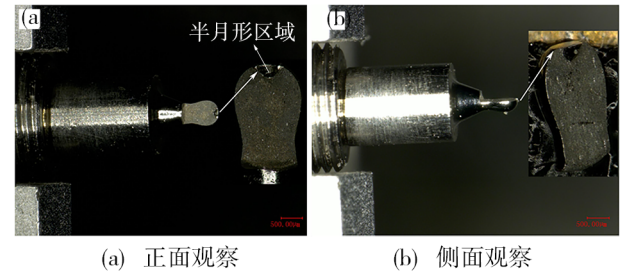


图2 球头断口宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphology of the shaft tine

2.2 微观观察结果

将轴尖断口及其匹配断口置于扫描电镜下观察,整个断面未见微观材料缺陷;断口“半月形”区域微观呈剪切韧窝+磨损形貌,应为轴尖与红刚玉压紧后发生塑性变形,轴尖部分材料发生剪切破坏所致;扩展区呈韧窝形貌,可见自源区向外发散的扩展棱线;裂纹沿轴向扩展至轴尖腰部附近,扩展方向发生 90° 偏转,由轴向变为横向扩展,横向断口也可见韧窝特征,轴尖断口微观形貌见图 3。其中,图 3(a)显示了轴尖断口整体形貌,可见断口包括形貌特征差异明显的两处区域;图 3(b)显示了“半月形”区域和扩展区之间的界线,二者之间的形貌差异应为材料所受应力状态不同导致的破坏方式存在差异,“半月形”区域以剪应力破坏为主,而轴向断口则以拉应力破坏为主;图 3(c)显示了断面扩展棱线特征,从图中可以看到,材料破坏源区位于“半月形”区域附近,裂纹自该区域继续沿轴向扩展。

对轴尖匹配断口进行观察,可见轴尖端部约 $\Phi 220 \mu\text{m}$ 区域被压平,压平区域边缘可见多处开裂,匹配断口微观形貌见图 4。图 4(a)显示了匹配断口整

体形貌,“半月形”区域可见明显的凸起,“半月形”区域所在的断面区域即为承受剪应力最大的区域;图4(b)显示了轴尖与红宝石区域接触面的形貌,接触面较为平坦,边缘可见多处开裂,裂纹方向主要沿轴向,表明球头发生剪切开裂后,裂纹主要沿轴向继续扩展;图4(c)显示了“半月形”区域及轴向断口的界线,其形貌特征与图3所示的特征相匹配。上述观察结果表明,轴尖的断裂模式为塑性断裂,源区位于球头塑性变形区域,未见材料缺陷,使用过程中轴尖与

红刚玉发生接触,球头发生挤压变形,导致部分区域发生剪切开裂。

从球头断口微观观察结果中可知,轴尖开裂的根本原因是轴尖受压产生塑性变形,被红刚玉表面压平的区域变形不协调,导致材料发生剪切破坏。然而,上述分析较为笼统,无法获得其服役状态下的应力分布和破坏过程,因此后文将建立有限元模型进行具体分析。

