

响应曲面法优化陶瓷—金属钎焊平面度的分析

王光辉¹, 刘旭¹, 张玉¹, 田皓¹, 宋晓国²

(1. 中国电科产业基础研究院, 石家庄, 050051; 2. 哈尔滨工业大学 (威海), 山东省特种焊接技术重点实验室, 威海, 264200)

摘要: 陶瓷—金属封装作为电子真空器件中的关键工艺在集成电路封装, 医疗设备、国防等得到了广泛应用, 两者连接后的平面度决定了芯片的可靠性, 预测并控制封装后陶瓷平面度变化对半导体行业的发展具有重大意义. 基于一种高温共烧陶瓷—金属结构, 采用响应曲面法对陶瓷金属钎焊的试验进行设计, 以同时研究多个试验变量对陶瓷金属钎焊平面度的影响. 将钎焊前后陶瓷平面度变化作为响应值, 采用中心组合设计 (central composite design, CCD) 建立了二次多项式回归方程的预测模型, 研究了陶瓷尺寸、金属尺寸对平面度变化的影响. 结果表明, 增大陶瓷高度或者减小陶瓷边长、墙体厚度均使平面度变化减小; 同时发现陶瓷尺寸对平面度影响较为显著, 而墙体厚度对平面度影响作用较小, 该结果为陶瓷钎焊平面度的预测及控制提供了参考.

创新点: (1) 研究了陶瓷尺寸金属尺寸对陶瓷—金属钎焊后平面度变化的影响规律.

(2) 采用响应曲面法建立了陶瓷—金属钎焊平面度与各试验参数的数学模型.

关键词: 陶瓷—金属封装; 平面度; 响应曲面法

中图分类号: TG 454 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20231204001

Analysis of the response surface method for optimising the flatness of ceramic-metal brazing

WANG Guanghui¹, LIU Xu¹, ZHANG Yu¹, TIAN Hao¹, SONG Xiaoguo²

(1. CETC Industrial Base Research Institute, Shijiazhuang, 050051, China; 2. Shandong Province Special Welding Technology Key Laboratory, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai, 264200, China)

Abstract: Ceramic-to-metal packaging is widely used as a key process in electronic vacuum devices in integrated circuit packaging, medical devices, and defence. The flatness of the two connections determines the reliability of the chip, and it is of great significance for the development of the semiconductor industry to predict and control the change of ceramic flatness after encapsulation. Design of experiments for ceramic-metal brazing based on a high-temperature co-fired ceramic-metal structure using the response surface method to simultaneously investigate the effects of multiple experimental variables on the flatness of ceramic-metal brazing. The change in ceramic flatness before and after brazing was taken as the response value, and a prediction model with quadratic polynomial regression equations was developed using a CCD combinatorial design to investigate the effect of ceramic size and metal size on the change in flatness. The results show that increasing the height of the ceramic or decreasing the length of the ceramic sides and the thickness of the wall reduces the change in flatness. At the same time, the ceramic size has a more significant effect on flatness, while the wall thickness plays a smaller role in affecting flatness. The results provide a reference for the prediction and control of ceramic brazing flatness.

Highlights: (1) The influence of ceramic size and metal size on the change of flatness after ceramic-metal brazing was investigated.

(2) The mathematical model of ceramic-metal brazing flatness with respect to each test parameter has been developed using the response surface method.

Key words: ceramic-to-metal packages; planarity; response surface methodology

0 序言

近几十年来,随着电子器件的广泛应用,承载电子元件的外壳封装技术及材料得到了蓬勃发展^[1-3],陶瓷—金属连接构成的复合结构,在保有陶瓷材料的耐高温、耐磨及抗腐蚀等优点的同时,还拥有金属材料优异的韧性和延展性等优点。陶瓷与金属封装由于热导率高、尺寸精确、可靠性好等优点而逐渐取代玻璃与金属封装^[4-6],但陶瓷与金属热膨胀系数不易匹配,在高温钎焊后陶瓷常发生变形,平面度难以控制,并且由于陶瓷材料脆性大,不能发生塑性变形,在工程应用中时常发生瓷件开裂、漏气等问题,降低了管壳封装的可靠性,影响了电子产品安全性能,阻碍了半导体行业的发展^[7-10],而目前鲜有报道关于陶瓷—金属钎焊平面度研究的文章,因此分析陶瓷—金属钎焊平面度的影响因素,预测控制封装后陶瓷平面度变化显得尤为重要。

