

激光烧结 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ 系 FGM 的温度场与热应力场

张同俊 李臻熙 李克平 李星国

(华中理工大学模具技术国家重点实验室,武汉,430074)

摘要: 用有限元法对激光烧结 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ 系 FGM 的温度场和残余热应力场进行了模拟计算,并对烧结过程试样中的温度分布进行了实时测量。结果表明:激光照射面(Al_2O_3 层)和背光面(Ti 层)的温度落差为 325 。陶瓷侧温度梯度大于金属侧,成分梯度指数 p 值愈大,陶瓷侧温度梯度愈大。试样内残余热应力分布受 p 值控制,依据残余热应力最小且陶瓷层为压应力的设计准则,确定了激光烧结 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ 系 FGM 的最佳成分梯度指数 $p = 0.5$ 。

关键词: 梯度功能材料 激光烧结 温度场 热应力场 有限元

Analysis on the field of temperature and thermal stress for $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ system FGM during laser sintering

Zhang Tongjun, Li Zhenxi, Li Keping, Li Xingguo

(State Key Lab. of Plastic Forming Simulation and Die & Mould Tech., HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: We use finite element method to calculate temperature field and thermal stress field for $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ system FGM in the process of laser sintering. The temperature of the different layers of the sintering sample was measured with the thermocouples. The results show that the temperature drop between the laser irradiating surface ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ layer) and the back surface (Ti layer) was 325 , and the temperature gradient was more precipitous in Al_2O_3 ceramic layer than in Ti metal layer. We defined the parameter p , called component gradient of FGM sample, to indicate the level of the temperature gradient in ceramic Al_2O_3 layer. The thermal residual stress distribution mainly was dependent on the value of p . The axial shear stress occurred near the radial free edge, and transformed from compressive stress to tensile stress along with the increasing of p from less than 0.5 to greater than 0.5. The maximum radial stress occurred in the transition region between pure Al_2O_3 layer and graded interlayer. The distribution of circumferential stress was similar to radial stress distribution. All of the component of the thermal residual stress got the minimum when $p = 0.5$.

Key words: functional gradient material laser sintering temperature field thermal stress field finite element method

引 言

梯度功能材料(FGM)是 80 年代后期发展起来的一种两侧成分完全不同,中间呈梯度过渡的新型材料。例如陶瓷/金属梯度功能材料,一侧具有隔热好、硬度高、耐高温、耐磨损、耐腐蚀、耐辐照等陶瓷的特点,另一侧具有导热性好,强韧性等金属的优点,中间成分呈梯度过渡,无明显界面,不产生应力集中,因此,特别适合于在极端条件下工作,在航天、核能、化工、电子、机械、医学生物等领域有广泛的用途。FGM 的制备根据需要可采用表面合成技术或整体合成技术。粉末冶金法是可行性最好的整体合成技术之一^[1]。用粉末冶金法合成 FGM 的关键技

术是如何达到平衡烧结。由于 FGM 的成分呈梯度分布,不同层厚处成分不一样,热物理性质也就不一样。在传统的烧结炉中是难以达到平衡烧结的。利用陶瓷对激光的强吸收性质,用激光照射 FGM 坯样的陶瓷面,很容易在坯样中建立一个呈梯度分布的温度场,通过适当的工艺,使之与坯样的成分梯度相匹配,便可达到平衡烧结^[2,3]。用模拟计算和实验测量的方法,研究激光烧结 Al₂O₃/Ti 系 FGM 的温度场和残余热应力场,探寻残余热应力最小并于富陶瓷侧为压应力的成分设计方法,从而获得高质量的 FGM。

1 实验方法

试验材料为市售 Al₂O₃ 粉(分析纯)和 Ti 粉(纯度 99%,200 目),Al₂O₃ 粉经转型处理,其基本性质列于表 1~表 3。

Table 1 The physical properties of the test materials^[4,5]

	Poisson's ratio	Young's modulus E (GPa)	density (g/cm ³)	melting point T _f (°C)
Al ₂ O ₃	0.27	380	3.9	2045
Ti	0.33	116	4.15	1668

Table 2 The thermal expansion coefficient of test materials(10⁻⁶°C⁻¹)^[6]

T(°C)	27	77	127	227	327	427	527	727	9007				
α _{Ti}	8.5	8.9	9.3	9.8	10.2	10.5	10.9	11.6	1.2				
T(°C)	20	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1400	1600
Al ₂ O ₃	5.3	6.5	7.5	8.1	8.6	8.8	9.0	9.2	9.4	9.9	10.3	10.7	11.1

Table 3 The thermal conductivity of test materials (W/m·°C)^[6]

T(°C)	27	127	327	527	727	927	1227	1727
α _{Ti}	21.9	20.4	19.4	19.7	20.7	22.0	—	—
Al ₂ O ₃	36.0	26.41	15.8	10.4	7.85	6.55	5.66	6.0