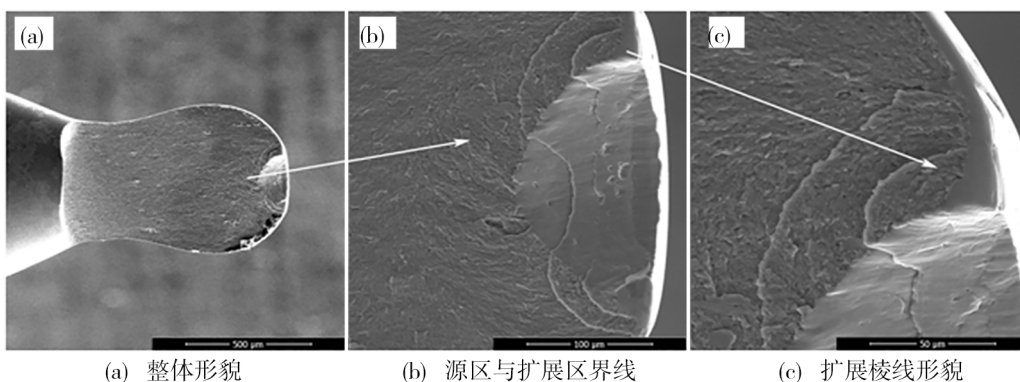


图3 轴尖断口微观形貌

Fig. 3 Fracture morphology of the shaft time

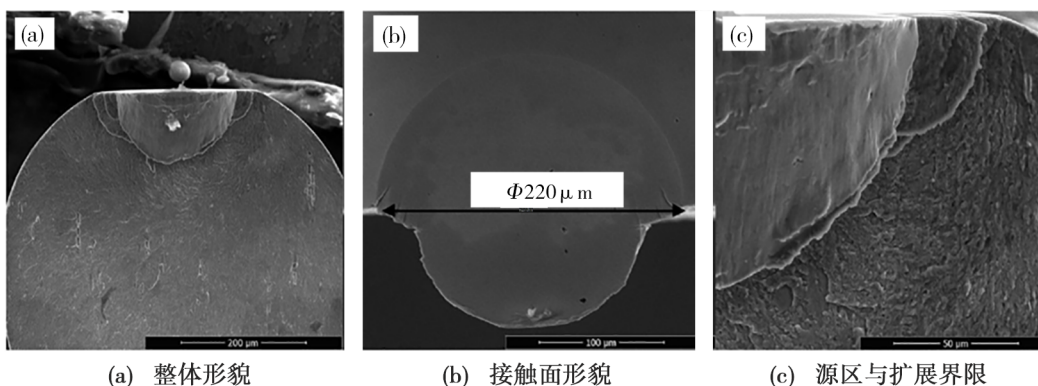


图4 轴尖匹配断口形貌

Fig. 4 Matching fracture morphology of the shaft time

3 分析与讨论

3.1 理论分析

根据Hertz弹性接触理论,对本文中的轴尖受压失效问题进行初步计算。Hertz接触理论分为点接触和线接触两个方面^[13],本例中的情况与点接触更为接近,其基本方程为:

$$\iint_{Ac} \sigma(x,y) dx dy = F \quad (1)$$

$$\frac{1}{\pi E'} \cdot \iint_{Ac} \frac{\sigma(x',y')}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} dx' dy' = \delta - Z(x,y) \quad (2)$$

式中,式(1)为平衡方程,式(2)为变形协调方程, Ac 为接触区域, $x, y, x', y' \in Ac$, σ 为接触应力, F 为作用载荷, E' 为弹性模量, δ 为法向接触变形, Z 为接触物体

表面间的初始间距。Hertz理论假设 $Z(x,y)$ 为二次函数,接触区域呈椭圆函数分布,其表达式如下:

$$Z(x,y) = Ax^2 + By^2 \quad (3)$$

$$\sigma(x,y) = \sigma_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{A}\right)^2 - \left(\frac{y}{B}\right)^2} \quad (4)$$

式中, A 和 B 均为几何参数, $\sigma_{\max}$ 为最大接触应力。将式(3)式(4)带入到式(1)式(2)即可得到球与平面点接触问题的理论解,其表达式如下所示:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} R \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) F} \quad (5)$$

$$\sigma_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi^3} \cdot \frac{1}{R^2} \cdot \frac{F}{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2}} \quad (6)$$

式中, a 为接触半径, R 为轴尖的半径, μ_1 和 μ_2 分别为 3J40 和红刚玉两种材料的泊松比, E_1 和 E_2 分别 3J40 和红刚玉两种材料的弹性模量, 各参数取值情况见表 1。对于红刚玉平面而言, 由于 E_2 为无穷大, 因此 $\frac{1-\mu_2^2}{E_2}=0$, 根据式(5)可反推得到作用载荷 $F=1\ 638\ \text{N}$, 因此最大接触应力 $\sigma_{\max}$ 为 64. 668 GPa, 远大于该材料的屈服强度。其原因在于, 本问题实际上不满足 Hertz 理论假设(2)和假设(4), 轴尖材料已经进入明显的塑性变形阶段。