文中基于一种高温共烧陶瓷—金属结构,研究陶瓷尺寸及金属尺寸对陶瓷钎焊前后平面度变化的影响规律,建立相关数学模型,为陶瓷—金属外壳材料选择及结构设计提供参考。

1 试验方法

采用陶瓷材料材质为 95%Al₂O₃, 试验外壳结构,如图 1 所示。采用陶瓷—金属墙体结构,墙体材质为 4J29,用以研究陶瓷尺寸和金属尺寸对平面度的影响,钎焊封接用焊料均为 AgCu28 共晶焊料。

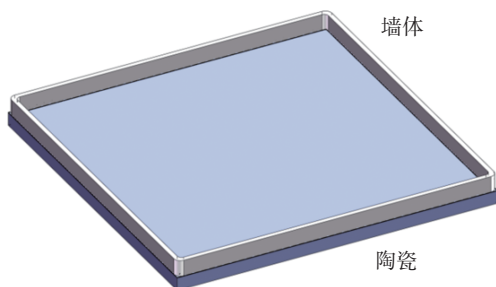


图 1 试验外壳结构示意图: 陶瓷—金属墙体结构
Fig. 1 Schematic construction of the test enclosure: ceramic-metal wall construction

首先采用 3D 轮廓仪测量陶瓷一表面的平面

度,然后在陶瓷的另一面采用高温链式炉完成陶瓷—金属的钎焊,钎焊最高温度为 810 °C,钎焊后测量陶瓷同一表面的平面度,对比前后差异。同一种试验参数采用上述步骤测量 5 次,取平面度变化均值。

2 试验结果与讨论

2.1 单因素试验

2.1.1 瓷件边长

墙体厚度 0.6 mm,瓷件高度 0.8、1.5、2.5、4.0 mm,不同瓷件边长对陶瓷—金属钎焊平面度的影响规律,如图 2 所示。采用 Origin 对试验数据进行拟合得到图示曲线,瓷件尺寸与平面度变化值呈现负幂指数关系 ($y = ax^{-b}$, $a, b > 0$)。由图可知,陶瓷平面度变化值随着瓷件边长的减小而减小,当瓷件边长为 10 mm 时,平面度变化接近于 0 mm。瓷件边长的减少意味着更小的钎焊面积,由陶瓷与金属热膨胀系数差异所产生的钎焊应力减小,变形程度降低^[11-13]。

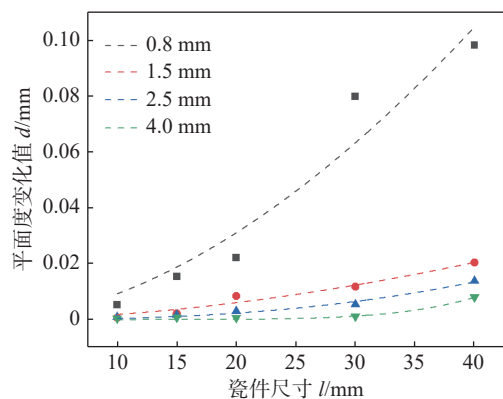


图 2 不同瓷件边长对陶瓷—金属钎焊平面度的影响规律
Fig. 2 Influence of different edge lengths on the flatness of ceramic—metal brazing

2.1.2 瓷件高度

墙体厚度 0.6 mm,瓷件边长 10、15、20、30、40 mm,不同瓷件高度下,陶瓷—金属钎焊平面度变化规律,如图 3 所示。同样采用 Origin 对试验数据进行多项式拟合得到曲线,瓷件尺寸与平面度变化值呈现正幂指数关系 ($y = ax^b$, $a, b > 0$)。随着瓷件高度的增加,平面度变化逐渐减小,当瓷件高度大于 3 mm 时,平面度变化极小,主要是因为瓷件高度越大,相同大小的应力所引起的变形量越小。

