

工艺参数对铜基激光熔覆层组织及耐磨性的影响

任振安, 郭作兴, 吴山力

(吉林大学, 长春 130025)

摘 要: 采用激光加工方法在 45 号钢基体上熔覆表面铜合金涂层, 试验研究了激光加工工艺参数(激光功率、扫描速度)对熔覆层组织特点和耐摩擦磨损性能的影响规律。试验发现, 激光功率较大或扫描速度较慢时熔覆层中出现了富铁相, 其形态分为球状和枝晶状两种, 球状富铁相一般出现在熔覆层中上部, 枝晶状富铁相一般出现在熔覆层底部, 富铁相中一般含有少量的铜和锡, 有的富铁相冷却时转变为马氏体组织。富铁相对铜合金熔覆层与 40Cr 摩擦副摩擦磨损不利, 但是对铜合金熔覆层与硬质合金摩擦副摩擦磨损有利。

关键词: Cu 基合金; 激光熔覆; 表面涂层; 摩擦磨损

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2002)01-69-04



任振安

0 序 言

激光熔覆是 70 年代发展起来的新的材料表面改性技术^[1], 国内外广泛开展了激光熔覆技术的研究与应用工作^[2~5]。基体材料包括各种钢、铁、铝合金、钛合金等, 熔覆材料有纯金属粉及其混合物和常见的铁、镍、钴基合金粉。还广泛开展了在镍、钴基粉中加入 WC、TiC、SiC、TiN、Cr₃C₂、TiB₂ 及 B₄C 等硬质点获得复合涂层, 激光熔覆 Al 基 SiC、Ti 基 TiN、SiC 等类型的复合涂层, 及 ZrO₂ 热障层等研究工作。研究目的是提高机械零件的表面耐磨、耐蚀及耐热等性能。

铜合金具有良好的耐磨性和耐蚀性, 是制造许多重要机械零件必需的材料。常规工艺均采用整体成型, 成本较高。为了节省材料, 降低加工成本, 可以采用激光熔覆等加工技术获得铜基合金表面涂层^[6]。因此, 采用激光熔覆技术在铁基材料上获得耐磨性与耐蚀性良好的铜基合金涂层具有一定的学术价值和应用价值。

1 试 验

基体材料为 45 号钢, 规格为 110 mm×80 mm×12 mm, 表面磨削加工后备用。熔覆材料为上海斯克焊材有限公司生产的铜基喷熔用合金粉末 F 422, 其形貌见图 1, 化学成分(质量分数, %)为

9.0~11.0Sn, 0.10~0.50P, 余为 Cu, 规格为 150~300 目。

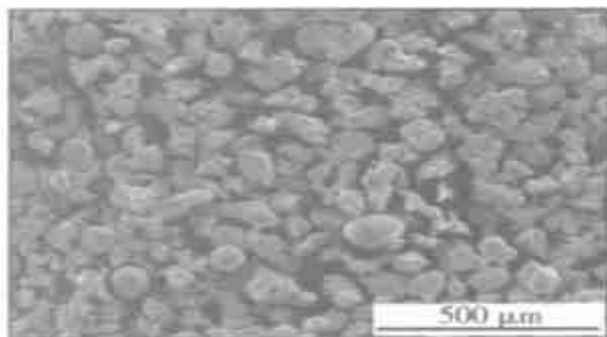


图 1 铜基合金粉末形貌

Fig. 1 Morphology of Cu-alloy powder

首先将待熔覆的铜基粉末用松香酒精作为粘结剂, 利用自制小模具, 在每块钢基体上均匀涂敷尺寸为 85 mm×28 mm×1.2 mm 的两个预敷层, 100℃烘干后待用。

在哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室进行激光熔覆试验, 激光器为德国的 2 kW 的 RS1700SM 型二氧化碳激光器。光斑直径 φ3 mm, 在预敷层上进行多道扫描, 搭接量为 0.5 mm, 熔覆时吹少量氩气进行保护。

