

文章编号: 1001-3806(2017)01-0040-07

纯铜表面脉冲激光熔覆 Ni60 涂层的结构与性能研究

房永祥, 齐丽君*, 王珂, 王海林, 朱长虹, 朱广志, 朱晓

(华中科技大学 光学与电子信息学院 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 为了克服纯铜表面激光熔覆时热量难以积聚的困难, 得到冶金结合良好的 Ni60 熔覆层, 采用预热辅助脉冲激光熔覆的方法, 在纯铜表面进行了 Ni60 合金粉末的熔覆实验, 并建立了纯铜表面预热辅助脉冲激光熔覆过程的 3 维瞬态热弹塑性模型, 对温度场及残余应力进行了仿真。预热温度达到 573K 时, Ni60 熔覆层中裂痕完全消除; 预热温度为 673K 时, 激光熔覆的加工效率提升了 2.2 倍; 预热辅助脉冲激光熔覆得到的 Ni60 熔覆层平均硬度达到 800HV_{0.2}; 常温下, Ni60 熔覆层与 ASTM52100 钢相对耐磨性为 4.45, 摩擦系数约是铜和 ASTM 52100 钢的 57%。结果表明, 随着预热温度的升高, Ni60 熔覆层中裂纹减少, 激光熔覆效率提高; Ni60 熔覆层有效地提高了表面硬度, 减小了摩擦系数。通过预热辅助脉冲激光熔覆技术, 在纯铜表面制备得到无裂纹、无气孔的 Ni60 熔覆层, 可有效地提高铜基材的硬度与耐磨性。

关键词: 激光技术; Ni60 涂层; 预热辅助脉冲激光熔覆; 纯铜; 残余应力; 耐磨性

中图分类号: TG156.99 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.01.009

Investigation of structure and properties of Ni60 coatings on pure copper by pulsed laser cladding

FANG Yongxiang, QI Lijun, WANG Ke, WANG Hailin, ZHU Changhong, ZHU Guangzhi, ZHU Xiao

(National Engineering Research Center for Laser Processing, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In laser cladding, it was difficult to accumulate heat on the pure copper surface for forming effective metallurgical bonding between copper and Ni60 coatings. In order to overcome the difficulties, a method of pulsed laser cladding assisted with preheating was adopted. Laser cladding experiments on copper substrate were conducted, and a 3-D transient thermo-elastic-plastic model was developed to simulate the thermal process and residual stress. When the preheating temperature reached 573K, the cracks in Ni60 cladding layer were completely eliminated. The processing efficiency of laser cladding was increased 2.2 times when preheating temperature was 673K. The average hardness of the Ni60 coating obtained by laser cladding assisted with preheating was 800HV_{0.2}. Under normal temperature, the relative wear resistance of Ni60 coating and ASTM52100 steel was 4.45. Friction coefficient of Ni60 coating was 57% of ASTM52100 steel or copper. The results show that with the increase of the preheated temperature, the number of cracks in Ni60 coating decreases and processing efficiency of laser cladding increases. Also, the surface hardness of Ni60 coatings improves and friction coefficient decreases effectively. By pulse laser cladding assisted with preheating, Ni60 cladding layer on pure copper without cracks and air holes is obtained.

Key words: laser techniques; Ni60 coating; pulsed laser cladding with preheating; pure copper; residual stress; wear resistance

引言

铜及铜合金因其优异的导电导热性能而广泛应用于电子、电力、冶金、航空航天等领域^[1], 但是铜的硬度较低、耐磨性差, 严重影响其使用寿命。利用激光熔覆技术可以在铜表面制备出高性能涂层, 因此具有广阔的发展前景。但是铜具有导热率大、对激光吸收率

低等性质, 在纯铜表面激光熔覆时难以形成冶金结合。对此, 国内外的学者主要采用添加过渡层^[2-3]、预热基材^[4-5]等方法解决。为了直接在铜表面熔覆所需材料, 更为有效的方法是提高激光功率密度, 使用更高功率的连续激光器或高峰值功率的脉冲激光器。

与 CO₂ 激光器相比, Nd:YAG 脉冲激光器具有高峰值功率和铜吸收率更高的优势, 采用其作为熔覆热源^[6-10], 可以克服铜表面热量难以积聚的问题, 降低激光熔覆设备的成本。但在研究当中, 存在熔覆层易开裂、激光熔覆效率低的问题。

采用激光-感应复合熔覆这一新型激光熔覆方式,

作者简介: 房永祥(1991-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: qlj@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2015-12-29; 收到修改稿日期: 2016-02-26

可以解决熔覆层易开裂的问题,并能够有效提升激光熔覆的效率^[11-15]。但是,目前多采用连续激光器,需要较大的激光平均功率和较高的预热温度^[5,11-15],激光器成本较高且易造成基材变形。

