

激光沉积制备 SiC_p/Cu 梯度涂层残余应力分析

李德英 张 坚 赵龙志 王新国

华东交通大学载运工具与装备省部共建教育部重点实验室, 江西 南昌 330013

摘要 利用 ANSYS 有限元软件对激光沉积过程中 SiC_p/Cu 梯度涂层的残余应力进行数值模拟。建立该梯度涂层的有限元分析模型, 探讨梯度分布因子和涂层单层厚度对 SiC_p/Cu 梯度涂层残余应力的影响。结果表明: 较大的残余应力主要分布在梯度涂层与基体的界面边缘位置; 当梯度涂层层数为 4, 梯度分布因子为 1, 单层厚度为 0.6 mm 时, SiC_p/Cu 梯度涂层有较好的残余应力缓和效果。根据优化结果采用激光沉积法制备的 SiC_p/Cu 不同梯度层之间界面较为清晰, 结合良好; 与均质涂层相比, 其硬度和耐磨性分别提高了 23.2% 和 5.2%。

关键词 材料; 梯度材料; 激光沉积; 有限元分析; 残余应力

中图分类号 TG665

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1206002

Study on the Residual Stress of SiC_p/Cu Gradient Coating by Laser Deposited

Li Deying Zhang Jian Zhao Longzhi Wang Xinguo

Key Laboratory of Ministry of Education of Education for Conveyance and Equipment, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China

Abstract The residual stresses of SiC_p/Cu gradient coating by laser deposited are simulated using finite element software ANSYS. The finite element analysis model of the gradient coating is established. The residual stresses of SiC_p/Cu gradient coating are discussed based on the gradient distribution factor and the single layer thickness. The results show that the larger residual stresses are mainly distributed on the interface edge between the gradient coating and substrate. When the layer number is 4, the gradient distribution factor is 1, and the single layer thickness is 0.6 mm, the residual stress relaxation of SiC_p/Cu gradient coating is excellent. SiC_p/Cu gradient coating with clear interfaces and excellent combination between the different gradient layers is prepared by laser deposited based on the optimization results. Compared with the homogeneous coating, the hardness and wear resistance are increased by 23.2% and 5.2%, respectively.

Key words materials; graded materials; laser deposited; finite element analysis; residual stress

OCIS codes 160.3380; 350.3390; 350.3850

1 引 言

SiC_p/Cu 复合材料具有高导热、高强度和良好的耐磨性等显著优点, 在高速轨道交通领域具有广阔的应用前景^[1]。目前, SiC_p/Cu 复合材料常用的制备方法主要包括热压法^[2-3]、挤压铸造法^[4]、放电等离子法^[5]和粉末冶金法^[6]等。但用作高速列车制动材料的 SiC_p/Cu 复合材料含有高体积分数的 SiC 颗粒, 机械加工比较困难, 同时高体积分数的 SiC 降低了复合材料的导热性能, 提高了粘着磨损的概率, 降低了制动盘的制动效果和制动稳定性, 因此如何实现 SiC_p/Cu 制动盘材料的净成形和提高复合材料的导热性能, 成为该材料在高速列车制动系统应用的关键。

收稿日期: 2015-06-12; 收到修改稿日期: 2015-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(51265014)、江西省科技厅(20151BAB206044)、江西省教育厅(KJLD1404)、载运工具与装备教育部重点实验室资助项目(12JD04)

作者简介: 李德英(1985—), 女, 硕士, 实验师, 主要从事特种加工等方面的研究。E-mail: lideyingecjtu@163.com

激光沉积技术是利用激光束将具有不同成分的金属陶瓷粉末瞬间熔化于基材表面,以改善其耐磨、耐蚀等性能的表面强化技术,该技术具有基材变形小、复合涂层稀释率低、界面结合强等优点,一般不需要或很少需要热处理强化或二次熔浸等辅助工艺^[7-9]。同时为防止含高体积分数SiC颗粒的复合涂层与铜基体之间由于材料热物性不匹配而开裂失效,可采用应力缓和型功能梯度(FGM)设计方案,使涂层与基体连接区域的微观组织结构和性能呈梯度分布,以缓和应力集中现象^[10]。

