

激光熔覆镍/锡基巴氏合金的显微组织及力学性能分析

许桐舟¹, 张陈^{1*}, 孙长青¹, 陈海涛², 徐玲¹, 潘秀红³

¹沈阳工程学院机械学院, 辽宁 沈阳 110136;

²沈阳大陆激光技术有限公司, 辽宁 沈阳 110136;

³中国科学院上海硅酸盐研究所高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室, 上海 200050

摘要 利用激光熔覆工艺制备锡基合金熔覆层、镍/锡基合金熔覆层,对两种熔覆层的显微组织、硬度及摩擦磨损性能进行分析,并与铸造锡基巴氏合金进行对比。结果表明:锡基合金熔覆层由方块状 SnSb、花瓣状 Cu₆Sn₅ 和基体相 α-Sn 组成。由于镍元素的扩散作用,在镍/锡基合金熔覆层底部生成了 Ni_xSn_y 和 CuNiSb₂ 混合相;两种激光熔覆层在截面深度 0.1~0.7 mm 处的显微硬度差别不大,均约为 50 HV;随着截面深度增大,镍/锡基合金熔覆层的硬度急剧升高,这是因为过渡层中的镍元素扩散到了熔覆层,形成了 Sn-Ni 金属间化合物,增大了这一区域的硬度;镍/锡基合金熔覆层和锡基合金熔覆层的平均摩擦因数分别为 0.165 和 0.199,均优于铸造锡基巴氏合金;两种激光熔覆层的磨损机理为表面疲劳磨损,磨损面有点蚀现象。铸造锡基巴氏合金的磨损较为严重,出现了犁沟,磨损机理为表面疲劳磨损和磨粒磨损。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 锡基巴氏合金; 过渡层; 力学性能

中图分类号 TH161+.14

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.031403

Analysis of Micromorphology and Mechanical Properties of Laser Cladding Nickel/Tin-Based Babbitt Alloy

Xu Tongzhou¹, Zhang Chen^{1*}, Sun Changqing¹, Chen Haitao², Xu Ling¹, Pan Xiuhong³

¹Mechanics Institute, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, Liaoning 110136, China;

²Shen Yang Dalu Laser Technology Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110136, China;

³State Key Laboratory of High Performance Ceramics and Superfine Microstructure, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract A tin-based alloy cladding layer and a nickel/tin (Ni/Sn)-based alloy cladding layer are prepared using a laser cladding process. The microstructure, hardness, and friction and wear properties of the two cladding layers are analyzed and compared to those of the as-cast Sn-based Babbitt alloy. The results reveal that the prepared Sn-based alloy cladding layer comprises square-shaped SnSb, petal-like Cu₆Sn₅, and a matrix phase α-Sn. A mixed phase of Ni_xSn_y and CuNiSb₂ is formed at the bottom of the Ni/Sn-based alloy cladding layer due to Ni diffusion. The two cladding layers have similar microhardness at a cross-sectional depth of 0.1–0.7 mm and both layers have a hardness value of approximately 50 HV. As the depth of the section increases, there is an abrupt increase in the microhardness of the Ni/Sn-based alloy cladding layer because the Ni element in the transition layer diffuses to the cladding layer, forming an Sn-Ni intermetallic compound. The Sn-Ni intermetallic compound increases the microhardness of this region. The average friction coefficients of the Ni/Sn-based cladding layer and Sn-based cladding layer are 0.165 and 0.199, respectively, which are superior to that of the as-cast Sn-based Babbitt alloy. The two cladding layers have better wear and fatigue properties than the as-cast Sn-based Babbitt alloy because the wear mechanism of the former is surface fatigue wear and pitting phenomenon is found on the wear surface. On the

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-07-23 录用日期: 2019-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(51371173);大学生创新创业项目(201911632294)

* E-mail: zhangchen@sie.edu.cn

other hand, the wear mechanism of the latter is surface fatigue wear and abrasive wear, and the surface is severely worn, which results in furrows.

