

第 3 代新型低碳高合金钢弧齿锥齿轮失效分析

高志坤, 邢 彬, 卜嘉利, 刘明坤
(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要:在中央传动调试试验中发生主动弧齿锥齿轮轮齿断裂故障,并连带其他部件产生不同程度损伤。主动弧齿锥齿轮整个圆周的接触印痕偏向小端一侧、靠近齿底,从动弧齿锥齿轮接触印痕分布在小端齿顶部位,印痕已不完整、局部超出工作面。为了排除 15Cr₁₄Co₁₂Mo₅Ni₂ 钢弧齿锥齿轮试验中发生的断裂故障,对齿轮进行宏观检查、断口分析、组织检查、硬度测试、成分分析、啮合印痕仿真分析与验证,确定了故障齿轮断裂的性质和产生原因。结果表明:主动弧齿锥齿轮为高周疲劳断裂,疲劳起源于小端面与齿凸面根部转接棱角部位,与材质与冶金缺陷无关;在工作过程中存在异常咬合是导致该齿轮产生早期疲劳开裂的主要原因。建议优化齿面加工参数,提高齿轮工作过程中的咬合质量,从而避免此类故障再次发生。

关键词:弧齿锥齿轮;失效分析;断裂;疲劳;接触印痕;异常啮合;中央传动

中图分类号:V233

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.01.024

Failure Analysis of the Spiral Bevel Gear Made of the 3rd Generation New Low Carbon High Alloy Steel

GAO Zhi-kun, XING Bin, BU Jia-li, LIU Ming-kun

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: During the commissioning test of an internal gearbox, the teeth fracture failure of the driving spiral bevel gear occurred, leading to collateral damage to other parts to varying degrees. The contact patterns on the entire circumference of the driving spiral bevel gear are biased to the small end near the root of the teeth. The contact patterns of the driven bevel gear are distributed at the top of the small end of the teeth, and the patterns are incomplete and partially beyond the working faces. To solve the problem of the fracture failure of the spiral bevel gear made of 15Cr₁₄Co₁₂Mo₅Ni₂ steel during the test, macroscopic inspection, fractographic analysis, metallographic examination, hardness testing, composition analysis, meshing pattern simulation and verification were conducted to determine the failure modes and causes. The results show that the fracture of the driving spiral bevel gear is of high cycle fatigue, originating at the corner between the small end face and the root of the convex side of the tooth, and had nothing to do with the material and metallurgical defects. The main reason for the early fatigue cracking of the gear is the abnormal meshing during operation. Therefore, it is recommended to optimize the machining parameters of gear pairs, and improve the meshing quality of the gear pair during operation, so as to avoid similar failure from happening again.

Key words: spiral bevel gear; failure analysis; fracture; fatigue; contact pattern; abnormal meshing; internal gearbox

0 引言

随着航空发动机推力的增大和推重比的提高,要求齿轮所传递的功率和速度不断提高,齿轮咬合表面的温度也需不断提高,这对制造齿轮的材料提出了更为苛刻的要求。弧齿锥齿轮因具有传动平稳、承载能力强、结构紧凑等优点,被广泛应用于发动机中央传动系统。中央传动弧齿锥齿轮是动力传输的枢纽,一旦失效将造成整个传动系统功能丧失,飞行任务

中断。

航空锥齿轮失效形式往往表现为齿面点蚀、胶合、磨损、塑性变形和断裂^[1-3],国内外学者对发动机工作中发生的多起齿轮断裂故障进行了深入研究。Pierre 等^[4]对 GE 90-11B 发动机齿轮箱直齿锥齿轮断裂故障进行分析,认为这是由局部脱碳产生的残余拉应力和工作应力共同作用造成的,后采取喷丸措施解决;陈聪慧^[5]、宋乐民^[6]针对涡喷发动机中央传动锥齿轮先后出现的 3 起齿轮失效故障,经理论分析和试验

收稿日期:2021-10-12 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:高志坤(1978),男,硕士,高级工程师。

引用格式:高志坤,邢彬,卜嘉利,等.第 3 代新型低碳高合金钢弧齿锥齿轮失效分析[J].航空发动机,2024,50(1):170-174.GAO Zhikun,XING Bin,BU Jiali,et al.Failure analysis of the spiral bevel gear made of the 3rd generation new low carbon high alloy steel[J].Aeroengine,2024,50(1):170-174.