本文中脉冲激光熔覆技术与辅助预热技术相结合,利用电磁感应加热装置将铜基材预热至一定温度后,采用 Nd:YAG 脉冲激光器在纯铜表面进行了 Ni60 粉末的熔覆实验,在激光平均功率为 750W、基材预热

温度超过 573K 时,就可以得到力学性能良好、无裂纹的 Ni60 熔覆层。

1 实验方法

实验用基材为铜含量 99.9% 的紫铜块,尺寸为 30mm × 30mm × 5mm。熔覆材料为 Ni60 合金粉末,成分见表 1。

实验装置如图 1 所示,实验中采用 750W 的 Nd:YAG

Table 1 Chemical composition (mass fraction) of Ni60 powder

w(C)	w(B)	w(Si)	w(Cr)	w(Fe)	w(Ni)
0.007 ~ 0.011	0.030 ~ 0.040	0.035 ~ 0.050	0.150 ~ 0.170	≤ 0.05	balance

脉冲激光器,激光光斑半径为 0.6mm,激光脉宽为 10ms,激光频率为 10Hz,激光平均功率为 750W,峰值功率为 7500W;激光光束扫描速率为 5mm/s,送粉速率为 0.46g/s,基材预热温度为 573K 或 873K。采用同轴送粉的方法,使用氩气将 Ni60 粉末从喷嘴吹入熔池内,喷嘴距离熔池的距离为 20mm。硬度检测及磨擦磨损性能检测采用的试样通过多道熔覆制成,搭接率为 33%。

实验中得到的 Ni60 熔覆试样经过标准金相处理后,使用王水腐蚀 30s ~ 40s 后,采用 ZEISS Axio Lab. A1 型光学显微镜观察微观组织。

熔覆层的硬度测量采用 HVS-1000 型维氏显微硬度计,负载为 200g,负载保持 15s。

熔覆层的室温摩擦磨损性能测量采用 BRUKER UTM-TriboLab 型摩擦实验平台进行测试,采用点面接触式往复摩擦的方法,上摩擦副为直径为 6.35mm 的 Si₃N₄ 陶瓷材料磨球,磨球与 Ni60 熔覆层进行往复摩擦,加载负载 45N,往复速率 10mm/s,时间 3h,总距离 108m。使用 ASTM52100 钢作为实验对比材料,测试实验均在 293K(室温)下进行。采用精度为 0.1mg 的天平对每次试验的磨损量进行称重,计算相对磨损量,从而计算出熔覆层的耐磨性能。

在实验结果的基础上,本文中对纯铜表面预热辅助脉冲激光熔覆 Ni60 合金粉末的过程进行了有限元仿真,并结合仿真结果,对实验中获得的不同预热温度下,冷却速率、熔池形貌、裂纹产生等进行了对比分析。

2 纯铜表面预热辅助脉冲激光熔覆过程的数值模拟

2.1 有限元模型

图 3 为有限元模型和网格划分示意图,铜基材为 30mm × 30mm × 5mm 的长方体,熔覆层尺寸为 20mm × 2mm × 0.5mm。为了保证计算的准确性且考虑计算时间,在靠近熔覆层的部分进行网格细化。

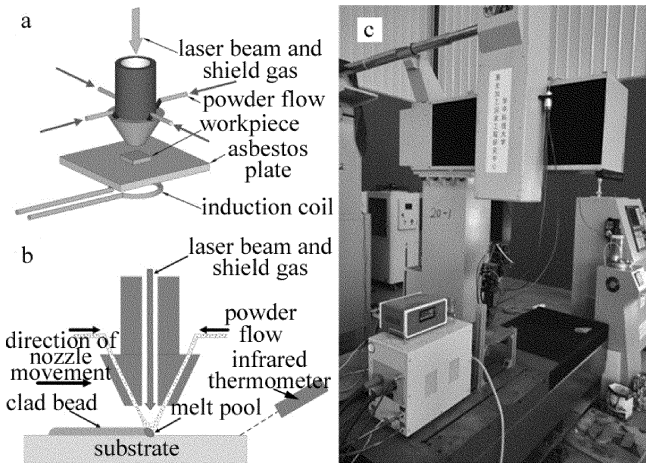


Fig. 1 Schematic graph of laser cladding instruments

图 2 是根据上述工艺参量在铜表面得到的 Ni60 熔覆层试样。图 2a 是预热温度分别为 293K, 473K, 673K, 873K, 1073K 时得到的单道激光熔覆试样;图 2b 是预热温度为 573K 下的多道熔覆试样,熔覆层厚度为 2mm。