按成分梯度指数 $p=0.75$ 配制梯度层为 10 层的坯样,坯样尺寸 $\phi 11\text{mm} \times 3\text{mm}$,在坯样不同层中埋设微细热电

偶($\phi 0.2\text{mm}$),经 900℃ 真空脱脂和预烧后进行激光烧结。激光烧结 FGM 的目的是在坯样中建立与成分的梯度相匹配的温度场,不需要也不应将材料熔化,更不能形成熔池产生对流破坏成分的梯度分布。因此,所需的激光功率不高。本实验采用 2kW 横流 CO₂ 激光器,光斑尺寸 14mm × 28mm,坯样置于旋转的试样台上,以保证坯样陶瓷面均匀吸收激光能量。通过激光功率监测器控制激光功率阶梯式增加,最高功率 500W,保持时间 60s,整个烧结时间 4min。烧结过程通 Ar 气屏蔽保护。通过坯样中埋设的微细热电偶用多道数据采集仪对烧结过程试样中的温度分布进行实时测量,采样周期 0.4s。

2 分析模型

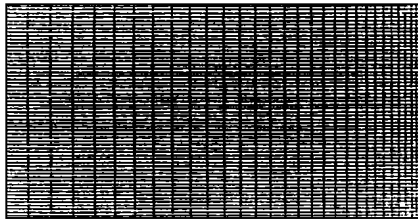
FGM 的成分分布由式 $f_1 = (z/t)^p$ 确定, f_1 为 Al₂O₃ 体积分数, z 为轴向坐标(以中心轴与底面[纯 Ti 面]的交点为坐标原点), t 为试样厚度, p 为成分梯度指数,取值在 0.25~2 之间。由于本实验采用 10 层阶梯式成分,故取 $z = z_i = it/9, i = 0, 1, \dots, 9$ 。

纯 Al₂O₃ 和 Ti 的热物参数见表 1~表 3。混合层的泊松比、热膨胀系数和热导率均采用线性混合率的计算值,杨氏模量 E 由下式确定:

$$E = \{ [f_2 E_2 (q + E_1) / (q + E_2)] + f_1 E_1 \} / \{ [f_2 (q + E_1) / (q + E_2)] + f_1 \} \quad (1)$$

式中,下标 1,2 分别代表 Al₂O₃ 和 Ti, f_1, f_2 分别为 Al₂O₃ 和 Ti 的体积分数, $f_1 + f_2 = 1$,取 q

= 4500MPa^[7]。



0

Fig.1 Grids for FEM

温度场的网格一致),径向取 30 个单元。由于轴向应力和切应力主要集中于径向边缘,故径向为非等格划分(图 1)。

3 结果与分析

3.1 温度场分析

图 2 示出激光烧结过程,辐照层(Al₂O₃层)和背光层(Ti 层)的温度实时测量曲线。由图可见,当激光功率一定时,各层温度均能达到稳定

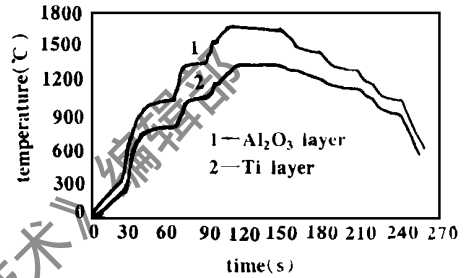


Fig.2 The temperature in Al₂O₃ layer and Ti layer of FGM sample during laser sintering

值。最高功率时,辐照层 1675 ,背光层 1350 ,温度落差为 325 ;两层温度变化基本上是同步的(背光层略滞后一点)。最高功率保持时间较长,温度稳定,表明此时试样处于动态热平衡状态,采用一维稳态传热模型是合理的。

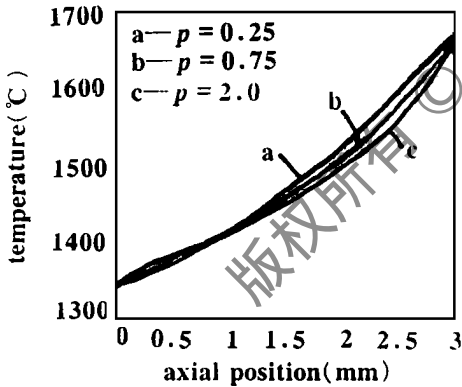


Fig.3 The temperature distributions in FGM samples of different *p* values at maximum sintering power

