

文章编号: 1000-8055(2010)02-0407-05

榫连结构接触面几何构形对接触区 应力分布的影响

魏大盛, 王延荣

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为研究并降低传统榫连结构接触区边缘的高应力梯度, 对几种典型接触形式展开了有限元分析, 计算结果表明不同接触形式将导致不同的接触应力分布; 针对某单齿燕尾形榫连结构, 建立了一系列不同网格密度的有限元模型计算分析接触区的应力集中程度, 并以此提高接触应力的求解精度; 并进一步改进了接触面的几何形式, 分析表明二维条件下圆弧/直线的接触形式改善了传统平面/平面接触的应力集中, 圆弧/圆弧的接触形式将使接触应力进一步降低。

关 键 词: 榫连结构; 接触应力; 接触面构形; 高应力梯度

中图分类号: V231.95; V232.3

文献标识码: A

Effects of profile of contact surfaces on the stress distribution for tenon jointing in blade disk assemblies

WEI Da sheng, WANG Yan rong

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To investigate and improve the high stress gradient near the edges of contact zone in conventional tenon jointing, several typical profiles of contact surface were analyzed by means of finite element method (FEM), indicating that different contact profiles would lead to different stress distributions. Then, a set of finite element models with different grids for dovetail attachment were established to analyze stress concentration effects, and improve the solving accuracy of contact stress. Different profiles of contact surface were chosen. The numerical solutions show that arc/line contact profile for two-dimensional (2-D) will remove the high stress concentration, and arc/arc one will further depress the contact stress.

Key words: tenon jointing; contact stress; profile of contact surface; high stress gradient

工程中存在着各种各样的接触问题, 航空发动机中, 装配时的过盈配合、传动系统中的齿轮传动、叶盘榫连结构, 都是典型的接触问题。以榫连结构的接触问题为例, 一方面, 国内以往采用有限元法或其他数值方法的计算结果精度较低, 没有准确刻画出接触区边缘处的高应力梯度^[1-2]。近期的一些研究通过试验揭示了榫连结构存在的高应

力梯度以及微动疲劳破坏的机理^[3-4], 但在数值模拟方面对高应力梯度还应给予更多关注^[5]。另一方面, 榫连结构的接触面形式通常为平面/平面接触, 对于其他接触面形式下接触应力的研究较少。

正因如此, 本文在文献[6-7]的研究基础上, 首先, 针对几种典型的接触形式, 研究其接触应力分布; 其次, 以某单齿燕尾形榫连结构为研究对象, 通

收稿日期: 2009-01-18; 修订日期: 2009-03-25

基金项目: 凡舟青年科研基金(20080403)

作者简介: 魏大盛(1978-), 男, 黑龙江宁安人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机结构强度、振动研究

过改进建模方式提高了采用有限元法模拟榫连接结构接触应力的计算精度;再次,考查了不同接触面形式下的接触应力分布,明确了合理选择接触面形式以降低接触区高应力梯度的措施,这对于改善榫连接结构的强度及微动疲劳性能至关重要.

1 几种典型接触形式的接触应力分析

接触问题的高度非线性使其求解难度大大提高,目前有限元法是处理接触问题的主要数值方法.开展叶盘榫连接结构接触应力分析之前,首先采用有限元法对几种典型接触形式的接触应力进行分析.

图 1 给出了几种较为典型的接触形式,图中 C 为接触点, a 为接触区半宽度.图中包括了 3 种接触:圆平面同无限弹性平面的接触;具有尖角的平面同无限弹性平面的接触;具有圆角 R 的平面同无限弹性平面的接触.图 2 给出了几种接触形式下接触面上压应力的分布,图 3 及图 4 分别为 $R/a=1/2$ 时的有限元模型及接触应力计算结果,可见接触区边缘接触点附近有明显的应力集中.

对于尖角平面同无限弹性平面的接触问题,文献[8-9]中给出了无摩擦条件下接触区压力分布的解析解,即

$$p(x) = \frac{P}{\pi(a^2 - x^2)^{1/2}} \tag{1}$$

式中 p 为上端压力, a 为接触区半宽度.可以看出,在接触区的边缘处($x = \pm a$),压力趋于无穷大,图 2 中有限元解对此的描述还有所欠缺.