实际上, 传统 Hertz 理论是在许多假设前提下推导出的近似解, 而在许多场合下上述假设是不成立的; 此外, Hertz 理论只能求出沿接触面法线方向上各个位置的应力等参数, 不能精确获知不同方向的应力分布和应力集中情况^[14-15]。因此, 需要采用有限元分析手段对该问题进行进一步讨论和分析。

表 1 Hertz 弹性接触理论各参数取值情况
Tab. 1 Parameter value of Hertz contact theory

接触半径 $a/\mu\text{m}$	球体半径 R/mm	泊松比 μ_1	弹性模量 E_1/GPa	弹性模量 E_2/GPa
110	0.25	0.3	210	∞
轴尖与红刚玉表面接触形成 $\Phi 220\mu\text{m}$ 平面	轴尖球头直径为 0.5mm	轴尖材料泊松比为 0.3	参照《航空材料手册》 ^[3]	红刚玉弹性模量远大于轴尖, 不发生形变

3.2 有限元分析

为了更直观说明 3J40 轴尖的开裂过程, 应用有

限元方法进行分析。红刚玉硬度远大于 3J40 轴尖材料, 可将其视作刚性表面。轴尖表面和红刚玉表面光滑, 计算过程中不考虑摩擦系数。建模时选取轴对称单元 CAX4R, 接触类型选用 SURFACE-SURFACE, 3J40 轴尖为 MASTER SURFACE, 红刚玉表面为 SLAVE SURFACE, 在接触区域加密网格。轴尖材料采用弹性理想塑性本构关系, 弹性模量设为 210 GPa, 屈服强度设为 814 MPa。轴尖与红刚玉表面之间建立接触关系, 接触物体表面间的初始间距 $Z=0$, 在计算过程中对轴尖施加 Y 轴位移加载, 约束红刚玉刚性面。计算过程中量纲长度采用微米, 质量采用克。

图 5 显示了轴尖球头在受到平面压应力后的剪应力云图以及最大应变云图。从图 5(a) 可以看到, 轴尖与红刚玉平面压紧后发生塑性变形, 轴尖与平面接触边缘附近有限元模拟剪应力最大; 从图 5(b) 可以看到, 在红刚玉表面附近形成“月牙形”应变较大的区域, 最大应变区在轴尖与红刚玉平面接触次表面。在实际加载过程中, 最大剪应力为 443. 6 MPa (约为抗拉强度一半), 相比理论分析结果, 与实际情况较为接近。

根据图 5 中的有限元分析结果, 在轴尖球头材料塑性变形过程中, 轴尖与平面接触边缘附近次表面剪应力最大、应变最大, 超过材料强度, 因此在服役过程中容易发生剪切破坏, 成为开裂源区, 有限元模拟结果与实际失效过程一致。

