

金刚石与硬质合金钎焊接头应力场分析

徐 超, 孙凤莲, 秦优琼, 孟工戈
(哈尔滨理工大学, 哈尔滨 150080)

摘 要: 采用 ANSYS 有限元数值模拟软件, 运用瞬态非线性分析的方法, 模拟出以 Ag-Cu-Ti 为钎料的金刚石与硬质合金钎焊接头的焊后应力场, 并预报出钎缝厚度对钎焊接头应力大小和分布的影响, 从而分别得出焊后金刚石层、钎料层与硬质合金区域的应力场分布, 通过对应力场彩云图以及数据组的综合分析, 找到焊后应力集中的危险区域; 在数控真空钎焊炉中进行钎焊试验, 由于施加压力的不同, 得出钎缝厚度不同的焊接试件。而后进行抗剪强度试验, 得出了钎料层厚度并不是越厚越好, 而是存在一个最佳值的规律, 计算所得规律与试验结果基本吻合。

关键词: ANSYS; 有限元; 焊接应力

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)02-47-04



徐 超

0 序 言

由于金刚石具有最高的硬度和耐磨性, 最好的导热性, 金刚石刀具可实现最高的加工精度, 长期以来一直倍受人们关注。然而由于金刚石特殊的晶体结构以及和其它金属材料之间的物理、化学、力学性能的差异较大, 在其加工工艺领域还存在许多亟待解决的问题^[1, 2] 其中金刚石与其它金属的连接问题, 一直是阻碍其推广应用的关键所在。

该工作主要针对 CVD 金刚石厚膜与基体的连接进行了研究。采用特殊的钎料和焊接工艺方法, 使 CVD 金刚石膜与基体形成冶金连接, 利用有限元数值模拟技术, 分析热应力的分布和影响因素, 预报出钎缝厚度对焊接接头应力大小和分布的影响, 是改善接头强度、降低裂纹产生机率的最有效的方法。特别是对于金刚石这种价格昂贵, 加工工艺又非常困难的特殊材料, 采用数值模拟技术更会得到事半功倍的结果^[3, 4]。

1 钎焊应力的数值分析

钎焊时在钎缝及其周围区域存在很高的应力、应变梯度。考虑到节省计算机资源, 缩短运算时间以及模拟的必要性, 文中在模拟金刚石钎焊接头三维应力场的时候, 运用对称加载的方法, 只模拟了焊件的四分之一来研究整个金刚石钎焊接头的应力场

分布。

1.1 分析条件与方法

1.1.1 网格划分

与 ANSYS 软件配合使用的前后处理器分别为 Prep7 和 Post1。三维、二维有限元模型如图 1 所示。图形的上部为金刚石层, 下部为硬质合金层, 中间是钎料层。为了保证计算精度, 在建立有限元模型时, 钎缝附近的单元必须划分得非常细密, 越靠近钎缝, 网格越细, 共分六级最小单元尺寸为 $9\ \mu\text{m}$ 。单元类型采用了 8 节点三维固体类型单元 Solid45, 整个有限元模型共 13 644 单元, 20 763 节点。

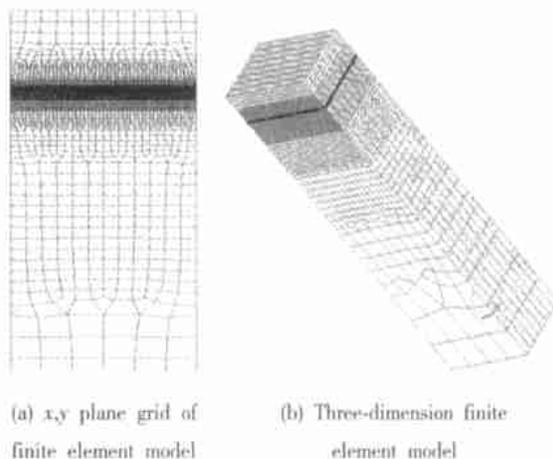


图 1 金刚石钎焊试件的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of diamond joint