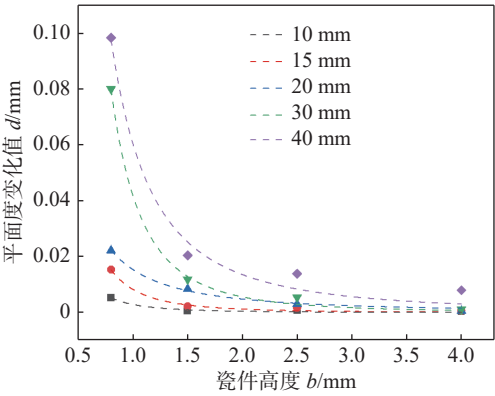


图 3 不同瓷件高度对陶瓷—金属钎焊平面度的影响规律
Fig. 3 Influence of different edge heights on the flatness of ceramic—metal brazing

2.1.3 墙体厚度

瓷件边长 20 mm, 瓷件高度 1.5 mm, 不同墙体厚度对陶瓷—金属钎焊平面度的影响, 如图 4 所示, 采用 Origin 对试验数据进行拟合得到一次函数曲线 ($y = ax$, $a > 0$). 由图可知, 陶瓷平面度变化值随着墙体厚度的增大而增大, 因为墙体厚度增加, 钎焊面积增大, 钎焊应力增大, 变形随之增加。

2.2 响应曲面法

采用响应曲面法建立瓷件尺寸及墙体厚度与瓷件平面度的关系模型, 响应曲面法又称回归设计, 其二阶模型主要包括 CCD、Box-behnken (BBD) 设计及 3k 全因子设计^[14-16]. 中心组合设计

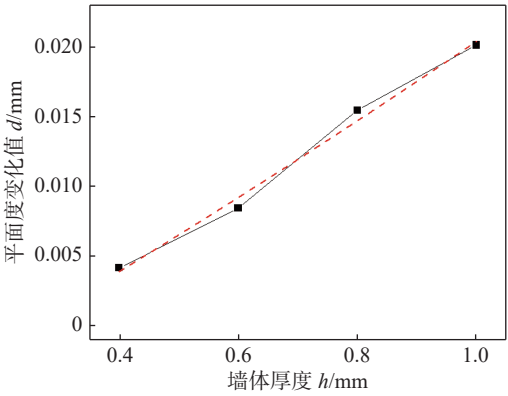


图 4 不同金属墙体厚度对陶瓷—金属钎焊平面度的影响规律
Fig. 4 Influence of different metal wall thickness on the flatness of ceramic—metal brazing

能同时满足回归性、正交性和旋转性, 采用该方法可在多元线性回归的基础上利用合理的试验设计方法, 并通过试验所得数据拟合输入变量与输出变量的函数关系, 获得多元二次回归方程. 通过基础探索试验, 可以发现瓷件边长、瓷件高度及墙体厚度对钎焊瓷件平面度变化值影响较大, 因此将 3 者设置为输入变量, 瓷件平面度变化值设置为输出变量, 三因子设计矩阵及瓷件平面度变化响应值见表 1.

三因子二次回归方程如下

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^3 b_j x_j + \sum_{k=1}^{3-1} \sum_{j=k+1}^3 b_{kj} x_k x_j + \sum_{j=1}^3 b_{jj} x_j^2 \quad (1)$$

表 1 CCD 试验设计及瓷件平面度变化值
Table 1 CCD test design and flatness change value of porcelain parts

试验 编号	输入变量			响应值
	瓷件边长a/mm	瓷件高度b/mm	墙体厚度h/mm	平面度变化值d/mm
1	30	2.4	0.6	0.004 425
2	40	2.4	0.4	0.002 560
3	20	2.4	0.4	0.001 640
4	40	0.8	0.4	0.080 680
5	40	0.8	0.8	0.106 175
6	40	1.6	0.6	0.020 040
7	30	0.8	0.6	0.073 730
8	40	2.4	0.8	0.009 400
9	20	0.8	0.8	0.040 000
10	20	0.8	0.4	0.028 000
11	30	1.6	0.4	0.011 120
12	20	1.6	0.6	0.010 300
13	30	1.6	0.8	0.026 530
14	30	1.6	0.6	0.017 270
15	20	2.4	0.8	0.004 750

