

# 钛合金表面扩散焊接轴承钢硬化层厚度的优化设计

韩庆礼<sup>1)</sup> 刘国权<sup>1)</sup> 王亮<sup>2)</sup> 王安东<sup>1)</sup> 向嵩<sup>1)</sup>

1) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083 2) 航天材料及工艺研究所, 北京 100076

**摘要** 为了确定钛合金表面扩散焊接轴承钢硬化层的合适厚度, 利用先进的纳米显微力学探针测量了材料的弹性模量. 采用 ANSYS 有限元软件, 对钛合金表面扩散焊接轴承钢硬化层在受压情况下的应力分布以及尺寸稳定性进行了分析, 以此对轴承钢硬化层的厚度进行了模拟. 结果表明, 当轴承钢硬化层厚度在 0.10~0.50 mm 内时, 最大等效应力发生在镍与铜之间, 容易引起界面处裂纹的产生; 合适的轴承钢硬化层厚度范围应为 1.00~2.00 mm, 最佳的厚度为 1.50 mm 左右.

**关键词** 轴承钢; 钛合金; 扩散焊接; 硬化层; 有限元分析

**分类号** TG 404

Ti6Al4V 合金比强度高, 抗氧化, 耐蚀性能好, 在航空、航天和兵工行业得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>. 然而 Ti6Al4V 合金的耐磨损性能差, 因此在实际使用过程中磨损严重, 变形较大, 严重时导致部件尺寸失配而无法正常工作. 在 Ti6Al4V 合金表面扩散焊接上适当厚度的硬质表面层 GCr15 轴承钢, 是提高其表面强度和耐摩擦性的一种行之有效的方法.

扩散焊接硬化层的厚度对钛合金部件在实际应用中有着重要的影响. 不同的硬化层厚度对部件的内应力分布以及尺寸稳定性起着很大的作用. 国内外学者对硬化层厚度的确定一直进行着研究<sup>[2-7]</sup>, 但是以往学者研究的都是针对单层硬化层材料进行考虑, 而钛合金表面扩散焊接轴承钢硬化层在实际工艺中添加了中间层材料镍和铜, 这样钛合金基体、镍、铜中间层以及表面轴承钢硬化层相当于形成了四层涂层, 这无形中加大了分析的难度. 另外材料的物性参数确定一般都是从文献中查阅得出, 这在很大程度上影响了分析的精度和准确度. 本文从实际工况出发, 先测量材料的物性参数, 然后再利用 ANSYS 有限元数值模拟的方法对钛合金表面焊接轴承钢硬化层的不同厚度进行模拟, 最终得到轴承钢硬化层厚度的允许范围以及最佳值.

轴承钢硬化, 在扩散焊接过程中为了防止生成金属间化合物加入了镍和铜两层中间层材料, 其中镍层靠近轴承钢一侧, 铜层靠近钛合金. 其金相照片见图 1, 图中右侧是钛合金, 左侧是轴承钢, 中间两层是镍和铜.

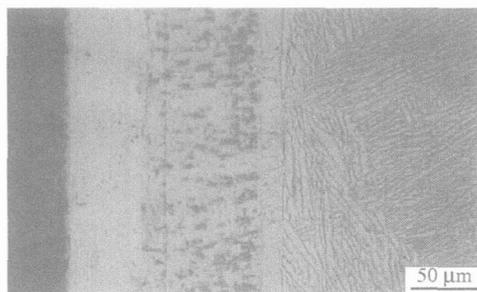


图 1 扩散焊接样品在光学显微镜下的形貌

Fig. 1 Optical microscopic image of a diffusion bonding sample

利用 ANSYS 有限元进行力学分析, 材料的弹性模量是最重要的物性参数. 本文利用先进的 Nano Indenter II 纳米显微力学探针测量材料的弹性模量, 测量过程忽略材料的各向异性, 分别测量样品横截面上各层材料, 得到钛合金基底材料、过渡中间层镍、铜以及轴承钢硬化层的纳米尺度弹性模量, 见表 1. 表中材料的密度和泊松比由文献<sup>[8]</sup>查得.

