

镍包石墨对激光熔覆镍基合金涂层组织和性能的影响

马超 王存山

(大连理工大学三束材料改性教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要 采用激光熔覆技术在 40CrNi2Si2MoV 钢表面制备了不同含量的镍包石墨镍基复合涂层。利用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电镜、能谱分析仪(EDX)、显微硬度计和摩擦磨损试验机,对不同镍包石墨含量镍基复合涂层的相组成、微观组织形貌、成分、硬度及摩擦磨损性能进行了分析。研究表明,不同镍包石墨含量的复合涂层均主要由 γ -Ni、 Ni_3B 、 M_{23}C_6 和 M_7C_3 相所组成,但有所不同的是,随着镍包石墨含量的增加,复合涂层凝固组织逐渐细化,共晶组织数量逐渐增多,且在镍包石墨添加量超过 10.0%(体积分数)时,组织中开始有明显的石墨相出现。受上述组织变化的影响,复合涂层的平均硬度值和耐磨性随着镍包石墨含量的增加而逐渐提高,而减摩性能则呈现出先降后增的变化趋势,当镍包石墨添加量为 6.0%(体积分数)时,复合涂层具有最低的减摩性能。

关键词 激光技术;复合涂层;镍包石墨;微观组织;性能

中图分类号 TG174.44; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201340.0803003

Influence of Graphite/Ni on Microstructure and Properties of Laser Clad Ni-Based Alloy Coatings

Ma Chao Wang Cunshan

(Key Laboratory for Materials Modification by Laser, Ion, and Electron Beams, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract Ni-based composite coatings with different graphite/Ni contents are prepared by laser cladding on the 40CrNi2Si2MoV steel. The microstructure and properties of the composite coatings are investigated by means of X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray (EDX) spectroscopy, Vickers hardness tester, and friction wear testing machine. The results show that the composite coatings mainly consist of γ -Ni, Ni_3B , M_{23}C_6 , and M_7C_3 phases. But with the graphite/Ni addition increasing, the contents of the eutectic increase. The graphite is observed as the graphite/Ni addition is beyond 10.0% (volume fraction). The changes in the microstructure improve the hardness and the wear resistance of the coatings while the anti-friction property presents a trend of first decreasing and then increasing, and the lowest anti-friction property is obtained as the graphite/Ni addition is 6.0%.

Key words laser technique; composite coating; graphite/Ni; microstructure; property

OCIS codes 140.3470; 140.3390; 310.1515; 350.3390

1 引言

随着现代机械和机构运转速度和负荷的急剧增加以及航空航天、军工和核能技术的发展,对材料性能提出更为严格的要求,许多工况条件处于无油润滑或少油润滑状态下,此时材料不仅要有优异的耐磨性能,还应具有良好的减摩性能。显然,传统的合金设计思想和工艺已不能满足上述的目的和用途。

由于摩擦磨损失效行为均源于工件表面并逐渐发展到内部,因此,采用先进的表面改性技术,直接在零件表面实际承受接触摩擦磨损等作用的特定部位上制备一层具有低摩擦系数、优异耐磨性能、与基体材料为牢固冶金结合的特殊涂层,是一种十分有效的方法。

激光熔覆技术集材料制备与表面改性于一体,

收稿日期: 2013-01-18; 收到修改稿日期: 2013-03-27

作者简介: 马超(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光改性方面的研究。E-mail: machao0709@yahoo.com.cn

导师简介: 王存山(1963—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事激光改性方面的研究。E-mail: laser@dlut.edu.cn

是绿色制造技术的重要支撑技术之一。目前,激光熔覆所采用的合金材料主要有镍基、钴基和铁基自熔性合金。这类合金具有良好的耐磨、耐蚀及抗氧化性能,同时与多种基材具有良好的润湿性能,易获得稀释度低、与基体保持冶金结合的耐磨涂层,但其减摩性能较差^[1-7]。如果在自熔性合金中加入一定化学计量比的固体润滑剂,制备出自润滑复合涂层,则可利用两种材料各自的性能特点,并通过两种材料的复合作用全面提升涂层的摩擦磨损性能。为此,近年来激光熔覆自润滑复合涂层受到相关研究领域的广泛关注,相继研发出以 MoS₂、元方氮化硼(h-BN)、WS₂ 等为固体润滑相的复合涂层,并取得了良好的试验结果^[8-11]。但上述固体润滑相在高能激光束作用下易发生分解,而起不到应有的自润滑效果,需严格控制工艺过程。而石墨作为一种固体润滑剂,其特殊的六边形薄层结构及薄层间微弱的范德瓦尔斯力,使石墨层间具有低的剪切强度,在受到摩擦挤压和热的作用下易在摩擦界面转移形成润滑转移膜,从而具有良好的自润滑性能,且其熔点高、耐热性好、价格低廉,是理想的自润滑材料之一。但石墨也存在以下两点不足:一是与合金熔体的润湿性差,不利于形成致密的激光熔覆层;二是易与强碳化物形成元素发生反应,形成硬质碳化物,致使涂层