式中: y 为回归模型输出变量, 文中为平面度变化值; x_k 与 x_j 代表输入变量, 文中为瓷件边长、瓷件高度和墙体厚度; 这些参数的选择基于陶瓷金属钎焊工艺的物理变形机理及工程经验。 b_o 、 b_j 、 b_{kj} 、 b_{ji} 均为回归系数, 采用设计软件获得了输入变量与输出变量真实值之间回归方程

$$100 \cdot \Delta PL = 2.59 + 0.60a - 7.15b - 4.53c - 0.18ac + 0.11ac - 2.15bc - 0.004a^2 + 3.10b^2 - 0.98c^2$$

(2)

式中: ΔPL 为钎焊瓷件平面度变化值; a 为瓷件边长; b 为瓷件高度; c 为墙体厚度。
0.05 表示该项不显著, 为提高回归方程的拟合度需要将该项删除。

对方程进行了方差分析, 其结果见表 2。对于回归模型, 模型的 p 值小于 0.05(即 95% 的置信水平)表明该模型显著, 具有统计学意义, p 值越小回归方程越显著, 对于回归方程系数项, p 值小于 0.05 表示该项显著对回归方程影响较大, p 值大于 0.1, 这一显著偏差提示模型中可能存在过度拟合或冗余变量引入的块效应, 需要考虑将模型约简, 将模型中 p 值大于 0.05 的系数项即 (a_2 , c_2) 删除得到优化后的回归方程, 如下

$$100 \cdot \Delta PL = 0.52 + 0.35a - 6.26b - 3.36c - 0.17ab + 0.11ac - 2.15bc + 2.83b^2$$

(3)

模型修改后对其进行方差分析, 见表 3。修改后回归模型 p 值 0.0003 远小于 0.05, 模型显著; 模

表 2 平面度方差分析
Table 2 Analysis of variance (ANOVA) for flatness

Source	误差平方和SSE/mm ²	自由度df	均方R/mm ²	组间方差/组内方差F-value	显著值p-value
Model	0.0144	9	0.0016	32.78	0.00060
瓷件边长a	0.0018	1	0.0018	36.82	0.00180
瓷件高度b	0.0094	1	0.0094	191.31	<0.00010
墙体厚度h	0.0004	1	0.0004	8.08	0.03610
ab	0.0016	1	0.0016	32.82	0.00230
ah	0.0000	1	0.0000	0.7587	0.04236
bh	0.0001	1	0.0001	1.94	0.02224
a ²	0.0000	1	0.0000	0.8618	0.39590
b ²	0.0010	1	0.0010	20.75	0.00610
c ²	3.961E-07	1	3.961E-07	0.0081	0.93180

$R^2 = 0.983\ 3$, Adjusted $R^2 = 0.953\ 3$, Predicted $R^2 = 0.840\ 2$

表 3 修改后平面度方差分析
Table 3 Modified analysis of variance (ANOVA) for flatness

Source	误差平方和SSE/mm ²	自由度df	均方R/mm ²	组间方差/组内方差F-value	显著值p-value
Model	0.0144	7	0.0021	49.01	<0.0001
瓷件边长a	0.0018	1	0.0018	42.97	0.0003
瓷件高度b	0.0094	1	0.0094	223.23	<0.0001
墙体厚度h	0.0004	1	0.0004	9.43	0.0180
ab	0.0016	1	0.0016	38.29	0.0005
ac	0.0000	1	0.0000	0.8853	0.0371
bc	0.0001	1	0.0001	2.26	0.0171
b ²	0.0011	1	0.0011	26.02	0.0014