测量后认为失效原因为共振破坏,后通过修改结构避免了共振的发生。然而,在边缘接触使弧齿锥齿轮轮齿承受非正常载荷引起的疲劳失效分析方面未见相关报道,并且与传统共振的失效模式差异性较难界定。在进行中央传动调试试验时,发生主动弧齿锥齿轮轮齿断裂故障。故障齿轮选用具有耐高温、耐腐蚀和优良强韧性的第3代新型低碳高合金钢 $15\text{Cr}1_4\text{Co}_{12}\text{Mo}_5\text{Ni}_2$ 材料制备,Trivedi^[7]、袁晓红^[8]的研究表明,该材料表面渗碳后具有较好的耐磨性能和较高的接触疲劳性能,类似故障在该材料齿轮上首次发生,因而探究其失效机理,对进一步完善设计和改进工艺有一定借鉴意义。

本文从宏观检查、断口分析、组织检查、成分分析、硬度测试、啮合印痕仿真与验证等多方面对故障弧齿锥齿轮进行分析,以明确其失效模式及原因,并提出相应的改进建议。

1 试验过程与结果

1.1 宏观检查

故障弧齿锥齿轮宏观形貌如图1所示。从图中可见,主动弧齿锥齿轮在轮齿下方腹板处断裂出4个整齿,拼接后大体完整,从动弧齿锥齿轮整体完好。主动弧齿锥齿轮凹面和从动弧齿锥齿轮凸面作为齿轮副的工作面,两侧工作面上均清晰可见接触印痕,形状呈细长眉毛状。故障主动弧齿锥齿轮整个圆周的接触印痕不均匀,偏向小端一侧、靠近齿底,印痕形貌特征大体分为3类(如图2所示)。第1类为5#齿(裂纹齿),印痕宽度最窄、约为1.0 mm,长度较长、约为23.0 mm,距离齿顶约为5.0 mm;第2类为6#~9#齿(掉齿),印痕宽度约为2.0 mm,长度约为20.0 mm,距离齿顶约为5.3 mm;第3类为其余齿(5#~9#之外的齿),印痕宽度约为1.7 mm,长度约为18.0 mm,距离齿顶约为5.3 mm。从动弧齿锥齿轮接触印痕分布在小端齿顶部位,印痕已不完整、局部超出工作面。

1.2 断口分析

故障主动弧齿锥齿轮掉齿断口可分为径向1、周向和径向2断口,径向1断口和周向断口较细腻、明显可见疲劳弧线和放射棱线特征,表明掉齿断口为疲劳性质,如图3(a)所示;从疲劳弧线和放射棱线的方向判断疲劳起源于小端面与齿凸面根部转接棱角部位,呈点源起始,如图3(b)所示;周向断口为径向1裂纹

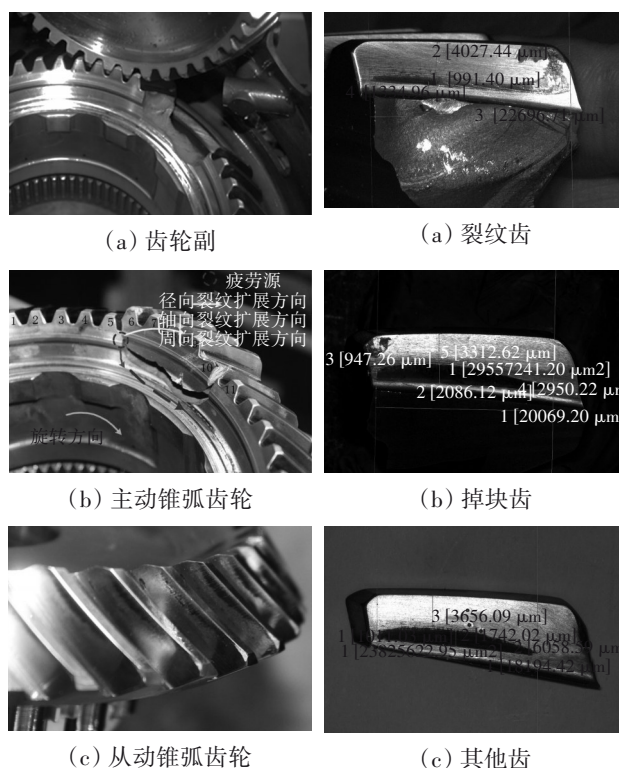


图1 故障齿轮局部宏观形貌 图2 主动锥弧齿凹面咬合痕迹宏观形貌

疲劳扩展形成,径向2断口较粗糙,面积小于整个掉块断口面积的20%,应为疲劳扩展后期形成的瞬断断口。从图中可见,裂纹首先从小端面向大端面扩展,然后同时沿轴向和径向扩展,至辐板转接部位后沿旋转方向周向扩展,穿过4齿后沿径向过载开裂掉块。