的减摩性降低。如果在石墨颗粒表面包覆一层镍,制成核壳结构的复合粉体,则不仅可以改善石墨与合金熔体之间的润湿性能,而且可以缓解石墨的反应溶解,使石墨颗粒得以最大程度地保留于涂层中。为此,本文以镍包石墨为固体润滑剂,以 Ni45A 镍基自熔性合金粉末为激光熔覆基质材料,利用激光熔覆技术在 40CrNi2Si2MoV 钢表面制备了不同镍包石墨含量的镍基复合涂层,系统分析了镍包石墨含量对镍基合金涂层微观组织和性能的影响规律。

2 试验材料和方法

选取尺寸为 20 mm × 15 mm × 10 mm 的 40CrNi2Si2MoV 钢为基体材料,其原始组织为回火索氏体。选用粒度为 45~180 μm 的 Ni45A 镍基自熔性合金粉末为激光熔覆基质材料(其成分如表 1 所示);选用镍包石墨粉末为润滑材料,其添加量分别为 6.0%、10.0% 和 14.0%(体积分数)。首先将配置好的复合粉体在研钵中充分研磨,使其混合均匀。然后预置于 40CrNi2Si2MoV 钢表面(预置层厚度约为 1 mm)。最后,采用 5 kW 横流 CO₂ 激光器在氩气保护下进行单道激光熔覆。优化后的工艺参数为:激光功率 2.5 kW,扫描速度 3 mm/s,光斑直径 5 mm。

表 1 镍基合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the Ni-based alloy powder (mass fraction, %)

	C	B	Si	Cr	Fe	Ni
Ni45A	0.3~0.6	2.0~3.0	3.0~4.5	11.0~15.0	≤5	Bal.

采用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪(XRD)、JSM-5600LV 型扫描电镜以及能谱分析仪(EDX)对熔覆层的相组成、微观组织形貌和微区成分进行分析。利用 DMH-2LS 型显微硬度计测试熔覆样品的显微硬度,载荷 25 g,加载时间 15 s,沿激光熔覆层的横截面由表及里每隔 0.10 mm 测试 3 次,取其算术平均值。在 CETRUMT-2 型磨损试验机上进行摩擦磨损试验,采用球盘往复磨损方式,使用直径为 5 mm 的 GCr15 钢球(其硬度为 HRC55),法向加载 5 N 的载荷,磨损长度 3 mm,磨损时间 30 min。

3 试验结果与分析

3.1 显微组织

图 1 所示为未添加镍包石墨镍基合金涂层的 X 射线衍射图谱。可见,合金涂层主要由 γ -Ni、Ni₃B、M₂₃C₆ 和 M₇C₃ 相所组成。

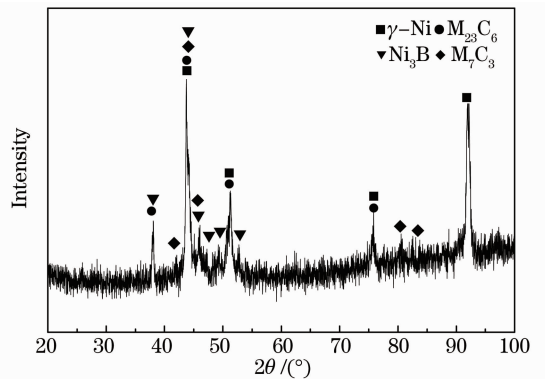


图 1 镍基合金涂层 X 射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of the laser clad Ni-based alloy coating

图 2 所示为上述合金涂层横截面组织形貌。按照组织的差异,合金涂层大致可分为熔覆层(CL)、界面结合区(BZ)、热影响区(HAZ)和基体(Sub.)四个亚层区。由图 2(a)可见,经过金相腐蚀剂适当