$R^2 = 0.98$, Adjusted $R^2 = 0.96$, Predicted $R^2 = 0.8822$

型中所有系数项 p 值均小于 0.05, 表明模型中所有项均显著; 预测 R^2 与调整后的 R^2 差值小于 0.2, 表明回归方程拟合较好。

平面度变化回归方程的预测值与试验测量值的对比, 如图 5 所示, 模型的预测值随机分布在预测值与实际值相等的直线附近, 表明所建立的回归模型能很好的反应平面度变化值与瓷件尺寸及墙体厚度之间的关系。

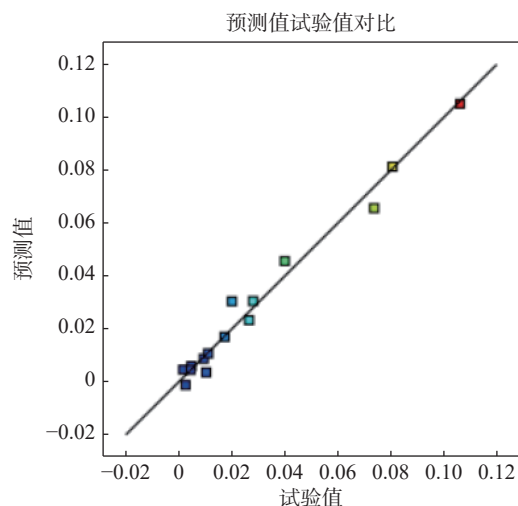


图 5 平面度变化回归方程的预测值与试验测量值的对比
Fig. 5 Comparison of predicted and experimentally measured values from regression equations for changes in flatness

通过上述回归模型可以对该工艺参数范围内的瓷件平面度变化值进行预测, 并分析上述因素对平面度变化值的影响规律. 不同瓷件边长下, 瓷件高度与墙体厚度对瓷件平面度变化值的影响规律, 如图 6 所示. 由图可知, 瓷件边长一定时, 随着瓷件高度的不断增大, 平面度变化值迅速减小; 而随着墙体厚度的不断增加, 平面度变化值略有增大. 由图 6(a) 到图 6(b) 再到图 6(c), 曲面斜度逐渐拉大, 意味着瓷件高度对平面度的影响程度随着瓷件边长的增大而增大。

不同瓷件高度下, 瓷件边长与墙体厚度对瓷件平面度变化值的作用规律, 如图 7 所示. 由该图可知, 瓷件高度为定值时, 瓷件平面度变化值随着墙体厚度及瓷件边长的增大而增大, 但瓷件边长的影响幅度明显更大. 同时瓷件高度增大时, 响应曲面整体下降, 表明瓷件高度的增大约束了平面度的变化, 在实际工程应用中, 可通过增大瓷件高度来实现减少形变的目的。

