

文章编号:1000-8055(2013)07-1644-06

齿向分段抛物线修形对渐开线花键副 微动磨损参数的影响

胡正根, 朱如鹏, 靳广虎, 倪 德

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 提出渐开线花键副齿向修形的分段抛物线函数, 得到齿向修形渐开线花键副的几何模型. 使用有限元方法对典型渐开线花键副进行微动摩擦接触分析, 得到修形和未修形渐开线花键副的接触应力及相对滑移分布, 并考虑修形位置和修形量对齿向修形渐开线花键副微动磨损参数的影响. 研究表明: 分段抛物线函数能满足渐开线花键副的齿向修形要求, 修形曲线过渡平滑; 齿向修形能有效地减少齿面端部接触应力和相对滑移的集中; 典型模型下, 修形位置集中在外花键端部和后半段时效果较好; 端部修形量应根据模型合理选择, 一般外花键后端的修形量相对前端较大.

关 键 词: 花键; 齿向修形; 有限元法; 微动; 接触应力

中图分类号: V21; TH131.4

文献标志码: A

Effect of axial piecewise parabolic modification on fretting wear parameters of involute spline couplings

HU Zheng-gen, ZHU Ru-peng, JIN Guang-hu, NI De

(Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A piecewise parabolic function of involute spline couplings axial modification was presented, and the modified geometric model of involute spline couplings was built. Based on the finite element method, the fretting frictional contact property of typical involute spline couplings was analyzed, and the contact stress and relative slip distributions of modified and unmodified involute spline couplings were obtained, as well as the effects of modified position and modified quantity on contact characteristics of modified involute spline couplings were considered. The following conclusions can be drawn from the analysis results. The piecewise parabolic function meets the axial modification requirement of involute spline couplings, and the modification curve is smooth. Axial modification can effectively reduce phenomena of concentrated contact stress and relative slip for involute spline. Modified positions should be the ends and latter half of external spline in the typical model. Modification quantity of the ends should be a reasonable choice for the model, and modification quantity of the back is generally larger than that of the front.

Key words: spline; axial modification; finite element method; fretting; contact stress

收稿日期: 2012-07-26

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130711.1810.201307.1644_001.html

基金项目: 国家自然科学基金(50775108); 高等学校博士学科点专项科研基金(20113218110017);

江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ11_0199); 江苏省高校优势学科建设工程

作者简介: 胡正根(1988—), 男, 江西南昌人, 硕士生, 主要从事机械传动、微动损伤研究.

相比普通平键联接,渐开线花键副以其受力匀称、承载能力大以及对中性和导向性好等优点,在航空、航天、汽车等领域中得到广泛运用^[1].针对渐开线花键连接,国内外学者开展了一系列的研究工作. Leen 等^[2-5]采用有限元方法对同时承受扭矩和轴向力的螺旋渐开线花键副的微动摩擦进行了研究,并利用光弹性法验证了有限元分析的正确性. Dietz 等^[6]对花键副的强度和磨损进行了实验研究,整理出了一些作为设计规则的基本关系. Medina 等^[7-8]采用静力学接触模型对偏心传动轴传动系统花键副的应力分布进行了研究. 陈卓、朱如鹏^[9]对航空发动机渐开线花键副强度进行了计算,分析了几个主要参数对花键副强度的影响. 韩晓娟^[10]研究了轴毂不同轴度所引起的微振磨损对挠性花键连接寿命的影响,并将此定量地引入花键连接的强度计算中,给出了低同心精度花键连接的强度计算方法. 但是在渐开线花键副修形,特别是齿向修形对渐开线花键副接触应力和相对滑移的影响方面,由于渐开线花键副几何模型较复杂,鲜有文献报道.

相关研究表明渐开线花键副的主要损伤形式是齿面的微动磨损,而接触应力和相对滑移是影响渐开线花键副微动磨损的两个重要参数^[11-14]. 本文采用分段抛物线函数对典型渐开线花键副进行齿向分段修形,利用有限元方法分析齿向修形后渐开线花键副的接触应力及相对滑移分布,并研究修形位置和修形量对修形渐开线花键副的接触应力及相对滑移的影响,为渐开线花键副的设计提供参考依据.