浸蚀后的熔覆层凝固组织呈现出典型的亚共晶组织形貌特征,即在树枝初晶间分布有细小层片状共晶组织。而对未经金相浸蚀的熔覆层做进一步观察发现,在亚共晶基体上尚弥散分布有不规则形状的深色组织[图 2(b)]。利用 EDX 对以上不同组织进行成分分析,结果显示,树枝晶为富 Ni 相,共晶组织中除了含有 Ni 外,还有 Cr、Fe、Si、C 等,而图 2(b)中的深色组织的主要元素为 Cr、Fe、C,再结合 XRD 分析结果以及涂层微观组织形态,可以初步判断合金熔体在非平衡凝固过程中首先析出树枝状的 γ -Ni 初晶。当凝固温度达到共晶温度时,剩余合金熔体将发生共晶转变,形成 (γ -Ni + Ni₃B) 共晶组织。合金继续固态冷却时,由于固溶体溶解度的改变,将从 γ -Ni 固溶体(包括初生 γ -Ni 和共晶体中 γ -Ni)内依次析出 M₇C₃ 和 M₂₃C₆ 碳化物。随着距表面距离的增加,由于凝固速率的降低和温度梯度的增大,组织中 γ -Ni 树枝初晶逐渐粗化[图 2(c)]。界面结合区是基体表面微熔层与液态熔覆材料搅拌混合,并以

热影响区为非均质形核位置凝固而成的。由于该微区是整个熔池中温度梯度最大和凝固速率最低的区域,致使界面结合区组织以平面晶的生长形态沿热流方向生长出来,并与热影响区之间的界面近似平直。随着凝固过程的进行,生长着的凝固前沿由于受非平衡动态凝固特征的影响,凝固速率逐渐增加,温度梯度逐渐降低,加之凝固前沿合金熔体稀释程度的降低,凝固组织构成和形态也随之发生变化,形成较为粗大的胞状初晶 + 共晶组织[图 2(d)]。在热影响区,因其受热温度高于奥氏体相变温度,在快速冷却后形成了细小的马氏体组织[图 2(e)],且随着层深的增加,其组织在温度梯度影响下逐渐过渡至原始回火索氏体组织[图 2(f)]。

图 3 所示为不同含量的石墨镍基复合涂层 X 射线衍射图谱,作为比较,Ni45 合金涂层的 X 射线衍射谱也被列在该图中。可见,当在镍基涂层中添加 6.0%(体积分数)的镍包石墨时,涂层的相组成并未发生变化,仍是由 γ -Ni、Ni₃B、M₂₃C₆ 和 M₇C₃ 相所组成,未发现与石墨相对应的衍射峰存在,这可能与涂层中石墨含量较低有关;当在镍基涂层中镍包石墨添加量增至 10.0%(体积分数)时,除上述四种组成相外,在 $2\theta=26^\circ$ 附近开始出现明显的石墨(002)晶面衍射峰,且随镍包石墨添加量的增加,该衍射峰强度逐渐增强。

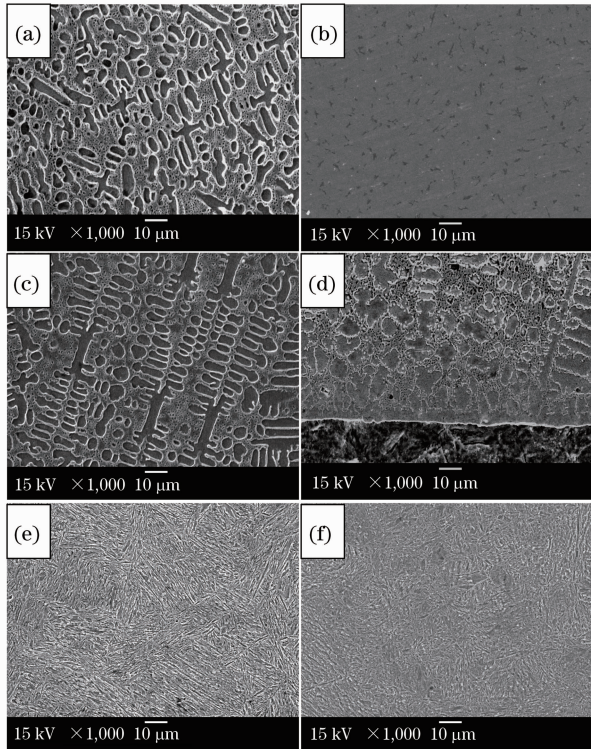


图 2 镍基合金涂层横截面组织形貌。(a) 熔覆层表面区域;(b) 未金相腐蚀熔覆层;(c) 熔覆层中部区域;(d) 界面结合区;(e) 热影响区;(f) 基体
Fig. 2 Cross-section morphologies of the Ni-based alloy coating. (a) Surface of cladding layer; (b) uncorroded cladding layer; (c) middle zone of cladding layer; (d) bond zone; (e) heat-affected zone; (f) substrate