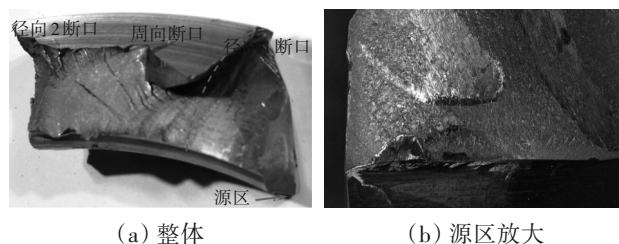


图3 掉齿断口宏观形貌

线切割取下径向1断口,在扫描电镜中观察,断口可见到明显的疲劳弧线和放射棱线特征,从其方向进一步判断疲劳起源于小端面与齿凸面根部转接棱角部位,呈点源起始,源区有明显的损伤痕迹,未见明显冶金缺陷,如图4(a)、(b)所示;掉齿断口源区附近高倍主要呈颗粒状碳化物形貌特征,局部可见疲劳条带形貌,如图4(c)所示;断口扩展区可见细密的疲劳条带形貌,如图4(d)所示。综合以上特征表明故障齿轮断口为高周疲劳属性^[9-10]。

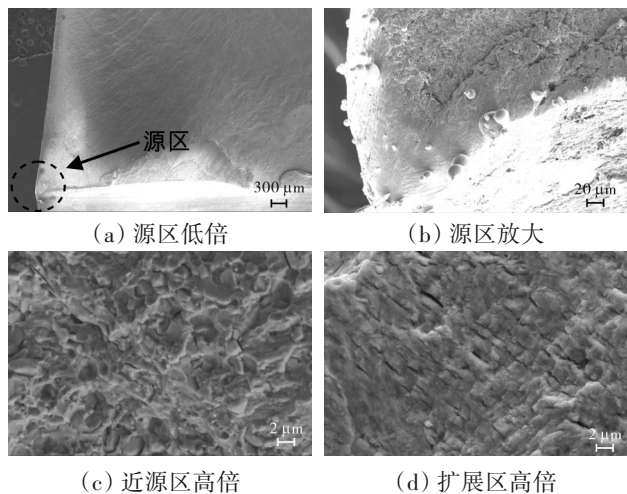


图4 掉齿径向1断口微观形貌

1.3 组织检查

在故障主动弧齿轮断口附近区域切取1个完整双齿进行显微组织观察,齿廓渗层碳化物级别为3级,符合标准中要求(1~4级),形貌如图5(a)所示;凹面啮合区域表面可以观察到形变特征,形貌如图5(b)所示;心部组织为回火马氏体+少量残余奥氏体组织,未见异常,形貌如图5(c)所示;在渗层与基体交界位置存在白块状组织,形貌如图5(d)所示,对该位置进行显微硬度测试硬度为450、507、445,明显低于心部硬度552.6,表明该白块状组织为残余奥氏体。

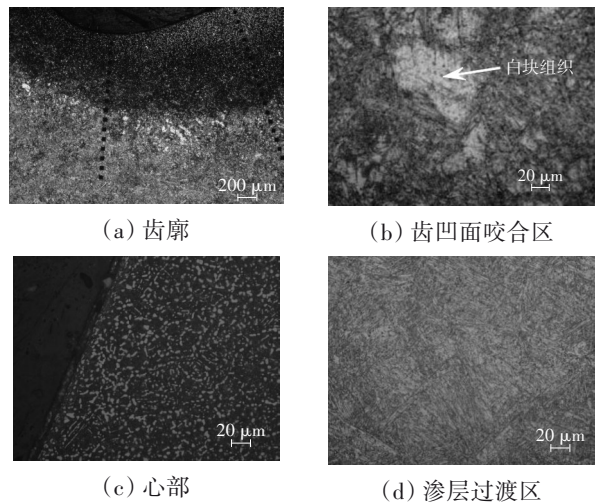


图5 故障弧齿轮组织形貌

1.4 硬度测试

对故障主动弧齿锥齿轮凹面表面进行硬度测试,结果为:齿面 $H_{RC}=63.1$ 、63.4、63.2;心部 $H_{RC}=50.1$ 、51.5、51.4,符合标准要求。