激光熔覆后的试样, 首先进行宏观观察, 然后做熔覆层的截面金相试样和表面磨损试样。金相试样经化学和电化学腐蚀后, 在 VIDAS 图像分析系统上进行组织观察与分析。对典型试样在 JSM-5310 型扫描电镜上进行观察分析, 并用 Link-ISIS 能谱仪进行微观成分分析。

在 MM-200 型摩擦磨损试验机上进行干摩擦

磨损试验, 试样尺寸为 14 mm×10 mm×10 mm。为了反映铜基合金熔覆层与不同配对摩擦副的摩擦磨损特性, 采用 40Cr 调质钢和硬质合金两种磨轮进行对比试验。试验参数为: 正压力 $P=80\text{ N}$, 磨轮尺寸 $\phi 50\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, 低速档, 干摩擦时间为 5 min (40Cr 磨轮) 或 10 min (硬质合金磨轮), 采用摩擦系数 μ 及试样失重 ΔW 评价试件的摩擦磨损特性。

摩擦系数 μ 的计算公式为

$$\mu=M/Pr,$$

式中: M 为摩擦力矩, 实际测定值, 单位 $\text{N}\cdot\text{m}$; P 为正压力, 80 N; r 为磨轮半径, 25 mm。

试验中注意, 开始时摩擦力矩不稳定, 待其稳定后再记录数据。试验中分别记录试验时间为 2, 3, 4 min (40Cr 磨轮) 和 4, 6, 8 min (硬质合金磨轮) 时的摩擦力矩数据, 再取平均值作为实际测定值。

2 工艺参数对熔覆层成分与组织的影响

2.1 试验结果

扫描速度为 200 mm/min, 激光功率变化范围为 700~1 500 W, 试验激光功率对熔覆层成分与组织的影响规律。图 2 为不同激光功率下的典型熔覆层金相组织, 可见, 激光功率较低时为细小均匀的树枝晶; 激光功率较高时, 树枝晶变得粗大了。在低倍下用能谱仪测得熔覆层成分结果见表 1。可见, 随着

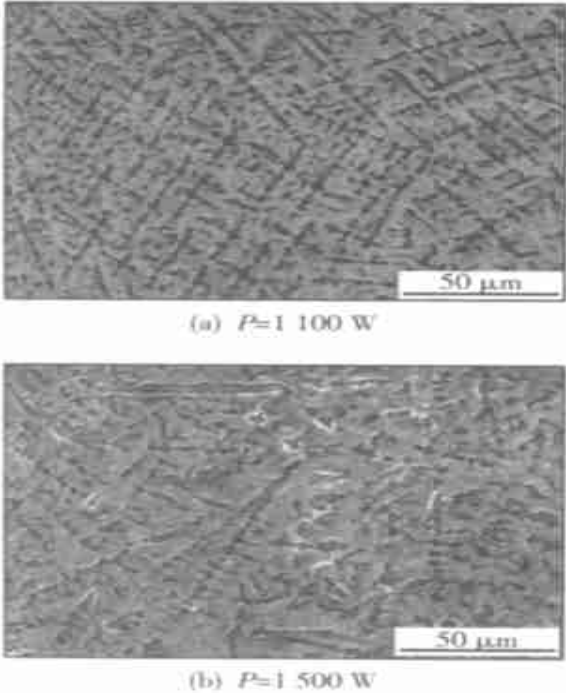


图 2 激光功率对熔覆层金相组织的影响
Fig. 2 Effect of laser power on the microstructure of coatings

激光功率的增加, 熔覆层含铁量不断增加, 铜与锡含量逐渐下降, 尤其是当激光功率增加到 1 500 W 时, 熔覆层含铁量高达 16.04%。

表 1 激光功率对熔覆层成分的影响(质量分数, %)

Table 1 Effect of laser power on the composition of coatings					
Laser power P/W	700	900	1 100	1 300	1 500
Cu	88.53	88.48	87.85	84.87	76.08
Sn	10.98	10.66	10.40	9.40	7.88
Fe	0.49	0.86	1.75	5.73	16.04