不同墙体厚度下, 瓷件边长与瓷件高度对瓷件

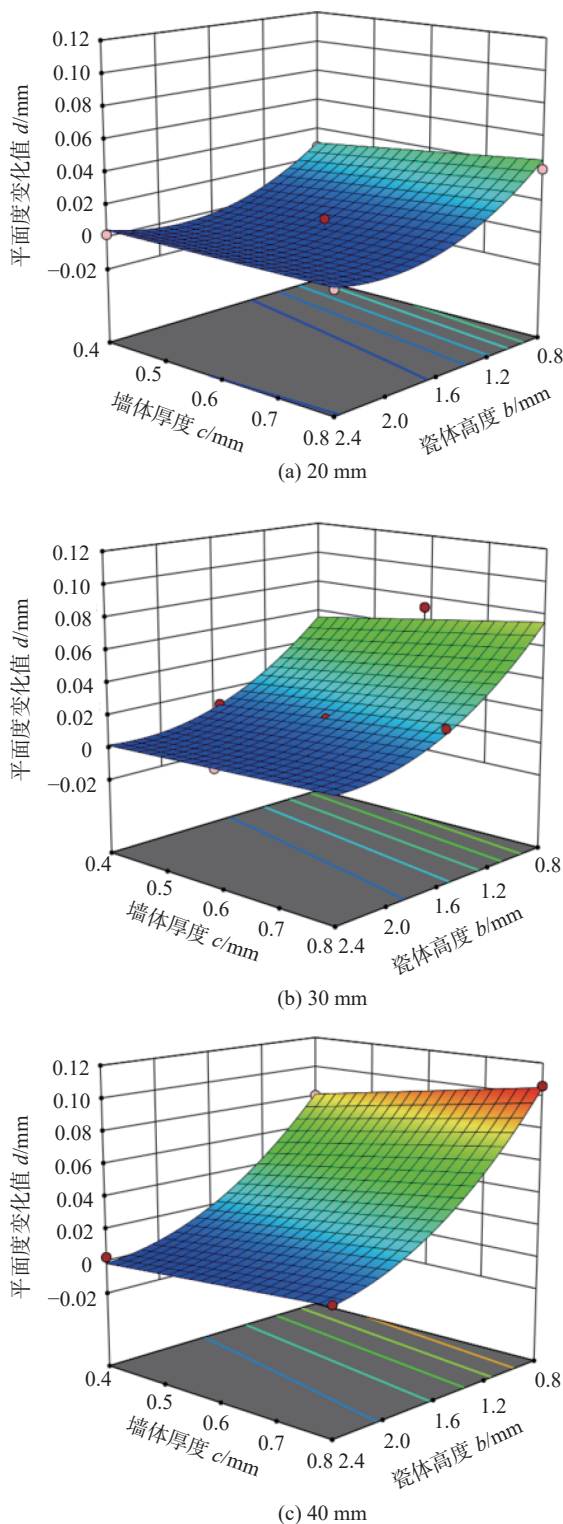


图 6 不同瓷件边长下, 瓷件高度与墙体厚度对瓷件平面度变化值的影响规律

Fig. 6 Influence of porcelain height and wall thickness on the change value of porcelain flatness under different porcelain side lengths. (a) 20 mm; (b) 30 mm; (c) 40 mm