对故障主动弧齿轮齿跟圆角渗层区域进行单点显微硬度检测,结果如图6所示。从图中可见,故障主动弧齿轮在渗层组织与心部组织过渡区存在软点

带,对应位置存在白色块状组织(如图5(a)、(b)所示)。

1.5 成分分析

故障锥齿轮基体能谱分析结果见表1,主要合金元素的质量分数未见明显异常。

表1 故障从动锥齿轮基体能谱分析结果 wt%

元素	V	Cr	Co	Fe	Ni	Mo
质量分数	0.6	13.1	13.0	66.7	2.0	4.5

1.6 啮合印痕仿真分析与验证

在弧齿锥齿轮的技术要求中齿轮副接触印痕分2种:静态接触印痕和动态接触印痕。静态接触印痕是安装好的齿轮副在滚检机轻微力的制动下运转后,在齿轮工作面上得到的滚动接触痕迹。动态接触印痕在经过加载后,在齿轮材料的弹性范围内动态色印在原有的静态接触印痕基础上扩展。故障弧齿锥齿轮着色咬合印痕设计要求:总为不间断的椭圆,并总在齿面范围内,无边缘接触;检查位置包括理论啮合安装位置和8个检查位置点共9个位置。其中,理论啮合安装位置印痕检查,把成对齿轮调整到理论啮合安装位置(即大/小齿轮锥顶重合的位置);8个检查位置点设置的主要依据是发动机转子轴向力作用下,考虑变形、轴承游隙变化等因素齿轮工作位置发生的变动。

根据着色说明书磨齿后检查要求,分别使用某商软件和有限元软件仿真分析齿面接触印痕,并使用专用齿轮滚检机验证实际印痕,分析与验证结果如图7~9所示。结果表明:某商软件分析的齿面静态接触印痕与实际加工的零件滚检结果基本一致,个别检查

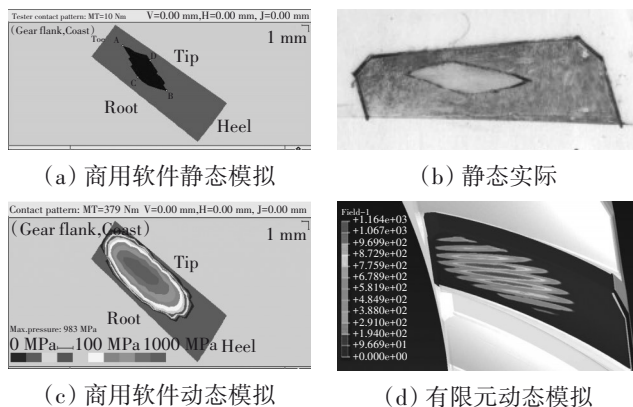


图7 理论位置(故障检查)咬合印痕仿真与验证结果

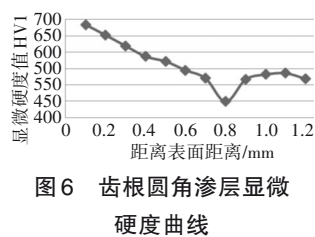


图6 齿根圆角渗层显微硬度曲线

位置齿面印痕与轮齿边缘很近,在施加工作载荷后易发生轮齿边缘接触;2种软件仿真分析的齿面加载接触印痕基本一致,主动弧齿锥齿轮在理论位置和位置1的齿面印痕与轮齿边缘很远、且接触应力约为1100 MPa;主动弧齿锥齿轮在8位置的齿面印痕与轮齿边缘很近,发生了轮齿边缘接触,接触应力显著增大,达到1600~2000 MPa。