Key words laser technique; laser cladding; tin-based Babbitt alloy; transition layer; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850; 310.3915

1 引言

轴瓦是轴承中最重要的零部件,其质量及寿命对轴承的性能具有举足轻重的影响。巴氏合金是生产轴瓦的主要原料,合金的制备工艺及成形质量对轴瓦的力学性能具有重要影响。现阶段,巴氏合金主要的制备工艺有浇铸法、喷涂法、镀膜法、焊接法等,但是这些传统工艺在提高巴氏合金耐磨性、硬度及其与基体结合强度等方面的作用并不十分明显^[1]。在工作状态下,对磨过程中产生的较大的摩擦力和切应力易导致轴瓦脱落,从而导致轴承报废。所以,提高轴瓦与基体间的结合强度,提高轴瓦的摩擦学性能,是有效改善轴瓦脱落的有效途径。可以通过加入镍^[2]或锡^[3]过渡层来提高基体与合金的结合强度,实现基体-镍-巴氏合金或基体-锡-巴氏合金的冶金结合,从而提高基体与巴氏合金的结合强度。激光熔覆^[4]和激光重熔^[5]技术也可以有效改善巴氏合金与基体间的结合强度,使其结合方式由机械结合变为冶金结合,并且能够细化晶粒,提高合金的显微硬度。

可以通过以下几种方法来改善巴氏合金的摩擦学性能:1)改变巴氏合金的制备工艺;2)改变巴氏合金中元素的质量分数;3)加入其他元素。Alcover Junior 等^[6]采用电弧喷涂和火焰喷涂工艺制备了锡基巴氏合金,之后通过磨损试验证明了热喷涂工艺制备的锡基巴氏合金的耐磨性要优于传统工艺制造的锡基巴氏合金。Zhang 等^[7-8]通过激光脉冲技术和涂覆聚合物的方法显著提高了巴氏合金的摩擦学性能。增加巴氏合金中铜元素的质量分数可以增加合金中 Cu_5Sn_6 的含量,提高合金的显微硬度和摩擦学性能^[9];而在巴氏合金中加入少量银可以提高合金的显微硬度、延展性和摩擦学性能^[10]。

除了上述通过改变制备工艺来改善巴氏合金的摩擦学性能外,Wu 等^[11-12]还研究了巴氏合金在海水条件下的摩擦学机理。研究表明,巴氏合金在海水下具有较好的摩擦学性能,在海水的腐蚀作用下会生成碱性碳酸铅 $\text{Pb}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$,这种物质对降低巴氏合金的摩擦因数起到了至关重要的作用。

相较于其他传统工艺,激光熔覆技术能够显著提高材料的摩擦学性能^[13-16],但国内外还没有采用

激光熔覆技术改善锡基巴氏合金摩擦学性能的相关报道。鉴于此,本文利用激光熔覆技术在 45 钢表面制备了锡基巴氏合金熔覆层,并通过加入镍过渡层来进一步提高基体与熔覆层的结合力;对熔覆层的组织形貌、力学性能进行分析,并将其与铸造态锡基巴氏合金进行对比。通过结合区形貌确定了界面的结合质量,通过摩擦磨损试验分析了熔覆层的摩擦学性能和磨损机理,获得了摩擦学性能优异的熔覆层,为采用激光熔覆技术制备锡基合金轴瓦提供了参考。

2 试验部分

以 45 钢为基体材料。对基材进行打磨,以去除其表面的氧化皮。熔覆粉末选用标准牌号锡基巴氏合金粉末,锡基巴氏合金粉末的化学成分见表 1。

采用预制粉末法进行熔覆试验,镍基过渡层和巴氏合金熔覆层粉末厚度均为 2 mm。熔覆设备采用 6 kW 光纤激光器,在高纯氩气保护下进行熔覆试验。巴氏合金熔覆参数如下:激光功率为 1200 W,扫描速度为 1500 mm/min,光斑尺寸为 3 mm×3 mm,搭接率为 50%。利用线切割机切取尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的试件,先用砂纸打磨,然后采用 W0.5 金刚石抛光剂进行抛光,之后采用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀,腐蚀时间为 15 s。采用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)观察熔覆层的形貌,采用扫描电镜附带的能谱仪(EDS)对熔覆层进行成分分析,采用 X 射线衍射仪(XRD)对熔覆层的物相进行分析,采用显微硬度计测量熔覆层的硬度(加载载荷为 4.9 N),采用摩擦磨损试验机进行干滑动磨损试验,磨损后采用 3CCD 真实色激光共聚焦显微镜观察磨痕形貌。

表 1 锡基巴氏合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of tin-based Babbitt alloy powder

Element	Cu	Sb	Sn
Mass fraction /%	5.5-6.5	11.5-12.0	Bal.