1.1.2 采用的基本准则和材料的力学参数

金刚石和硬质合金在文中钎焊条件(加热温度为 1 120 K)下不会产生塑性变形。因此, 在计算中

只考虑弹性变形。Ag—Cu—Ti 钎料合金要经历凝固、塑性和弹性几个阶段，产生应力的区域是弹、塑性区，因此，计算中分别考虑了弹—塑性状态。由于冷却过程中，作为应力释放层的钎料层的厚度较薄，变形量较大，因此，在进行塑性变形计算中应考虑钎料层的应力钢化作用对接头应力的影响。

塑性应变速率采用经典的 Von mises 屈服准则和 Prandtl-reuss 流动准则： $d\epsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{d\epsilon_{eq}^p}{\sigma_e} S_{ij}$ ； σ_e 表示 Miss 等效应力， $\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}}$ ； $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk}$ 表示偏应力张量； $d\epsilon_{eq}^p = \sqrt{\frac{3}{2} d\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p}$ 表示等效塑性应变增量。

强化准则：各向同性等向强化。

钎焊所用钎料以及钎焊基体材料的热、力学性能参数随温度变化如图 2 所示^[4-5]，由于金刚石和硬质合金在这种温度下不会发生塑性变形，所以图 2c 只给出 Ag—Cu—Ti 屈服强度随温度变化的曲线。

1.1.3 非线性解法的策略与边界条件

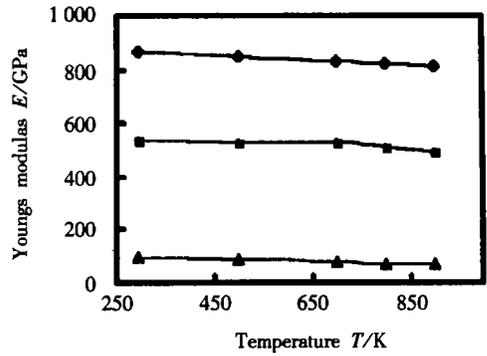
ANSYS 提供了四种非线性迭代方法：完全 Newton—raphson 法、改进 Newton—raphson 法、应变修正 Newton—raphson 法和正割法。该文的计算采用了完全 Newton—raphson 法。ANSYS 程序提供了多种塑性材料选项，主要有四种：经典双线性随动强化 (BKIN)、双线性等向强化 (BISO)、多线性随动强化 (MKIN)、多线性等向强化 (MISO)，前两项遵守 Von mises 屈服准则，该文选用双线性等向强化即 BISO。使用的求解器为 SPRASE MATRIX DIRECT SOLVER，并采用应力钢化准则和变形准则。

由于在焊接过程中焊接应力只是在钎料凝固后的冷却过程中产生，而 Ag—Cu—Ti 钎料合金的熔点为 1 120 K，因此，模拟的温度范围选择在 900 ~ 293 K。当温度在 900 ~ 500 K 时，冷却速度为 20 K/min，当温度在 500 ~ 400 K 时，冷却速度为 10 K/min，之后随炉冷却。由于金刚石试件的结构尺寸较小，冷却速度较慢，在冷却过程中假设接头各部分的温度是均匀的，这种假设基本与实际情况相符合。