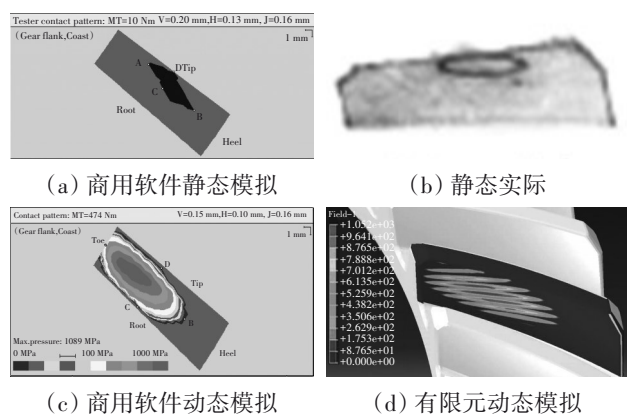


图8 位置1咬合印痕仿真与验证结果

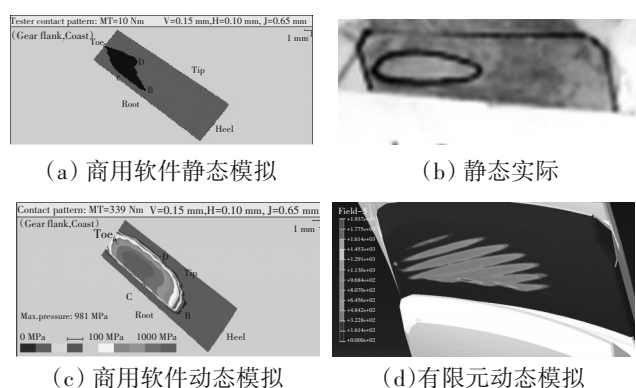


图9 位置8咬合印痕仿真与验证结果

2 分析与讨论

从故障主动弧齿锥齿轮断口检查可知:故障齿轮裂纹起始于小端面与齿凸面根部转接棱角部位、呈点源特征,首先从小端面向大端面扩展,然后同时沿轴向和径向扩展,至辐板转接部位后沿旋转方向周向扩展,穿过4齿后沿径向过载开裂掉块,扩展区约占整个断口面积80%,疲劳扩展充分;微观上扩展区存在大面积撕裂棱的扩展纹理特征及细密的疲劳条带形貌特征,结合高周疲劳断口的判断依据,表明该故障主动弧齿锥齿轮裂纹的失效性质为高周疲劳。

通过故障弧齿锥齿轮宏观检查可知:主动弧齿锥

齿轮整个圆周的接触印痕不均匀,偏向小端一侧、靠近齿底;从动弧齿锥齿轮接触印痕分布在小端齿顶部位,印痕已不完整、局部超出工作面,说明故障弧齿锥齿轮副工作过程中发生了边缘接触。

弧齿锥齿轮齿面接触区的形状、大小和位置对齿轮的平稳运转、载荷分布、使用寿命和噪声有直接影响。接触印痕是衡量弧齿锥齿轮啮合质量的重要标志,也是锥齿轮研制过程中最关键的问题所在。某公司最早提出基于局部共轭原理的弧齿锥齿轮加工参数形成技术,并采用轮齿接触分析(Tooth Contact Analysis, TCA)^[11-13]技术模拟弧齿锥齿轮的啮合过程来获得齿面接触印痕和传动误差曲线,从而预判所获得的弧齿锥齿轮加工参数的合理性。求出主动弧齿锥齿轮的几何参数、加工参数,选取大轮齿面上的1个参考点;利用局部共轭原理,在从动弧齿锥齿轮上求出与主动轮参考点共轭的1个点,并求出该点的法曲率及法向量,并得出从动弧齿锥齿轮的加工参数^[14-15]。在实际生产加工中,根据滚齿试验结果,往往需要多次反复的参数调整才能得到1个合适的接触印痕与良好啮合性能。由此可见,弧齿锥齿轮着色咬合印痕与加工参数的调整密不可分。由故障主动弧齿锥齿轮工作面典型检查位置咬合印痕仿真与验证可知:按现有锥齿轮齿面详细设计参数加工的齿轮,个别典型检查位置上的静态印痕处于齿廓边缘;在工作过程中,载荷作用下主动弧齿锥齿轮凹面的动态印痕向小端和齿根方向移动、发生边缘接触,使得齿根部位应力增大。在这种周期往复异常咬合作用下,促使小端面与齿凸面根部转接棱角部位萌生疲劳裂纹,齿轮齿面加工参数考虑不充分是故障的主要原因。因此,通过齿面加工参数优化、咬合印痕仿真、试验验证等,确保齿轮试制后全面满足着色咬合印痕设计要求,提高齿轮工作过程中的咬合质量,是避免此类故障发生的主要措施。