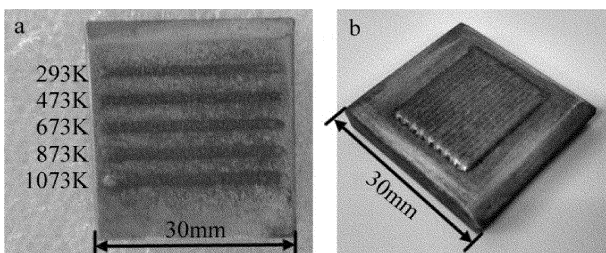


Fig. 2 Samples of Ni60 coating deposited on pure copper by laser cladding a— single track b— multi-track

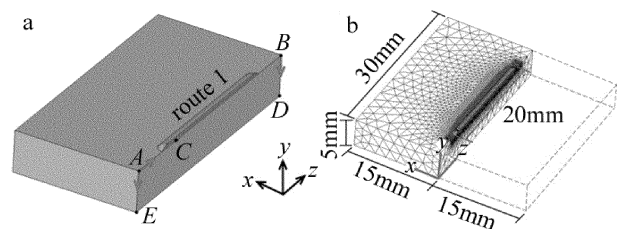


Fig. 3 Schematic graph of finite solid model and mesh model

温度场与应力场分析过程中,采用生死单元技术

模拟熔融粉末的添加:先将整个熔覆层的单元全部杀死,在求解过程中再使用 APDL 循环语句实现单元的再生。瞬态热分析采用 solid70 单元类型,应力分析采用 solid185 类型和双线性随动弹塑性模型计算。

2.2 温度场分析

激光的能量分为两部分:一部分激光被粉末阻挡,将粉末颗粒熔化或部分熔化;另一部分激光到达基材表面,形成熔池。本文中通过将熔覆层的初始温度设为熔化温度模拟第一部分能量;通过施加体热源的方式模拟第二部分能量,因为本文中激光熔覆采用的激光脉宽为 10ms,脉冲间隔为 90ms,在下一激光脉冲到达熔池之前,上一脉冲引起的不均匀温度分布已经达到平衡,因此采用椭球热源模型,如图 4 所示。

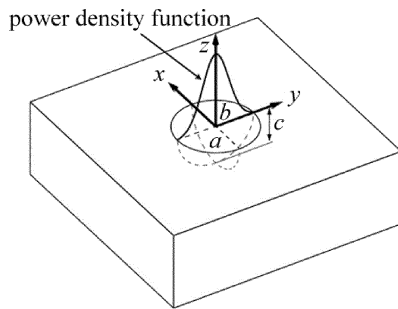


Fig. 4 Schematic diagram of heat source

若采用单纯激光熔覆的方式,铜基材的初始温度 $T_{\text{initial}} = 293\text{K}$;若采用预热的方式, $T_{\text{initial}} = 573\text{K}$ 或 $T_{\text{initial}} = 873\text{K}$ 。

热学边界条件包括热传导、热对流和热辐射,表达式见下^[16]:

$$\begin{aligned}
 & -k(T) \times (\nabla T \times \mathbf{n})|_{\Omega} = \\
 & \begin{cases} h(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) - Q_{\text{laser}}, (\Omega \in \Gamma) \\ h(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4), (\Omega \notin \Gamma) \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中, \mathbf{n} 为表面的法向量, h 为自然对流系数(单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), ε 为斯特藩-玻尔兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4)$), σ 为材料的发射率, Q_{laser} 为激光热源, Γ 为光斑的面积, T 为基材表面的温度, T_0 为环境温度。

将式中热对流与热辐射合并为一项,即:

$$h(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) = h_c(T - T_0) \quad (2)$$

式中, h_c 为铜的传热系数。本文中通过实验测量 h_c 的近似值。实验过程为:采用图 1 所示的实验装置,将铜块加热至 1073K,测量铜块自然冷却过程中随时间变化的温度曲线,结合铜块的表面积,可以近似计算出 h_c 随温度变化的值,结果如表 2 所示。

考虑到对称性,还需要在对称面 ABDE(见图 3a)施加绝热条件;工件的底面与石棉板接触,近似看成绝

Table 2 Temperature vs. heat transfer coefficient of copper

temperature/K	293	573	673	773	873	973	1073
coefficient of heat convection/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	17	33.1	37.1	45.2	68.9	101.1	141.8

热,底面施加绝热条件。

2.3 残余应力分析

激光熔覆过程中残余应力产生的主要原因为:激光与材料作用产生的温度梯度引起的热应变,弹性形变、塑性形变、固态相变引起的体积变化。本文中采用热弹塑性模型计算,只考虑材料的热应变、弹性形变与塑性形变。