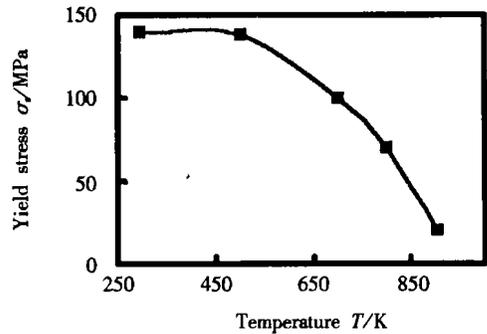
1.2 计算结果分析及讨论

1.2.1 钎料层厚度与残余应力分布的数值模拟

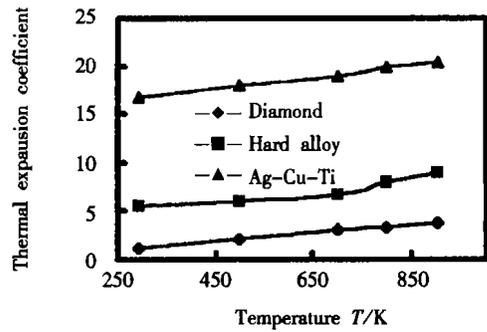
图 3 为在不同的钎料层厚度时接头附近的残余应力在 x(平行于界面)方向的分布。从图中可以明显的看到，中心区域的平均残余应力比边缘区大；金刚石层呈现压应力，而钎料与硬质合金呈现拉应力。当钎料层厚度较薄时，金刚石层中的最大压应



(a) Variation of Youngs modulus with temperature



(b) Variation of yield stress with temperature



(c) Variation of thermal expansion coefficient with temperature

图 2 有限元计算中所采用的材料参数

Fig. 2 Materials parameters used in FEM calculation

力在接头的中心区，此时中心区是最危险的区域。随着钎料层厚度的增加，金刚石层中的最大压应力在逐渐的向接头的边缘移动，此时靠近边缘区是最危险的区域。另外，从图中还可以看到：当钎料层较薄时，应力分布区域较大。值得注意的是，无论钎料层的厚与薄，在金刚石层，接头的周边处总是受到较大的拉应力，此区也是较危险的区域，是导致接头沿金刚石层与钎料分离的主要应力之一。（如图 3e 所示）