1 渐开线花键副齿向分段抛物线修形

1.1 齿向修形曲线

渐开线花键副的齿向修形一般指外花键轮齿在不同轴向位置的齿厚变化^[15-16]. 由于接触应力和相对滑移沿齿长的非对称性^[17-18], Ding 等^[4]曾提出一种 6 次多项式的修形方式,但确定该修形曲线需知道 6 个位置的修形量,这使得修形曲线难以确定,而且在该修形方式下,修形段与未修形段不连续,存在较大的应力集中,不能完全满足修形要求. 本文提出一种齿向分段抛物线修形方式,即两端为抛物线修形,中间为未修形段,修形段与未修形段过渡点曲率为 0,使得过渡平滑,其修形曲线示意图如图 1 所示. 通过改变刀具相对于中心轴的位置函数来实现不同的切削深度,这样就

可以实现外花键轮齿厚度的变化,加工得到该修形方式下的外花键轮齿^[4].

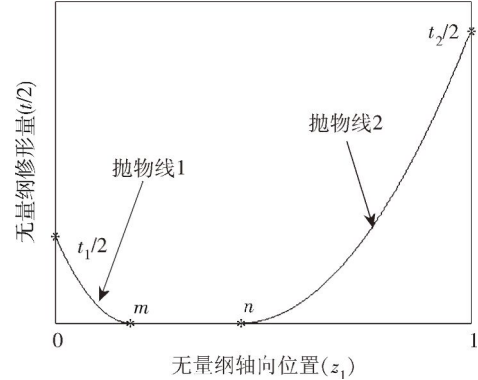


图 1 外花键齿向修形方式

Fig. 1 Axial modification method of external spline

图 1 中 m 和 n 为未修形段起止点位置相对于外花键的无量纲齿长, t_1 和 t_2 为端面修形量相对于外花键的无量纲分度圆齿厚, t 为轴向任意位置修形量相对于外花键的无量纲分度圆齿厚, 则 $t/2$ 是刀具径向向内移动的相对于外花键的无量纲分度圆齿厚. 确定 t_1, t_2, m, n 的值即可计算得到修形抛物线 1 和抛物线 2 的函数, 如下式:

$$\frac{t}{2} = \begin{cases} \frac{t_1}{2m^2} z_1^2 - \frac{t_1}{m} z_1 + \frac{t_1}{2} & 0 \leq z_1 \leq m \\ 0 & m \leq z_1 \leq n \\ \frac{t_2}{2(n-1)^2} z_1^2 - \frac{nt_2}{(n-1)^2} z_1 + \frac{n^2 t_2}{2(n-1)^2} & n \leq z_1 \leq 1 \end{cases}$$

1.2 齿向修形后的变化

为了考察修形前后微动磨损参数的变化,取图 2 所示典型圆齿根渐开线花键副为分析对象^[1]. 图 2 中花键齿数为 18, 模数为 2.5, 压力角为 30° , $D_b = 20 \text{ mm}$, $D_o = 70 \text{ mm}$, $a_1 = 27 \text{ mm}$, $a_2 = 2.89 \text{ mm}$, 内花键轴承受的扭矩 $T = 3000 \text{ N} \cdot \text{m}$, 平均接触应力 $p_c = 95.03 \text{ MPa}$. 渐开线花键副材料的弹性模量为 206.8 GPa , 泊松比为 0.28. 修形位置 $m = 0.185$, $n = 0.444$, 端部修形量 $t_1 = 1.27 \times 10^{-3}$, $t_2 = 1.121 \times 10^{-2}$. 为研究齿向修形对接触应力和相对滑移的影响,将软件 CATIA 中精确几何模型导入软件 ANSYS workbench 13.0, 计算渐开线花键副承载接触区的接触应力和相对滑移. 渐开线花键副有限元模型如图 3 所示, 边界条件为:模拟渐开线花键副全齿应力,单齿施加循环对称结构,外花键输出轴的 A 面固定,扭矩等效为

沿内花键输入轴B面顶端弧线的切向节点力. 接触设置为: 内花键齿面为目标面, 外花键齿面为接触面, 计算方法为增广拉格朗日法, 法向接触刚度系数取0.1, 摩擦因数取0.3. 经试算, 单元总数为20804, 节点总数为95657时计算结果趋于收敛.