将FGM的设计思想引入到激光沉积法制备SiC_p/Cu复合涂层中,通过精确控制SiC颗粒和铜混合粉末的输送和相应的工艺,从而实现材料组成、微观结构和性能沿涂层厚度方向呈梯度变化。利用有限元法对激光沉积SiC_p/Cu梯度涂层的残余应力进行分析计算,并根据优化结果采用激光沉积法制备出该梯度涂层。

2 FGM模型的建立

2.1 有限元模型

利用有限元软件Ansys建立了SiC_p/Cu梯度涂层的有限元模型,如图1所示。模型分为沉积件与基板两部分,沉积件尺寸为34 mm×4 mm×2.4 mm。沉积件部分单元类型采用八节点六面体单元Solid70,网格大小为1 mm×1 mm×0.6 mm。为了节省计算时间,提高计算效率,基板部分采用比较粗的网格划分,选择单元类型为Solid90。模拟单道多层的激光沉积过程,并且依据实际情况(如层厚等)对模型沉积件尺寸进行变更。应力应变分析时对基板底面和相邻两个侧面进行约束,采用双线性随动强化机制模拟材料非线性,同时材料服从Von Mises屈服准则。

2.2 材料参数确定

沉积件基板为铜板,FGM采用4层,沉积层表层体积分数为40%,由于制件在激光沉积过程中是逐层沉积上去的,在梯度分布设计中成分分布模型可用如下幂函数表示,这有利于热应力缓和^[11]:

$$\begin{cases} V_a(x) = \left(\frac{n_x}{n}\right)^P \\ V_b(x) = 1 - \left(\frac{n_x}{n}\right)^P \end{cases} \quad (1)$$

式中 V_a 和 V_b 分别为SiC和铜体积分数,且满足 $V_a + V_b = 1$, n 为总沉积层数, n_x 为第 x 层沉积层, P 为梯度分布因子。

根据(1)式可计算出不同梯度分布因子所对应的SiC体积分数,并绘制出在不同沉积层位置处的SiC体积分数变化曲线,如图2所示。

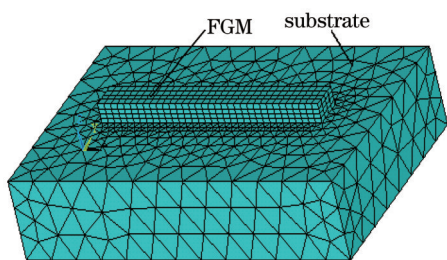


图1 SiC_p/Cu梯度涂层的有限元模型

Fig.1 Finite element model of SiC_p/Cu coating

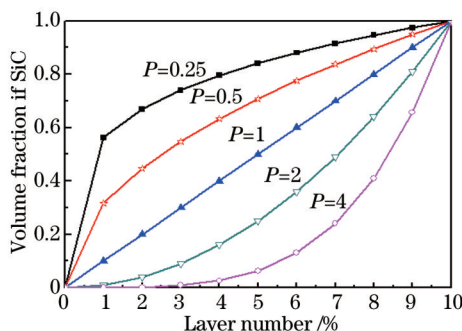


图2 SiC在梯度涂层中的体积分数

Fig.2 Volume fractions of SiC in coating

基于SiC_p/Cu梯度复合材料的设计原则,需确定SiC和铜在不同组分配比下梯度层的物性值,从而对梯度涂层的残余应力进行分析计算。SiC和铜的物理性能参数如表1所示。梯度沉积层内各点的物理性能由Voight模型的线性混合法则确定^[12],即

$$K(i) = V_a(i)K_a + V_b(i)K_b, \quad (2)$$

式中 $K(i)$ 为梯度涂层中第 i 层材料的物性参数, K_s 和 K_0 分别为 SiC 和铜的物性参数。

表 1 SiC 和铜的物理性能参数

Table 1 Physical performance parameters of SiC and Cu

Material	Thermal conductivity $\lambda /(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Specific heat $c /(\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Poisson ratio ν	Thermal expansion coefficient $\alpha / (10^{-6} \text{K}^{-1})$	Young's moduls E / GPa
SiC	61.63	655.69	0.16	4.3	450
Cu	405.5	385	0.34	16.7	126

3 结果与分析

3.1 梯度分布因子对残余应力的影响

在梯度涂层层数和厚度相同的条件下,梯度分布因子 P 不同,使梯度涂层的热物性参数过渡形式不同,从而造成梯度涂层内部的残余应力值及其分布不同。为分析梯度分布因子对残余应力的影响,从而获得最佳的 P 值,暂定梯度涂层层数为 4,单层厚度为 0.6 mm,取不同 P 值从而得到残余应力与梯度分布因子的关系,如图 3 所示。