温度梯度愈大,则热应力愈大。从减小陶瓷侧的热应力考虑,*p* 应取较小值。

3.2 残余热应力分析

FEM 分析表明,激光烧结 Al₂O₃/Ti 系 FGM 试样的径向应力 σ_{rr} 和周向应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 的大小和分布情况基本上是相同的,而轴向应力 σ_{zz} 和切应力 τ_{rz} 的分布基本相似。图 4 示出 FGM 试样 ($p = 0.75$) 激光烧结后的径向和轴向残余热应力分量的等值线图。在纯 Al₂O₃ 和纯 Ti 层中, σ_{rr} 和 $\sigma_{\theta\theta}$ 均为较弱的拉应力,而在梯度层中, σ_{rr} 和 $\sigma_{\theta\theta}$ 均为压应力。 $\sigma_{rr}^{\max} = 90\text{MPa}$, $\sigma_{\theta\theta}^{\max} = 89.4\text{MPa}$,均出现在纯陶瓷层与相邻的梯度层的交界面处。 σ_{zz} 和 τ_{rz} 主要集中在试样径向边界附近,在试样内部这两个应力分量都接近于零。 σ_{zz} 在径向边界处以拉应力形式存在。最大应力

$\sigma_{zz}^{\max} = 72.2\text{MPa}$, $|\sigma_{rz}|^{\max} = 54.8\text{MPa}$ 。

图5和图6分别为 p 值变化对径向应力和轴向应力沿试样厚度方向分布的影响。由于 FGM 试样

的成分分布呈阶梯状(10层),各层之间的热膨胀系数差导致 σ_{rr} 和 σ_{zz} 沿轴向分布呈现锯齿状特征,即在各层交界面处均出现了应力峰。

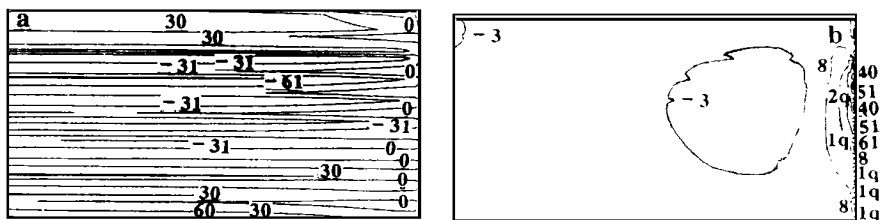


Fig. 4 Isogram of radial and axial stresses in FGM sample (MPa)

a—radial stress b—axial stress

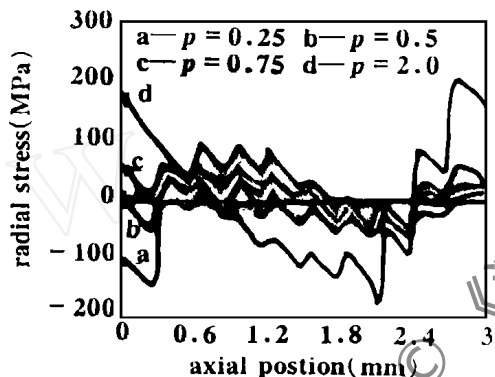


Fig. 5 Radial stress distribution along the symmetric axial of FGM sample

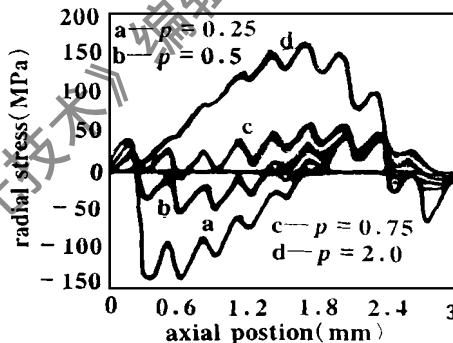


Fig. 6 Axial stress along axial position at free edge of FGM sample

从 σ_{rr} 的分布来看,当 $p > 0.5$ 时,纯 Ti 层和纯 Al_2O_3 层均处于拉应力状态,而梯度层则处于压应力状态。最大径向拉应力 σ_{rr}^{\max} 出现在纯 Al_2O_3 层与梯度层的交界处,这是因为当 p 值增大时, Al_2O_3 侧成分梯度增大,而且温度梯度也增大(图3),所以容易在该局部位产生应力集中。这种应力分布状态对材料是十分不利的^[8],尤其是 σ_{rr}^{\max} 出现在通常 FGM 较为薄弱的纯陶瓷层与梯度层的过渡区,容易引起陶瓷层开裂。当 $p < 0.5$ 时,应力分布情况正好相反,纯 Ti 层和纯 Al_2O_3 层处于零应力或压应力状态,只是在靠近 Ti 侧的梯度层中有弱的拉应力存在。当 $p = 0.5$ 时, $\sigma_{rr}^{\max} = 75.7\text{MPa}$,位于第三层与第四层(从 Ti 侧数起)的交界面处。显然,相对而言,后一种应力分布状态对材料更为有利。

