

金属和玻璃胶合体热膨胀仿真及实验验证

李国会^{1,2}, 徐宏来^{1,2}, 向汝建^{1,2}, 杜应磊^{1,2}, 吴 晶^{1,2}, 向振佼^{1,2}, 张 越^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 仿真分析了热膨胀系数不同的金属和玻璃胶合体在不同温度下的形变, 同时使用热膨胀仪测试了不同金属的热膨胀系数, 随后, 将热膨胀系数不同的金属分别与相同材料的玻璃进行胶合, 最后将胶合体置于半封闭空间并对其整体进行加热, 采用哈特曼波前测试系统测试胶合体的形变。结果表明, 胶合体的仿真数据和实验数据基本吻合。该仿真与实验结果, 对不同材料属性的胶合体在热膨胀匹配设计方面具有一定的指导意义。

关键词: 热膨胀系数; 胶合体; 哈特曼

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB201931.190272

Simulation and experimental verification of thermal expansion of metal and glass cementing bodies

Li Guohui^{1,2}, Xu Honglai^{1,2}, Xiang Rujian^{1,2}, Du Yinglei^{1,2}, Wu Jing^{1,2}, Xiang Zhenjiao^{1,2}, Zhang Yue^{1,2}

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1012, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, P. O. Box 919-1002, Mianyang 621900, China)

Abstract: The stress of different adhesive bodies were simulated and analyzed at different temperature, and the thermal expansion coefficient of different metals were tested by the Thermal Expansion Instrument. Then, the metals with different thermal expansion coefficient were bonded to the glass separately, then the adhesive bodies were heated in a semi-enclosed space and their deformation were measured by Hartmann. The results show that the simulation data of the adhesive bodies agree well with the experiment data. It can be used to guide the design of thermal expansion matching for different attributes materials.

Key words: thermal expansion coefficient; adhesive body; hartmann

PACS: 02.60.Cb; 52.38.-R; 42.55.-f; 42.60.-V

1884 年 Schott 熔制出世界上第一块高质量的光学玻璃, 从此光学玻璃的研究始终是人们关注的热点^[1], 特别是随着光学、信息学、生命科学以及航空航天等行业的快速发展, 对光学玻璃的应用领域和制备技术都有较大的拓展^[2-4]。大多数光学玻璃具有抗氧化、耐腐蚀、耐高温等特点^[5-6], 其热学、电学、机械性能较好, 但其质地脆弱, 容易破碎^[7-8]。而金属具有较好的延展性, 柔韧性较好^[9], 采用性能相近的金属和玻璃进行熔接、焊接或者环氧树脂粘接的方式, 将二者融为一体, 可以获得强度高、刚度大、延展性好的胶合体, 可以制造各种压力传感器^[10-12]。文献 [6] 介绍了大量的金属和玻璃的连接技术和方法, Tsann-ShyiChern 等人采用匹配熔接进行连接, B. Schmidt, Pawel Knapkiewicz 以及 A. T. J. HelVoort 等人通过键合的方式进行连接, 国内浮法玻璃新技术国家重点实验室采用焊接的方式进行连接, 同时, 国内外通过钎焊的方式对金属和玻璃进行连接的较多。由于金属和玻璃的材料种类和属性不尽相同, 其物理、化学性能总是存在差异, 特别是热膨胀系数方面, 难以完全匹配^[13], 从而导致玻璃和金属连接后热力学性能不一致, 应用中将产生一定的残余应力, 导致组合体的强度下降, 从而影响结构的机械性能^[4, 14]。

在光学系统应用中, 特殊情况下用到的金属和玻璃胶合体同样会遇到上述问题。为了减小热胀冷缩对胶合体形变的影响, 在胶合材料热膨胀匹配设计时, 应当选择热膨胀系数相同或者相近材料进行胶合^[9]。为此, 本文针对

金属和玻璃胶合体进行热膨胀匹配设计和实验验证,通过仿真热膨胀系数不同的已知金属和玻璃的胶合体,分析热膨胀导致的形变,同时,通过实际测量不同材料的热膨胀系数并对热膨胀系数不同的金属和相同材料的玻璃进行胶合,随后对胶合体进行加热实验,用哈特曼测试系统监测胶合体的形变,并与理论分析进行对比,检验数据的有效性,从而为胶合体材料的选择、热膨胀匹配设计提供参考。