图 3(a)和(b)所示分别为沿激光扫描方向梯度涂层表面和界面处的 x 方向应力,图 3(c)为沿梯度方向剪切应力。由图可知,梯度涂层表面和界面处的 x 方向应力主要表现为压应力,最大应力值位于界面处的边缘位置,故开裂易出现在界面边缘附近。由于涂层两端的边缘效应,涂层的首末两端存在明显的应力值起伏[见图 3(a)]。图 3(b)中沿激光扫描方向界面处 x 方向应力由压应力转变为拉应力,在界面边缘处再转变为压应力,同时图 3(c)中沿梯度方向剪切应力在第二层位置处也存在由压应力向拉应力转变,这种压应力和拉应力的突变极易造成脆性涂层的破坏。

从图中可以看出,随着梯度分布因子 P 值增大,涂层表面 x 方向应力和沿梯度方向剪切应力值逐渐减小,且沿梯度方向剪切应力在第一层位置处的突变量逐渐减小,在 $P=2$ 时突变量基本趋于零[见图 3(a)和(c)]。这是因为随着梯度分布因子的增大,梯度涂层各层中所含 SiC 的体积分数差值减少,使得梯度涂层热

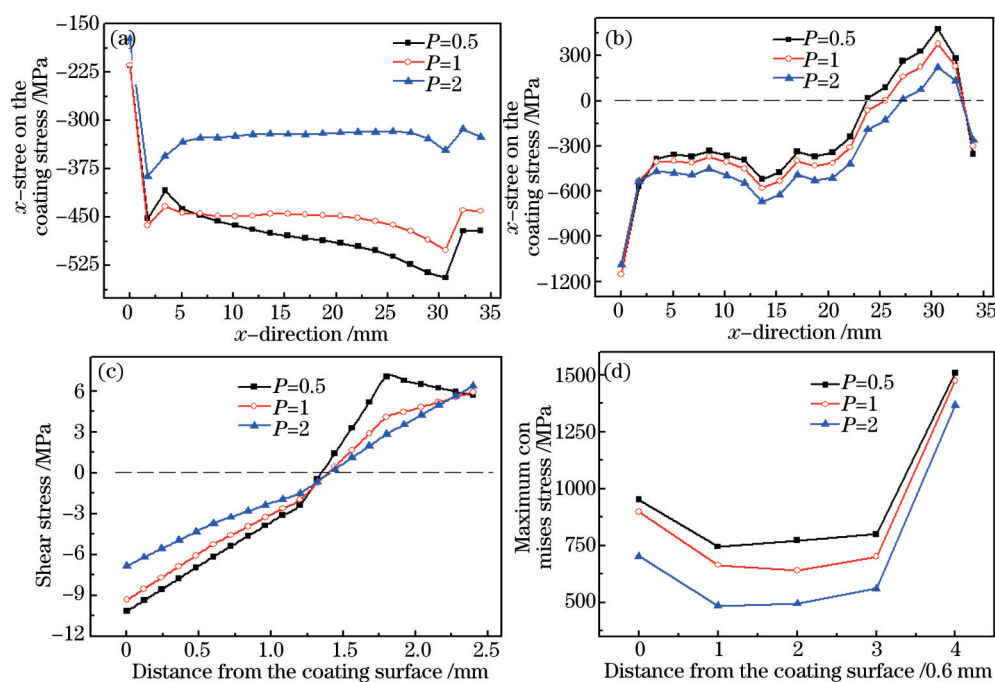


图 3 梯度分布因子对残余应力的影响。(a) 梯度涂层表面的 x 方向应力;(b) 梯度涂层界面处的 x 方向应力;
(c) 沿梯度方向剪切应力;(d) 最大 Von Mises 残余应力沿梯度方向的分布规律

Fig.3 Influences of gradient distribution factors on residual stress. (a) Stress of x -direction on the coating surface;
(b) stress of x -direction at the interface; (c) shear stress along z -direction; (d) maximum Von Mises stress along z -direction