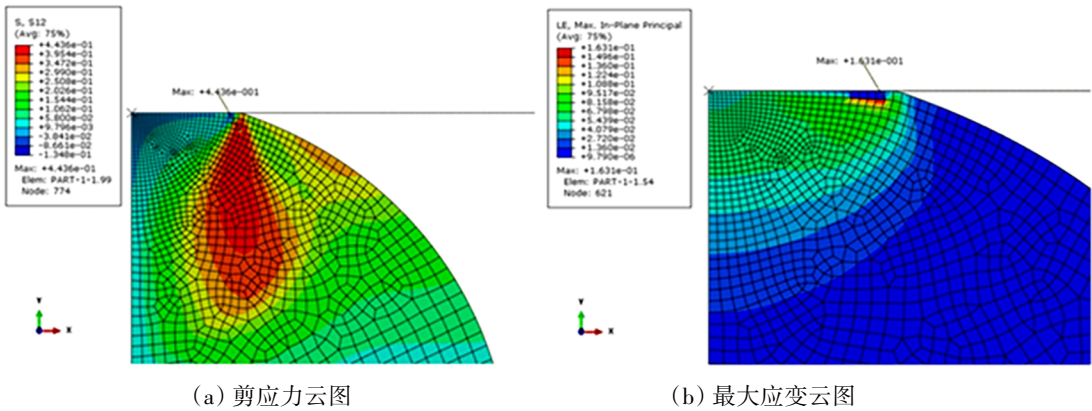


图 5 有限元分析结果

Fig. 5 Finite element analysis results

3.3 综合分析

宏观观察结果表明, 轴尖整体呈银白色, 未见腐蚀特征。轴尖球头部位存在挤压变形, 球头弧面已被压平, 形成 $\Phi 220\ \mu\text{m}$ 平坦区域。轴尖沿中轴线分为两半, 端部“半月形”区域发生剪切破坏, 断面较为光滑, 微观呈剪切韧窝+磨损形貌。轴向断面较平, 微观呈韧窝形貌, 较为粗糙, 可见自剪切区域向

外扩展的棱线; 裂纹沿轴向扩展至轴尖腰部附近, 扩展方向发生 90° 偏转, 应与试验过程中裂纹沿周向开裂后轴尖应力分布发生改变有关。

Hertz 理论分析结果得到的最大接触应力远大于该材料的屈服强度, 其原因在于, 本文中的轴尖失效问题实际上不满足 Hertz 理论假设(2)和假设(4), 轴尖材料已经进入明显的塑性变形阶段。采用有限元

手段进行分析,高硬度球头结构在受到平面压应力作用下在轴尖与平面接触边缘附近剪切力最大、应变最大,超过材料强度,因此在服役过程中发生塑性变形和剪切破坏,成为开裂源区。

该结果对设计方的启示是,尽管 3J40 轴尖材料强度极高,在服役工况下又承受压应力,仍有可能在较大载荷作用下发生塑性变形和剪切破坏;而材料一旦发生剪切破坏,则裂纹会迅速沿轴向发生扩展而断裂为两半,带来灾难性的后果。

4 结论

通过对 3J40 轴尖的观察与分析,得到如下结论:

(1)轴尖的断裂模式为塑性断裂,源区位于球头塑性变形区域,使用过程中轴尖受到较大应力,发生塑性变形,导致源区剪切开裂,随后裂纹沿轴向扩展至轴尖腰部附近,扩展方向发生 90° 偏转,最终断裂;

(2)Hertz 理论分析结果得到的最大接触应力远大于该材料的屈服强度,其原因在于,本文中的轴尖失效问题实际上不满足 Hertz 理论假设(2)和假设(4),轴尖材料已经进入明显的塑性变形阶段;