1 热膨胀系数定义

热膨胀系数是材料物理性能的一个重要参数,定义为固体温度每升高 1 K 时长度或体积的变化量,热膨胀系数公式为^[15-16]

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

式中: α 是材料在 ΔT 温度区间内的热膨胀系数; L_0 为材料在初始温度为 T_0 时的长度, ΔL 为材料在 ΔT 温度区间内长度的变化量; ΔT 为温度变化量, 即 $\Delta T = T - T_0$ 。

2 热膨胀系数测试

本文的研究对象为金属和玻璃的胶合体,为此,采用 NETZSCH DIL 402 热膨胀仪测试玻璃和金属的热膨胀系数,为金属和玻璃胶合体的计算机仿真提供热膨胀系数。图 1 是 DIL 402 热膨胀仪和双样品支架,可以一次性测试金属和玻璃两种材料的热膨胀系数。

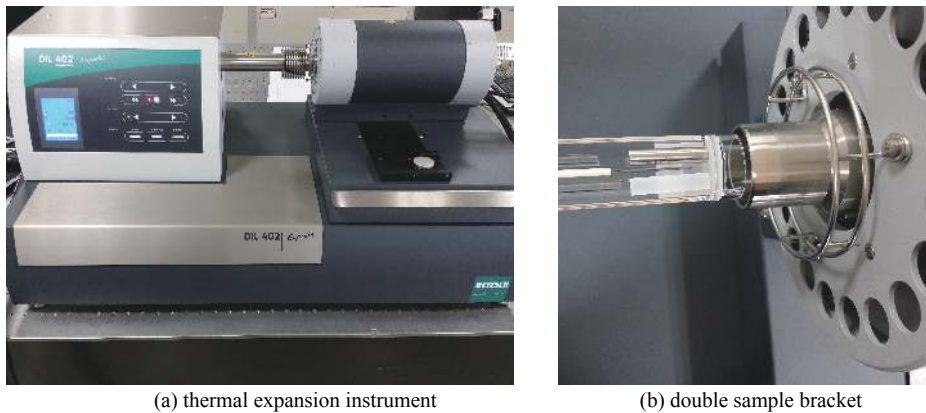


Fig. 1 Thermal expansion instrument DIL 402 and double sample bracket

图 1 DIL 402 热膨胀仪和双样品支架

测试样品尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, 测试过程中, 低温段需要采用液氮进行降温。测试样品中, 金属 1 和金属 2 为不同组分的殷钢材料, 金属 3 为不锈钢材料, 玻璃材料为熔石英。图 2 是金属 1 和金属 2 的热膨胀系数测试曲线, 图 3 是金属 3 的热膨胀系数测试曲线, 图 4 是两种玻璃材料的热膨胀系数测试曲线。从测试结果来看, 金属 1 和金属 2 的膨胀系数分别为 $0.60 \times 10^{-6} / \text{K}$ 和 $1.63 \times 10^{-6} / \text{K}$, 金属 3 的热膨胀系数为 $16.49 \times 10^{-6} / \text{K}$, 玻璃的热膨胀系数 $0.47 \times 10^{-6} / \text{K}$ 和 $0.51 \times 10^{-6} / \text{K}$ 。

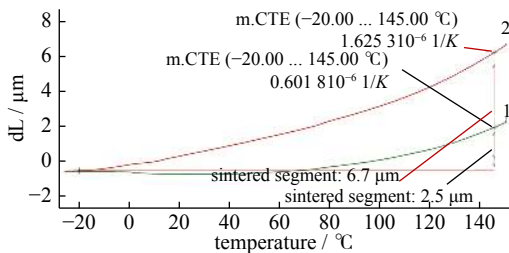


Fig. 2 Thermal expansion coefficient curves of metals 1 and 2

图 2 金属 1 和金属 2 的热膨胀系数曲线

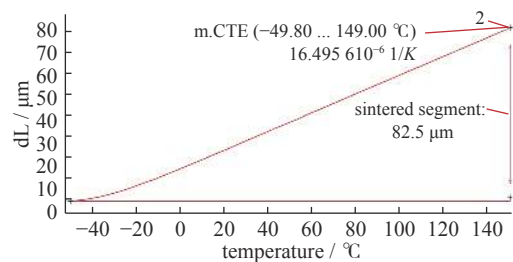


Fig. 3 Thermal expansion coefficient curves of metal 3

图 3 金属 3 的热膨胀系数曲线

3 胶合体热膨胀仿真

采用 UG 仿真软件并利用热膨胀仪测试的热膨胀系数对玻璃和金属胶合体进行仿真计算, 模拟不同热膨胀系数的金属和玻璃胶合后的形变。图 5 是胶合体仿真模型, 上层为玻璃, 下层为金属。