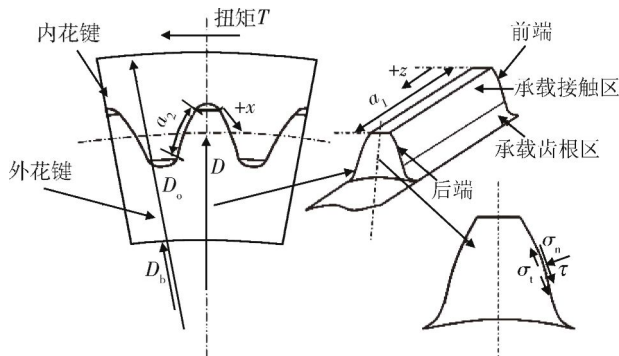


图2 典型渐开线花键副几何模型

Fig. 2 Geometric model of typical involute spline couplings

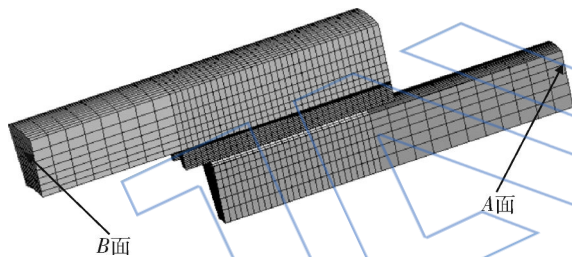


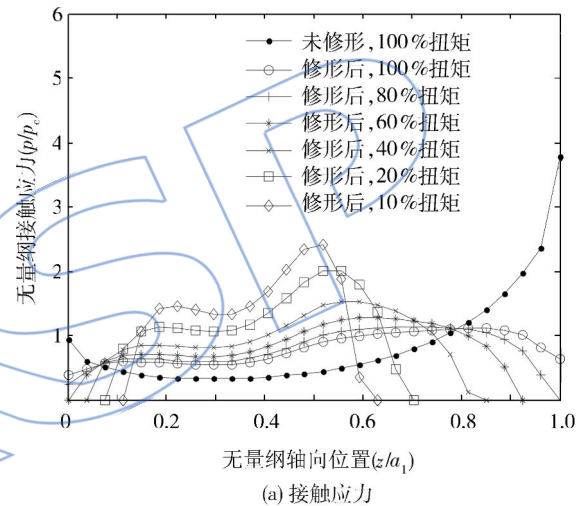
图3 典型渐开线花键副有限元模型

Fig. 3 Finite element model of typical involute spline couplings

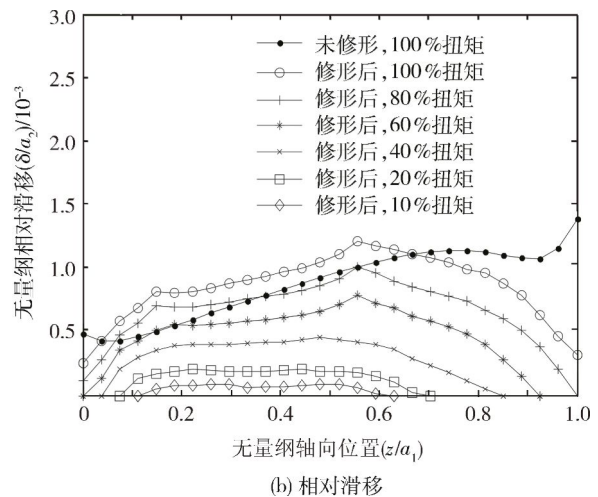
图4(a)给出了渐开线花键副在逐步加载的情况下接触应力修形前后的比较. 因为考虑的是齿向修形前后接触应力及相对滑移的变化, 故本文取 $x=0.5a_2$ 处渐开线花键副接触应力及相对滑移的变化. 从图中可见, 随着扭矩的增加, 修形渐开线花键副轴向接触宽度逐步向两端扩展, 扭矩超过设计值80%后渐开线花键副齿面完全进入接触状态, 在过渡点 $z/a_1=0.185$, $z/a_1=0.444$ 处, 接触应力未明显变化, 说明本文提出的修形方式使修形与未修形段过渡平滑. 在整个轴向上, 后半段的接触应力相对于前半段的接触应力较大, 这与外花键轮齿承受的扭矩随着轴向距离增加而增加是相符合的. 与未修形花键渐开线副相比, 修形后渐开线花键副接触应力分布相对均匀. 特别是在 $z/a_1=0$, $z/a_1=1$ 处, 未修形的渐开线花键副在这两个位置由于存在几何突变, 且外花键在 $z/a_1=1$ 处承受扭矩最大, 导致接触应力集中严