平面度变化值的作用规律, 如图 8 所示. 由图可知 3 种墙体厚度下, 响应曲面变化较小, 说明该因素对瓷件平面度变化值影响较小。

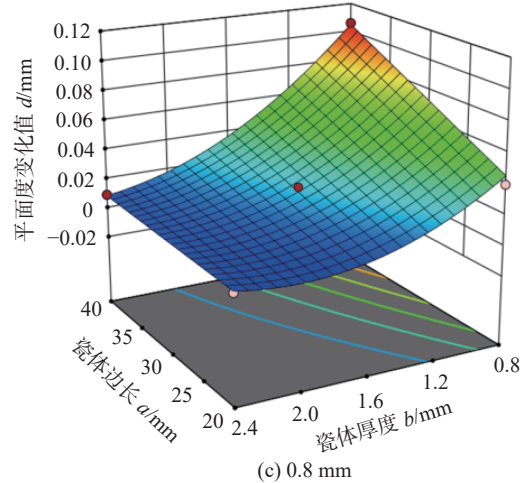
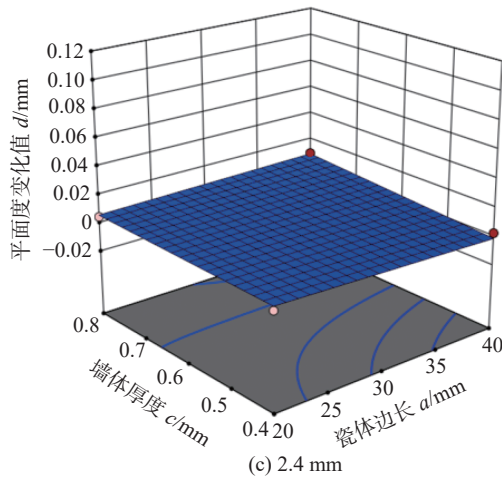
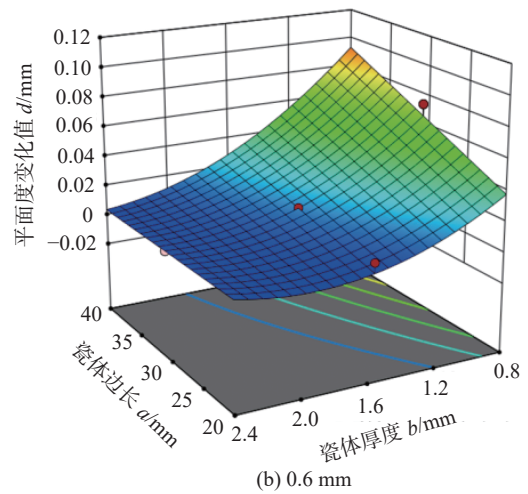
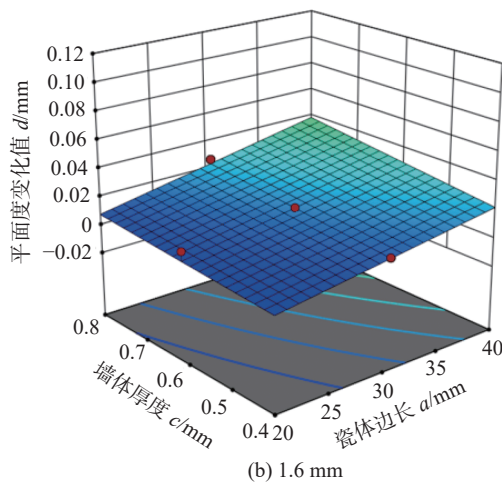
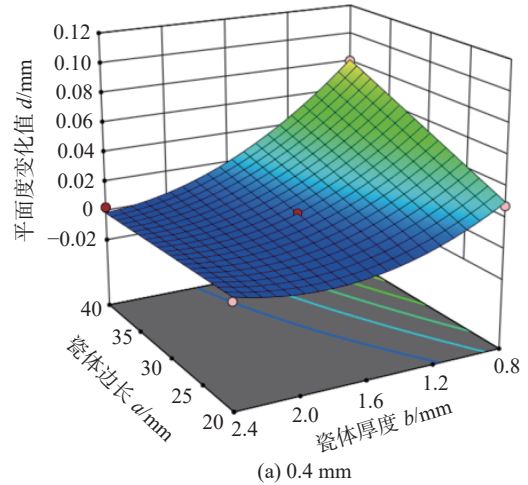
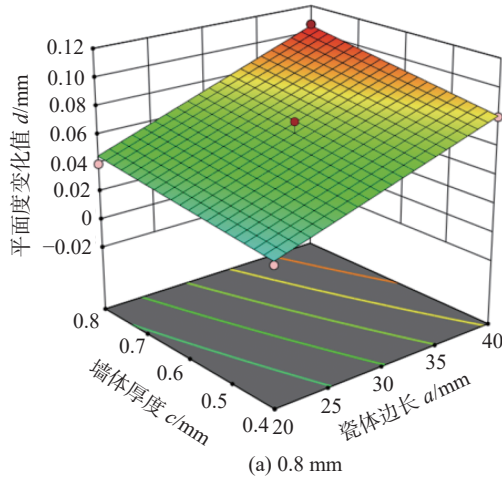


图7 不同瓷件高度下,瓷件边长与墙体厚度对瓷件平面度变化值的作用规律

Fig. 7 Role of porcelain side length and wall thickness on the change value of porcelain flatness under different porcelain heights. (a) 0.8 mm; (b) 1.6 mm; (c) 2.4 mm

图8 不同墙体厚度下,瓷件边长与瓷件高度对瓷件平面度变化值的作用规律

Fig. 8 Law of the role of porcelain edge length and porcelain height on the change value of porcelain flatness for different wall thicknesses. (a) 0.4 mm; (b) 0.6 mm; (c) 0.8 mm;

