

[文章编号] 1004- 0609(2001)05- 0750- 04

Al-Al₂O₃ 结构件钎缝处的剪切应力分布与热膨胀匹配^①

马 鑫^{1, 2}, 冯吉才¹, 董占贵¹, 梁旭文³

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 信息产业部电子五所, 广州 510610; 3. 中国科学院 上海冶金研究所, 上海 200050)

[摘 要] 采用有限元数值模拟方法研究了冷却过程在 Al-Al₂O₃ 异种材料结构件钎缝处导致的剪切应力分布。计算结果表明: 最大剪切应力位于钎缝圆角处和靠近钎缝圆角的 Al₂O₃ 陶瓷/Cu 镀层金属界面处, 同时中间层合金的热膨胀系数与 Al 的热膨胀系数相匹配时, 可以最大限度减小剪切应力。

[关键词] 有限元; 数值模拟; Al-Al₂O₃ 钎焊; 剪切应力

[中图分类号] TG 457. 14; TG 404

[文献标识码] A

金属-陶瓷连接结构为异种材料连接, 二者的力学性能和热膨胀系数相差很大, 在外加力学和/或温度载荷条件下, 结构件常常呈现出连接界面裂纹扩展的失效模式。界面韧性断裂力学的发展已经对此作出了越来越深入的理论解释^[1~ 5]。但是另一方面, 连接过程的温度变化在金属-陶瓷结构件界面处导致的力学响应却很少有研究。

钎焊方法是金属-陶瓷结构件的一种常见连接方法。由于两种材料的热膨胀系数不匹配, 焊后冷却过程将导致钎缝界面处形成较大的应力-应变场, 并可能出现焊接热裂纹。同时有研究表明, 选择具有合适性能参数的中间层合金将有助于改善异种材料连接的界面应力问题^[6~ 9]。为此本文作者采用有限元方法(FEM, Finite Element Method)研究了焊后冷却过程导致的 Al-Al₂O₃ 结构件钎缝处的力学响应特征。同时通过分析中间层合金热膨胀系数变化对钎焊圆角处最大剪切应力的影响, 给出了优化

的材料热膨胀匹配方案。

1 有限元模型

图 1 所示为 Al-Al₂O₃ 钎焊件结构示意图。Al₂O₃ 陶瓷表面镀有一层 0.2 mm 厚的 Cu 以改善可焊性。中间层合金为 Sn 基低熔点合金, 厚度为 0.1 mm。该结构为轴对称结构, 其 1/2 部分相对应的二维 FEM 网格模型示于图 2, 图 3 所示为钎缝圆角(在图 1 中被忽略)的局部放大图。模型采用 8 节点等参单元, 共 1 776 个单元, 5 463 个节点。

有限元数值模拟软件为商用非线性有限元程序包 ANSYS 5.6, 所有材料均假设为线弹性, 计算中采用的材料性能参数列于表 1。冷却过程是唯一的外加温度载荷, 考虑到所采用的 Sn 基中间层合金的熔点仅为 180~ 190 ℃, 计算中采用的冷却温度范围为 180~ 20 ℃。

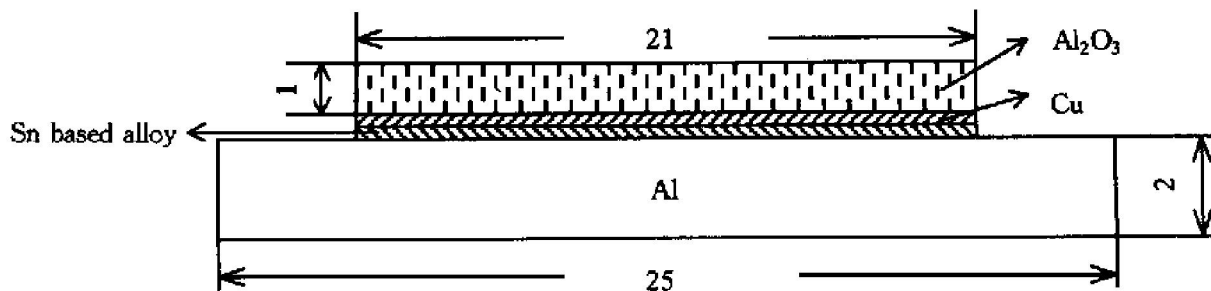


图 1 Al-Al₂O₃ 钎焊件结构示意图

Fig. 1 Schematic of Al-Al₂O₃ soldering assembly(unit: mm)

