

# 38CrMoAl钢表面激光合金化WC/Co-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>涂层的组织和性能

冯 巧<sup>1</sup> 王存山<sup>1</sup> 韩立影<sup>1,2</sup> 于 群<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051

**摘要** 采用激光合金化技术在38CrMoAl钢表面制备了不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数的纳米WC/Co-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金化层。采用X射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)、显微硬度计和摩擦磨损试验机,系统研究了Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量对合金化层组织和性能的影响。结果表明,不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的合金化层主要是由马氏体、奥氏体、Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C和WC相组成。有所不同的是,随着Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的增加,组织中Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C、纳米WC和奥氏体的相对含量逐渐增加,而马氏体的相对含量则逐渐减少;而当Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数超过1.0%时,纳米WC的数量开始降低,凝固组织略有粗化。受上述组织变化的影响,合金化层硬度与耐磨性随着Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的增加而呈现出先增后降的趋势,即当Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数为1.0%时,合金化层具有最高的硬度和最佳的耐磨性能。

**关键词** 激光光学; 激光合金化; 纳米钴包碳化钨; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 组织; 性能

中图分类号 TG162.21 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0803001

## Microstructure and Properties of WC/Co-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating Fabricated by Laser Alloying on 38CrMoAl Steel Substrate

Feng Qiao<sup>1</sup> Wang Cunshan<sup>1</sup> Han Liying<sup>1,2</sup> Yu Qun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Materials Modification by Laser, Ion, and Electron Beams, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

<sup>2</sup>School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China

**Abstract** WC/Co-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alloying layers are prepared by laser alloying on 38CrMoAl steel substrate. The influences of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mass fraction on microstructure and properties of the layers are investigated through X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), microhardness tester, and friction wear testing machine. The results show that the layers with different mass fractions of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are mainly consist of austenite, martensite, Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C and WC phases. With the increase of the Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition, the contents of the Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C, nano-WC, and austenite gradually increase, whereas the content of martensite gradually decreases. But when the mass fraction of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is more than 1.0%, the content of the nano-WC begins to decrease, the solidified microstructure is slightly coarsened. Because of these changes in the microstructure, the hardness and wear resistance of the layers first increase and then decrease, that is, the layer has the highest hardness and the better wear resistance as the Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mass fraction is 1.0%.

**Key words** laser optics; laser alloying; nano WC/Co; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; microstructure; property

**OCIS codes** 140.3390; 310.1515; 350.3390

### 1 引 言

激光合金化技术是利用高能激光束,使基材表层和添加的合金元素熔化混合,从而形成以原基材为基

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-12

基金项目: 中航集团产学研资助课题(CXY2012DG35)

作者简介: 冯 巧(1989—),女,硕士研究生,主要从事激光表面改性方面的研究。E-mail: fionafeng1215@163.com

导师简介: 王存山(1963—),男,博士,副教授,主要从事激光表面改性方面的研究。E-mail: laser@dlut.edu.cn(通信联系人)

的新的表面合金层<sup>[1]</sup>。由于这项技术具有组织均匀致密、基体的热效应低、性能优异、柔性化程度高和工艺成本低廉等鲜明特点,因而受到国内外相关研究领域的广泛关注。