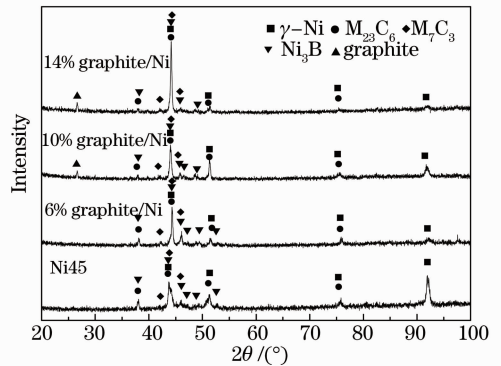


图 3 不同镍包石墨含量(体积分数)复合涂层的 X 射线衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of Ni45 + graphite/Ni composite coatings with different graphite/Ni volume fractions

图 4 为不同镍包石墨含量复合涂层典型的组织形貌。可见,各涂层同样具有亚共晶形貌特征。但有所不同的是,随着镍包石墨含量的增加,树枝初晶逐渐缩短变细,枝晶间共晶组织的数量逐渐增多。产生这一变化的可能原因是在激光熔覆过程中石墨的溶解,一方面会使合金熔体的成分向共晶成分偏

移,这不仅可以增加共晶组织的数量,而且有助于提高合金熔体的过冷度,细化涂层的凝固组织,并提高固溶体的固溶度,进而增加碳化物的析出量;另一方面,石墨在溶解过程中会从周围合金熔体中吸取热

量,这将造成石墨与周围合金熔体间存在一个相对低温区,从而为结晶提供了成分起伏和能量起伏,这将会增加合金熔体的异质形核率,有益于组织的细化^[8]。

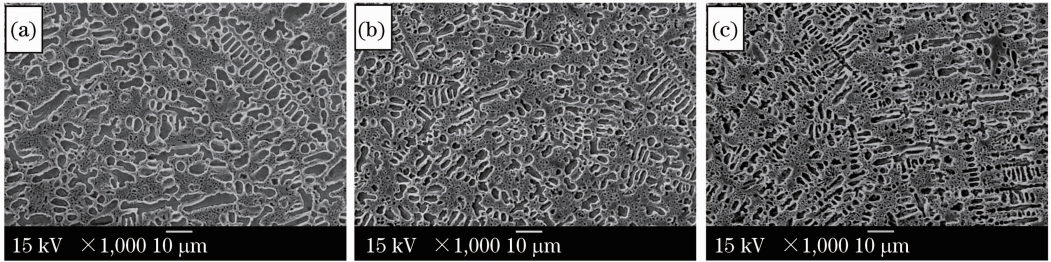


图 4 不同镍包石墨含量复合涂层典型组织形貌。(a) Ni45+6.0%镍包石墨;
(b) Ni45+10.0%镍包石墨;(c) Ni45+14.0%镍包石墨

Fig. 4 Microstructure of the composite coatings with different graphite/Ni additions. (a) Ni45+6.0% graphite/Ni; (b) Ni45+10.0% graphite/Ni; (c) Ni45+14.0% graphite/Ni

在扫描电镜下对未经腐蚀的复合涂层做进一步观察发现,复合涂层中分布有一些深色组织,且随着镍包石墨含量的增加,深色组织的形态逐渐由质点状变为球状,其数量逐渐增加(图 5)。EDX 微区成分分析表明,图 5(b)和(c)中的深色组织主要含有碳及微量的镍和铬元素(表 2),结合 XRD 分析,可以判断球状深色组织应为石墨相。而对于图 5(a)中所示的质点状深色组织,因其尺寸小于电子束斑直径,在电子

束作用下将不可避免地激发出深色质点周围其他合金元素的特征 X 射线,致使所测得成分中镍含量达到 24.97%(质量分数),但从其高达 68.45%(质量分数)的碳含量,也可判断该深色组织为石墨相。石墨的含量、形态及分布状态是复合涂层重要的组织特征之一,也是决定复合涂层性能的关键因素。与原始镍包石墨颗粒[图 5(d)]相比,复合涂层中石墨相的大小和形态都发生了较大程度的改变。