熔覆层材料参考温度取为熔点温度 1573K,基材参考温度取为环境温度 293K。激光熔覆前将铜基材加热至 1073K,利用感应加热器进行缓冷,释放基材的余应力。

U_x, U_y, U_z 代表位移在宽度、高度、和长度方向的分量,考虑对称性,在面 ABDE(见图 3a),分别为施加位移 $U_x = 0$ 的约束条件。为了防止模型发生刚性移动,在 A 点施加 $U_y = 0, U_z = 0$ 的位移约束条件,在 B 点施加 $U_y = 0$ 的位移约束条件,这样既不影响基材的自由膨胀,又能够防止出现残余应力非线性求解过程中出现不收敛的问题。

2.4 材料热力学性质

模拟中采用的铜与 Ni60 粉末的热传导系数、比热容、线性膨胀系数、弹性模量、屈服应力随温度变化的数值,低温部分参考了参考文献[17]~参考文献[19],

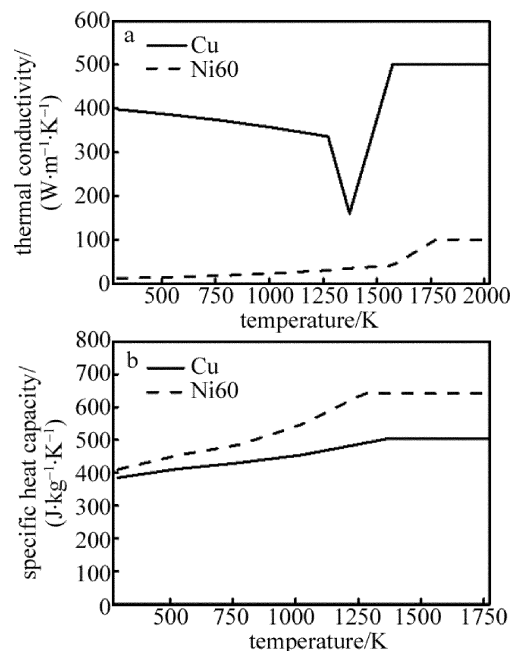


Fig. 5 Temperature vs. thermal properties of Cu and Ni60 powder
a—thermal conductivity b—specific heat

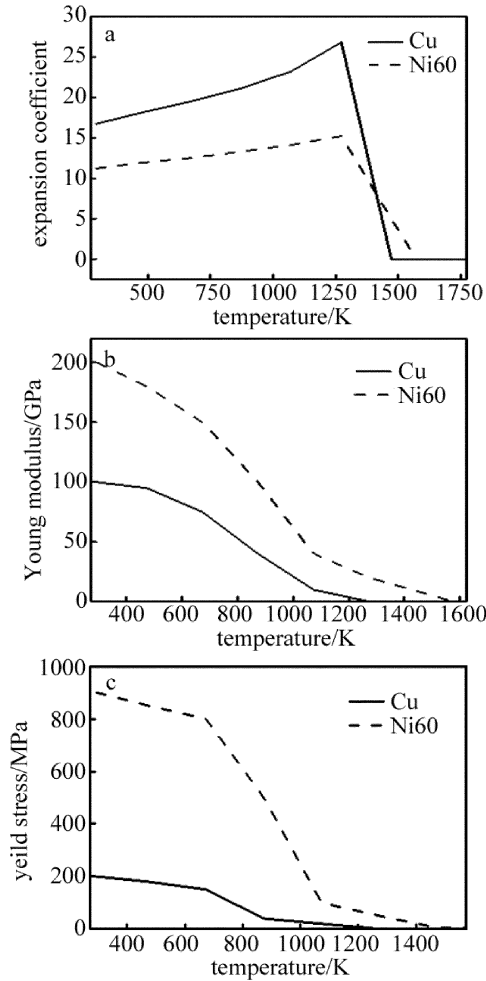


Fig. 6 Temperature vs. mechanical properties of Cu and Ni60 powder
a—linear expansion coefficient b—Young's modulus c—yield stress

高温部分根据变化趋势进行了估算。根据参考值和估算值所绘制的随温度变化曲线如图 5 和图 6 所示。

铜的熔点约为 1340K, 采用参考文献[20]中的方法计算 Ni60 粉末的熔点约为 1573K。不考虑材料密度与泊松比随温度的变化, 取铜的密度为 8890kg/m^3 , 泊松比为 0.31^[17]。Ni60 粉末的密度为 7600kg/m^3 , 泊松比为 0.30^[18]。残余应力计算中需要用到材料的切线模量, 将其取为 100MPa ^[21]。假设添加到铜基材上熔化的粉末是液态, 在粉末凝固之前的应变对于最终的残余应力分布没有贡献, 因此温度大于熔点时线性膨胀系数设为零。

3 实验结果与仿真结果分析

3.1 预热温度对熔池冷却速率的影响

在激光熔覆过程中, 合适的冷却速率对于熔覆层的机械性质具有重要作用^[14]。实验中采用的 Nd:YAG 激光器, 平均功率密度达到 $6.6 \times 10^8\text{W/m}^2$, 熔池短时间内达到一个很高的温度, 而且基材铜的导热性较好, 在熔池内部冷却速率大。Ni60 粉末的强化机制是固溶