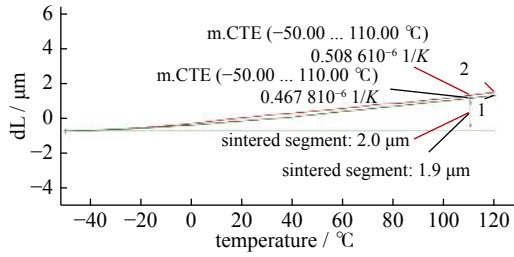


Fig. 4 Thermal expansion coefficient curves of two glasses

图 4 两种玻璃热膨胀系数测试曲线

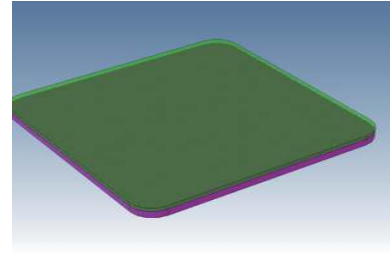


Fig. 5 Simulation model

图 5 仿真模型

仿真模型中, 玻璃材料的膨胀系数为 $0.47 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 导热系数为 $1.4 \text{ W}\cdot\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, 比热为 $0.67 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, 金属材料的热力学参数分为三种:

- (1) 金属 1 的膨胀系数为 $0.60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 导热系数为 $10.5 \text{ W}\cdot\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, 比热为 $0.48 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- (2) 金属 2 的膨胀系数为 $1.63 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 导热系数为 $13.9 \text{ W}\cdot\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, 比热为 $0.51 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- (3) 金属 3 的膨胀系数为 $16.49 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 导热系数为 $15.9 \text{ W}\cdot\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, 比热为 $0.50 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