物性参数差值减小,材料热匹配提高,因而涂层表面 x 方向应力值和沿梯度方向剪切应力值相应减小,同时沿梯度方向剪切应力值在第一层位置处突变量逐渐减小;而界面处 x 方向应力值先逐渐增大,然后逐渐减小[见图3(b)],这是因为随着梯度分布因子的增大,一方面弹性模量的降低有利于残余应力的减小,另一方面热膨胀系数的升高会导致残余应力增大,两者相互作用导致残余应力起伏变化。Von Mises 等效应力遵循第四强度理论,通常用来描述材料处于复杂应力状态下的应力水平,其值越小越好^[13]。图3(d)为最大 Von Mises 残余应力沿梯度方向的分布规律。由图可知, $P=2$ 时最大 Von Mises 残余应力值最小, $P=1$ 次之。另外通过对最大 Von Mises 残余应力值进行标准差统计计算得出, $P=0.5、1、2$ 时标准差分别为 285.45、312.56、331.35,说明 $P=0.5$ 时残余应力值起伏最小,应力分布最均匀,且 $P=1$ 次之。由以上分析并综合考虑到 SiC 含量的增加对梯度涂层耐磨性的强化作用,因而梯度分布因子选取 $P=1$ 较为合理,即当涂层中 SiC 的体积分数逐层线性增加时,梯度涂层中的残余应力较小且分布较均匀。

3.2 单层层厚对残余应力的影响

当梯度涂层层数为4,梯度分布因子为1时,残余应力与梯度涂层单层层厚的关系如图4所示。由图4(a)和(c)可知,随着梯度涂层厚度的增加,涂层表面 x 方向应力和沿梯度方向最大剪切应力逐渐降低,且残余应力降低的幅度逐渐减小,其主要原因是,随着梯度涂层厚度的增加涂层内部温度梯度降低,且温度梯度降低的幅度减小。因此,较厚的梯度涂层不易产生裂纹以及因剪切应力而引起的撕裂型或混合型失效。

由图4(b)和(d)可知,当梯度涂层单层层厚小于0.9 mm时,随着层厚的增加界面 x 方向压应力和沿梯度方向最大 Von Mises 应力值呈下降的趋势,显然层厚的增加有利于减小梯度材料中的残余应力;但当层厚从0.9 mm增加到1.2 mm时,界面 x 方向压应力和最大 Von Mises 应力值又有所增加。由此可见,适当增加梯度涂层厚度有利于缓和梯度涂层中的残余应力,在设计梯度涂层结构时应尽量避免涂层过薄或过厚。另外,通过对图4(d)进行标准差统计计算得出,当涂层单层层厚分别为0.3、0.6、0.9、1.2 mm时,其标准差分别为128.68、312.56、337.28、331.34,说明当涂层单层层厚 $d=0.3$ mm时残余应力值起伏最小,此时残余应力分布最均匀, $d=0.6$ mm时残余应力分布较为均匀。但由图4(d)可知,当 $d=0.3$ mm时最大 Von Mises 应力值最大,因而梯度涂层单层层厚选取0.6 mm左右较为合理。