3 试验结果及分析

3.1 熔覆层的显微组织及物相分析

图 1 为光学显微镜下激光熔覆锡基巴氏合金不

同位置的组织形貌。图 1(a)为基体部分的微观形貌,45 钢的微观组织由深褐色珠光体和白色铁素体组成。图 1(b)为熔覆层与基体结合区,基体与熔覆层之间出现了明显的界面,说明基体与熔覆层形成了良好的冶金结合。靠近结合区颜色较浅部分为基体的热影响区。热影响区部分由于激光熔覆的急冷急热效应而发生了淬火效应,珠光体有向马氏体转变的倾向,从而提高了热影响区的硬度。图 1(c)为

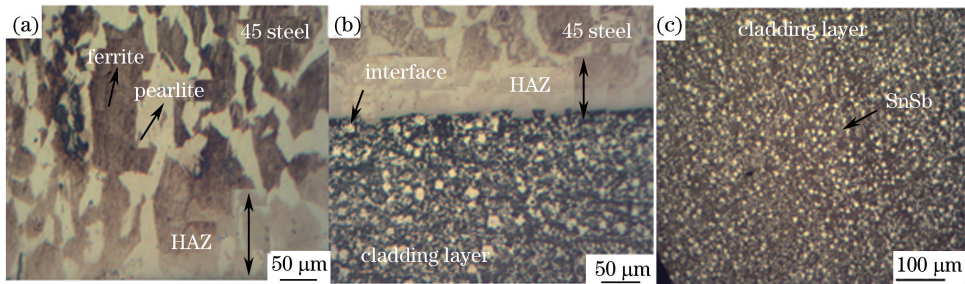


图 1 激光熔覆锡基巴氏合金不同位置的组织形貌。(a) 45 钢;(b)热影响区;(c)镍/锡基巴氏合金熔覆层

Fig. 1 Microstructures and morphologies of laser cladding tin-based Babbitt alloy in different positions. (a) 45 steel; (b) heat affected zone; (c) cladding layer of nickel/tin-based Babbitt alloy

图 2 为激光熔覆镍/锡基巴氏合金不同位置的组织形貌。图 2(a)为 45 钢基体与镍过渡层结合区的形貌,镍过渡层表面没有裂纹、气孔等缺陷,与基体产生了明显的界面层,并实现了良好的冶金结合。热影响区效应与图 2(a)中的效果相似,也有向马氏体转变的倾向。图 2(b)为镍/锡基合金熔覆层与镍过渡层结合处的微观组织,可以明显地看到镍过渡层扩散到了锡基巴氏合金熔覆层中。在熔覆过程中,光斑短暂地停留于镍层形成熔池,而镍的密度小于锡,导致一部分熔化的镍在凝固过程中上浮。由于镍可与锡、锑、铜等金属相互固溶形成金属间化合物,因此一部分镍在上浮过程中与锡相互扩散,

锡基巴氏合金熔覆层的微观形貌,可以看到块状 SnSb 相和针状 Cu_6Sn_5 相均匀地分布在颜色较深的锡基固溶体中。激光熔覆这一过程会聚集大量的热,并且热会在极短的时间内迅速散失,从而增大了锡基巴氏合金的过冷度。过冷度增大后会产生大量的晶核,在晶核生长过程中热量急剧散失,晶粒尺寸减小,从而达到了细化晶粒的目的^[17]。由于硬质点 SnSb 相增多,熔覆层的硬度也会随之升高。

与锡、锑、铜等形成金属间化合物,并在光斑离开后迅速冷却,从而形成了镍与锡基巴氏合金的冶金结合,对熔覆界面的结合强度产生巨大影响。图 2(c)为镍/锡基巴氏合金熔覆层的微观组织,熔覆层中产生了大量近似于星形的组织和更为细小的白色针状晶粒,大部分星形组织呈聚集态,少量星形组织未完全聚集。这可能是由于针状晶粒形核过多,抑制了 SnSb 相晶核的形成,并且镍过渡层在熔覆过程中吸收了热量并传递给熔覆层,导致部分 SnSb 相聚集,而少量 SnSb 相还未完全聚集熔覆层便已凝固。熔覆层中的针状相较图 1 中的更为细化。