重, 修形后, 端部的接触应力下降趋势明显.

图4(b)给出了渐开线花键副在逐步加载的情况下相对滑移修形前后的比较. 从图中可见, 未修形渐开线花键副的相对滑移随着轴向位置增加而增加, 在 $z/a_1=1$ 处达到最大, 其值约为 $0.0013a_2$. 修形后, 渐开线花键副的相对滑移随着负载的增加而增加, 与接触应力的变化类似, 80%负载后, 渐开线花键副齿面完全进入接触状态, 整个齿面都出现相对滑移. 修形后渐开线花键副的相对滑移分布与未修形渐开线花键副的相对滑移相比分布较均匀, 在端部相对滑移明显减小.



(a) 接触应力



(b) 相对滑移

图4 渐开线花键副接触应力和相对滑移分布图

Fig. 4 Contact pressure and relative slip distributions of involute spline couplings

在渐开线花键副的实际使用中, 未修形渐开线花键副在端部微动磨损严重, 特别是 $z/a_1=1$ 端, 这与端部接触应力和相对滑移集中是相关的^[2]. 渐开线花键副经过分段抛物线函数的齿向修形后, 端面接触应力及相对滑移集中现象改善明

显,修形与未修形区域过渡点接触应力及相对滑移也没有突变,整个接触应力及相对滑移分布较为均匀,说明本文提出的分段抛物线修形曲线能满足渐开线花键副的齿向修形要求,能有效改善渐开线花键副的接触应力及相对滑移集中现象。

2 修形位置的影响

在齿向分段抛物线修形中,位置参数(m 和 n)和端面修形量(t_1 和 t_2)对微动磨损参数有重要的影响,为了考察修形位置参数(m 和 n)对微动磨损参数的作用,取3种典型齿向修形位置,如图5所示。曲线1为上节采用的典型修形曲线,曲线2的未修形位置移动到外花键轮齿中部,即 $m=0.370, n=0.630$,曲线3的未修形位置移动到外花键轮齿后半段,即 $m=0.556, n=0.815$ 。