① [基金项目] 精密热加工国防科技重点实验室基金资助项目
[作者简介] 马 鑫(1973-), 男, 工程师, 博士。

[收稿日期] 2000- 12- 21; [修订日期] 2001- 02- 09

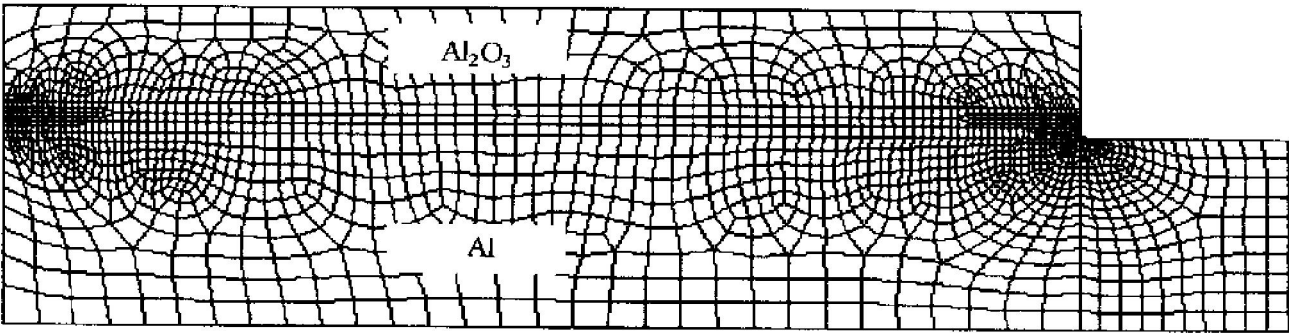


图 2 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 钎焊件结构二维有限元网格

Fig. 2 Two-dimensional finite element model of $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ soldering assembly

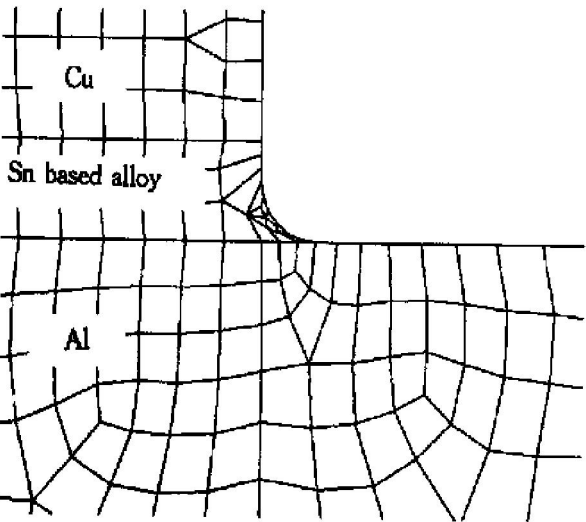


图 3 钎缝圆角局部放大

Fig. 3 Local enlargement of soldering fillet

表 1 有限元计算中所采用的材料参数

Table 1 Material parameters used in FEM calculation

Material	E/Pa	ν	$\alpha/(10^{-6}\text{K}^{-1})$
Al	70	0.33	25.1
Sn based alloy	43	0.36	25.4
Cu	117	0.34	16.7
Al_2O_3	300	0.23	6.7

2 界面力学响应的基本特征

对于此类钎焊结构件，由于钎缝长度远大于钎缝高度，我们最关心的力学响应参数是剪切应力-应变场^[10]。同时由于应力集中出现于几何奇异位置，我们最关心的结构部位就是钎缝圆角附近。图 4 所示为钎缝圆角附近剪切应力等值分布图，图 5 所示为进一步的局部放大图。可见最大剪切应力位于钎缝圆角处和靠近钎缝圆角的 Al_2O_3 陶瓷/ Cu 镀层金属界面处。这一计算结果与试验结果相吻合，