表 1 材料的物性参数

Table 1 Physical parameters of selected materials

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
钛合金	4 430	148	0.33
铜	8 940	156	0.34
镍	8 890	243	0.31
轴承钢	7 810	259	0.29

## 1 材料的性能及接头形式

本文选择 Ti6Al4V 钛合金表面扩散焊接 GCr15

收稿日期: 2006-02-27 修回日期: 2006-07-07

基金项目: 国防科工委基础研究资助项目 (No. 2005HP008)

作者简介: 韩庆礼(1977-), 男, 博士研究生; 刘国权(1952-), 男, 教授, 博士生导师

## 2 有限元模型及可信度评估

### 2.1 有限元模型

图 2 为求解问题的有限元模型。模型采用四节点 PLANE182 实体单元；由于涉及到接触问题，接触单元选择 TARGE169 和 CONTA172。在接触部位网格划分的较密，保证了模型的准确性。该模型下部方形对应于钛合金轴承钢一体化材料，上部圆形对应于轴承钢滚珠。滚珠的半径为 5 mm；模型中钛合金的厚度为 5 mm，长度为 20 mm；硬化层厚度为变量，钛合金和轴承钢之间中间层镍和铜的厚度各为 80 μm。模型上面加一线载荷力 9.8 kN。

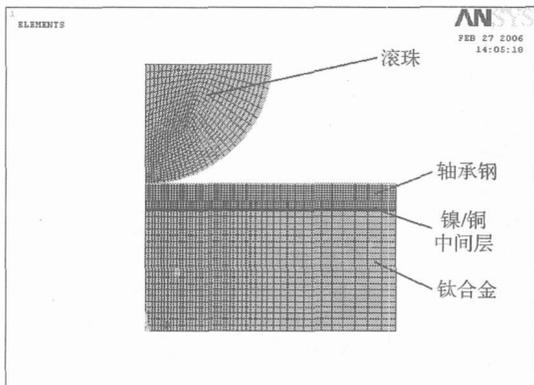


图 2 划分网格

Fig.2 Mesh division

### 2.2 有限元模型可信度评估

用钢球压在无硬化层的钛合金板材上或者轴承钢板材上作为上述有限元模型的评定系统，将有限元分析结果和采用赫兹解析方法得到的结果进行比较。对于无涂层体系的解析解的结果表明<sup>[2]</sup>，界面下最大剪切应力  $\tau_{max}$  的数值应为  $0.3 P_{max}$ ， $P_{max}$  为最大应力。即  $\tau_{max}/P_{max}$  的解析解值为 0.3。表 2 对这两种方法的结果进行了对比。由表 2 可以看出，采用本模型得出数值计算结果精度可控制在 5% 以内，按照工程计算要求，符合计算结果的精确度。

表 2 无涂层情况的解析解和有限元解的结果对比

Table 2 Comparison of finite element analysis results with Hertz's solutions

结果对比	解析解	有限元解
钢球压在钛合金上	0.3	0.3009
钢球压在轴承钢上	0.3	0.2993

## 3 模拟结果及讨论

### 3.1 应力分析及讨论

不同的硬化层厚度对部件的内应力分布以及尺寸稳定性有很大的影响。实际模拟过程中硬化层的厚度分别取 0.10, 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 3.00, 4.00 mm。图 3 是硬化层厚度为 1.00 mm 时，部件的等效应力分布图和剪切应力分布图。

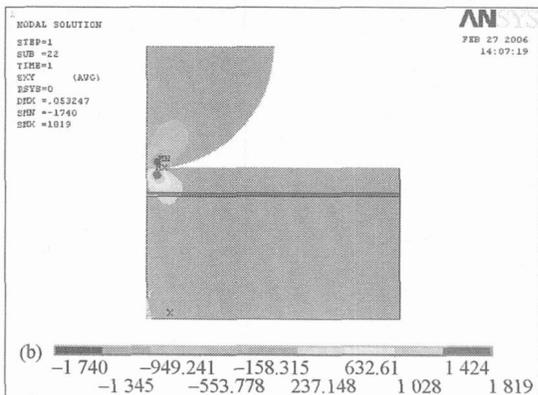
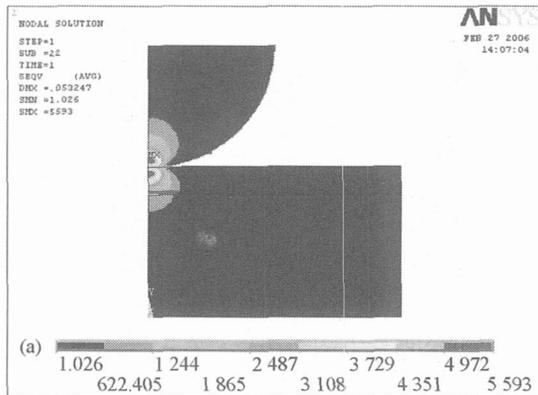