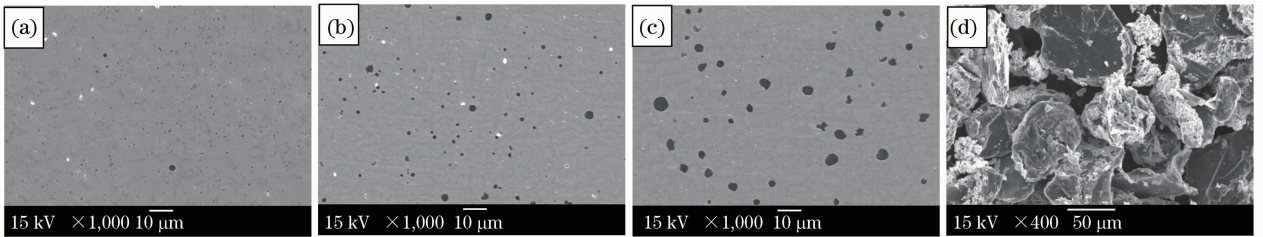


图 5 不同镍包石墨含量复合涂层中石墨的分布状态。(a) 6.0%镍包石墨;
(b) 10.0%镍包石墨;(c) 14.0%镍包石墨;(d) 原始镍包石墨颗粒

Fig. 5 Distribution of graphite particles in the composite coatings with different graphite/Ni additions. (a) 6.0% graphite/Ni; (b) 10.0% graphite/Ni; (c) 14.0% graphite/Ni; (d) raw graphite/Ni particles

表 2 复合涂层中深色组织的能谱成分分析结果(质量分数,%)

Table 2 Composition of the dark region in composite coatings (mass fraction,%)

Graphite/Ni addition	C	Ni	Cr	Fe	Si
6.0%	68.45	24.97	4.56	0.97	1.05
10.0%	89.53	9.05	1.42	—	—
14.0%	99.30	0.47	0.23	—	—

石墨的熔点较高,在实用激光能量密度下难以使其熔化,因此,石墨尺寸和形态变化主要受控于其固态溶解行为,而固态溶解行为又与原始颗粒的形状、颗粒与合金熔体互溶性和反应特性有关,即其是多种溶解机制综合作用的结果。其中一种可能的溶

解形式为尖角-均匀溶解:由于原始石墨颗粒形状的不规则性,其曲率存在差异,这导致合金熔体与石墨颗粒界面不同区域存在碳浓度差。根据胶态平衡理论,第二相颗粒的溶解度与其曲率半径有关。在石墨尖角处附近的合金熔体具有较高的碳浓度,而靠

近石墨平直界面处附近的合金熔体的碳浓度则较低,这就引起合金熔体中碳浓度由尖角处向曲率半径比较大的区域扩散,从而导致石墨颗粒尖角部位的加速溶解,使石墨颗粒发生球化。而另一种可能的溶解方式为扩散反应式溶解:由于石墨对激光能量高的吸收,致使其界面能提高,原子活动能力增强,从而为界面附近区域原子短程扩散以及石墨与合金熔体中的铬、铁元素反应形成碳化物创造了有利条件,这种扩散反应的结果必然导致石墨颗粒的溶解。随着镍包石墨添加量的增加,由于石墨对激光能量高的吸收率而导致热能消耗率的增大以及包围石墨颗粒的合金熔体含量的降低,势必降低均匀溶解和局域扩散反应溶解的程度,使石墨颗粒尺寸增大,圆整度降低^[12]。

石墨的分布状态则与合金熔液的对流状况、石墨颗粒在激光熔池中的运动以及石墨颗粒与液固界面之间的相互作用等因素密切相关。首先,从合金熔液的对流状况来看,由于石墨的导热性要远远大于其周围的合金熔液,石墨的存在必然会造成合金熔体中大量热量向石墨相聚集,从而引起整个激光熔池温度梯度的降低。随着石墨含量的增加,温度梯度的降低幅度增大,这势必会减弱激光熔池的对流强度,从而降低了石墨分布的均匀性。其次,从石墨颗粒在熔池中的运动因素考虑,由于石墨的密度要远低于镍基合金的密度,因此石墨颗粒在受到合金熔液对流制约的同时,尚要发生上浮运动。随着涂层中石墨含量的增多,颗粒尺寸的逐渐增大,势必会降低其上浮的速度,从而有利于石墨的均匀分布。再次,从石墨颗粒与液固界面之间的相互作用因素考虑,由于位于液固界面前沿的石墨颗粒与合金熔液热物性参数存在差异,将导致界面附近传热和传质过程的改变,从而对界面的形状及界面稳定性产生影响。与此同时,推进的液固界面对石墨颗粒的界面行为也将产生很大的影响,依据作用于颗粒上力的平衡,最终可能导致石墨颗粒被推进的液固界面所捕获或推移。基于临界速度理论的分析表明,涂层中石墨的数量越多,尺寸越大,越易发生捕获现象,从而有利于石墨颗粒在涂层内的均匀分布。但从试验结果看,涂层中石墨分布的均匀性是随其含量增加而降低的,由此可以初步推断涂层中石墨的分布状态主要受控于激光熔池的对流搅拌作用。