轴向应力 σ_{zz} 主要集中在径向边界附近,沿厚度方向, p 值较小时,纯 Ti 层和富 Al_2O_3 的梯度层中为较弱的拉应力,其余为压应力。随着 p 值

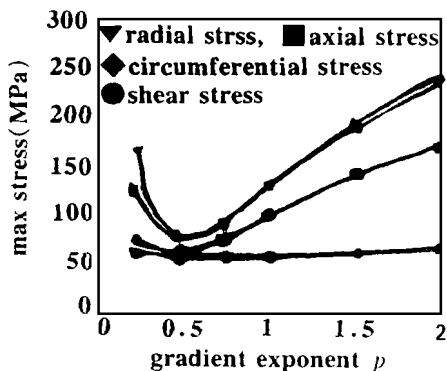


Fig. 7 Effect of the gradient exponent p on maximum stresses

的增大,沿试样整个厚度方向上 σ_{zz} 均逐渐转变为拉应力状态,而且应力值也逐渐增大。对于轴对称的片状试样,径向边界处存在较大的轴向拉应力容易在弱结合面处产生层间开裂,而轴向压应力则能抑制这种开裂倾向。所以取较小的 p 值对材料更为有利。

成分梯度指数 p 对各应力分量最大值(切应力取最大绝对值)的影响见图 7。当 $p = 0.5$ 时, σ_{rr}^{\max} , σ_{zz}^{\max} 和 τ_{rz}^{\max} 都达到了最小值, $\sigma_{rr}^{\max} = 75.7\text{MPa}$, $\sigma_{zz}^{\max} = 59.4\text{MPa}$, $\tau_{rz}^{\max} = 76.7\text{MPa}$ 。 p 值变化对 $|\tau_{rz}|^{\max}$ 的影响不大。而 σ_{rr}^{\max} 和 σ_{zz}^{\max} 的大小和变化基本相同。

综上所述,在激光温度梯度烧结的情况下, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ 系梯度功能材料最佳成分梯度指数 $p = 0.5$ 。

4 结 论

采用实验测量和有限元分析的方法确定了激光烧结 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ 系 FGM 过程中烧结体内的梯度温度场;并对烧结后试样内的残余热应力进行了分析,主要结论如下:

(1) 温度测量结果表明: Al_2O_3 层最高温度 1675, Ti 层最高温度 1350; 两处温度变化基本上是同步的;烧结过程中,试样可达到动态热平衡状态。

(2) 温度场的 FEM 分析表明, Al_2O_3 侧的温度梯度大于 Ti 侧的温度梯度;随着 p 值增大, Al_2O_3 侧的温度梯度进一步增大, Ti 侧的温度梯度则基本不变。计算结果与测量结果基本吻合。

(3) σ_{rr} 和 σ_{zz} 的大小和分布基本相同,当 $p > 0.5$ 时,纯 Ti 层和纯 Al_2O_3 层均处于拉应力状态,而且 p 值愈大,拉应力愈大。当 $p < 0.5$ 时,则转为压应力状态。

(4) σ_{zz} 和 τ_{rz} 的分布基本相似,主要集中于径向边界附近,往内趋近于零。沿厚度方向, p 值较小时为压应力, p 值增大转为拉应力。激光温度梯度烧结 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ 系 FGM 的最佳成分梯度指数 $p = 0.5$ 。

(5) 各应力分量均在 $p = 0.5$ 时最小,且此时于陶瓷侧为压应力(σ_{zz} 和 τ_{rz})或近于零应力(σ_{rr} 和 $\tau_{\theta\theta}$)。故激光烧结 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ 系 FGM 的最佳成分梯度指数为 $p = 0.5$ 。

本项工作得到武汉工业大学材料复合新技术国家实验室开放基金的部分资助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Watanabe R, Kawaswi A. Recent development of FGM for special application to space plane In: Composite Materials, 1992;39(4):197
- 2 张同俊,李星国,李克平 *et al.* 94 秋季中国材料研讨会论文集. 北京:化学工业出版社,1995;8,1(1):174
- 3 李克平,张同俊,李星国 *et al.* 激光技术,1997;21(3):174
- 4 美国金属学会编. 金属手册(第九版,第二卷). 北京:机械工业出版社,1992
- 5 坂野久夫. 最新精密陶瓷. 上海:同济大学出版社,1990
- 6 Touloukian Y S. Thermophysical Properties of Materials. IFI/Plenum Press, New York: Washington, 1977
- 7 Drake J T, Williamson R L, Rabin B H. J A P, 1993;74(7):1321
- 8 Williamson R L, Rabin B H, Drake J T. J A P, 1993;74(7):1310

*

*

*

作者简介:张同俊,男,1940年8月出生。教授。从事材料科学的科研和教学工作,近年的科研包括激光在材料制备科学方面的应用,机械合金化和超硬涂层等内容。