图 6~11 是不同热膨胀系数金属+玻璃胶合体在 40, 50, 60 °C 时的应变和应力。

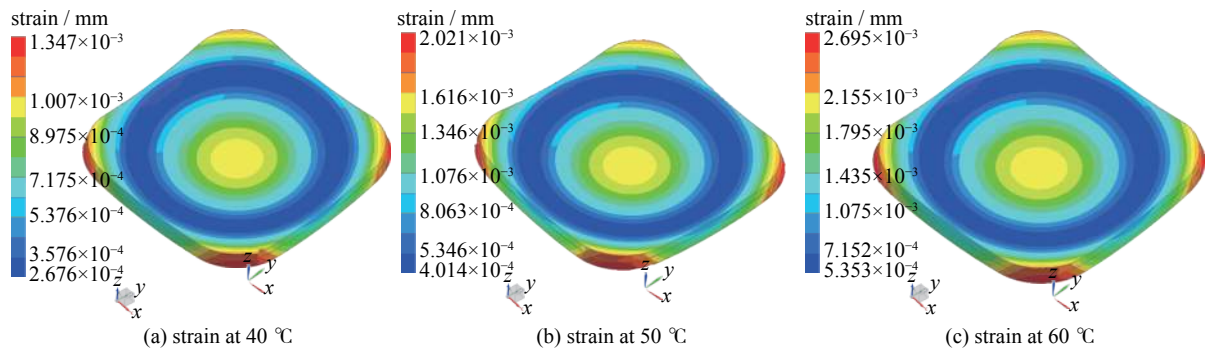


Fig. 6 Strain of the adhesive body of metal 1 and glass at 40, 50, 60 °C

图 6 金属 1+玻璃胶合体 40, 50, 60 °C 的应变

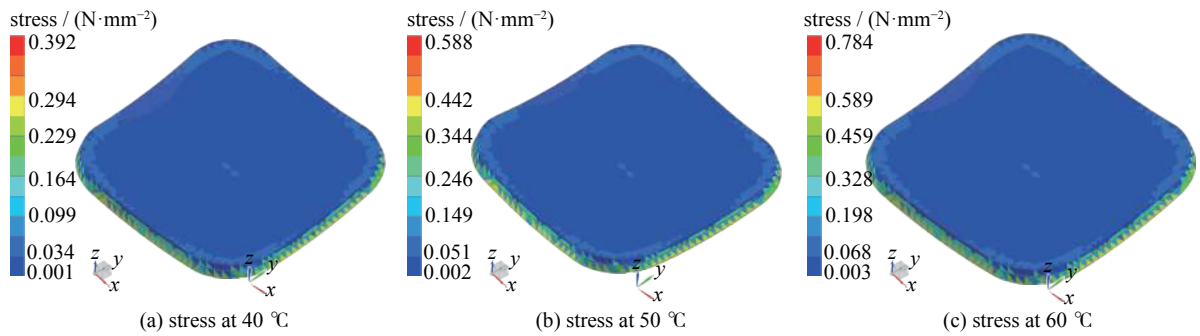


Fig. 7 Stress of the adhesive body of metal 1 and glass at 40, 50, 60 °C

图 7 金属 1+玻璃胶合体 40, 50, 60 °C 的应力

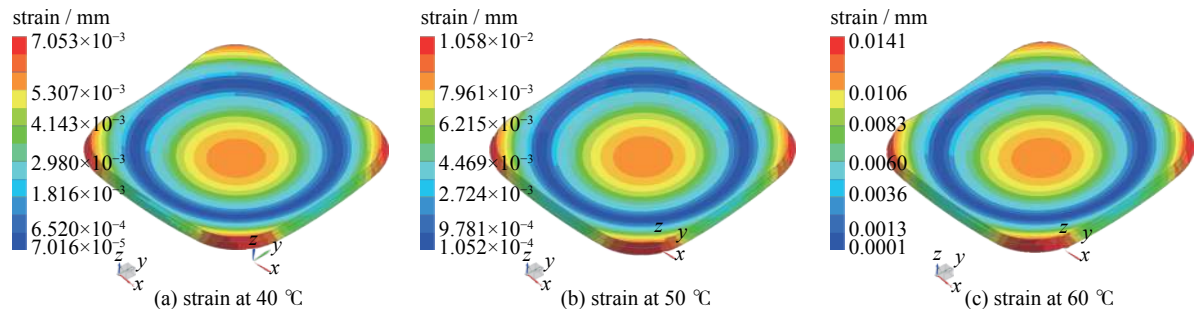


Fig. 8 Strain of the adhesive body of metal 2 and glass at 40, 50, 60 °C

图 8 金属 2+玻璃胶合体 40, 50, 60 °C 的应变

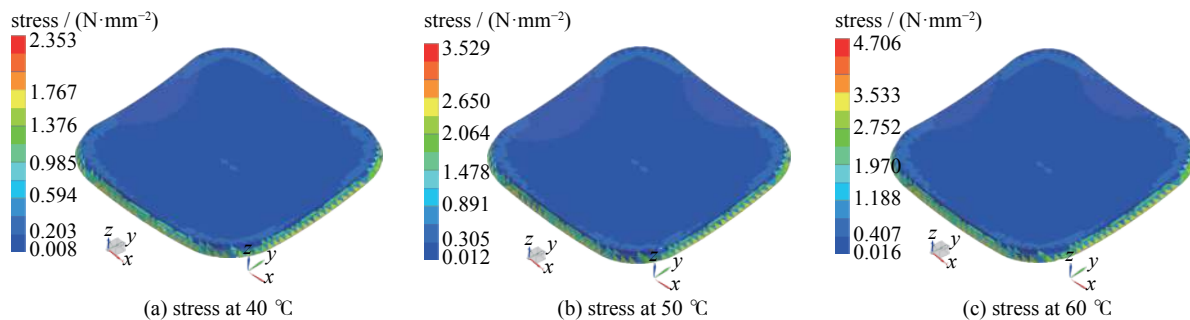


Fig. 9 Stress of the adhesive body of metal 2 and glass at 40, 50, 60 °C

图 9 金属 2+玻璃胶合体 40, 50, 60 °C 的应力

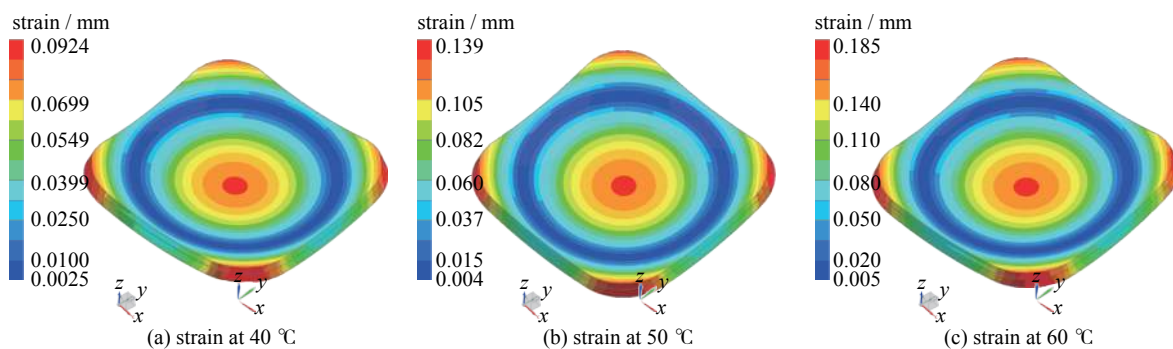


Fig. 10 Strain of the adhesive body of metal 3 and glass at 40, 50, 60 °C

图 10 金属 3+玻璃胶合体 40, 50, 60 °C 的应变

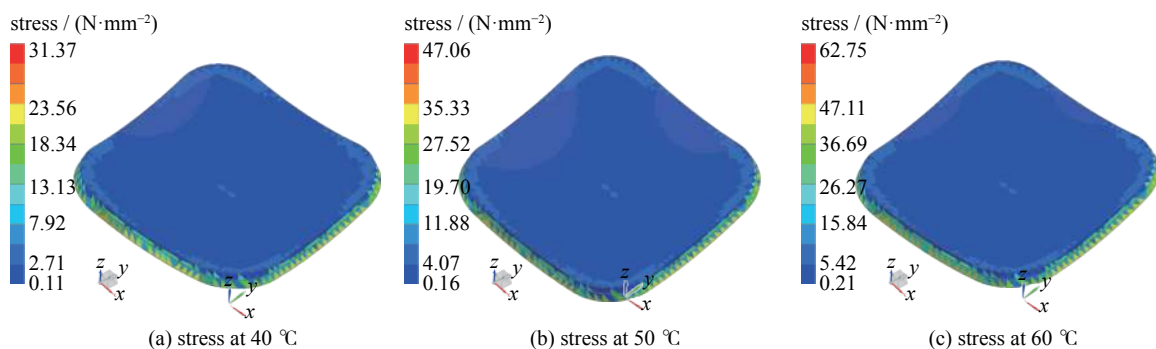