3.2 显微硬度

图 6 所示为不同镍包石墨含量复合涂层显微硬度沿层深的分布曲线。可见,各涂层显微硬度沿层

深方向皆呈明显的阶梯状分布,分别对应熔覆层、界面结合区、热影响区和基体。在熔覆层,其最高的硬度不是位于表面区,而是位于距表面一定距离的亚表层,因为该微区具有最高的冷却速度^[13-14],晶粒的尺寸相对较细。随着层深的增加,由于温度梯度的增大和凝固速率的降低,晶粒尺寸逐渐变粗,显微硬度随之降低,并在由平面晶构成的界面结合区达到最低值;而在热影响区,因其组织由细小马氏体构成,硬度值在该微区发生陡升。但随着层深的继续增加,因组织逐渐由马氏体向原始回火索氏体过渡,硬度再次发生陡降。值得关注的是,随着镍包石墨含量的增加,由于熔覆层组织的逐渐细化以及碳化物和共晶组织数量的增多,致使熔覆层的平均硬度值随之增加。

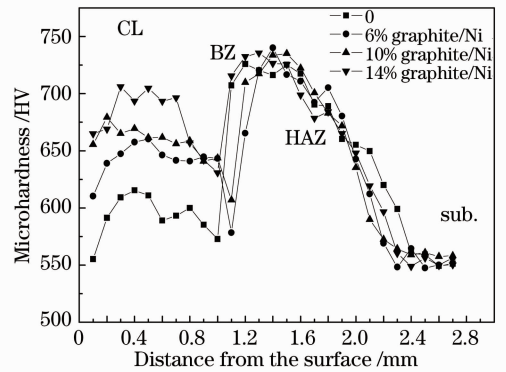


图 6 不同镍包石墨含量复合涂层显微硬度沿层深的分布曲线

Fig. 6 Microhardness curves of the cross-section of the composite coatings with different graphite/Ni additions

3.3 摩擦磨损性能

图 7 所示为复合涂层在稳定摩擦磨损阶段平均摩擦系数随镍包石墨含量的变化曲线。由图可见,随着镍包石墨含量的增加,复合涂层的摩擦系数呈

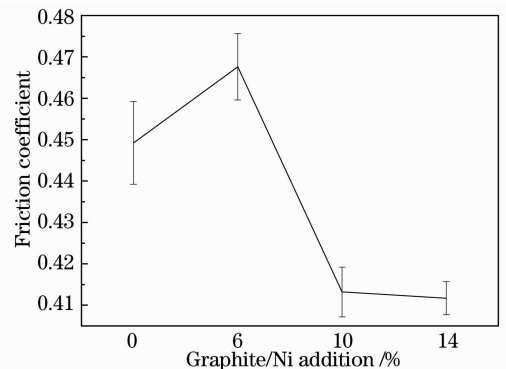


图 7 复合涂层摩擦系数随镍包石墨含量的变化曲线

Fig. 7 Influence of graphite/Ni content on the friction coefficient of the composite coatings

现出先增后减的变化趋势,即在镍包石墨添加量为 6.0%(体积分数)时,复合涂层具有最高的摩擦系数,减摩性最低。但复合涂层的磨损体积则随着镍包石墨含量的增加而降低,耐磨性能逐渐增高(图 8)。

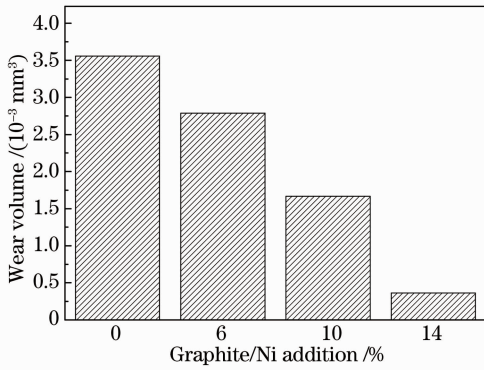


图 8 不同镍包石墨含量复合涂层的磨损体积
Fig. 8 Influence of graphite/Ni content on the wear volume of the composite coatings