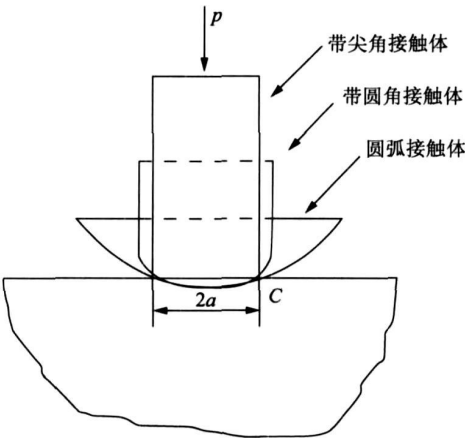


图 1 几种典型的接触几何构形

Fig. 1 Typical profiles of contact pairs

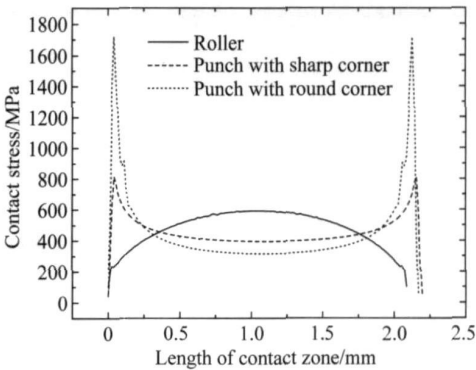


图 2 接触区的应力分布

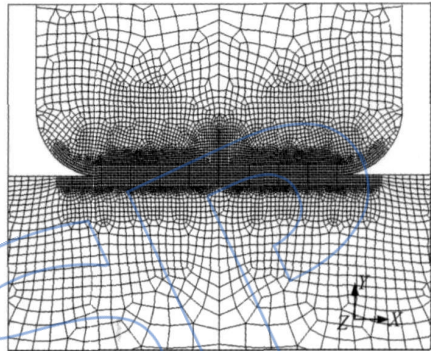


图 3 接触分析有限元模型 ($R/a=1/2$)

Fig. 3 Finite element model for contact analysis ($R/a=1/2$)

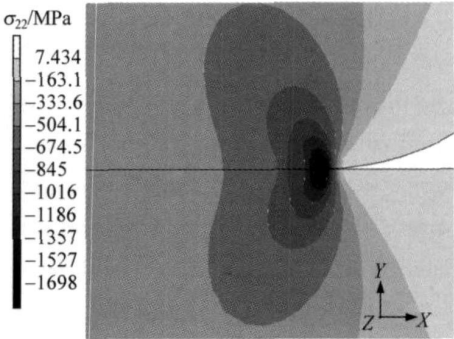


图 4 接触面的应力分布

Fig. 4 Stress distribution on the contact plane

由图 2 的应力结果可以看出,几种情况下接触区的应力梯度差异很大,可采用比值 R/a 区分几种情况:对于圆平面同无限弹性平面的接触,有 $R/a > 1$,此时接触应力沿接触区为椭圆分布;对于具有尖角的平面同无限弹性平面的接触,有 $R/a = 0$,此时接触应力在接触区边缘有较大梯度;而具有圆角的平面同无限弹性平面的接触情况处于这两种情况之间,有 $0 < R/a < 1$.考虑圆角时,榫齿/榫槽的接触状态应处于 $R/a = 0$ 和 $R/a = 1$

两种情况之间, 因此本节计算了 $R/a=0$, $R/a=1/2$ 和 $R/a>1$ 等几种情况, 这无疑对真实榫连结构的接触应力分析很有帮助。

2 单齿燕尾形榫连结构的有限元分析

某单齿燕尾形榫连结构如图 5 所示, 图中几何模型左边界为对称面, 接触区长度 7 mm, 接触面倾角为 45° , 接触区边缘圆角半径为 2 mm。

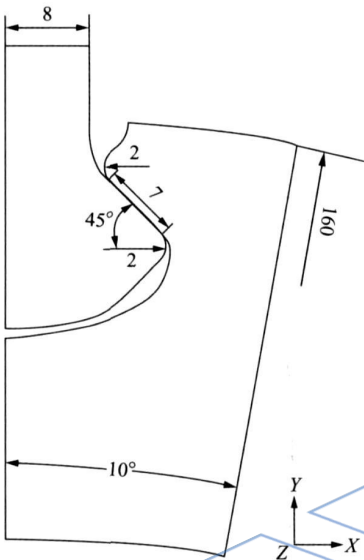


图 5 榫连结构几何模型(单位:mm)
Fig. 5 Geometrical model of a tenon jointing (unit: mm)