Fig. 11 Stress of the adhesive body of metal 3 and glass at 40, 50, 60 °C

图 11 金属 3+玻璃胶合体 40, 50, 60 °C 的应力

分析结果如表 1 所示。

表 1 三种金属和玻璃材料在 40, 50, 60 °C 时的应力和应变汇总表

Table 1 Strain and stress of the adhesive bodies at 40, 50, 60 °C

No.	temperature/°C	strain/ μm			stress/MPa		
		metal 1+ glass	metal 2+ glass	metal 3+ glass	metal 1+ glass	metal 2+ glass	metal 3+ glass
1	40	1.35	7.05	92.4	0.39	2.39	31.37
2	50	2.02	10.58	139	0.59	3.53	47.06
3	60	2.69	14.1	185	0.78	4.71	62.75

从汇总表可以看出, 三种材料的胶合体在不同温度下应力和应变都成上升趋势, 对于热膨胀系数较大的金属 3, 其应变较大, 同时产生的应力也达到 62.75 MPa。

4 实验验证

分别将规格尺寸与仿真模型一致的三种金属与玻璃进行胶合, 固化之后即可开展胶合体面形随温度变化的实验验证。首先, 将胶合体、平行光源和哈特曼置于光学平台上, 打开光源调节光路, 使光束经胶合体反射后进入哈

特曼探测器中,光路调节到位后用半封闭的盒子将胶合体罩住,随后对盒子内部空间进行加热,由内置温度传感器读取温度值,哈特曼测试系统监测胶合体面形的变化量。加热前去除系统像差作为初始面形,当温度稳定在 50 ℃ 时再次测试胶合体的面形,该面形即为胶合体在温度变化后产生的面形变化量。图 12 是面形测试实验平台示意图,图 13 是三种胶合体 50 ℃ 的面形变化量。