高倍观察发现, 铜基合金熔覆层中出现了形态不同, 数量不等的富铁相。当激光功率在 1 100 W 以下时, 熔覆层富铁相较少, 尺寸也较小; 当激光功率在 1 300 W 以上时, 熔覆层富铁相较多, 尺寸也较大。

在熔覆层上部的富铁相多为球状(见图 3), 而在熔覆层底部则多为枝晶状(见图 4)。富铁相的出现必将使熔覆层的性能发生变化。



图 3 球状富铁相
Fig. 3 Spheroidal iron-rich phase

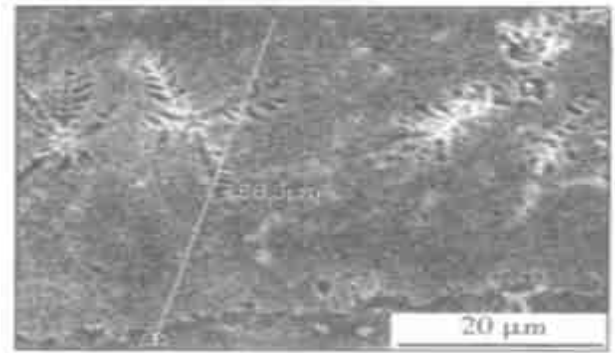


图 4 枝晶状富铁相
Fig. 4 Dendritic iron-rich phase

在激光功率为 1 100 W 条件下, 选择扫描速度为 100 mm/min、200 mm/min、300 mm/min、400 mm/min、500 mm/min、700 mm/min, 试验扫描速度对熔覆层成分与组织的影响。与图 3 熔覆层组织相比, 扫描速度 v 增加到 700 mm/min 时, 组织变细。经能谱仪

测定, 熔覆层成分(质量分数, %)由扫描速度为 200 mm/min 时的 87.85Cu、10.40Sn、1.75Fe 改变为 88.20Cu、11.05Sn、0.75Fe, 可见, 熔覆层含铁量有所减少, 但下降幅度不大。尽管扫描速度快, 熔覆层中还是存在尺寸很小的富铁相

在熔覆层和钢基体之间存在着明显的过渡层。如图 5 的元素线分布测定结果可见, 该过渡层由两个成分不同的层状组织组成。在靠近钢基体的一侧, 有一层较宽的灰色组织, 其成分主要由铁组成, 含有少量的铜和锡。在熔覆层一侧, 有一层较窄的黑色区, 其成分主要为铜, 并含有少量铁和锡。应注意的是, 这两个区域中的铁和铜含量变化很大, 但是锡含量变化不大。

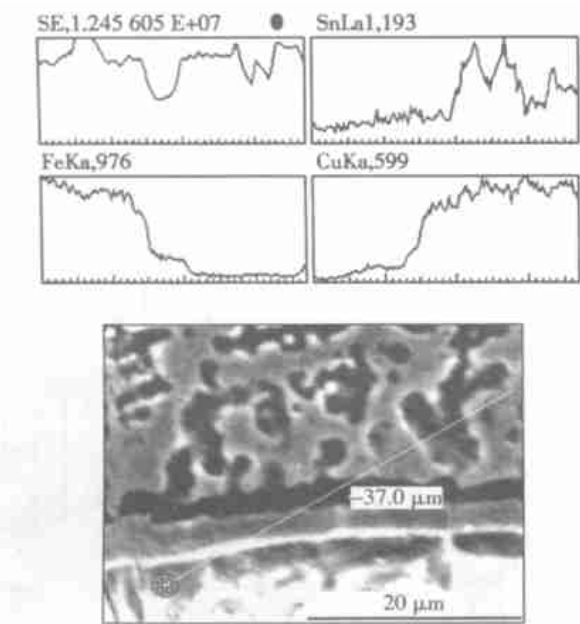


图 5 熔覆层底部过渡区元素线分布
Fig. 5 Element line distribution at the area from substrate to coating