结合故障主动弧齿锥齿轮的金相组织、显微硬度测试表明:在渗层组织与心部组织过渡区存在“软点”带(距离表面约0.8 mm),对应位置存在残余奥氏体组织。分析产生这一现象原因应为由于主动弧齿锥齿轮15Cr₁₄Co₁₂Mo₅Ni₂材料合金元素多、渗碳困难,在长时间渗碳过程中如果碳势过高,扩散时间不足,则容易导致材料碳元素及合金元素在渗碳过渡区聚集,产生残余奥氏体带(白色块状组织),导致其出现硬度软

点。因此,通过渗碳工艺、参数的控制与调整,降低奥氏体在冷却过程中的稳定性,是消除和减少 $15\text{Cr}_{14}\text{Co}_{12}\text{Mo}_5\text{Ni}_2$ 渗碳层残留奥氏体的最为有效的途径。本次故障主动弧齿锥齿轮裂纹起始于小端面与齿凸面根部转接棱角表面,源区未见明显残余奥氏体等组织缺陷,基体材料成分、组织、硬度等符合标准要求,表明其与齿轮疲劳裂纹萌生无明显关联性。

3 结论

(1)故障主动弧齿锥齿轮断裂为高周疲劳性质,且与材质与冶金缺陷无关;

(2)齿轮齿面加工参数考虑不充分,使齿轮在工作过程中发生异常咬合、齿根部位应力增大,是齿轮疲劳断裂的主要原因。

建议通过齿面加工参数优化、咬合印痕仿真、试验验证等,确保齿轮试制后全面满足着色咬合印痕设计要求,避免齿轮工作过程中产生异常咬合。

参考文献:

- [1] Joshi H D, Kothari K D. Mode and cause of failure of a bevel gear a review[J]. Advance Engineering and Research Development, 2014, 1 (2): 1-9.
- [2] Fernandes P J L. Tooth bending fatigue failures in gears[J]. Engineering failure analysis, 1996, 3(3): 219-225.
- [3] Siddiqui N A, Deen K M, Khan M Z. Investigating the failure of bevel gears in an aircraft engine[J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2013, 1(1): 24-31.
- [4] Pierre J, Robbins D C. Powerplant group chairman's factual report[R]. Washington D C: National Transportation Safety Board, 2018.
- [5] 陈聪慧. 航空发动机机械系统常见故障[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 456-467.
- [6] 宋乐民. 发动机中央传动锥齿轮失效机理的试验研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 231-245.
- [7] SONG Lemin. Experimental study on failure mechanism of bevel gear in engine central transmission [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 231-245. (in Chinese)
- [8] Trivedi H K, Forster N H, Rosado L. Rolling contact fatigue evaluation of advanced bearing steels with and without the oil anti-wear additive tricresyl phosphate[J]. Tribology Letters, 2011, 41(3): 597.
- [9] Yuan X H, Zheng S J, Yang M S, et al. Carbide precipitation and microstructure refinement of Cr-Co-Mo-Ni bearing steel during hot deformation[J]. Journal of Central South University, 2015, 9(22): 3265.
- [10] 张栋, 陶春虎. 失效分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 133-140.
- [11] ZHANG Dong, TAO Chunhu. Failure analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 133-140. (in Chinese)
- [12] 美国金属学会. 金属手册第十卷失效分析与预防[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 148-150.
- [13] American Institute of Metals. Metal handbook, vol. 10, failure analysis and prevention[M]. Beijing: China Machine Press, 1986: 148-150. (in Chinese)
- [14] Gleason W. Understanding tooth contact analysis[M]. New York: University of Roch Ester Press, 1981: 124-129.
- [15] Fan Q, Lowell W. New developments in tooth contact analysis (TCA) and loaded TCA for spiral bevel and hypoid gear drives[J]. Gear Technology, 2007, 24(3): 26-35.
- [16] Sheveleva G I, Volkov A E, Medvedev V I. Algorithms for analysis of meshing and contact of spiral bevel gear[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(2): 198-215.
- [17] Litvin F L. Gear geometry and applied theory[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1994: 107-281.
- [18] Litvin F L, Zhang Y. Local synthesis and tooth contact analysis of face-milled spiral bevel gears[R]. NASA /CR-1991-4342.

(编辑: 程 海)