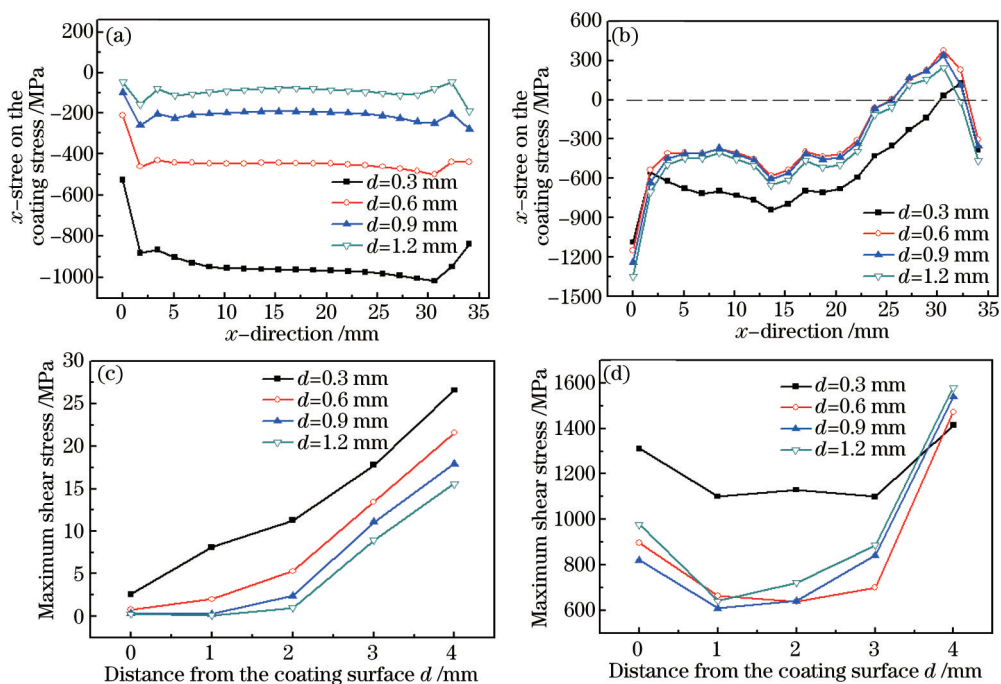


图4 单层层厚对残余应力的影响。(a) 梯度涂层表面的 x 方向应力; (b) 梯度涂层界面处的 x 方向应力; (c) 沿梯度方向最大剪切应力; (d) 最大 Von Mises 残余应力沿梯度方向的分布规律

Fig.4 Influences of single layer thickness on residual stress. (a) Stress of x -direction on the coating surface;

(b) stress of x -direction at the interface; (c) maximum shear stress along z -direction; (d) maximum Von Mises stress along z -direction

3.3 残余应力缓和效果评价

由上述分析可知,当梯度涂层层数为4,梯度分布因子为1,单层厚度为0.6 mm时,SiC_p/Cu梯度涂层可获得较好的残余应力缓和效果。将优化后的SiC_p/Cu梯度涂层与非梯度涂层(NFGM)的残余应力进行比较,结果如表2所示。

表2 梯度涂层与非梯度涂层残余应力缓和效果对比(单位: MPa)
Table 2 Comparison of residual stress relaxation between FGM and NFGM (unit: MPa)

Items	σ_x^{\min}	σ_y^{\min}	σ_z^{\max}	σ_z^{\min}	τ_{xy}^{\max}	τ_{xy}^{\min}	σ_{Maxes}^{\max}	T^{\max} (K)
FGM	-1206.7	-1206.7	32.7	-831.9	0.76	-8.88	897.9	1585
NFGM	-1681.4	-2305.4	54.5	-1151.6	1.57	-9.03	1094	1723
1-FGM/NFGM	0.282	0.257	0.6	0.278	0.516	0.017	0.179	0.08

与SiC_p/Cu非梯度涂层相比,梯度涂层的残余应力均有大幅度缓和,效果最明显的是z向拉应力(60%),其次是切向拉应力(51.6%),最后是x向压力应,同时梯度涂层等效应力缓和效果达到17.9%;另外梯度涂层的表面温度也有所降低(8%)。由此可见,合理设计梯度涂层的成分分布,可以明显改善梯度涂层表面的工作温度,有效缓和梯度涂层残余应力。

3.4 梯度涂层制备与性能

3.4.1 梯度涂层制备

实验采用200目(1目=0.075 mm)SiC粉末和200目663青铜粉作为沉积原料,利用激光沉积法制备SiC_p/Cu梯度涂层。为改变SiC_p与铜基体的表面润湿性以及降低激光对SiC_p分解现象,预先对SiC_p表面进行化学镀铜处理。将663青铜粉和Cu包覆SiC_p复合粉末按照上述优化结果逐层沉积到基板上,即取梯度涂层层数为4,梯度分布因子为1,涂层每层厚度控制在0.6 mm左右,其中SiC_p的体积分数分别为5%、10%、15%、20%,从而制备出SiC组成成分呈线性分布(即P=1)的SiC_p/Cu梯度涂层。同时,为便于对比分析,将相同含量SiC_p均匀分布制备成均质复合涂层,即梯度复合涂层与均质复合涂层的SiC_p总含量是一致的,通过计算得出均质复合涂层的SiC_p体积分数为12.5%。

将上述不同体积分数的SiC_p进行化学镀铜处理,然后在真空干燥箱中进行干燥处理。激光沉积设备采用YLS-4000-CL型光纤激光器以及6自由度式机械臂控制的激光实验操作平台。采用的激光沉积工艺为激光功率为700 W、激光扫描速率为8 mm/s,光斑直径为0.5 mm。