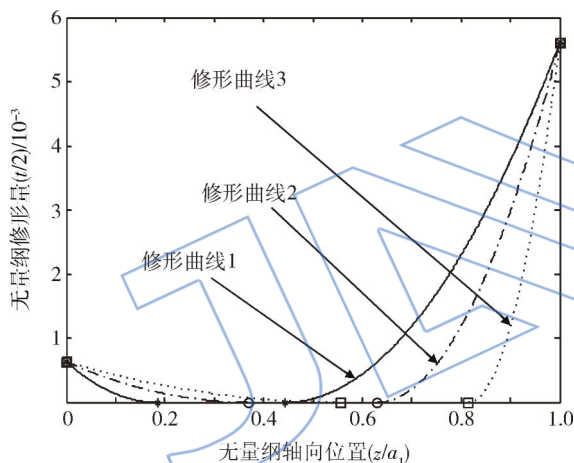


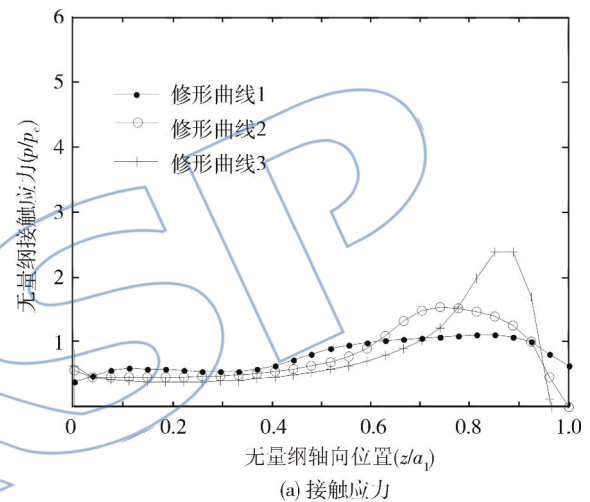
图5 外花键不同齿向修形曲线

Fig. 5 Different axial modification curves of external spline

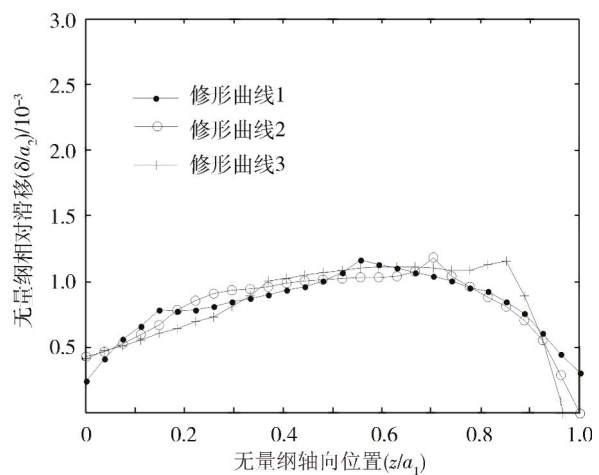
图6(a)给出了渐开线花键副在不同修形曲线下接触应力的变化。在 $z/a_1=0$ 端,修形曲线2和修形曲线3明显有接触应力集中现象,在 $0.05 < z/a_1 < 0.5$ 段,3种修形方式的接触应力很接近,这与该处受载不严重、修形量较小是相关的。 $0.5 < z/a_1 < 0.9$ 时,修形曲线3的接触应力变化最大, $z/a_1=0.85$ 附近,接触应力集中严重,曲线2的接触应力也在曲线1之上,这与该段受载严重、修形曲线3的曲率变化较大、修形曲线1的曲率变化较小是相关的。 $z/a_1 > 0.9$ 时,修形曲线3的接触应力急剧下降,在 $z/a_1=0.96$ 处下降为0,后面未进入接触状态,修形曲线2刚好完全进入接触状态,修形曲线1的接触应力下降平缓,这是由修形曲线2和修形曲线3在加载过程中,前段承

载面积较大,整个齿面最终变形量较小导致最终承载面积较小引起的。

图6(b)给出了渐开线花键副在不同修形曲线下相对滑移的变化。与接触应力的分布类似,相对滑移的分布大致分3部分:前端修形曲线2和修形曲线3相对滑移较大;前半段除端部外,3种修形曲线相对滑移分布区别不明显;后半段修形曲线3相对滑移急剧变化,未完全进入接触状态,修形曲线2次之,刚好进入接触状态,修形曲线1相对滑移变化平缓。



(a) 接触应力



(b) 相对滑移

图6 修形位置对接触应力和相对滑移的影响

Fig. 6 Effect of modified position on contact pressure and relative slip

通过3种修形曲线的比较发现:修形曲线1是较好的,即在典型模型下,修形位置应集中在外花键轮齿的端部和后半段。主要有3点原因:端部存在几何过渡面,容易引起应力集中;外花键轮齿

上承受的扭矩沿着轴向增加,后半段承载较严重,在 $z/a_1=1$ 处达到最大;后端最大修形量相同的情况下,修形曲线 1 在后半段的曲率变化相对修形曲线 2 和修形曲线 3 较小,有利于接触应力和相对滑移平缓变化。

3 修形量的影响

除修形位置外,端部修形量也是齿向分段抛物线修形方式的一个重要影响因素。本节研究在上节讨论的较好修形位置,即 $m=0.185$, $n=0.444$ 时,不同端部修形量 (t_1 和 t_2) 对接触应力和相对滑移的影响。

图 7(a) 给出了渐开线花键副在不同端部修形量下接触应力的变化。从图中可知,当 $t_2=1.121 \times 10^{-2}$ 不变, $t_1=6.40 \times 10^{-4}$, 1.27×10^{-3} , 2.54×10^{-3} 时,前端接触应力发生明显变化, $t_1=6.4 \times$