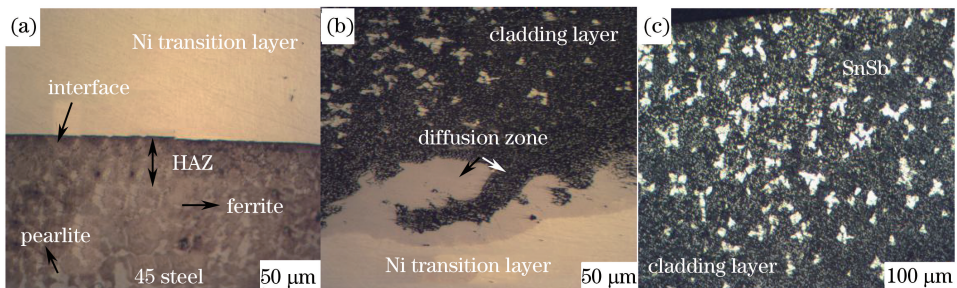


图 2 激光熔覆镍/锡基巴氏合金不同位置处的组织形貌。(a)基体与过渡层结合区;(b)过渡层与熔覆层扩散区;(c)镍/锡基巴氏合金熔覆层

Fig. 2 Microstructures and morphologies of laser cladding nickel/tin-based Babbitt alloy in different positions. (a) Bonding zone between substrate and transition layer; (b) diffusion zone between transition layer and cladding layer; (c) cladding layer of nickel/tin-based Babbitt alloy

图3为两种熔覆层的XRD图谱,图3(a)为镍/锡基巴氏合金熔覆层的XRD图谱,图3(b)为锡基巴氏合金熔覆层的XRD图谱。锡基巴氏合金熔覆层的相组成为 α -Sn、SnSb和 Cu_6Sn_5 ,在镍/锡基巴氏合金熔覆层的X射线测试中检测到了峰强较高的 α -Sn、单质镍、SnSb、 Cu_6Sn_5 ,此外还检测到了少量 Ni_xSn_y 、 $CuNiSb_2$ 等复杂的混合相。

采用扫描电镜观察两种熔覆层试样的微观形貌,图4(a)为锡基巴氏合金熔覆层的微观形貌,图中出现了花瓣状组织,这是在光学显微镜下未观察到的。对此区域进行EDS面扫描,面扫描结果如图4(b)~(d)所示。颜色越亮代表此元素的含量越高,锡在方块状相中聚集,铜在针状相和花瓣状相中聚集,而基体相中并不含有铜元素,这与X射线衍

射的结果相符,表明方块状相为SnSb固溶体,花瓣状相为 Cu_6Sn_5 ,暗黑色固溶体为锡基固溶体相(α -Sn)。这与文献[4]中的研究结果近似。

图5为镍/锡基巴氏合金熔覆层的SEM形貌和EDS面扫描元素分布,可以清晰地看到镍与铜两种元素聚集的区域基本相同,该区域还含有少量锡和锑,所以可以确定是镍元素的存在抑制了 Cu_6Sn_5 相的生成。结合XRD分析可知这部分区域生成了 Ni_xSn_y 、 $CuNiSb_2$ 混合相,并且有一部分镍以单质的形式存在。这种混合相由于镍元素的存在而提高了熔覆层的硬度和耐磨性。在文献[2]中并没有类似相的生成,这可能是由离心铸造温度较低导致的。在镍、铜、锡、锑4种元素的混合相生成后,SnSb固溶体相才生成,这是锑在锡中的高固溶性决定的。

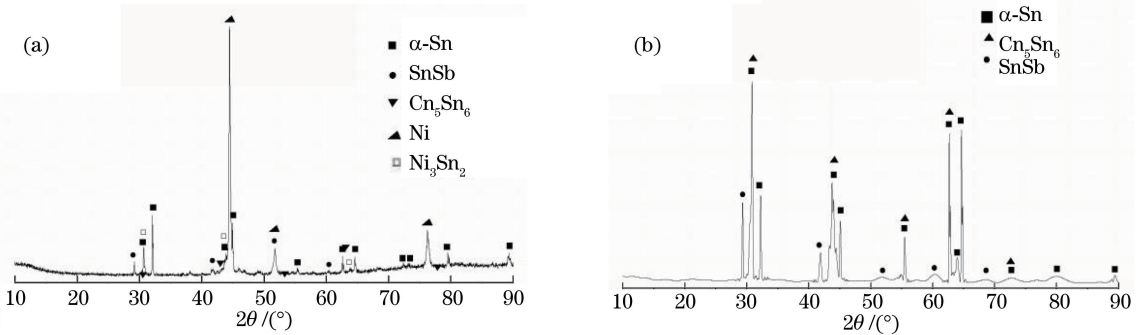


图3 两种熔覆层表面的XRD分析图谱。(a)镍/锡基巴氏合金;(b)锡基巴氏合金

Fig. 3 XRD analysis of surfaces of two cladding layers. (a) Nickel/tin-based Babbitt alloy; (b) tin-based Babbitt alloy