2.2 分析讨论

随着激光功率的增加, 激光束的功率密度增大, 预敷层与基体单位面积上获得的能量相应增多, 熔化后的铜合金层冷却速度相应变慢, 因此, 激光功率大于 1 300 W 后, 熔覆层枝晶组织相对粗大些。同时, 钢基体的熔化量也随激光功率的增大而增多, 使熔覆层的含铁量增加, 铜与锡含量相对降低。

由铜—铁相图可知, 铁在铜中的固溶量较小, 因此, 钢基体中的铁熔化进入铜合金熔覆层后, 熔化量少时可以以固溶形式存在, 超过铜的固溶量后则以独立的富铁相形式存在, 使得熔覆层由单一的 α -Cu 固溶体变为 α -Cu+钢的双相组织(见图 6)。随着基体的熔化量增大, 熔覆层中富铁相逐渐增多, 尺寸也变大了。由于铁的比重小于铜的比重, 未溶解

在铜中的铁或铜合金固溶铁的能力不足时, 铁相由于表面张力而呈球状在铜熔池中上浮。熔池冷却凝固过程中, 尺寸不同的球状铁水来不及浮到熔覆层表面, 故以球状富铁相形式存在于熔覆层中。枝晶状富铁相是由于高温时溶解在铜溶液中的铁当温度下降时溶解度减小结晶析出造成的。

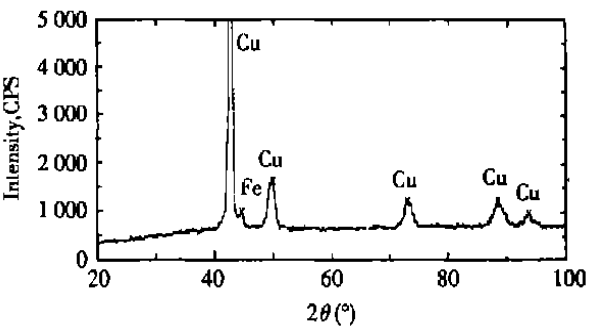


图 6 铜基熔覆层典型 X 射线衍射相分析结果
Fig. 6 Phase analysis of X ray diffraction on typical Cu alloy coating

高倍下对球状富铁相进行元素线分布分析表明, 富铁相与铜基体之间成分相差极大, 但是, 无论是大尺寸还是小尺寸的球状富铁相, 均与铜基体在界面上有一定的成分过渡。由于基体为 45 号钢, 又溶入了较多铜, 加之激光熔覆层冷却较快, 故富铁相易转变为马氏体。

熔覆层底部析出的枝晶状富铁相有一定的方向性, 而且由于铁在铜溶液中析出需要一定的时间, 而激光熔覆层冷却又较快, 故尺寸较小的树枝状富铁相含有一定量的铜和锡。在熔覆层与基体之间, 当激光功率较小时, 二者交界比较明显, 基体受激光的热作用表面熔化造成凸凹不平, 但是从元素线分布情况来看, 交界处的铁与铜混合区很窄。然而激光功率较大时, 熔覆层与基体之间则出现一层厚薄不均的过渡区。

如图 7 所示, 激光功率为 1 500 W 时, 除造成铜合金渗入基体 HAZ (热影响区) 的一次奥氏体晶界外, 熔覆层底部较小的树枝状富铁相下面还有一明显的带状区, 它将熔覆层与基体分隔开来。该区虽然颜色与熔覆层相近, 但是, 元素面分布测定表明该区主要由铁元素组成, 铜与锡的含量与熔覆层相比大大降低。对应的元素线分布也证明了这一点。在过渡区内还形成了铜合金渗入基体 HAZ 晶界的通道。相应的点元素定量分析结果表明, 过渡区中部成分(质量分数, %)为 88.4Fe、11. %Cu、0.1Sn。扫描速度对熔覆层组织及成分的影响不如激光功率的影响大, 但二者影响机理相同, 这里就不再赘述了。