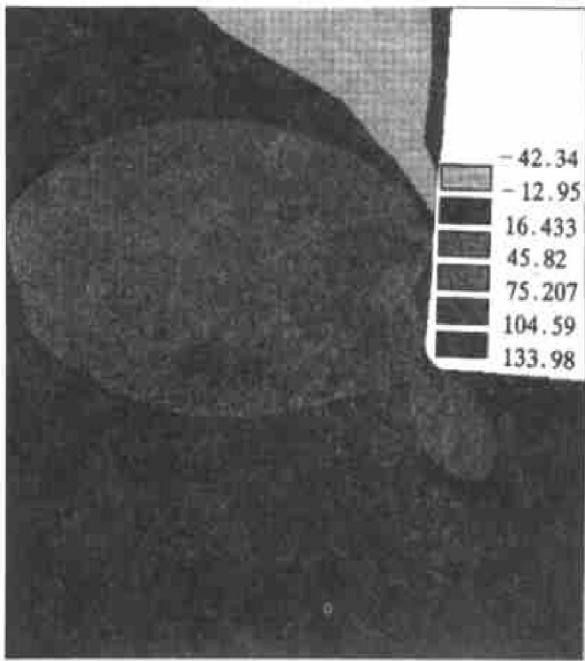


图 4 钎缝圆角附近剪切应力等值分布图(MPa)

Fig. 4 Shear stress contours near soldering fillet

即焊后裂纹主要出现于上述两个部位。

3 中间层合金热膨胀系数的影响

冷却过程之所以能够在钎焊件中引发应力-应变，是由于结构中 4 种材料的热膨胀系数不匹配。这一方面是 Al_2O_3 陶瓷与 Al 两个被连接对象之间的整体热膨胀失配，另一方面是各层材料之间的局部热膨胀失配。现假设 Al_2O_3 、 Al 和 Cu 3 种材料的热膨胀系数不可改变，在此条件下分析了中间层合金热膨胀系数变化对钎缝圆角处最大剪切应力的影响，进而给出了优化的中间层合金热膨胀匹配方案。

中间层合金热膨胀系数变化对钎缝圆角处最大剪切应力的影响示于图 6。计算中假设的中间层合金热膨胀系数，最大值大于 Al 的相应值，最小值小

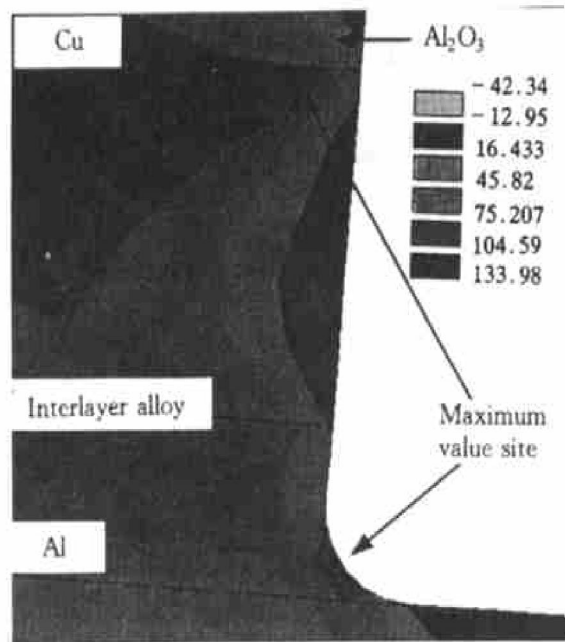


图 5 钎缝圆角附近剪切应力等值分布图(图 4 的进一步放大)

Fig. 5 Shear stress contours near solder fillet (further enlargement of Fig. 4)

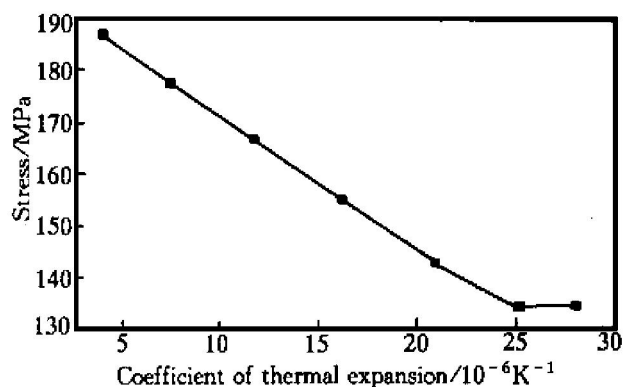


图 6 中间层合金热膨胀系数对钎焊件内部最大剪切应力的影响

Fig. 6 Effect of thermal expansion coefficient of interlayer alloy on maximum shear stress in soldering assembly