分析表明, 带圆角平面同无限弹性平面发生接触时, 接触区边缘存在较大的应力梯度, 榫连结构接触区边缘的情况与此类似. 采用有限元法处理此类问题, 网格划分对于计算结果的影响较为显著, 因此建立了 5 种不同密度的有限元网格来考查接触应力的数值结果. 设接触区四边形单元边长为 L_e , 接触区边缘圆角半径 R_f , 则参数 L_e/R_f 可用于度量接触区网格密度, 不同网格密度有限元模型的参数见表 1, 图 6 所示为网格 1。

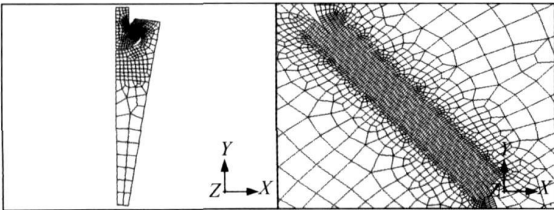


图 6 燕尾形榫连结构的有限元网格
Fig. 6 Finite element grids for a dovetail attachment

表 1 不同网格密度的有限元模型
Table 1 Finite element models with different grids

	单元数	节点数	接触区单元数	接触区单元边长 L_e	L_e/R_f
网格 1	2538	2730	100	0.06608	0.033 04
网格 2	5463	5771	200	0.03304	0.016 52
网格 3	9882	10304	300	0.02203	0.011 02
网格 4	15 465	16009	400	0.01652	0.008 26
网格 5	22 265	22919	500	0.01322	0.006 61

计算边界条件如下: 转速为 15 000 r/min; 建模时并未考虑的叶片部分产生的拉力 100 MPa; 模型左侧为对称面, X 向位移为 0; 轮盘右侧为循环对称平面, 其法向位移为 0. 不同模型接触应力计算结果可见表 2, 文献[10]中给出了详细的分析过程及结论, 这里不再赘述。

表 2 不同网格密度模型接触应力计算结果
Table 2 Contact stress calculated for different finite element grids

	$\sigma_{11}/$ MPa	$\sigma_{22}/$ MPa	$\sigma_{12}/$ MPa	$\sigma_{eq}/$ MPa	主应力/ MPa
网格 1	-1 239	-1083	-579.8	1 120	-1573
网格 2	-1 578	-1406	-693.9	1 287	-1991
网格 3	-1 724	-1626	-750.5	1 411	-2182
网格 4	-1 805	-1734	-784.6	1 503	-2238
网格 5	-1 819	-1774	-770.3	1 465	-2247

由表 2 结果可知, 随着网格密度的增加, 峰值应力计算结果提高, 计算结果逐渐逼近, 网格 4 同网格 3 的计算结果相差不到 7%, 网格 5 同网格 4 的计算结果相差均在 3% 以下. 图 7 为榫槽接触

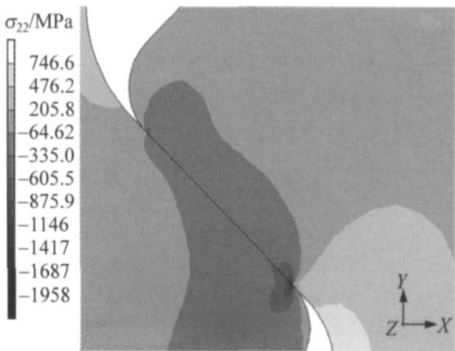


图 7 接触区应力分布
Fig. 7 Stress distribution at the contact zone

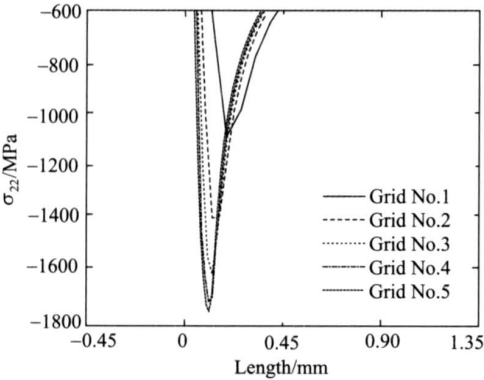


图 8 不同模型接触区应力(σ_{22})分布

Fig. 8 Stress (σ_{22}) distribution on contact surface for different grids

区应力云图,在接触区两侧边缘均具有较高的应力梯度,其中下边缘点的应力梯度较高.图 8 中给出了高应力梯度区附近不同模型接触应力的计算结果.