1.2.2 结果分析

钎料层可以释放部分应力，同时由于其热膨胀系数高，又会产生应力，关键是由相匹配的各部分的

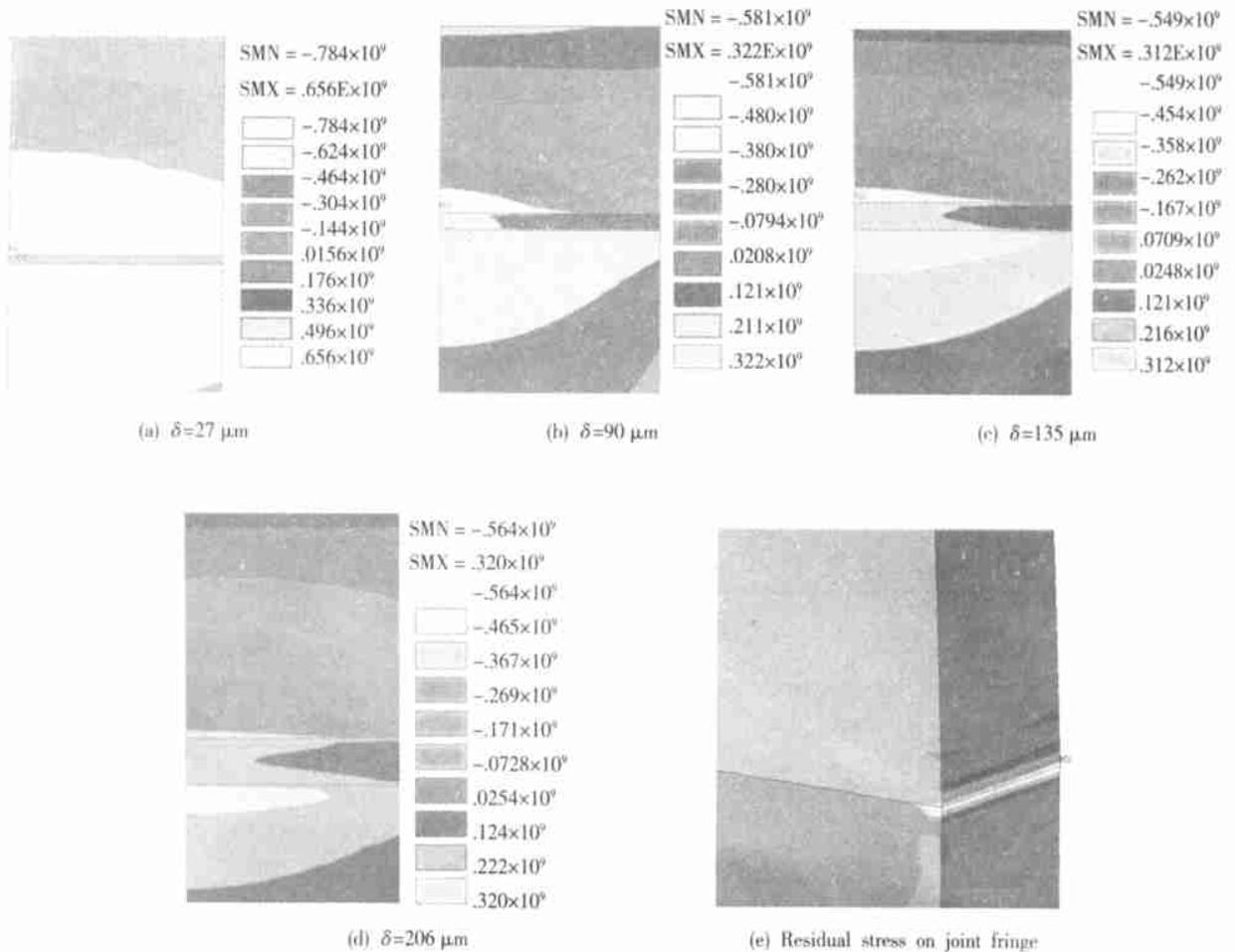


图 3 钎料层厚度对 x 方向残余应力(单位: Pa) 分布的影响

Fig. 3 Effects of filler metal s thickness on x direction residual stress distribution

材料特性、物理参数决定。该试验中被连接的材料金刚石和硬质合金的热膨胀系数均比 Ag—Cu—Ti 钎料合金的热膨胀系数低得多,弹性模量又比其高得多,各物理参数相差悬殊^[5~7],冷却过程中钎料合金的收缩也最大。钎料层过厚时应力增加,是由于钎料层总体积的增加导致冷却时总收缩力的加大,太薄时钎料层的变形梯度大,导致钎料的加工硬化增加,进一步变形困难,从而使钎焊热应力增加,钎料层厚度的最佳值是由双方材料的性能决定的,钎料层厚度对 x 方向残余应力最大值的影响见图 4。

2 钎焊接头应力的试验研究

2.1 试验材料与方法

(1) 金刚石厚膜: 国产化学气相沉积金刚石膜,厚度在 0.5 ~ 1.4 mm,尺寸为 5 mm × 5 mm × 1.4 mm。

(2) 钎料成分: 含 Ti 为 6% 的 Ag—Cu 共晶钎料,钎焊时以箔的形式加在钎缝中。

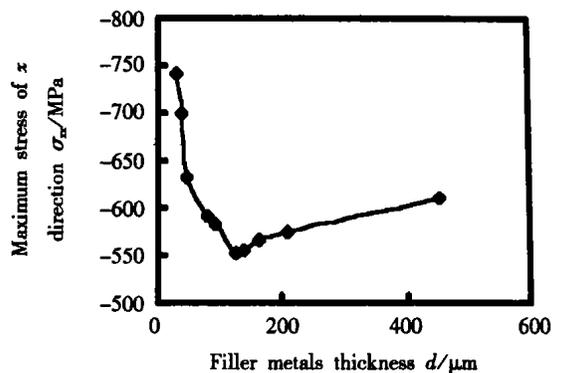


图 4 料层厚度对 x 方向残余应力最大值的影响

Fig. 4 Effects of filler metal s thickness on x direction stress magnitude

(3) 基体材料: W—Co 类硬质合金 YG8, 其成分由 WC—8%Co 组成。

(4) 试验设备: ①由美国引进的辐射加热真空焊机; ②Instron—1186 电子万能试验机。

(5) 试验方法: 焊前用丙酮清理焊件和钎料的表面,试件组装和定位后,施加一定的压力,在真空炉中进行钎焊。

2.2 试验结果与分析

室温下在 Instron-1186 电子万能试验机上进行抗剪试验。试件的应变速度为 0.2 mm/min。记录显示器上输出的拉断时最大载荷。试验得出, 钎缝厚度与其抗剪强度关系如图 5 所示, 由图 5 可知当钎缝的厚度太薄时, 焊件所能承受的最大载荷比较小, 而当钎缝厚度太厚时, 焊件所能承受的最大载荷也比较小。只有当钎缝厚度达到一个最佳值时, 能承受的最大载荷达到最大值。太薄时钎料层的变形梯度大, 导致钎料的加工硬化, 使焊后热应力增加。试验结果与有限元分析得出规律基本上吻合, 而最佳值范围有所不同, 可能是由于试验误差所引起。