于 Al_2O_3 的相应值。计算结果表明,当中间层合金的热膨胀系数与 Al 的热膨胀系数相匹配时,钎缝圆角处的剪切应力最小。也就是说,对于研究所涉及的多层异种材料钎焊结构,中间层合金的热膨胀系数应该与结构中热膨胀系数最大的 Al 相匹配。这样才能最大限度地减小冷却过程在钎缝圆角处导致的剪切应力。

4 结论

由于异种材料之间热膨胀系数不匹配,冷却过程将在 $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 钎焊件内部导致热应力。有限元计算结果表明最大剪切应力位于钎缝圆角处和靠近钎缝圆角的 Al_2O_3 陶瓷/Cu 镀层金属界面处。同时为最大限度减小冷却过程在钎焊件内部导致的剪切应力,中间层合金的热膨胀系数应该与 Al 的热膨胀系数相匹配。

[REFERENCES]

- [1] Qian Z, Akisanya A R. An experimental investigation of failure initiation in bonded joints [J]. *Acta Mater*, 1998, 46(14): 4895– 4904.
- [2] Reimanis I E, Dalglish B J, Evans A G. The fracture resistance of a model metal/ ceramic interface [J]. *Acta Metall Mater*, 1991, 39: 3133– 3141.
- [3] Tvergaard V, Hutchinson J W. On the toughness of ductile adhesive joints [J]. *J Mech Phys Solids*, 1996, 44 (5): 789– 800.
- [4] Chai H, Chiang M Y M. A crack propagation criterion based on local shear strain in adhesive bonds subjected to shear [J]. *J Mech Phys Solids*, 1996, 44(10): 1669– 1689.
- [5] Ma X, Qian Y Y, Yoshida F. Relative damage stress and its application in the case of temperature cycling load [J]. *Progress in Natural Science*, 2001, 11(2): 156– 160.
- [6] Varis A G, Suo Z, Shih C F. Ductile failure of a constrained metal foil [J]. *J Mech Phys Solids*, 1991, 39: 963– 986.
- [7] Burstow M C, Howard I C, Ainsworth R A. The influence of constraint on crack tip stress fields in strength mismatched welded joints [J]. *J Mech Phys Solids*, 1998, 46(5): 845– 872.
- [8] Mortensen A, Suresh S. Functional graded metals and metal-ceramic composites: part I processing [J]. *International Materials Reviews*, 1995, 40: 239– 265.
- [9] Munz D, Yang Y Y. Stress singularity at the interface in bonded dissimilar materials under mechanical and thermal loading [J]. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1992, 59: 857– 861.
- [10] Yang Y Y, Munz D, Schaller W. Effect of stress jump at the interface of a joint on failure behavior [J]. *International Journal of Fracture*, 1997, 87: 113– 118.

Shear stress distribution in fillet of $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ soldering assembly and thermal expansion matching

MA Xin^{1, 2}, FENG Jī-cai¹, DONG Zhan-gui¹, LIANG Xu-wen³

- (1. State Key Laboratory of Welding, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China;
2. Electronics 5th Research Institute of Ministry of Information, Guangzhou 510610, P. R. China;
3. Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, P. R. China)

[Abstract] By means of finite element numerical simulation, the shear stress distribution in the fillet of $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ soldering assembly was analyzed. The calculating results show that the maximum level of shear stress occurs at the soldering fillet and the interface near the soldering fillet between Al_2O_3 ceramics and coated Cu. Meanwhile, in order to limit the shear stress as small as possible, the thermal expansion coefficient of interlayer alloy should match with the Al base metal.

[Key words] finite element; numerical simulation; $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ soldering; shear stress

(编辑 黄劲松)