50 ℃ 时,金属 1+玻璃胶合体的形变为 2.84 μm ,金属 2+玻璃胶合体的形变为 10.47 μm ,金属 3+玻璃的胶合体形变为 84.25 μm 。前面两种胶合体的热形变与仿真模型相差较小,而第三种胶合体的热变形相对较大,主要是由于实验过程中,随着形变的增加,材料内部应力增大,导致胶

合体的一个角产生脱胶现象,其热形变小于理论分析结果,同时,在仿真过程中,由于胶层厚度、粘接强度以及结构参数跟胶合体实物总是存在一定的差异,这也是导致理论分析和实验结果产生偏差的原因之一。通过实验,验证了三种胶合体理论分析和实验结果的一致性和有效性,其结果在胶合体选材以及热匹配设计等方面具有一定的指导作用。

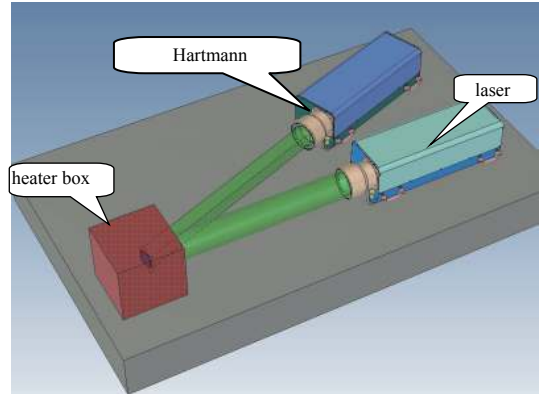


Fig. 12 Platform of mirror profile testing

图 12 面形测试实验平台示意图

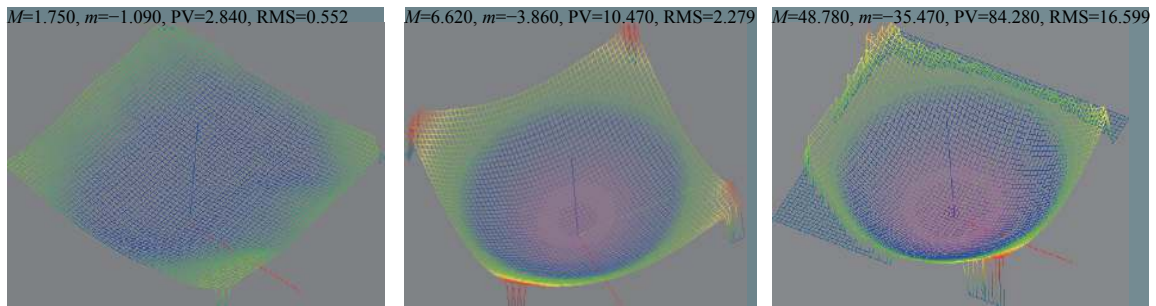


Fig. 13 Deformation of three adhesive bodies at 50 ℃

图 13 三种胶合体 50 ℃ 面形变化量

5 结论

以金属和玻璃为对象,利用热膨胀仪测试了材料的热膨胀系数,以测试结果为仿真输入条件,对金属和玻璃的胶合体进行了热膨胀仿真分析,最后用与仿真模型技术参数一致的金属材料 and 玻璃进行胶合,固化后进行了温度考核实验。通过实验发现,50 ℃ 时,三种金属材料 and 玻璃的组合体产生的形变与仿真结果基本一致,从而验证了热膨胀系数测试 results 和仿真分析 results 的有效性。其结果可以为金属 and 玻璃胶合体的热匹配设计提供一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 何峰,黄震,宋培煜,等. BaO对高膨胀光学玻璃结构和性能的影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(7): 5-8. (He Feng, Huang Zhen, Song Peiyu, et al. Effect of BaO structure and properties of high expansion optical glass. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(7): 5-8)
- [2] 安汝平,李旭东,张赋,等. 层合结构复合材料热膨胀系数的有限元计算[J]. 塑料, 2013, 42(6): 80-82. (An Ruping, Li Xudong, Zhang Fu, et al. Finite element calculation on thermal expansion coefficient of laminated composite. Plastics, 2013, 42(6): 80-82)
- [3] 许军锋,郑超,杨伟,等. Ge-Se-Sb玻璃的热膨胀分析[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(10): 816-821. (Xu Junfeng, Zheng Chao, Yang Wei, et al. Analysis of thermal expansion of Ge-Se-Sb chalcogenide glass. Journal of Xi'an Technological University, 2016, 36(10): 816-821)
- [4] 董为勇,倪嘉,吴可凡,等. 玻璃与金属焊接残余应力有限元模型模拟计算分析[J]. 建材世界, 2016, 37(3): 35-39. (Dong Weiyong, Ni Jia, Wu Kefan, et al. Calculation and analysis about welding residual stress in glass-to-metal by finite element model. The World of Building Materials, 2016, 37(3): 35-39)
- [5] 董丽宁,王江,陈钢,等. 超高功率短脉冲作用下薄壁金属的热特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 071003. (Dong Lining, Wang Jiang, Chen Gang, et al. Thermal analysis of thin-wall metal under high-power short-pulsed heating. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 071003)
- [6] 李卓然,徐晓龙. 玻璃与金属连接技术研究进展[J]. 失效分析与预防, 2013, 8(2): 123-130. (Li Zhuoran, Xu Xiaolong. Review of bonding technology of glass to metal. Failure Analysis and Prevention, 2013, 8(2): 123-130)
- [7] 陈思颖,黄晨光,陈捷,等. 用电子散斑干涉法测量材料热膨胀系数[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 681-684. (Chen Siying, Huang Chengguang, Chen Jie,