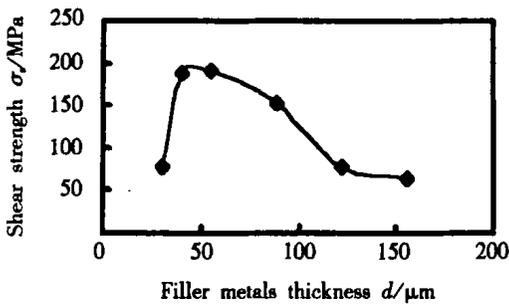


图 5 钎料层厚度与接头抗剪强度的试验关系

Fig. 5 Results of shear strength to interlayer thickness

3 结 论

(1) 焊后钎接头中金刚石层始终受压应力, 硬质合金层始终受拉应力。

(2) 钎料层的厚度影响 x 方向的残余应力的分布。钎料层较薄时, 金刚石的中心区受到较大的压应力。钎料层较厚时, 金刚石的边缘区受到较大的压应力; 而金刚石的外表面总是受到拉应力作用。有限元分析所得出的规律与试验结果基本吻合。

(3) 钎缝的边缘区域始终受到较大的应力作用, 是焊后出现裂纹的主要部位。

参考文献:

- [1] 孙凤莲, 冯吉才, 刘会杰, 等. Ag-Cu-Ti 钎料中 Ti 元素在金刚石界面的特征[J]. 中国有色金属学报, 2001, 5(2): 103~106.
- [2] Fenglian Sun, Jicai Feng, Dan Li. Bonding of CVD diamond thick films using an Ag-Cu-Ti brazing alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 115(4): 333~337.
- [3] Nejana Raevska. Reduction of the stresses introduced during the diffusion bonding of dissimilar materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 77(2): 50~53.
- [4] 张启运, 庄鸿寿. 焊接手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [5] Alvin Levy. Thermal residual stresses in ceramic-to-metal brazed joints[J]. Journal of American Ceramic Soc, 1991, 74(9): 2141~2147.
- [6] Seung I Cha, Soon H Hong. Analysis and modeling of residual stress in diamond thin film. www.mrs.org/publications/jmr/jmra/2001/jul/013.html.
- [7] 任耀文. 真空钎焊工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

作者简介: 徐超, 男, 1978 年出生, 哈尔滨理工大学材料加工专业硕士研究生。

Email: i1027924@sina.com

[上接第 46 页]

参考文献:

- [1] Fishman M R, Rabkin E, Levin P. Laser produced functionally graded tungsten carbide coatings on M2 high-speed tool steel[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A302(1): 106~114.
- [2] Levocici D T. Laser processing of MMC layers on a metal base[J]. Materials and Manufacturing Processes, 1999, 14(4): 475~487.
- [3] 陈彦宾, 任振安. 激光熔覆 Cu/WCP 复合涂层[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 19~22.

2002, 23(1): 19~22.

- [4] 吴萍, 周昌焱, 唐西南. 激光合金化熔覆制备耐磨陶瓷梯度涂层[J]. 金属学报, 1994, 30(11): 508~512.
- [5] Chong P H, Man H C, Yue T M. Microstructure and wear properties of laser surface-cladded Mo-WC MMC on AA6061 aluminum alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 145(1): 51~59.

作者简介: 吴萍, 女, 1968 年 1 月出生, 工学博士, 副教授。研究方向为材料表面改性技术, 发表论文 30 余篇。

Email: pingwu@eyou.com