3 不同接触面形式的榫连结构接触应力分析

针对几种典型接触形式的接触应力分析中发现,不同接触面形式下的接触应力计算结果有较大差异,因此,合理选择接触面形式将有助于改善榫齿/榫槽之间的接触应力.传统的榫齿/榫槽接触面为平面/平面接触,本节将重点针对圆弧面/平面接触以及圆弧面/圆弧面接触展开分析.

3.1 圆弧面/平面榫连结构

对图 5 所示的榫连结构加以改进得到圆弧面/平面接触的榫连结构,见图 9,叶片榫头为圆弧面,轮盘榫齿为平面.计算得到的接触应力云图如图 10 所示,可以看出平面/平面接触时较高的应力集中被近似椭圆形的应力分布形式所取代,峰值应力水平显著降低.

3.2 圆弧面/圆弧面榫连结构

不妨进一步对接触面形式加以改进,即圆弧面/圆弧面的接触形式,如图 11 所示,叶片榫头及轮盘榫齿均为圆弧面.这里考虑了两种情况:一是圆弧面凸面接触;二是圆弧面凸面与凹面接触.接触应力是否会进一步降低,本节将对此展开讨论.

根据几何模型建立有限元模型,圆弧面/圆弧面接触形式下计算得到的接触应力分布情况同圆弧面/平面较为接近.为进行对比分析,图 12 给出

了不同接触形式下接触应力沿接触面的分布,可以看出圆弧面/平面接触形式下高应力梯度不存在了.凸面接触时,接触点处的应力较高;而凸面与凹面接触时,同圆弧面/平面接触相比接触应力进一步降低.显然,合理选择接触面形式有助于改善榫连结构的强度,提高工作可靠性.