10^{-4} 时,修形量过小,前端仍然有应力集中, $t_1=2.54 \times 10^{-3}$ 时,修形量过大,前端未完全进入接触, $t_1=1.27 \times 10^{-3}$ 较好。同理 $t_1=1.27 \times 10^{-3}$ 不变,改变 t_2 时,后端接触应力改变, $t_2=1.121 \times 10^{-2}$ 较好。当外花键两端修形量同时减半,即 $t_1=6.4 \times 10^{-4}$, $t_2=5.605 \times 10^{-3}$ 时,两端仍有应力集中现象,未达到修形目的;当外花键两端修形量同时增加 1 倍,即 $t_1=2.54 \times 10^{-3}$, $t_2=2.242 \times 10^{-2}$ 时,两端都未进入完全接触状态,且在花键副中部附近有较大的应力集中。

图 7(b) 给出了渐开线花键副在不同修形曲线下相对滑移的变化。相对滑移的变化规律与接触应力的变化类似,过大的修形量会导致端部相对滑移为 0,过小的修形量使端部相对滑移较大。

比较 7 种不同端部修形量渐开线花键副的接触应力及相对滑移分布发现:外花键端部修形量应根据花键副几何模型合理选择,过大的修形量导致渐开线花键副在中部附近有应力集中,过小的修形量不能达到修形的目的,本文中外花键后端的修形量相比前端较大。

4 结论

本文提出的外花键齿向分段抛物线修形方法,可以适应渐开线花键副两端接触参数不对称的状态,有效地改善接触应力和相对滑移分布,得到如下结论:

1) 适当的齿向分段抛物线修形将会改善渐开线花键副接触应力和相对滑移的端部集中现象,同时由于修形段与未修形段曲线过渡平滑,使得渐开线花键副微动磨损参数分布均匀。

2) 齿向修形位置对渐开线花键副的微动磨损参数分布影响较大。由于本文中外花键轮齿上承受的扭矩沿着轴向增加,后半段承载较严重,故较好的修形位置一般位于外花键端部及承载较大的后半段,即 m 和 n 应靠近外花键的前端。

3) 端部修形量是渐开线花键副齿向分段抛物线修形必须考虑的一个重要因素。修形量应根据渐开线花键副几何模型及受载情况合理选择,本文中后端应力集中较严重,故后端的修形量相比前端较大。

参考文献:

- [1] 布尔加科夫. 航空齿轮传动和减速器手册[M]. 常春江, 译. 北京: 航空工业出版社, 1988.
- [2] Leen S B, Hyde T R, Williams E J, et al. Development of a