- et al. Application of electroinc speckle pattern interferometry in thermal expansion coefficient measurements. *Higt Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(6): 681-684)
- [8] Overend M, Jin Q Warson J. The selection and performance of adhesives for a steel-glass connection[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011, 31(7): 587-5978.
- [9] 王玺, 方晓东. K9玻璃在脉冲CO₂激光作用下的热应力分析[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 051006. (Wang Xi, Fang Xiaodong. Analysis of thermal stress in K9 glass irradiated by pulsed CO₂ laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 051006)
- [10] 肖晓芳, 陈丽梅, 程敏熙. 测量玻璃热膨胀系数和折射率温度系数实验[J]. *实验室研究及探索*, 2010, 29(4): 24-26. (Xiao Xiaofang, Chen Limei, Cheng Minxi. Experiment of measuring the thermal expansion coefficient and the coefficient of class refraction index aginst temperature. *Research and Exploration in Laboratory*, 2010, 29(4): 24-26)
- [11] 李娟, 郭杰, 田野. 高性能环氧树脂研究进展[J]. *热固性树脂*, 2017, 32(1): 59-65. (Li Juan, Guo Jie, Tian Ye. Research progress of epoxy resins with high performance. *Thermosetting Resin*, 2017, 32(1): 59-65)
- [12] 韩建宝, 江长春, 张聪越, 等. 光学系统透镜热形变特性仿真研究[J]. *光学技术*, 2013, 39(1): 19-22. (Han Jianbao, Jiang Changchun, Zhang Congyue, at al. Research on heat deformation properties of optical system lenses. *Optical Technique*, 2013, 39(1): 19-22)
- [13] 王玺, 方晓东. 准分子材料激光辐照K9玻璃的热力效应分析[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 041002. (Wang Xi, Fang Xiaodong. Thermal and mechanical damage in K9 glass irradiated by KrF excimer laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 041002)
- [14] 黄江, 师文庆, 谢玉萍, 等. 激光作用于金属材料瞬态温度场的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 029001. (Huang Jiang, Shi Wenqing, Xie Yuping, et al. Numerical simulation of transient temperature field under the interaction between laser and metal materials. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 029001)
- [15] 刘博洋, 刘武华, 叶丰. La₅₅ Al₂₅ Ni₁₀ Cu₁₀金属玻璃的热膨胀性能研究金属玻璃的热膨胀性能研究[J]. *轻金属*, 2013, 7: 57-60. (Liu Boyang, Liu Wuhua, Ye Feng. Thermal expansion of La₅₅ Al₂₅ Ni₁₀ Cu₁₀ bulk metallic glass. *Light Metals*, 2013, 7: 57-60)
- [16] 刘琳, 王圣来, 刘光霞, 等. 大尺寸KDP/DKDP晶体热膨胀系数研究[J]. *人工晶体学报*, 2015, 44(6): 1443-1447. (Liu Lin, Wang Shenglai, Liu Guangxia, et al. Research on thermal expansion coefficient of large-aperture KDP/DKDP crystals. *Journal of synthetic crystals*, 2015, 44(6): 1443-1447)