实验采用Tescan VEGAII LMH钨灯丝扫描电子显微镜观察涂层的微观结构形貌。采用XHV-1000Z数显维氏硬度计测量复合涂层表面显微硬度,选定载荷为0.5 kgf,加载时间为20 s,在复合涂层表面沿激光扫描方向每隔1 mm进行一次测量,同时为减小测量误差,在同一位置测量5次取平均值。采用M-2000型磨损实验机测定激光沉积层的耐磨性,磨损副材料为GCr15,主轴转速为200 rad/min,压力为300 N,持续磨损15 min后将试样取下进行称重,重复磨损称重4次。复合涂层的耐磨性用磨损量 η 来表示, η 越小,说明材料的耐磨性能越好。

3.4.2 梯度涂层性能

图5为SiC_p/Cu梯度涂层金相图片^[14]。从图中可以看出,采用激光沉积制备的SiC_p/Cu梯度涂层具有明显

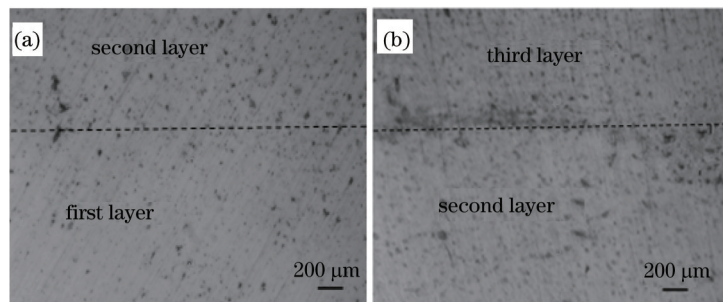


图5 SiC_p/Cu梯度涂层金相图^[14]
Fig.5 Diagrams of SiC_p/Cu gradient coating^[14]

的梯度分层结构,而且不同梯度层之间的界面较为清晰;梯度层之间结合良好,各层中SiC_p在铜基体中分布较均匀,未发现明显的裂纹和气孔等缺陷,激光沉积效果较好。

通过对激光沉积SiC_p/Cu均质复合涂层和梯度复合涂层进行显微硬度和耐磨性测试,测试结果见表3。均质复合涂层的平均显微硬度为112 HV,平均磨损量为10.2‰,而梯度涂层的平均显微硬度和平均磨损量分别为138 HV和9.7‰。与均质复合涂层相比,其硬度和耐磨性分别提高了23.2%和5.2%。由此可见, SiC_p/Cu梯度涂层的性能得到了较大提高。

表3 梯度涂层与非梯度涂层硬度和耐磨性对比

Table 3 Comparison of microhardness and wear resistance between FGM and NFGM

Items	M1 /HV	M2 /HV	M3 /HV	M4 /HV	Average 1 /HV	η_1	η_2	η_3	η_4	Average 2
FGM	126	141	137	148	138	9.8‰	9.2‰	9.7‰	10.1‰	9.7‰
NFGM	98	118	120	112	112	10.6‰	9.8‰	10.1‰	10.3‰	10.2‰
$1-\frac{\eta_{FGM/NFG}}{\eta_{FGM}}$	-	-	-	-	23.2%	-	-	-	-	5.2%

Note: M-microhardness; η -wear rate

4 结 论

1) 较大的残余应力主要分布在梯度涂层与基体的界面边缘位置;随着梯度分布因子 P 值增大,涂层表面 x 方向应力、沿梯度方向剪切应力和最大 Von Mises 应力逐渐减小,而界面处 x 方向应力值先逐渐增大,然后逐渐减小,最佳梯度分布因子可取 $P=1$ 。

2) 涂层单层厚度增加有利于缓和梯度涂层中的残余应力,但厚度越大界面 x 方向压应力和沿梯度方向最大 Von Mises 应力均增大,涂层最佳单层厚度为0.6 mm。

3) 当梯度涂层层数为4,梯度分布因子为1,单层厚度为0.6 mm时, SiC_p/Cu 梯度涂层有较好的残余应力缓和效果。与非梯度 SiC_p/Cu 涂层相比,其 z 向拉应力和切向拉应力缓和效果分别达到了60%和51.6%。

4) 根据优化结果采用激光沉积法制备的 SiC_p/Cu 不同梯度层之间的界面较为清晰,结合良好;通过性能测试发现该涂层的平均硬度和平均磨损量分别为138 HV和9.7‰,与均质涂层相比分别提高了23.2%和5.2%。