强化, 较高的冷却速率虽然可以细化晶粒提高熔覆层性能, 但是冷却速率过高会使得熔覆层内部残余应力较大, 产生裂痕。将基材预热可以将冷却速率降低到一个合适的范围, 克服裂痕问题并保证一定的冷却速率以得到良好的微观组织。

根据实验仿真参量设置为: 激光功率 $P = 450\text{W}$, 激光脉宽 $\Delta t = 10\text{ms}$, 激光频率 $f = 10\text{Hz}$, 扫描速率 $v_s = 5\text{mm/s}$ 。模拟的熔覆层长度为 20mm , 模拟激光作用时间为 $0\text{s} \sim 4\text{s}$, 计算 40 个脉冲作用的过程, 由于每个脉冲作用时, 熔池温度上升下降曲线相似, 作者取一个脉冲作用过程对熔池冷却速度进行研究。

图 7 为不同预热温度下, 第 5 个激光脉冲作用过程中的熔池温度变化仿真曲线与冷却速度。图 7a 为熔池 C 点温度随时间变化曲线; 图 7b 为不同预热温度下, 熔池 C 点的温度从 1573K 降低到 1073K 过程的冷却速率 v_c 。

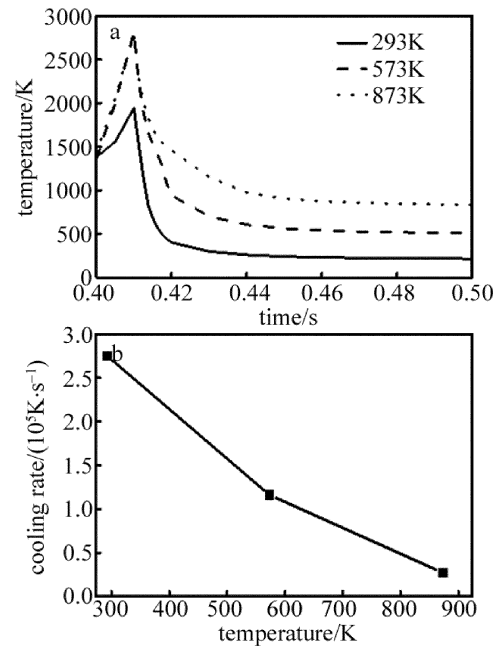


Fig. 7 Simulated temperature evolution vs. cooling rate of melt pool during the fifth laser pulse
a—simulated temperature evolution b—simulated cooling rate of melt pool

从图 7 中可以看出: 不预热时, 冷却速度 $v_c = 2.75 \times 10^5\text{K/s}$, 当预热温度分别为 573K 和 873K 时, v_c 分别为 $1.16 \times 10^5\text{K/s}$ 和 $0.27 \times 10^5\text{K/s}$, 分别降低了 1.4 倍和 9.2 倍。因此, 基材预热会导致熔池冷却速度变慢, 带来熔池凝固速度降低。

图 8 分别为不同预热温度下的 Ni60 熔覆层微观组织, 金相显微镜的放大倍率为 1000 倍。而在从图中可以观察到: 单纯采用脉冲激光熔覆时, 熔覆层中的晶粒十分的细小 (见图 8a), 采用基材预热的方法之后, 熔覆层中的晶粒明显变大 (见图 8b 和图 8c), 基材预

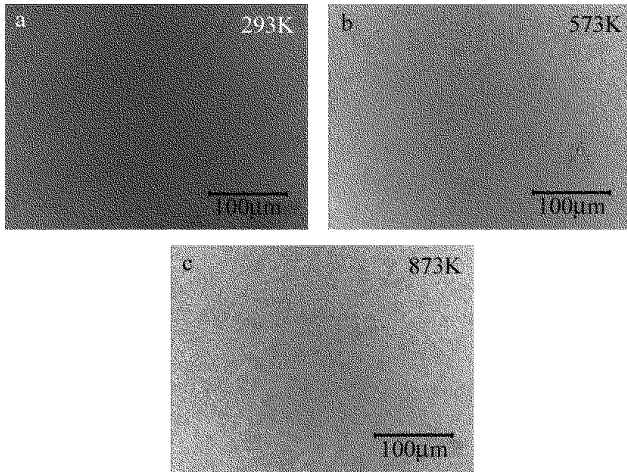


Fig. 8 Microstructure of the clad under different initial temperatures

热温度为 873K 时,晶粒比预热温度为 573K 时晶粒更大。这是因为随着预热温度升高,熔池冷却速率降低,晶粒的生长时间更长,因此晶粒尺寸更大。

3.2 预热温度对熔覆层尺寸和激光熔覆加工效率的影响

图 9 为不同预热温度下的熔池的宽度与深度仿真值,随着预热温度的升高,熔池的深度和宽度增加,预热温度为 873K 时,熔覆层深度为单纯采用激光熔覆深度的 2 倍左右。这是因为基材预热温度提高后,熔覆区域温度梯度下降,热量扩散速度减慢,使得熔池的尺寸变大,这就克服了铜的热导率过大导致热量难以积聚的困难。