3 结论

(1) 单因素试验结果显示,瓷件边长、厚度和墙体厚度均会对陶瓷—金属钎焊平面度产生影响,其

中减小陶瓷边长、墙体厚度或者增大陶瓷厚度均可降低平面度变化值。

(2) 在各影响因素之间的主次关系与其之间的交互作用对平面度影响的探究中,通过对正交试验

的数据进行分析,发现陶瓷尺寸对平面度影响显著,而金属墙体厚度对平面度影响作用较小。

(3) 平面度变化值与陶瓷尺寸和金属墙体厚度存在一个关系模型,利用其可实现瓷件平面度变化值的预测。

参考文献

- [1] 张炳渠, 赵平, 戴增荣. 微电子陶瓷封装的金属化技术[J]. 真空电子技术, 2003(4): 41–44.
Zhang Bingqu, Zhao Ping, Dai Zengrong. Metalization technology for microelectronic ceramic packaging[J]. Vacuum Electronics, 2003(4): 41–44.
- [2] 张志庆, 张玉, 刘旭. TO 型陶瓷封装外壳可靠性研究[J]. 电子质量, 2022(11): 32–36.
Zhang Zhqing, Zhang Yu, Liu Xu. Reliability research on TO-type ceramic packaging shell[J]. Electronic Quality, 2022(11): 32–36.
- [3] Li Y, Wang J, Shen Z, *et al.* Application of Ag–Cu–Ti active metal composite filler in ceramic joining: a review[J]. 材料科学前沿, 2023, 17(4): 230664.
- [4] Wampers H, Sauerzapfe K, Mckean W. Highly leak-tight ceramic-metal assembly for a novel, three-dimensional imaging X-Ray process[J]. Ceramic Forum International, 2021(5/6): 98.
- [5] A F M, B J F A M A, C E C, *et al.* Thermo-mechanical design optimization of symmetric and non-symmetric sandwich plates with ceramic-metal-ceramic functionally graded core to minimize stress, deformation and mass[J]. Composite Structures, 2021, 276: 114496.
- [6] Chmielewski M, Pietrzak K. Metal-ceramic functionally graded materials – manufacturing, characterization, application[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2016, 64(1):151
- [7] Tang L, Wang Y, Liang Q, *et al.* Design and investigation of a high integrated reliable ceramic package for surface mount technology[J]. Microelectronics Journal, 2021(8): 114.
- [8] Pan H. OFC 2022 Expo to feature kyocera's next-generation, high-speed ceramic packages for optoelectronics[J]. Fiber Optics & Communications: Monthly newsletter covering domestic & international news on fiber optic communications and related fields, 2022(3): 45.
- [9] Xue Z, Tian X, Luan Y, *et al.* Size effect on heat conduction and associate thermal fracture behavior of thin ceramic plates[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 113(2): 102951.
- [10] Anton C, Muntean M, Gavrilă R, *et al.* The direct bonding of metals to ceramics for the manufactured microwave packages[C]// Conference & Exhibition of the European Ceramic Society. 2002.
- [11] Chun Hway, Hsueh, Paul, *et al.* Thermal expansion coefficients of unidirectional fiber-reinforced ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1988, 71(10): 438–441.
- [12] Hirata Y. Theoretical analyses of thermal shock and thermal expansion coefficients of metals and ceramics[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(1): 1145–1153.
- [13] Wang H, Singh R N. Thermal shock behaviour of ceramics and ceramic composites[J]. Metallurgical Reviews, 2013, 39(6): 228–244.
- [14] 谭波. 响应曲面法优化激光打孔工艺参数的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011
Tan Bo. Research on the optimization of laser drilling process parameters by response surface method [D]. Wuhan: Huazhong of Science and Technology, 2011.
- [15] Shi L, Wang Y, Zhang Y, *et al.* Optimization of the preparation process of electrostatic-solution blow spinning nanofiber yarn using response surface methodology[J]. *Textile Research Journal*, 2022, 92(21-22): 4437–4449.
- [16] Rajabi M, Aboutalebi M R, Seyedein S H, *et al.* Simulation of residual stress in thick thermal barrier coating (TTBC) during thermal shock: A response surface-finite element modeling[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(4): 5299–5311.

第一作者: 王光辉, 硕士, 助理工程师; 主要研究方向金属钎焊. Email: wangguanghui@cetc13.cn.

通信作者: 刘旭, 硕士, 高级工程师; Email: chidazhao@hit.edu.cn.

(编辑: 刘启明)