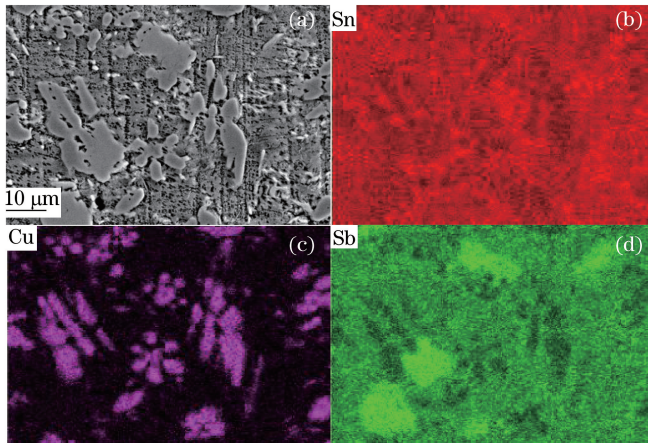


图4 锡基巴氏合金熔覆层的SEM形貌及元素分布。(a)SEM形貌;(b)锡元素的面扫描结果;(c)铜元素的面扫描结果;(d)锑元素的面扫描结果

Fig. 4 SEM morphology and element distributions of cladding layer of tin-based Babbitt alloy. (a) SEM morphology; (b) surface-scanning result of tin; (c) surface-scanning result of copper; (d) surface-scanning result of antimony

图6为过渡区EDS面扫描元素分布,镍元素主要扩散到块状物中,锡基固溶体中并没有发现镍的存在;锡、锑两种元素向镍过渡区扩散但没有形成类似于熔覆层的块状混合相,这可能是由于镍元素过

多,锡、锑与镍生成了某种镍占比较大的相,形成了良好的冶金结合;铜元素大部分聚集于熔覆层,只有较少的铜元素扩散到镍中,由于铜的含量较少,在熔覆过程中还未流动到过渡层时就已

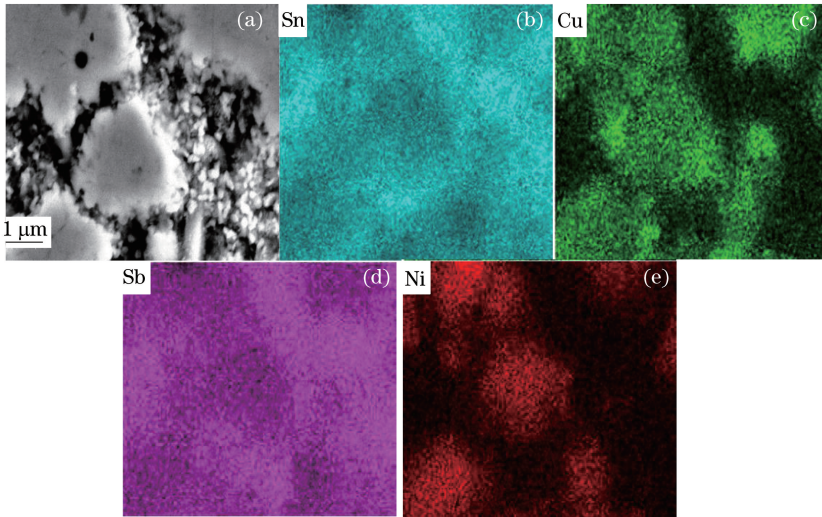


图5 镍/锡基巴氏合金熔覆层的SEM形貌及元素分布。(a) SEM形貌;(b)锡元素的面扫描结果;(c)铜元素的面扫描结果;(d)锑元素的面扫描结果;(e)镍元素的面扫描结果

Fig. 5 SEM morphology and element distributions of cladding layer of nickel/tin-based Babbitt alloy. (a) SEM morphology; (b) surface-scanning result of tin; (c) surface-scanning result of copper; (d) surface-scanning result of antimony; (e) surface-scanning result of nickel