图 3 硬化层厚度为 1.00 mm 时的等效应力(a)及剪切应力图(b)。

Fig.3 Images of simulated equivalent stress (a) and shear stress (b) when the hardened layer thickness is 1.00 mm

以同等条件模拟了不同硬化层厚度的等效应力分布和剪切应力分布。模拟结果可以看出：当轴承钢硬化层厚度小于 0.10 mm 时，最大的等效应力和剪切应力都在钛合金基体内，此时的轴承钢对部件整体受力作用不大；随着轴承钢硬化层厚度的增加，当厚度为 0.10~0.50 mm，最大的等效应力和剪切应力开始转移到镍和铜层之间，此时由于铜和镍的强度比较底，所以最容易萌生裂纹并长大，因此这个

厚度范围最不利于部件的正常运转；当硬化层厚度在 1.00 mm 或以上时，其最大等效应力和剪切应力分布在表面轴承钢内部，此时轴承钢完全发挥出其强度高的优势，因此如果仅仅从受力上考虑，这个范围的厚度应该比较好的。

不同的硬化层厚度，对应的受力大小也不一样。图 4 是模型中不同位置的等效应力分布图，其中等效应力最大的位置是在模型的中心线上。图 4 中的

A、B、C、D 点的位置都位于模型中心线上。A 点位于滚珠下方和轴承钢硬化层表面接触的位置；B 点位于轴承钢和镍层交界的位置；C 点位于镍和铜层交界的位置；D 点位于铜和钛合金交界的位置。

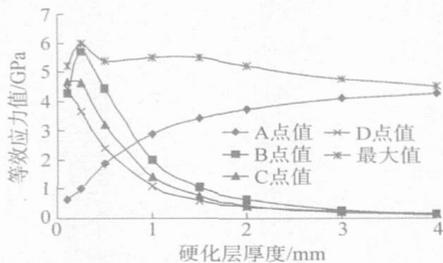


图 4 硬化层不同厚度时各位置的等效应力分布

Fig.4 Curves of equivalent stress at different positions with hardened layer thickness

由图 4 分析可以看出：C 点和 D 点的等效应力都是逐步减少的。B 点的等效应力以及最大等效应力变化都是由小变大然后再变小，在 0.25 mm 左右时候达到最大值，然后值逐渐减少趋于一稳定值。硬化层厚度在 0.10~0.50 mm 范围时，最大等效应力分布在铜镍中间层之间，由于铜镍的强度相对于轴承钢来说要小，如果硬化层厚度在这个范围，那么整个部件的最大等效应力就分布在了钛合金扩散焊接部件的最薄弱的环节，所以说这个厚度范围是应当避免的。当硬化层厚度增加到 0.50 mm 以上时，B、C、D 点的等效应力都是逐步减小的，所以从这个角度考虑，整个轴承钢硬化层厚度应该大于 0.50 mm。A 点是轴承钢表面的受力分布，可以看出表面的受力是随着硬化层厚度的增加而逐步增加。如果轴承钢表面受力过大，在实际磨损过程中部件容易发生点蚀现象，所以轴承钢的厚度不能太厚，综合起来考虑 1.00~2.00 mm 为最佳值。

图 5 是轴承钢硬化层不同厚度下的最大剪切应力分布。由图可以看出最大剪切应力的分布与最大等效应力的分布较类似，当硬化层厚度很薄时剪切应力较小，然后随着厚度的增加其值也逐步变大，当硬化层厚度为 0.25 mm 时候达到最大，然后随着硬化层厚度的增加最大剪切应力逐步降低。为了避免大的剪切应力，轴承钢的厚度应该大于 0.50 mm。部件受到的剪切应力越小，在实际应用中纳米镍硬化层越不易脱落；但是并不是说硬化层厚度越厚越好，当硬化层厚度太厚时，整个部件的质量大幅度增加，就失去了钛合金比强度高优点。

### 3.2 尺寸稳定性分析

不同厚度的硬化层不仅仅对部件的应力有很大

的影响，对整个部件的尺寸稳定性也有很大的作用。图 6 是轴承钢硬化层在不同厚度下，模型滚珠上平面向下的位移情况。

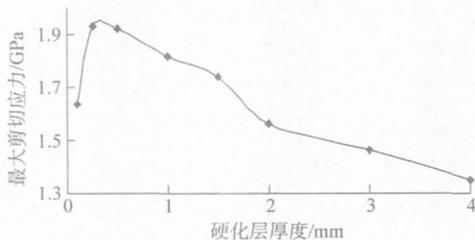


图 5 硬化层不同厚度下的最大剪切应力分布

Fig.5 Curve of maximal shear stress at different positions with hardened layer thickness