参 考 文 献

- 1 Shu K M, Tu G C. The microstructure and the thermal expansion characteristics of Cu/SiC p composites[J]. Material Science and Engineering A, 2003, 349(1): 236-247.
- 2 Zhan Yongzhong, Zhang Guoding, Zeng Jianmin. Tribological characteristics of copper hybrid composite at elevated temperature[J]. Tribology, 2006, 26(3): 421-426.
湛永钟, 张国定, 曾建民. SiC和石墨混杂增强铜基复合材料的高温摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(3): 421-426.
- 3 Zhan Yongzhong, Zhang Guoding. Tribological behavior of SiC particle reinforced copper matrix composites[J]. Tribology, 2003, 23(6): 495-499.
湛永钟, 张国定. SiCp/Cu 复合材料摩擦磨损行为研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(6): 495-499.
- 4 Xie Sujing, Cao Xiaoming, Zhang Jinsong. On the dry friction and wear properties of copper-matrix composites reinforced with 3D-mesh SiC[J]. Tribology, 2003, 23(2): 86-90.
谢素菁, 曹小明, 张劲松. 三维网络SiC增强铜基复合材料的干摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(2): 86-90.
- 5 Hu Cuixin, Zhang Xiuqing, Lü Yuting, et al.. Study on properties of SiCp/Cu composite prepared by spark plasma sintering[J]. Hot Workong Technology, 2013, 42(6): 117-124.
胡翠欣, 张修庆, 吕玉廷, 等. 放电等离子法制备SiCp/Cu复合材料及其性能研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(6): 117-124.
- 6 Xiong Xiang, Sheng Hongchao, Yao Pingping. Sintering pressure and temperatures of Cu-based aircraft brake materials[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(2): 206-212.
熊 翔, 盛洪超, 姚萍屏. 铜基航空刹车材料的烧结温度与烧结压力[J]. 中南大学学报, 2007, 38(2): 206-212.
- 7 Weng Ziqing, Dong Gang, Zhang Qunli, et al.. Effects of annealing on microstructure and properties of FeCrNiCoMn high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0303002.

- 翁子清, 董刚, 张群莉, 等. 退火对激光熔覆 FeCrNiCoMn 高熵合金涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0303002.
- 8 Zhao L Z, Zhao M J, Li D Y, *et al.*. Study on Fe-Al-Si situ composite coating fabricated by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(8): 3368-3372.
- 9 Verwimp J, Rombouts M, Geerinckx E, *et al.*. Application of laser clad WC-based wear resistant coatings[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 330-337.
- 10 Guo Shuangquan, Zhou Zhangjian, Feng Yunbiao, *et al.*. Simulation and analysis of the residual stresses in functionally graded tungsten coatings on 316L stainless steel[J]. Materials Review, 2010, 24(11): 68-72.
郭双全, 周张健, 冯云彪, 等. 316L 不锈钢基体表面钨功能梯度涂层残余应力的模拟分析[J]. 材料导报, 2010, 24(11): 68-72.
- 11 Cheng Xiyun, He Jun, Wang Rutuan. The structure design of function graded material coating and its application development[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35 (11): 111-114.
程西云, 何俊, 王如团. 梯度涂层结构设计制备及应用研究现状[J]. 润滑与密封, 2010, 35(11): 111-114.
- 12 Gong Wei, Zhou Liming, Wang Enze, *et al.*. Numerical simulation of the contact stress of functionally gradient glass-ceramic coatings on Q235 steel[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(2): 46-51.
龚伟, 周黎明, 王恩泽, 等. Q235 钢基体表面微晶玻璃功能梯度涂层接触应力的数值模拟[J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 46-51.
- 13 Gong Wei, Zhou Liming, Wang Enze, *et al.*. Finite element analysis of residual stresses on Y-TZP/LZAS glass-ceramic gradient coatings[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28(10): 787-793.
龚伟, 周黎明, 王恩泽, 等. Y-TZP/LZAS 微晶玻璃功能梯度涂层残余应力的有限元分析[J]. 材料研究学报, 2014, 28(10): 787-793.
- 14 Wang Xinguo. Prepared SiCp/Cu Functionally Gradient Materials by Laser Cladding[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2015: 50-55.
王新国. 激光熔覆制备 SiCp/Cu 梯度功能复合材料[D]. 南昌: 华东交通大学, 2015: 50-55.

栏目编辑: 张浩佳