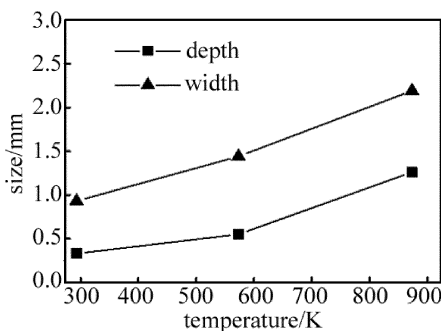


Fig. 9 Simulated width and depth of single clad under different preheated temperatures

图 10 为实验得到的不同送粉速率 v_p 下,熔覆层高度和宽度随预热温度的变化曲线。从图中可以看出,增加预热温度可以有效地提高熔覆层的宽度与高度,预热温度为 873K 时,熔覆层深度为单纯采用激光熔覆高度的 2 倍左右,与熔覆层深度的仿真结果一致。原因主要是预热温度升高后,熔池的尺寸变大,同时熔池存在的时间变长,因此在熔覆过程中能够吸收熔化更多的粉末,从而使熔覆层的宽度与高度增加。

在激光的扫描速率相同情况,本文将熔覆层宽度与高度的乘积作为激光熔覆效率的标准,见下:

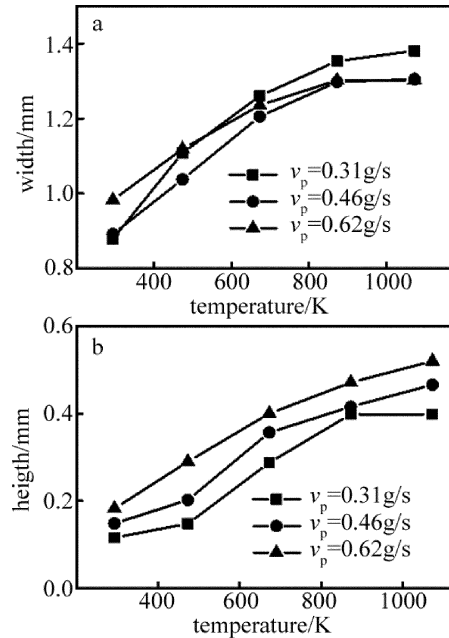


Fig. 10 Measurement height and width of single clad under different powder rates and preheated temperatures

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{W_1 \cdot H_1}{W_2 \cdot H_2} \quad (3)$$

式中, η_1, η_2 分别为两次熔覆的熔覆效率, W_1 和 W_2 分别为两次熔覆的熔覆层宽度,而 H_1 和 H_2 分别为两次熔覆的熔覆层高度。在此定义下,根据图 10 中的实验数据,与不预热相比,在预热温度分别为 473K, 673K, 873K 和 1073K 情况下,激光熔覆效率分别提升了 0.6 倍、2.2 倍、3.1 倍、3.6 倍。因此感应预热有效地提升了脉冲激光熔覆的效率。

3.3 预热温度对熔覆层裂痕产生的影响

激光熔覆过程中,由于激光热源产生的温度梯度,以及铜与 Ni60 材料热膨胀系数等热力学性质的差异,会使熔覆层内产生拉应力。当应力达到一定极限时,熔覆层会产生裂纹。

熔池在熔融状态时,熔池部分受热膨胀,受到周围低温区域的约束,由于熔覆层的弹性模量与屈服应力近似为零,熔池内部压应力值较小。在熔池冷却过程中,温度开始下降,熔池部分开始收缩,受到周围固体区域的约束,会产生拉应力。通过将基材预热,基材最终与熔覆层一同冷却至室温,可以消除熔覆层内部拉应力。

图 11 是预热温度为 293K 和 573K 时残余应力沿路径 1 的分布的仿真曲线图,图中 S_x, S_y, S_z 分别代表熔覆层的宽度、高度和长度方向的应力,应力值为正时代表拉应力,应力值为负时代表压应力。