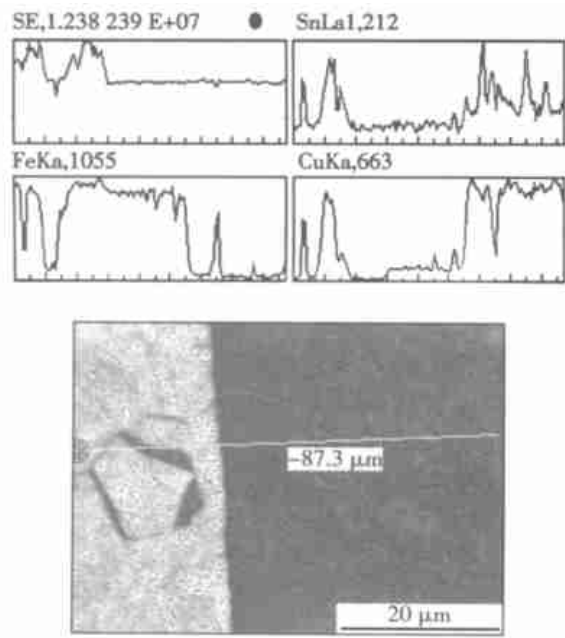


图 7 熔覆层底部过渡区及其元素线分布特点
Fig. 7 Element line—distribution at the area
from substrate to coating

3 工艺参数对铜基合金熔覆层摩擦磨损性能的影响

3.1 激光功率对铜基合金熔覆层摩擦磨损性能的影响

不同激光功率条件下铜基合金熔覆层的摩擦磨损试验曲线由图 8、9 可见, 在 40Cr 磨轮条件下, 随着激光功率的增加, 铜基熔覆层与磨轮间的摩擦系数迅速增加, 磨损量亦显著增加。而当磨轮为硬质合金时, 随着激光功率的增加, 摩擦系数则稍有下降, 磨损量亦不断减小。虽然此时试验时间增加了 1 倍, 但磨损量却远小于 40Cr 磨轮时的数据。

在 40Cr 磨轮条件下, 激光功率低时, 钢基体基本上不熔入铜基合金熔覆层, 因此, 铜合金熔覆层与钢磨轮间的摩擦系数小, 磨损量自然也小。随着激光功率的增加, 铜合金熔覆层含铁量增加, 富铁相增多, 由于富铁相与 40Cr 磨轮的成分和组织相近, 干摩擦时的局部摩擦作用增强, 使得摩擦系数增加, 熔覆层失重显著增加。可见, 在这种摩擦磨损条件下, 控制激光加工工艺参数使钢基体尽量少熔入铜合金熔覆层中为好。

在硬质合金磨轮条件下则与 40Cr 磨轮条件下的试验结果完全相反(见图 9)。这是由于硬质合金磨轮硬度很高, 与其对磨的铜基合金熔覆层硬度较低, 二者硬度差太大, 当激光功率增加时熔覆层中的富铁相增多, 宏观硬度提高。由图 3 可见, 较大尺寸

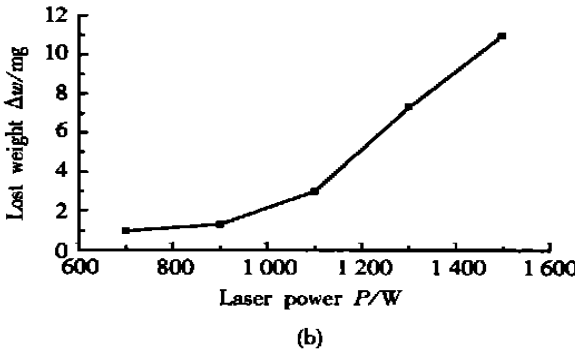
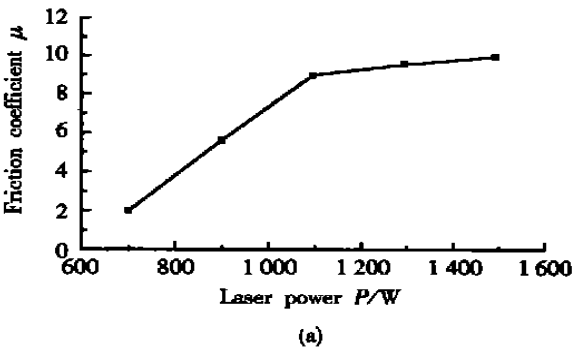