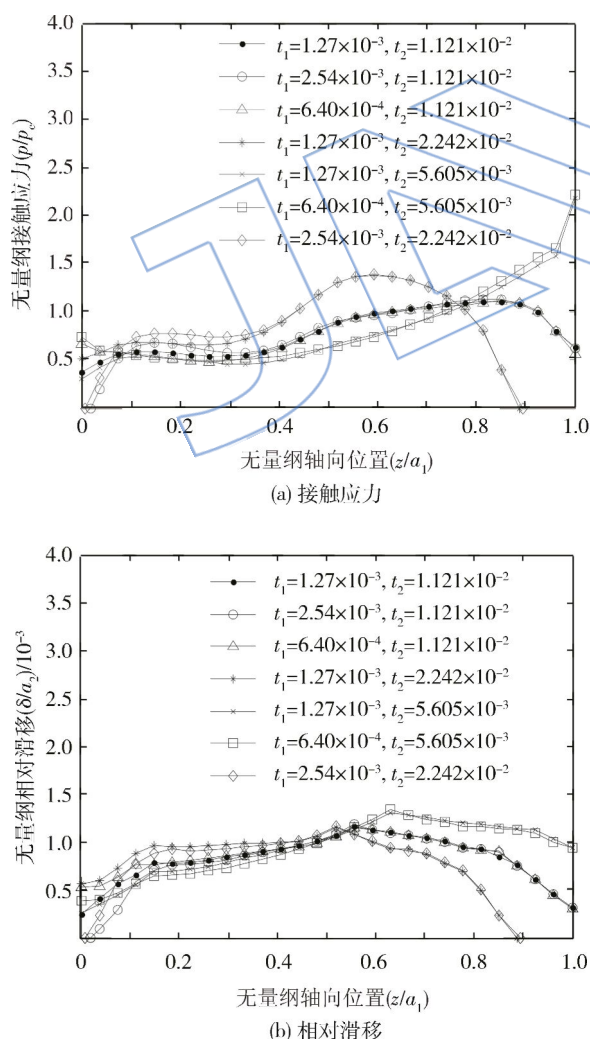


图 7 修形量对接触应力和相对滑移的影响

Fig. 7 Effect of modified quantity on contact pressure and relative slip

- representative test specimen for frictional contact in spline joint couplings[J]. *Journal of Strain Analysis*, 2000, 35(6):521-544.
- [3] Leen S B, Hyde T H, Ratsimba C H H, et al. An investigation of the fatigue and fretting performance of a representative aero-engine splined coupling[J]. *Journal of Strain Analysis*, 2002, 37(6):565-583.
- [4] Ding J, McColl I R, Leen S B. The application of fretting wear modelling to a spline coupling[J]. *Wear*, 2007, 262(9/10):1205-1216.
- [5] Leen S B, Richardson I J, McColl I R, et al. Macroscopic fretting variables in a splined coupling under combined torque and axial load[J]. *Journal of Strain Analysis*, 2001, 36(5):481-497.
- [6] Dietz P, Schafer G, Wesolowski K. 花键轴联接:应力和磨损特性[J]. *工程设计*, 1996(1):31-38.
Dietz P, Schafer G, Wesolowski K. Strength and abrasion wear of involute spline[J]. *Engineering Design*, 1996(1):31-38. (in Chinese)
- [7] Medina S, Olver A V. Regimes of contact in spline couplings[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2002, 124(2):351-357.
- [8] Medina S, Olver A V. An analysis of misaligned spline couplings[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2002, 124(5):269-278.
- [9] 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*, 2008, 155(4):90-92.
CHEN Zhuo, ZHU Rupeng. Strength analysis of involute spline of aero-engine[J]. *Mechanical Engineering and Automation*, 2009, 155(4):90-92. (in Chinese)
- [10] 韩晓娟. 挠性花键联接的强度计算[J]. *燕山大学学报*, 2001, 25(1):45-46.
HAN Xiaojuan. Strength calculating methods of flexible splines[J]. *Journal of Yanshan University*, 2001, 25(1):45-46. (in Chinese)
- [11] Kececiogulu D, Koharcheck A. Reliability of aircraft splines with or without a wear induction period[J]. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 1983, 105(2):163-170.
- [12] Ratsimba C H H, McColl I R, Williams E J, et al. Measurement, analysis and prediction of fretting wear damage in a representative aero-engine spline coupling[J]. *Wear*, 2004, 257(11):1193-1206.
- [13] Ku P M, Valtierra M L. Spline wear-effects of design and lubrication[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1975, 97(4):1257-1263.
- [14] McColl I R, Waterhouse R B, Harris S J, et al. Lubricated fretting wear of a high-strength eutectoid steel rope wire[J]. *Wear*, 1995, 185(1/2):203-212.
- [15] 冒维鹏. 鼓形齿式联接的设计计算[J]. *煤矿机电*, 2009(5):24-27.
MAO Weipeng. Design and calculation of the coupling with crowned tooth[J]. *Collery Mechanical and Electrical Technology*, 2009(5):24-27. (in Chinese)
- [16] 王新林,孙永胜. 鼓形齿联轴器设计计算简明适用方法[J]. *重型机械*, 2005(3):52-58.
WANG Xinlin, SUN Yongsheng. Simple calculating method for design of drum tooth coupler[J]. *Heavy Machinery*, 2005(3):52-58. (in Chinese)
- [17] 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, 217(3):123-142.
- [18] Ding J, Leen S B, Williams E J, et al. Finite element simulation of fretting wear-fatigue interaction in spline couplings[J]. *Tribology-Materials, Surfaces and Interfaces*, 2008, 2(1):10-24.