从图中可以看出:基材不预热时,沿熔覆层长度方向的应力 S_z 为较大的拉应力,平均值达到 550MPa;沿

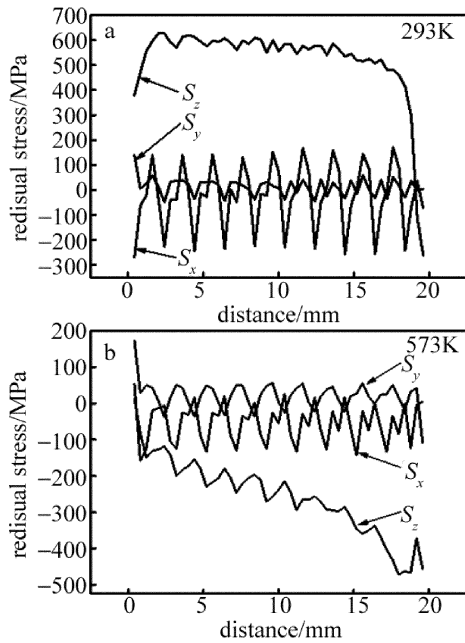


Fig. 11 Residual stress of the clad under different initial temperatures
 熔覆层宽度方向应力 S_x 值的是波动的,拉应力与压应力循环出现,拉应力值最大达到约 150MPa;沿熔覆层高度方向应力 S_y 值则较小。基材预热温度为 573K 时, S_z 与 S_x 均为压应力, S_y 主要表现为拉应力,但是应力值较小,最大仅为约 50MPa。说明在基材不预热时,拉应力更大,更容易产生裂痕。

图 12 是实验得到的单纯激光熔覆、预热温度为 573K 和 873K 时熔覆层裂痕形貌图。从图中可以观察到:只采用脉冲激光熔覆得到的熔覆层裂痕数量多,宽度大,质量不符合要求;而采用基材预热后再激光熔覆(预热温度为 573K 和 873K),得到的熔覆层基本没有裂痕产生。

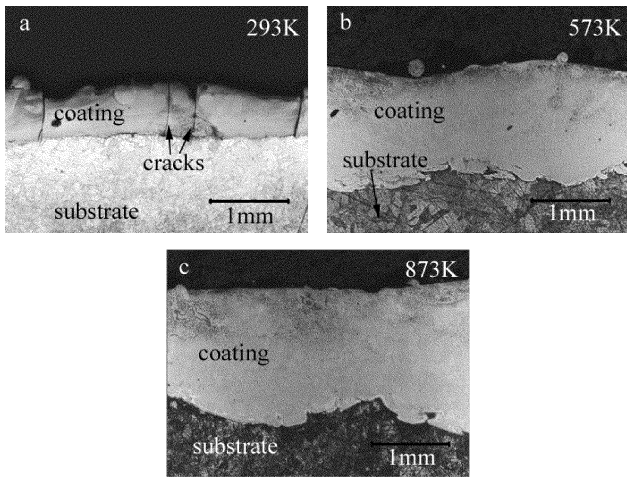


Fig. 12 Cracks under different initial temperatures

3.4 Ni60 熔覆层的显微硬度与摩擦磨损性能检测

图 13 为熔覆层显微硬度沿深度 y 方向分布的实验曲线图,从图中可以得到: Ni60 熔覆层的硬度最高

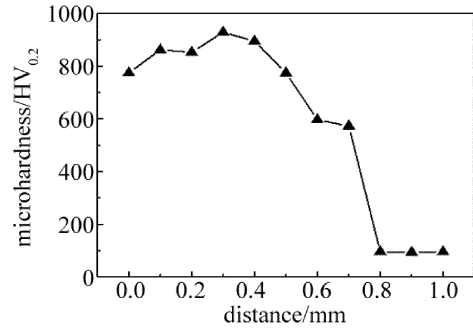


Fig. 13 Microhardness of Ni60 clad along depth direction
 达到 920HV_{0.2},平均硬度达到 800HV_{0.2},与铜基材相比,表面硬度提高了 8 倍。

利用精度为 0.1mg 的天平分别对 ASTM52100 钢和 Ni60 熔覆层样品的磨损失重进行测量,得到: ASTM52100 钢样品的磨损失重为 4.9mg, Ni60 熔覆层样品的磨损失重为 1.1mg,相对耐磨性为 4.45。

图 14 为铜、ASTM52100 钢和 Ni60 熔覆层样品与陶瓷磨球的摩擦系数关系图。铜与 ASTM52100 钢在常温下的摩擦系数约为 0.7,而 Ni60 熔覆层的摩擦系数仅为 0.4 左右。这说明 Ni60 熔覆层起到了有效的减摩效果。

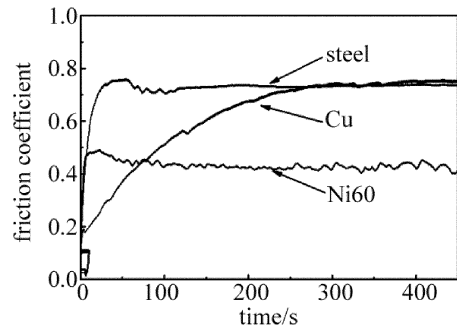


Fig. 14 Measurement curve of friction coefficient of steel, copper and Ni60 cladding coating