图 8 激光功率对铜基熔覆层磨损特性的影响
(40Cr 磨轮)

Fig. 8 Effect of laser power on wear characteristic
between Cu alloy coating and
40Cr friction wheel

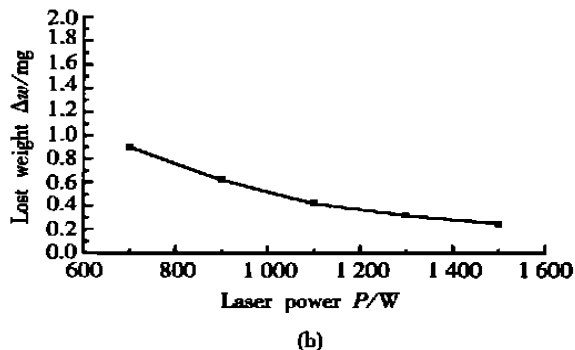
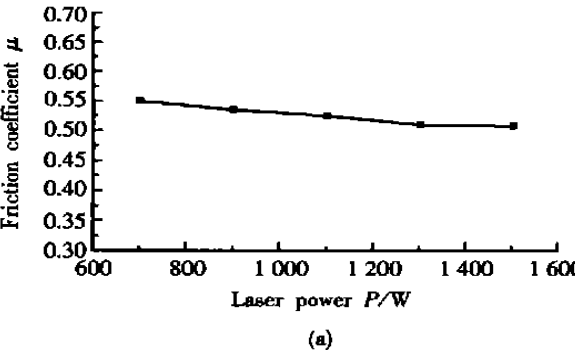


图 9 激光功率对铜基熔覆层磨损特性的影响
(硬质合金磨轮)

Fig. 9 Effect of laser power on wear characteristic
between Cu alloy coating and
hard-alloy friction wheel

4 结 论

(1)利用有限元方法,模拟分析了异种材料扩散连接接头残余应力的分布特征。分析表明,对接头有害的较大的残余应力区域分布在膨胀系数较小母材靠近焊缝附近的地带,而残余应力的最大值出现在其界面脆性相及焊缝附近靠近接头边缘的微小区域,降低连接温度、减少连接时间有利于减小接头残余应力,优化接头的界面应力状态。

(2)提出了中间层残余应力因子 R_f 和中间层厚度因子 T_f 的概念,其中 $R_f = \Delta\alpha \cdot E \cdot \sigma_{0.2} \cdot w$, $T_f = E\sigma_{0.2}w \sqrt{\Delta\alpha_1 \Delta\alpha_2}$ 。考虑到中间层的接触强化影响及被焊金属表面物理接触的形成要求,当选择中间层时,为降低接头的残余应力,应尽量选择 $|R_f|$ 、 T_f 较小的中间层,同时中间层厚度应在能保障

形成充分物理接触的前提下取较小的厚度。

参考文献:

[1] Munz D, Sekuhr M A, Yang Y Y. Thermal stresses in ceramic—metal joints with an interlayer[J] . Journal of the American Ceramic Society, 1995, 78(2): 285 ~ 290.
[2] Yu H Y, Sanday S C, Rath B B. Residual stresses in ceramic—interlayer—metal joints[J] . Journal of the American Ceramic Society, 1993, 76(7): 1661 ~ 1664.
[3] 日本金属学会. 金属データブック[M] . 日本: 丸善株式会社, 1993.
[4] 何 鹏, 冯吉才, 张秉刚, 等. TiAl 基合金与 40Cr 钢扩散连接的界面结构及结合强度[J] . 焊接, 2000, (12): 15 ~ 19.