为进一步分析复合涂层摩擦磨损性能随镍包石墨含量变化的内在机制,在扫描电镜下对其摩擦磨损表面进行了观察。由图 9(a)可见,在干滑动摩擦磨损过程中,镍基合金涂层因受 GCr15 摩擦副的犁削作用,在其磨损表面出现了表征磨粒磨损特征的犁沟。在随后的磨损过程中,反复的犁削作用将导

致涂层亚表面产生很高的局部应力集中,从而诱发微裂纹的形成、扩展与联通,最终形成沿滑移方向延展的疲劳剥落坑。当在镍基合金涂层中添加 6.0%(体积分数)的镍包石墨时,由于晶粒的细化和硬质相数量的增多,有效地增加了涂层的抗磨粒磨损能力,其磨损表面犁沟开始变得窄而浅[图 9(b)]。但硬质相数量的增多势必会增加微裂纹的形成几率,加剧疲劳磨损程度,使磨损表面局部区域产生较大的剥落坑,增加了其周围磨损表面的粗糙度,加之涂层中石墨含量很低,难以起到自润滑的作用。这将使复合涂层的摩擦系数升高,减摩性变差,而耐磨性则因受上述两种因素的综合作用,较镍基合金涂层略有提高;当镍包石墨的添加量增至 10.0%(体积分数)时,因涂层中石墨数量明显增多,将有利于在摩擦挤压作用下形成润滑转移膜,这不仅可以有效提高涂层的减摩性能,而且可以缓解摩擦副之间的接触压力,降低涂层的疲劳磨损程度。同时,硬度的持续增加使涂层的抗磨粒磨损能力有了进一步提升,犁沟变得越加宽而浅[图 9(c)];当镍包石墨的添加量继续增至 14.0%(体积分数)时,上述变化趋势也越加明显,涂层磨损表面只出现了轻微的擦伤痕迹[图 9(d)]。以上试验事实说明一定比例镍包石墨的添加,将有利于提高涂层的摩擦磨损性能。

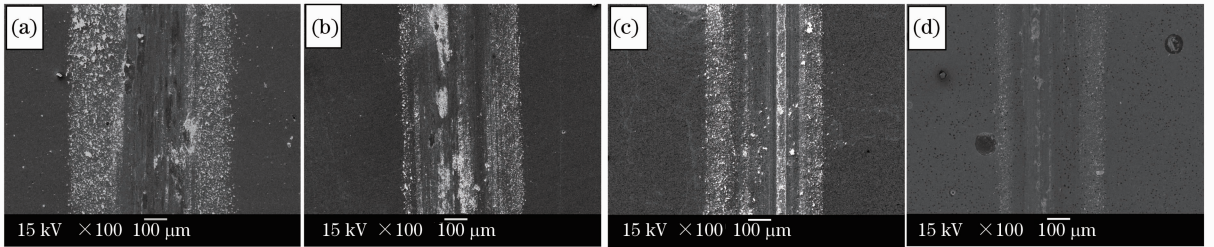


图 9 不同镍包石墨含量复合涂层的磨损表面形貌。(a)无镍包石墨;(b) 6.0%镍包石墨;
(c) 10.0%镍包石墨;(d) 14.0%镍包石墨

Fig. 9 Worn morphologies of the composite coatings with different graphite/Ni additions. (a) 0.0% graphite/Ni;
(b) 6.0% graphite/Ni; (c) 10.0% graphite/Ni; (d) 14.0% graphite/Ni

4 结 论

1) 不同镍包石墨含量的镍基复合涂层均主要由 γ -Ni、Ni₃B、M₂₃C₆ 和 M₇C₃ 相组成。但有所不同的是,随着镍包石墨添加量的增加,复合涂层凝固组织逐渐细化,共晶组织数量增多,且当镍包石墨添加增至 10.0%(体积分数)时,涂层中开始有明显的石墨的存在。

2) 涂层中石墨的数量、大小和分布状态与镍包石墨的添加量密切相关,即随着镍包石墨含量的增

加,石墨的数量增加,颗粒尺寸变大,且因受合金熔池对流搅拌作用这一主要因素控制,石墨分布均匀性变差。

3) 随着镍包石墨含量的增加,复合涂层的硬度和耐磨性逐渐提高,而减摩性则呈现出先降后增的变化趋势,即镍包石墨含量为 6.0%(体积分数)时,复合涂层具有最低的减摩性能。