4 结论

(1) 采用预热基材的方法,利用平均功率 750W、单脉冲能量 75J 的 Nd:YAG 脉冲激光器,在纯铜表面得到了具有良好冶金结合的 Ni60 熔覆层。

(2) 预热辅助脉冲激光熔覆能够降低熔覆层与铜基材的残余应力大小,在预热温度达到 573K 以上时,铜表面 Ni60 熔覆层不产生裂纹;预热温度为 673K 时,与不预热相比激光熔覆的加工效率提升了 2.2 倍。

(3) 预热辅助脉冲激光熔覆得到的 Ni60 熔覆层的硬度最高达到 920HV_{0.2},平均硬度达到 800HV_{0.2},相比于铜基材,表面硬度提高了 8 倍。在常温下,得到的 Ni60 熔覆层与 ASTM52100 钢的相对耐磨性达到 4.45 倍;与 Cu 基材或者 ASTM52100 钢相比,摩擦系数降低了约 43%。

参 考 文 献

- [1] LI M Y. Study on laser surface modification of copper [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013; 1-3 (in Chinese).
- [2] CHEN S Y, LIANG J, LIU C S, *et al.* Preparation of a novel Ni/Co-based alloy gradient coating on surface of the crystallizer copper alloy by laser [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 258(4): 1443-1450.
- [3] LIU F, LIU C, CHEN S Y, *et al.* Laser cladding Ni-Co duplex coating on copper substrate [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2010, 48(48): 792-799.
- [4] ZHANG Y Z, TU Y, XI M Z, *et al.* Characterization on laser clad nickel based alloy coating on pure copper [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(24): 5924-5928.
- [5] TIAN F J, LIU W J, SHANG X F. Study on Ni60A coating on copper by laser cladding [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2008, 33(12): 35-37 (in Chinese).
- [6] LIU F, LIU C S, CHEN S Y, *et al.* Pulsed Nd:YAG laser post-treatment Ni-based crack-free coating on copper substrate and its wear properties [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 201(14): 6332-6339.
- [7] YAN H, WANG H. Nd:YAG laser cladding Ni base alloy/nano-h-BN self-lubricating composite coatings [J]. *Materials Science and Technology*, 2010, 26(4): 461-468.
- [8] CHEN S Y, DONG J, CHEN J. Nano-particles reinforced Co-based gradient coating with high wear resistance prepared in-situ by laser on surface of crystallizer copper alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 0703006 (in Chinese).
- [9] LI Y, ZHANG Y Z, HUANG C, *et al.* Microstructure and electric conductivity of laser clad TiB₂/Cu coating on pure copper [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 585-588 (in Chinese).
- [10] YAN H, ZHANG J, ZHANG P L. Laser cladding of Co-based alloy/TiC/CaF₂ self-lubricating composite coatings on copper for continuous casting mold [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 232: 362-369.
- [11] ZHOU S F, ZENG X Y, HU Q W, *et al.* Process study of Ni-based WC composite coatings by means of laser-induction hybrid cladding [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(2): 124-126 (in Chinese).
- [12] ZHOU S F, DAI X Q, ZHENG H Z. Characteristics on structure and properties of WC Ni60A coatings by laser cladding and laser induction hybrid cladding [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(7): 113-118 (in Chinese).
- [13] ZHOU S F, ZHANG T Y, XIONG Z, *et al.* Investigation of Cu-Fe-based coating produced on copper alloy substrate by laser induction hybrid rapid cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 59(7): 131-136.
- [14] FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Laser cladding assisted with an induction heater (LCAIH) of Ni-60% WC coating [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 222: 244-258.
- [15] FARAHMAND P, LIU S, ZHANG Z, *et al.* Laser cladding assisted by induction heating of Ni-WC composite enhanced by nano-WC and La₂O₃ [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(10): 15421-15438.
- [16] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, CORBIN S. Laser cladding [M]. New York, USA: CRC Press, 2005; 88-96.
- [17] DAVIS J R. ASM specialty handbook: copper and copper alloys [M]. Materials Park, USA: ASM International, 2001; 446-452.
- [18] DAVIS J R. ASM specialty handbook: nickel, cobalt, and their alloys [M]. Materials Park, USA: ASM International, 2000; 36-37.
- [19] LIDE D R. Handbook of chemistry and physics [M]. New York, USA: CRC Press, 2003, 12: 190-219.
- [20] CHEN E P. Method and empirical formula to calculate melting point of the iron-based, nickel-based and cobalt-based alloy [J]. *Special Steel*, 1992, 13(2): 28-30 (in Chinese).
- [21] RHODIN M. Calculation of welding deformations in a pipe flange master's thesis in applied mechanics [D]. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2012; 17-18.