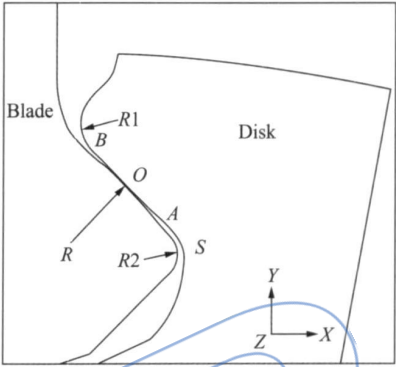


图 9 圆弧面/平面榫连结构几何模型

Fig. 9 Geometrical model for an arc/line contact pairs

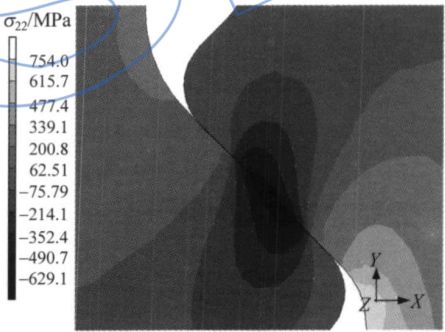


图 10 接触区应力分布

Fig. 10 Stress distribution at the contact zone

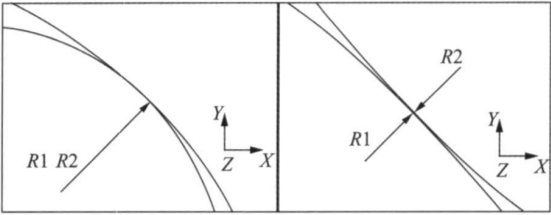


图 11 圆弧面/圆弧面榫连结构几何模型示意图

Fig. 11 Geometrical model for an arc/arc contact pairs

当然,建立不同接触面几何构形的模型应确保满足如下条件:叶片或轮盘的圆弧接触面半径较大,接近平面/平面接触情况,保证模型质量无

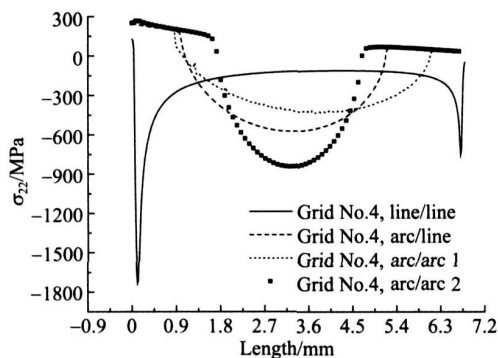


图 12 不同接触面形式下的接触应力 σ_{zz} 对比

Fig. 12 Contact stress σ_{zz} at contact zone with different profiles

显著变化;选择合适的接触点,保证榫齿根部的弯曲应力不变,以此满足不同计算结果的可比性.也就是说,图 12 中所示的几条曲线,虽然形式各异,但曲线积分得到的接触面上的合力以及由此产生的力矩应差别较小.

4 结 论

本文采用有限元法针对几种典型接触形式、单齿燕尾形榫连结构的接触应力展开分析,明确了传统榫连结构接触区边缘存在的高应力梯度,并重点研究了不同接触面形式(平面/平面、圆弧面/平面、圆弧面/圆弧面)对接触应力的影响,得出了一些具有工程意义的结论:

1) 不同接触形式下的接触应力分布迥异,接触分析结果对于榫连结构接触面几何形式的设计具有借鉴意义;

2) 传统榫连结构为平面/平面接触,接触区边缘存在显著的应力梯度,这是产生微动疲劳磨损的重要因素;

3) 改进榫连结构接触面形式,将改善榫齿/榫槽接触区的高应力梯度状况,圆弧形/圆弧形接触形式下将获得更为合适的接触应力分布.

本文的研究结果对于新型榫连结构的设计与工程应用具有实际意义.当然,文中的分析还有待进一步深入,例如三维条件下的接触应力分析,榫连结构几何参数,例如接触区长度、接触面角度、

接触点位置等,对接触应力的影响.另外,针对不同接触面形式的微动疲劳寿命分析也是未来的研究方向.

参考文献:

- [1] 温卫东,高德平. 榫头/榫槽接触问题边界元分析[J]. 航空动力学报, 1992, 7(2): 117-120.
WEN Weidong, GAO Deping. Analysis of tenon and mortise contact problems by boundary element methods[J]. Journal of Aerospace Power, 1992, 7(2): 117-120. (in Chinese)
- [2] 郑旭东, 蔚夺魁, 王兆丰, 等. 某型航空发动机涡轮叶片和轮盘榫齿裂纹故障力学分析[J]. 航空发动机, 2005, 31(3): 35-38.
ZHENG Xudong, YU Duokui, WANG Zhaofeng, et al. Mechanical analysis of crack failures in turbine blade and disk serration of an aeroengine[J]. Aeroengine, 2005, 31(3): 35-38. (in Chinese)
- [3] 古远兴. 高低周复合载荷下燕尾榫结构微动疲劳寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
GU Yuanxing. Research on fretting fatigue life of dovetail joint under HCF-LCF load[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [4] 刘道新, 刘军, 刘元铺. 微动疲劳裂纹萌生位置及形成方式研究[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 42-47.
LIU Daoxin, LIU Jun, LIU Yuanyong. Study on nucleating location and formation of fretting fatigue cracks[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3): 42-47. (in Chinese)
- [5] Sinclair G B, Cormier N G. Contact stresses in dovetail attachments: alleviation via precision crowning[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125: 1033-1041.
- [6] Sinclair G B, Cormier N G, Griffin J H, et al. Contact stresses in dovetail attachments: finite element modeling[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124: 182-189.
- [7] Sinclair G B, Cormier N G. Contact stresses in dovetail attachments: physical modeling[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124: 325-331.
- [8] Gladwell G M L. 经典弹性理论中的接触问题[M]. 范天佑, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 1991.
- [9] Johnson K L. 接触力学[M]. 徐秉业, 罗学富, 译. 北京: 高等教育出版社, 1991.
- [10] 魏大盛. 凡舟青年基金研究报告 粉末冶金涡轮盘/叶接触部位压保载条件下强度及寿命分析[R]. 北京: 北京航空航天大学, 2008.