作者简介: 何 鹏, 男, 1972 年出生, 哈尔滨工业大学博士后。现从事钎焊及扩散焊研究工作, 发表论文 20 余篇。

Email: hlx[111] @163.com

(编辑: 王 亚)

[上接第 72 页]

的富铁相由于激光熔覆具有加热快冷却快的特点, 并且由于溶于富铁相中少量铜提高钢的淬透性的作用, 富铁相冷却时转变为高硬度的马氏体组织, 使熔覆层与磨轮间的摩擦系数有所降低, 尤其是二者间的硬度差减小了, 铜基合金熔覆层抵抗变形的能力提高, 使磨损量减小。改变扫描速度的试验结果与改变激光功率时类似。

4 结 论

在研究工艺参数(激光功率、扫描速度)对铜基合金熔覆层的成分和组织、熔覆层耐摩擦磨损性能的影响规律试验中得到了如下结论。

(1)随着激光功率的增加或扫描速度的下降, 熔覆层中铜与锡的含量减少, 铁含量增加, 熔覆层中出现了形态不同, 数量不等的富铁相。这是由于钢基体受热熔化进入熔覆层造成的。

(2)富铁相形态分为球状和枝晶状两种。球状富铁相一般出现在熔覆层中上部, 是由于液态铁水在铜熔池中团聚上浮形成的; 枝晶状富铁相一般出现在熔覆层底部, 是由于溶于铜溶液中的铁降温时溶解度下降结晶析出形成的。富铁相中一般含有少量的铜和锡, 有的富铁相冷却时转变为马氏体组织。

(3)铜基合金熔覆层与 40Cr 磨轮干摩擦磨损时, 随着激光功率的增加或扫描速度的下降, 由于熔覆层中的富铁相增多, 使得摩擦系数和失重量均增加, 耐磨性下降。此时, 在保证熔合良好的前提下, 应

降低激光功率或提高扫描速度, 减少基体的熔化量。

(4)铜基合金熔覆层与硬质合金磨轮干摩擦磨损时, 随着激光功率的增加, 摩擦系数和失重量的变化规律与 40Cr 磨轮时相反。这是由于富铁相使熔覆层硬度升高, 抵抗变形的能力增强产生的效果。在这种条件下, 可以适当增加热输入量, 使基体少量熔化, 既保证耐磨性, 又有利于提高生产率。

参考文献:

[1] Sudarshan T S. 表面改性技术——工程师指南[M] . 范玉殿译. 北京: 清华大学出版社, 1992. 388 ~ 443.
[2] Tomlinson W J, Bransden A S. Laser surface alloying grey iron with Cr, Ni, Co and Co—Cr coatings[J] . Surface Engineering, 1990, 6(4): 281 ~ 286.
[3] Mridha S, Baker T N. Composite layer formation on Ti—6Al—4V surfaces by laser treatment using preplaced SiC powder[J] . Surface Engineering, 1997, 13(3): 233 ~ 237.
[4] 张思玉, 郑克全. 扫描速度对激光熔覆 WC—B₄C—Co 涂层显微组织和性能的影响[J] . 中国激光, 1993, 20(12): 940 ~ 944.
[5] 邵德春. 激光表面合金化提高钛合金高温抗氧化性能的研究[J] . 中国激光, 1997, A24(3): 281 ~ 285.
[6] 杨洗陈. 铜合金的激光熔覆[J] . 中国激光, 1994, A21 (2): 152 ~ 156.

作者简介: 任振安, 男, 1954 年出生, 工学博士, 副教授。主要从事铸铁焊接、堆焊与材料表面改性方面的教学与科研工作, 发表论文 20 余篇。

Email: renzhenan@yahoo.CO.UK

(编辑: 王 亚)