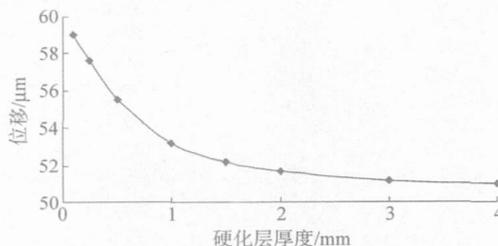


图 6 硬化层不同厚度下模型的位移变化

Fig.6 Curve of simulated displacement with hardened layer thickness

由图 6 可以看出：随着硬化层厚度的不断增加，模型滚珠上平面向下的位移逐步减少；当硬化层厚度增加到 2.00 mm 时，模型的位移量变化很小。如果从部件的尺寸稳定性来考虑，硬化层的厚度是越厚越好。但是由上面分析可以看出，硬化层越厚部件的质量越大，表面的应力也越大，另外当硬化层厚度超过 2.00 mm 时，部件的尺寸变化量不是太大。所以综合起来考虑，硬化层的厚度以不超过 2.00 mm 为宜。

## 4 结论

(1) 采用 ANSYS 有限元软件，对钛合金表面扩散焊接轴承钢硬化层在受压情况下的应力分布进行了分析，以此对轴承钢硬化层的厚度进行了模拟。

(2) 当轴承钢硬化层厚度在 0.10~0.50 mm 之间时，最大等效应力发生在镍和铜之间，容易引起界面处的裂纹产生。

(3) 轴承钢硬化层厚度的增加有利于部件整体的尺寸稳定性，但会相应增加部件的质量。

(4) 从应力分布情况看，合适的轴承钢硬化层厚度范围为 1.00~2.00 mm，最佳的厚度为 1.50 mm 左右。

## 参 考 文 献

- [1] 刘茨, 曲周德, 王本贤. 钛合金 TC4 的研究开发与应用. *兵器材料科学与工程*, 2005, 28(5): 47
- [2] 鄢建辉, 汪久根, 綦振慧. 单层涂层最佳厚度的有限元分析. *机械设计*, 2004, 21(1): 7
- [3] 鄢建辉, 汪久根. 双层涂层体系最大剪应力分析. *浙江大学学报:工学版*, 2004, 38(5): 621
- [4] Kua C H, Keer L M. Contact stress analysis of a layered transversely isotropic half-space. *J Tribol*, 1992, 114:253
- [5] Njiwa R K, Consiglio R, Stebut J V. Boundary element modeling of a coating-substrate composite under an elastic, Hertzian type pressure field: cylinder on flat contact geometry. *Surf Coat Technol*, 1998, 102:138
- [6] Stephens L S, Liu Y, Meletis E I. Finite element analysis of the initial yielding behavior of a hard coating/substrate system with functionally graded interface under indentation and friction. *J Tribol*, 2000, 122:381
- [7] Komvopoulos K. Finite element analysis of a layered elastic solid in normal contact with a rigid surface. *J Tribol*, 1988, 110:477
- [8] 滕志斌. 新编常用材料手册. 北京: 金盾出版社, 1994: 18

## Optimization and design of thickness of bearing steel layer diffusion bonding on titanium alloy surface

HAN Qingli<sup>1)</sup>, LIU Guoquan<sup>1)</sup>, WANG Liang<sup>2)</sup>, WANG Andong<sup>1)</sup>, XIANG Song<sup>1)</sup>

1) Materials Science and Engineering school, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076, China

**ABSTRACT** In order to confirm the appropriate thickness of bearing steel layer diffusion bonding on titanium alloy surface, the elastic modulus of materials was measured by Nano Indenter II. Stress distribution and integrated distortion of the titanium alloy which bonded bearing steel layer were analyzed by finite element simulation under press stress, and the thickness of bearing steel layer was optimized and designed. The results show that when the thickness of hardened layer is 0.10—0.50 mm, the maximal equivalent stress is located the interface of titanium alloy and bearing steel layer, which can easily induce interface cracks; the appropriate thickness of bearing steel layer is 1.00—2.00 mm, and the optimal thickness is about 1.50 mm.

**KEY WORDS** bearing steel; titanium alloy; diffusion bonding; hardened layer; finite element analysis