(3)有限元分析发现轴尖与红刚玉平面接触边缘附近次表面存在较大的剪应力和应变,因此在服役过程中容易发生剪切破坏,成为开裂源区,有限元模拟结果与实际失效过程一致。

参考文献

- [1] 秦添艳. 轴承钢的生产和发展[J]. 热处理, 2011, 26(2): 9-12.
- [2] QIN Tianyan. Production and development of bearing steel [J]. Heat Treatment, 2011, 26(2): 9-12.
- [3] 郑秉礼, 武会源, 卢适茹. 抗硫化氢腐蚀仪表用 0Cr40Ni55Al3 轴承合金的研究[J]. 仪表材料, 1980(2): 15-23.
- [4] ZHENG Bingli, WU Huiyuan, LU Shiru. Study on 0Cr40Ni55Al3 bearing alloy used in H₂S corrosion resistant instruments [J]. Instrument material, 1980(2): 15-23.
- [5] [3] 《中国航空材料手册》编辑委员会, 中国航空材料手册(第 5 卷)[M]. 中国标准出版社, 2002 年 8 月第 2 版, 255-261.
- [6] Editing committee of China Aeronautical Materials Handbook. China aeronautical materials handbook (vol. 5) [M]. China Standards Press, Aug. 2002, 2ed edition, 255-261.
- [7] [4] 邵荔宁, 周景春, 刘彪, 等. 球形轴尖球头圆度的非接触精密测量[J]. 航空精密制造技术, 2011, 47(6): 17-19.
- [8] SHAO Lining, ZHOU Jingchun, LIU Biao, et al. Non-touch measure for roundness shaft tine precision circular [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2011, 47(6): 17-19.
- [9] [5] DENG Shiping, TANG Guangming. HU Jiatao. Used as pivots the properties and microstructure of Ni-40Cr-3.5Al-1.0Nb-B alloy[J]. Functional Materials, 2004, 35: 2189-2192.
- [10] [6] ZHANG Rong, SONG Dongsheng, DU Tongxun, et al. Effect of ageing heat treatment process on the microstructure and mechanical properties for high hardness 3J40 alloy [J]. Procedia Engineering, 2012, 27: 1097 - 1109.
- [11] [7] 杨晨星. 00Cr40Ni55Al3Ti 轴承合金的组织特征及耐磨和疲劳性能研究[D]. 昆明理工大学, 2019.
- [12] YANG Chenxing. Study on microstructure and wear and fatigue resistant capability of 00Cr40Ni55Al3Ti bearing alloy [D]. Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [13] [8] DONG Dingqian, CHEN Fei, CUI Zhenshan. A physically-based constitutive model for SA508-III steel: Modeling and experimental verification [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 634: 103-115.
- [14] [9] 张兵, 朱乐乐, 王快社, 等. 纯镍的高温塑性变形行为及本构方程[J]. 稀有金属, 2015, 39(5): 406-413.
- [15] ZHANG Bing, ZHU Lele, WANG Kuaishe, et al. High temperature plastic deformation behavior and constitutive equation of pure nickel [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(5): 406-413.
- [16] [10] PU Enxiang, ZHENG Wenjie, SONG Zhigang. Effect of precipitation on hot deformation behavior and processing maps of nickel-base UNS N10276 Alloy [J]. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 2017, 30(11), 1119-1134.
- [17] [11] 田红亮, 朱大林, 方子帆, 等. 赫兹接触 129 年 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2011, 33(6): 61-71.
- [18] TIAN Hongliang, ZHU Dalin, FANG Zifan, et al. 129 years of Hertz contact [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2011, 33(6): 61-71.
- [19] [12] 池冰. 航空发动机滚动轴承动力学模型分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [20] CHI Bing. Dynamical models analysis of aircraft engine rolling bearing [D]. Harbin Institute of Technology, 2016.
- [21] [13] 官春平. 圆柱与刚性平面 Hertz 接触的临界参数计算[J]. 轴承, 2013, 8: 4-7.
- [22] GUAN Chunping. Calculation of critical parameters for Hertz contact between cylinder and rigid plane [J]. Bearing, 2013, 8: 4-7.
- [23] [14] 李峰, 赵杰. 应用 ANSYS 求解赫兹接触问题[J]. 机电产品开发与创新, 2006, 19(6): 76-78.
- [24] LI Feng, ZHAO Jie. Application of ANSYS software in solution of Hertz contact problem [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Product, 2006, 19(6): 76-78.
- [25] [15] 朱子宏, 魏宪军. 应用 ABAQUS 求解赫兹接触问题[J]. 机械, 2009, 36(3): 11-13.
- [26] ZHU Zihong, WEI Xianjun. Application of ABAQUS software in solution of Hertz's contact problem [J]. Machinery, 2009, 36(3): 11-13.