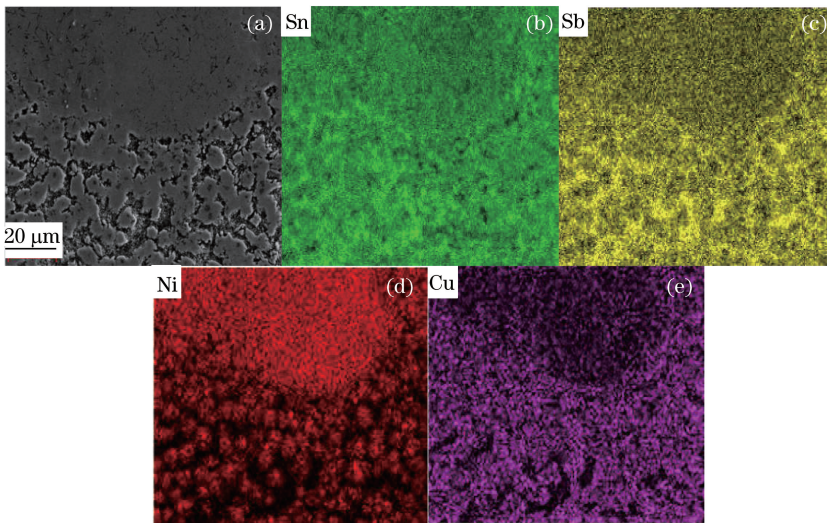


图6 过渡区的SEM形貌及EDS面扫描元素分布。(a) SEM形貌;(b)锡元素的面扫描结果;(c)锑元素的面扫描结果;(d)镍元素的面扫描结果;(e)铜元素的面扫描结果

Fig. 6 SEM morphology and EDS surface-scanning element distributions in transition zone. (a) SEM morphology; (b) surface-scanning result of tin; (c) surface-scanning result of antimony; (d) surface-scanning result of nickel; (e) surface-scanning result of copper

经与镍、锡、锑结合生成了新的相。

3.2 截面硬度分析

将镍/锡基合金熔覆层、锡基合金熔覆层和铸造锡基合金试样分别记为A、B、C。在图7中给出了这三种试样的硬度曲线。A、B试样在截面深度为0.1~0.7 mm处的硬度差别不大,均在50 HV左右,约为C试样的的两倍。激光熔覆的急冷急热作用使得硬质相比传统工艺制得的硬质相明显细化,

硬质相分布得更加均匀,从而使得两种熔覆层试样的硬度显著提高。随着截面深度增加,A试样的硬度急剧升高,这是因为过渡层中的镍元素扩散到了熔覆层,与熔覆层中的锡形成了Sn-Ni金属间化合物,增大了这一区域的硬度。

3.3 熔覆层的摩擦学性能分析

图8中给出了A、B、C试样的摩擦因数曲线。A试样的摩擦因数曲线相对B、C试样的曲线更平

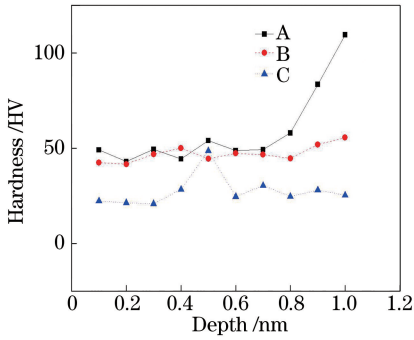


图7 三种试样的硬度随深度的变化

Fig. 7 Hardness of three samples as a function of depth

稳,在 15~20 min 时略有上升,表明锡基巴氏合金熔覆层经过镍过渡处理后提高了涂层的耐磨性。B 试样的曲线在 0~5 min 时呈圆弧式上升,在磨损初期熔覆层表面在压力作用下产生了犁沟,使得对摩球与熔覆层间表现为机械咬合,导致摩擦因数增大。在 12.5~15 min 时,摩擦因数有下降的趋势,可能是因为硬质相颗粒被磨掉,导致针形减摩相 Cu_6Sn_5 与对摩球接触时,在 Cu_6Sn_5 相的减摩作用下,摩擦因数降低。在 15 min 之后,减摩相被磨掉,部分硬质 β 相与对摩球再次产生机械咬合,导致摩擦因数发生波动,摩擦因数升高。C 试样的曲线波动得最大,摩擦因数最大值达到了 0.53,这可能是因为,在磨损初期大量的硬质点颗粒脱落,并产生犁沟,在犁沟和硬质点颗粒的双重作用下,摩擦因数急剧上升,硬质点脱落后,起到减摩作用的 Sn-Sb 固溶体和针状相 Cu_6Sn_5 与对摩球接触,使得摩擦因数曲线趋于