随着激光合金化研究的不断深入,合金化材料已从具有某种性质的金属或非金属逐步发展到陶瓷材料<sup>[2-7]</sup>。由于陶瓷材料具有高的抗氧化性、耐腐蚀性、耐磨性和低的导热系数等特性,是目前激光合金化研究最为广泛的一类合金化材料。研究所涉及的陶瓷种类十分繁多,不仅包括各种碳化物、氮化物、硼化物和氧化物,而且包括各种金属或合金包覆的硬质陶瓷颗粒<sup>[8-12]</sup>。但由于陶瓷颗粒和基材之间的热物性参数存在较大差异,在激光合金化过程易产生裂纹和孔隙等缺陷。而纳米陶瓷材料因其特殊的结构和尺寸效应,不仅具有优异的力学性能,而且其表面和内部缺陷少,加之其高的分散性,可在一定程度上缓解界面应力集中的产生。因此,激光合金化纳米颗粒已成为当今研究的热点和前沿<sup>[13-17]</sup>。例如,王钰等<sup>[16]</sup>在40Cr钢表面利用WC、Co及碳纳米粉进行纳米合金化强化,结果表明,合金化层中的纳米碳化钨与基体形成良好冶金结合,起到弥散强化作用,大幅提高基体表面硬度和耐磨性,相比常规表面强化处理,能有效提高螺杆性能。马等<sup>[17]</sup>在60CrMnMo钢表面激光合金化纳米WC、TiC及B<sub>4</sub>C混合粉末,结果表明,由于纳米材料的尺寸效应,合金粉末溶解并形成新的固溶体B<sub>10</sub>C、Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、Ti<sub>8</sub>C<sub>5</sub>、W<sub>2</sub>B等硬质相,可显著提高材料表面硬度和耐磨性。此外,稀土氧化物Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>具有净化液相成分、细化晶粒作用<sup>[18-20]</sup>,能明显改善合金化层的组织、硬度及耐磨性能,如果按一定化学计量比添加在纳米WC中,预计会进一步提高合金化层的力学性能。

为此,本文以纳米WC/Co为合金化基质材料,以Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为添加剂,利用激光合金化技术在38CrMoAl钢表面制备了不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的合金化层,系统分析了Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对合金化涂层的微观组织和性能的影响规律。

## 2 试验材料与方法

选取尺寸为15 mm×15 mm×10 mm的38CrMoAl钢为基体材料,其原始组织为回火索氏体。以粒度为50~100 nm的WC/Co为合金化基质材料,以粒度为75 nm的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为添加剂,其添加量分别为0.5%、1.0%和1.5%(质量分数,下同)。前期试验表明,当Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的添加量超过1.5%时,合金化层的开裂敏感性急剧增加,在其内开始出现许多贯穿裂纹。所以从实用角度考虑,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的添加量被限定在上述较小范围内。首先,将合金化粉末按化学计量比进行配比,并在研钵中充分研磨,使其混合均匀。然后用体积分数为5%的紫胶乙醇溶液将粉末配成合金化涂料,预置于38CrMoAl钢表面(预置层厚度约为0.3 mm)。待合金化涂料自然干燥后,采用5 kW横流CO<sub>2</sub>激光器在氩气保护下进行激光合金化。优化的工艺参数为:扫描速率为4 mm/s,激光功率为2300 W,搭接率为50%,光斑直径4 mm。

采用XRD-6000型X射线衍射仪(XRD)、JSM-5600LV型扫描电子显微镜(SEM)和电子探针(EPMA)对合金化的相组成、微观组织形貌和微区成分进行分析。采用HV-1000A型显微硬度计测量合金化层的显微硬度,载荷1.9613 N,加载时间15 s,沿合金化层横截面由表及里每隔0.10 mm测试三次,取其算术平均值。摩擦磨损试验在Ms-1型磨损试验机上进行,选用外径40 mm,内径17 mm的GCr15为摩擦副,其硬度为HRC55,所施加的法向载荷为100 N,转速为90 r/min,摩擦力矩15 N·m,磨损时间为30 min。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 显微组织

图1所示为添加1.0%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金化层的XRD图谱。可见,合金化层主要是由马氏体、奥氏体、Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C和WC相构成。