参 考 文 献

1 Yao Jianhua. Laser Surface Modification Technology and

- Application [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012. 112-113.
- 姚建华. 激光表面改性技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012. 112-113.
- 2 Guan Zhenzhong. Handbook of Laser Process Technology[M]. Beijing: China Metrology Press, 1998. 236-337.
- 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998. 236-337.
- 3 Chen Jianmin, Wang Lingqian, Zhou Jiansong, *et al.*. Research progress of laser clad Ni-based coatings [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(2): 13-20.
- 陈建敏, 王凌倩, 周健松, 等. 激光熔覆镍基涂层研究进展[J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 13-20.
- 4 C Navas, R Colaco, J de Damborenea, *et al.*. Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200 (24): 6854-6862.
- 5 Chen Jianmin, Guo Chun, Zhou Jiansong. Microstructure and tribological properties of laser cladding Fe-based coating on pure Ti substrate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(9): 2171-2178.
- 6 Sun Ronglu, Liu Zhiyong, Niu Wei, *et al.*. Influence of Ti substrate dilution on the microstructure of NiCrBSiC laser clad coatings[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1741-1745.
- 孙荣禄, 刘智勇, 牛伟, 等. 钛合金稀释作用对 NiCrBSiC 激光熔覆层微观结构的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1741-1745.
- 7 Shang Lijuan, Zhu Jingpu, Tan Chaoxin. Investigation on laser-deposition of the self-melted Co-base and Ni-base alloys [J]. Chinese J Lasers, 1990, 17(8): 491-496.
- 尚丽娟, 朱荆璞, 谭朝鑫. 激光熔覆镍基和钴基自熔合金的研究[J]. 中国激光, 1990, 17(8): 491-496.
- 8 Niu Wei, Sun Ronglu. Effect of h-BN content on microstructures and wear resistance of laser cladding self-lubricant coatings[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0803011.
- 牛伟, 孙荣禄. h-BN 含量对激光熔覆自润滑涂层微观组织和磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0803011.
- 9 Yang Jiaoxi, Liu Huadong, Ding Xiao, *et al.*. Microstructure and dry sliding wear behavior of MoS₂/Ni-based solid self-lubrication coatings prepared by laser cladding [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(8): 22-26.
- 杨胶溪, 刘华东, 丁啸, 等. 激光熔覆制备 MoS₂/Ni 基自润滑复合涂层组织及磨损性能[J]. 金属热处理, 2010, 35(8): 22-26.
- 10 Zhang Xiaofeng, Wang Aihua, Zhang Xianglin, *et al.*. Microstructure and properties of laser clad nano-Ni-encapsulated h-BN/CaF₂ composite coating [J]. J Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(1): 9-13.
- 章小峰, 王爱华, 张祥林, 等. 激光熔覆 Ni 基纳米 Ni 包 h-BN/CaF₂ 涂层组织性能[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 9-13.
- 11 Zhang Xiaofeng, Wang Aihua, Zhang Xianglin, *et al.*. Microstructure and tribological properties of laser cladding Ni45-CaF₂-WS₂ self-lubrication coating[J]. The Chinese J Nonferrous Metals, 2008, 18(2): 215-220.
- 章小峰, 王爱华, 张祥林, 等. 激光熔覆 Ni45-CaF₂-WS₂ 自润滑涂层组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(2): 215-220.
- 12 Huang Liguang, Wang Liandeng, Zhu Dingyi, *et al.*. The melting microstructure and properties of Ni-graphite self-lubricating alloys [J]. J Fuzhou University (Natural Science Edition), 2009, 37(2): 232-236.
- 黄利光, 王连登, 朱定一, 等. Ni 基合金-石墨自润滑材料的熔炼组织及性能[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 232-236.
- 13 Luo fang, Yao Jianhua, Hu Xiaxia, *et al.*. Effect of laser power on the cladding temperature field and the heat affected zone[J]. J Iron and Steel Research, 2011, 18(1): 73-78.
- 14 Liu Zhonghua. Research on Microstructure and Properties of Ni-Based Composite Coating by Laser Cladding on Titanium Surface Alloys [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. 22-25.
- 刘中华. 钛合金表面激光熔覆镍基复合涂层组织性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. 22-25.

栏目编辑: 宋梅梅