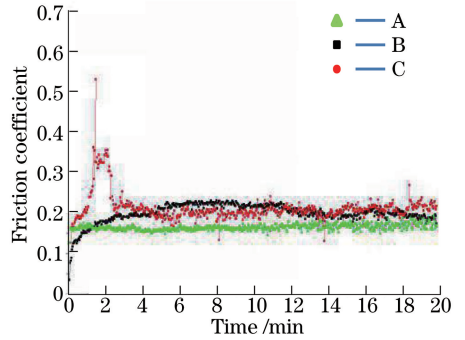


图8 三种试样的摩擦因数曲线

Fig. 8 Friction coefficient curves of three samples

平缓并逐渐降低。

由图 9(a)可以看出,镍/锡基巴氏合金的磨损机理主要为表面疲劳磨损。在前期竖向荷载和摩擦力的双重作用下,熔覆层发生塑性变形,导致熔覆层表面产生了细小的微裂纹,这些细小的微裂纹向表层内部扩展,在达到熔覆层承受极限后,熔覆层发生点蚀。随着磨损时间延长,点蚀面积逐渐增大。由图 9(b)可以看出,锡基巴氏合金的磨损机理为表面疲劳磨损和磨粒磨损,在达到磨损面疲劳极限后熔覆层发生鳞剥现象,脱落的碎屑进入磨损面,与对摩球、熔覆层形成了磨粒磨损,使塑性变形更为剧烈,并使磨损表面产生了犁沟。由图 9(c)可以看出,铸造锡基巴氏合金的磨损面上有擦伤痕迹并伴有犁沟,磨损面内侧发生脱落,磨损面在两侧均有不同程度的扩散,磨痕宽度为前两者的两倍左右。磨损机理主要为黏着磨损和磨粒磨损。

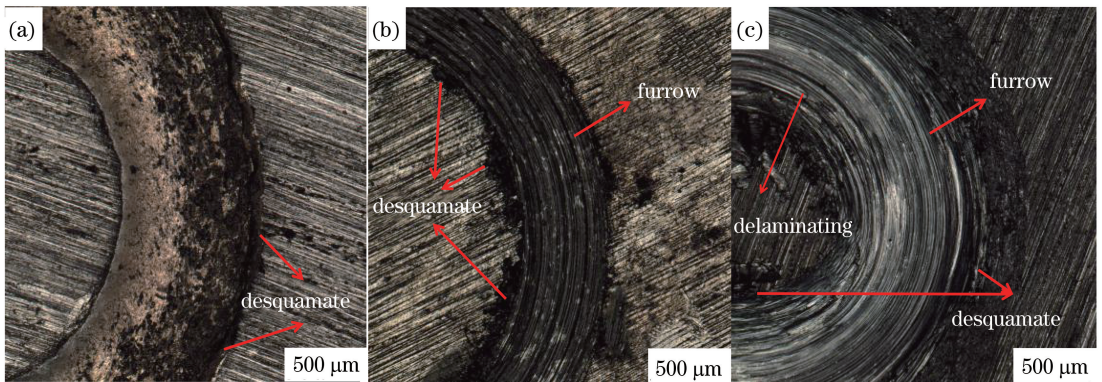


图9 不同试样的磨损轮廓图。(a)镍/锡基巴氏合金;(b)锡基巴氏合金;(c)铸造锡基巴氏合金

Fig. 9 Wear contours of three samples. (a)Nickel/tin-based Babbitt alloy; (b) tin-based Babbitt alloy; (c) as-cast tin-based Babbitt alloy

从磨损量(表 2)、摩擦因数曲线、磨损轮廓图来看,采用激光熔覆技术制备的两种熔覆层的摩擦学性

能要明显优于铸造锡基合金,并且镍/锡基合金熔覆层的耐磨性要好于锡基巴氏熔覆层的耐磨性。

表2 不同试样的平均摩擦系数和磨损量

Table 2 Average friction coefficients and wear amounts of three samples

No.	Wear amount /g	Average friction coefficient
A	0.0212	0.165
B	0.0480	0.199
C	0.0599	0.211

4 结 论

镍/锡基巴氏合金熔覆层的微观组织主要由块状 SnSb、 α -Sn 固溶体,以及靠近过渡层处因镍的扩散而生成的含有镍、锑、铜、锡的混合相组成。混合相具有较高的硬度和抗变形能力。锡基巴氏合金熔覆层的微观组织主要由针状 Cu_6Sn_5 、块状 SnSb、 α -Sn 固溶体组成;前者与过渡层相互扩散,后者则与基材形成结合面。

镍/锡基合金和锡基合金熔覆层在截面深度 0.1~0.7 mm 处的显微硬度差别不大,均约为 50 HV。随着截面深度增加,镍/锡基合金熔覆层的显微硬度急剧升高,这是由于过渡层中的镍元素扩散到了熔覆层,与熔覆层中的锡形成了 Sn-Ni 金属间化合物,增大了这一区域的硬度。镍/锡基合金和锡基合金熔覆层的平均摩擦系数分别为 0.165 和 0.199,均优于铸造态锡基巴氏合金。镍/锡基合金和锡基合金熔覆层的磨损机理主要表现为表面疲劳磨损,磨损面有点蚀现象。铸造态锡基巴氏合金的磨损较为严重,出现了犁沟,磨损机理主要是表面疲劳磨损和磨粒磨损。