图2为上述合金化层横截面的SEM形貌。依据组织差别,整个合金化层可分为合金化区(AZ)、界面结合区(BZ)、热影响区(HAZ)和基体(Sub)4个亚层区。由图2a可见,合金化区主要是由树枝晶及分布其间的共晶组织组成。EPMA点成分分析表明,枝晶中除Fe、Cr、Al和C元素外,尚含有一定化学计量比的W和Co元素,且C元素的含量较原始基体明显为高,其平均化学成分为Fe<sub>82.7</sub>C<sub>9.8</sub>W<sub>4.5</sub>Cr<sub>1.3</sub>Al<sub>0.9</sub>Co<sub>0.8</sub>(原子百分数)。共晶组织因其比较细小,无法准确测量各组成相的化学成分,但由其平均化学成分Fe<sub>69.5</sub>C<sub>15.3</sub>W<sub>21.5</sub>Cr<sub>2.2</sub>Al<sub>0.5</sub>(原子百分数)可以发现,其碳的原子数分数更是高达15.3%。这意味着纳米WC/Co在激光合金化过程中发生了溶解。结合XRD分析结果,可以推断合金化区在非平衡凝固过程中经历了如下组织演化:先是纳米WC/Co发生溶

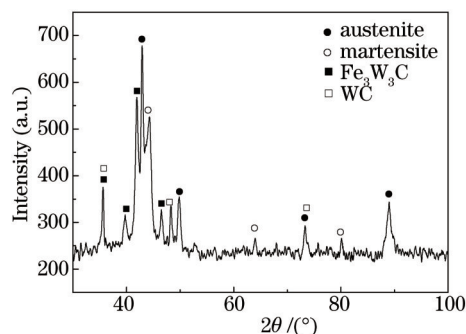


图1 质量分数为1.0%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金化层的XRD

Fig.1 XRD diffraction pattern of the alloying layer containing 1.0% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (mass fraction)

解,致使其周围液相的成分偏向亚共晶成分,并随着凝固温度的降低,开始析出奥氏体(A)树枝晶;当凝固温度达到共晶转变温度时,剩余液相将发生共晶转变,形成A+Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C共晶组织;在随后固态急速冷却过程中,先前的共晶奥氏体和共晶组织中的奥氏体将发生马氏体相变。由于Co是奥氏体稳定元素,其在奥氏体中的固溶将会降马氏体转变的M<sub>s</sub>点,致使室温组织保留了相当数量的残余奥氏体组织。随着到表面距离的增加,由于凝固速率的降低和温度梯度的增加,树枝晶主干逐渐变长,二次枝晶臂发展越加充分[图2(b)],甚至在合金化层与基体间的界面结合区出现了具有定向生长特征的粗大柱状晶[图2(c)]。而在与界面结合区相邻的热影响区,因其受热温度高于奥氏体相变温度,快速冷却后形成了细小的板条、针状马氏体和少量的残余奥氏体组织[图2(d)],且受径向温度梯度分布的影响,其组织随离表面距离的增加而逐渐过渡至原始回火组织(图略)。

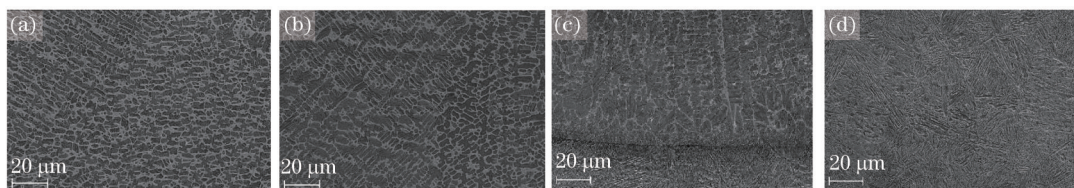


图2 质量分数为1.0%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金化层的横截面SEM形貌。(a)合金化区表面;(b)合金化区中部;(c)界面结合处;(d)热影响区

Fig.2 Cross-sectional SEM micrographs of the alloying layer containing 1.0% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (mass fraction). (a) Surface of the alloying ;