参 考 文 献

- [1] Qin Z, Zhao Z W, Wei H D, et al. Research progress and preparation techniques of Babbitt metal [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(18): 10-14.
秦卓, 赵子文, 魏海东, 等. 巴氏合金的研究进展及制备技术[J]. 热加工工艺, 2016, 45(18): 10-14.
- [2] Fan J L, Liu Z Y, Guo Y H, et al. Effect of Ni layer on the microstructure evolution and mechanical property of Cu-based bearing shell with aging treatment [J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 217: 527-532.
- [3] Xia Q Z, Wang J M, Yao K, et al. Interface bonding properties of multi-layered metal composites using material composition method [J]. Tribology International, 2019, 131: 251-257.
- [4] Hao Y B, Zhao K, Yang P, et al. Microstructure

and mechanical properties of tin-based Babbitt alloy made by laser cladding deposition [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(10): 2016-2023.

郝云波, 赵凯, 杨萍, 等. 激光熔覆锡基巴氏合金微观组织和力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(10): 2016-2023.

- [5] Zhang W. Research on microstructure and hardness of tin-base Babbitt alloy made by laser remelting [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(8): 32-34.
张伟. 锡基巴氏合金减摩材料激光重熔组织与硬度的研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(8): 32-34.
- [6] Alcover Junior P R C, Pukasiewicz A G M. Evaluation of microstructure, mechanical and tribological properties of a Babbitt alloy deposited by arc and flame spray processes [J]. Tribology International, 2019, 131: 148-157.
- [7] Zhang D Y, Ho J K L, Dong G N, et al. Tribological properties of tin-based Babbitt bearing alloy with polyurethane coating under dry and starved lubrication conditions [J]. Tribology International, 2015, 90: 22-31.
- [8] Zhang D Y, Zhao F F, Li Y, et al. Study on tribological properties of multi-layer surface texture on Babbitt alloys surface [J]. Applied Surface Science, 2016, 390: 540-549.
- [9] Kamal M, El-Bediwi A, Lashin A R, et al. Copper effects in mechanical properties of rapidly solidified Sn-Pb-Sb Babbitt bearing alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 530: 327-332.
- [10] Dong Q, Yin Z W, Li H L, et al. Effects of Ag micro-addition on structure and mechanical properties of Sn-11Sb-6Cu Babbitt [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 722: 225-230.
- [11] Wu H R, Bi Q L, Zhu S Y, et al. Friction and wear properties of Babbitt alloy 16-16-2 under sea water environment [J]. Tribology International, 2011, 44(10): 1161-1167.
- [12] Wu H R, Bi Q L, Yang J, et al. Tribological performance of tin-based white metal ZChSnSb 8-8 under simulated sea water environment [J]. Tribology, 2011, 31(3): 271-277.
吴海荣, 毕秦岭, 杨军, 等. 巴氏合金 ZChSnSb 8-8 海水环境下的摩擦学行为研究 [J]. 摩擦学学报, 2011, 31(3): 271-277.
- [13] Chen J F, Li X P, Xue Y P. Friction and wear properties of laser cladding Fe901 alloy coating on 45 steel surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46

- (5): 0502001.
- 陈菊芳, 李小平, 薛亚平. 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502001.
- [14] Zhao S Z, Jin J B, Xie M, et al. Effects of scanning speed on microstructure and wear resistance of Cu80Fe20 immiscible coatings prepared by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302005.
- 赵淑珍, 金剑波, 谢敏, 等. 扫描速率对激光熔覆 Cu80Fe20 偏晶涂层组织与耐磨性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302005.
- [15] Liu Y N, Sun R L, Niu W, et al. Microstructure and friction and wear resistance of laser cladding composite coating on Ti811 surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102010.
- 刘亚楠, 孙荣禄, 牛伟, 等. Ti811 表面激光熔覆复合涂层的微观组织及摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102010.
- [16] Zhuang Q Q, Zhang P L, Li M C, et al. Microstructures and wear resistance properties of Ni-Ti-Si coatings on copper alloy surface by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1102002.
- 庄乔乔, 张培磊, 李明川, 等. 铜合金表面激光熔覆 Ni-Ti-Si 涂层微观组织及耐磨性能[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1102002.
- [17] Moazami Goudarzi M, Jenabali Jahromi S A, Nazarboland A. Investigation of characteristics of tin-based white metals as a bearing material [J]. Materials & Design, 2009, 30(6): 2283-2288.