(b) middle zone of the alloying layer; (c) interface; (d) heat-affected zone

硬质WC相的大小、数量和分布是决定合金化层组织与性能的重要因素。在SEM背散射电子原子序数衬度成像下,发现在枝晶间尚分布有纳米尺寸的白亮颗粒相[图3(a)]。进一步EPMA面成分分析表明,这些纳米颗粒主要含有W和C两种元素[图3(b)和(c)]。结合XRD分析,可以判断其为WC相。从WC的形态和分布特征,可以初步判断其很有可能为液析WC。激光合金化是一个远离平衡态的物理冶金过程,合金化层中硬质相的溶解行为十分复杂。但在硬质相种类、数量及工艺参数一定的情况下,其溶解行为则主要取决于颗粒的大小。纳米WC颗粒因大的表面积而具有很高的活性,加之其对激光高的吸收率,因此在热力学上处于一种非稳态或亚稳态,这为其界面附近区域原子的短程扩散和反应溶解创造了有利条件。同时,纳米WC因高的表面能而导致其熔点的降低,对纳米WC颗粒的溶解也起到了一定的促进作用。而纳米WC颗粒的溶解及其组成元素在液相中的扩散,势必使后续形成的奥氏体枝晶固溶一定数量的W和C元素。由于非平

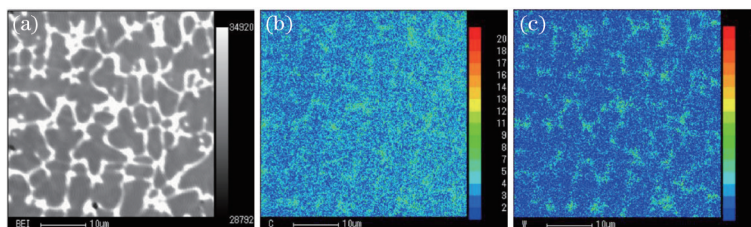


图3 质量分数为1.0%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金化层的背散射电子像及元素面分布图。(a)背散射电子像;(b)C元素面分布;(c)W元素面分布

Fig.3 Back scattered electron photograph and element area distribution taken from the alloying layer containing 1.0% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(mass fraction). (a) Back scattered electron photograph; (b) C element area distribution; (c) W element area distribution

平衡凝固的特点,以及固溶度随凝固温度的下降而降低,将会从枝晶内排出一部分W、C原子至晶间区,进而导致纳米WC颗粒的析出。

不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量合金化层的XRD图谱如图4所示。可见,随着Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数的变化,合金化层的组成相并未发生改变,其仍是由马氏体、奥氏体、Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C和WC相所组成。但采用直接对比法半定量分析表明,随着Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的增加,组织中奥氏体和Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C的数量逐渐增加,而马氏体和纳米WC的数量则逐渐减少。这种变化主要是因为Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>有促进WC/Co颗粒分解的作用,而这种作用势必会增加颗粒周围液相中W、C和Co元素的含量。W是典型的提高钢淬透性的合金元素,其在奥氏体中的固溶会使马氏体的相变M<sub>s</sub>点提高,而C和Co在奥氏体中的固溶,则会使马氏体的相变M<sub>s</sub>点降低。从试验结果可以判断,后两种元素的作用将是主要的,其在提高组织中残余奥氏体含量的同时,也促进了液相成分向共晶成分偏移,导致Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C相数量的增多。

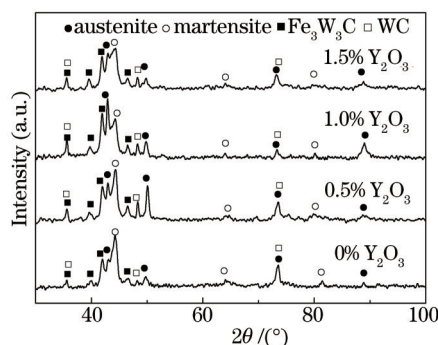


图4 不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数合金化层的XRD图谱

Fig.4 XRD patterns of the alloying layers containing different mass fraction of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

图5为不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量合金化区典型的组织形貌。不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量合金化区皆呈现出亚共晶组织形貌特征。但有所不同的是,随着Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数的增加,合金化层的组织逐渐细化,共晶组织的数量逐渐增多。当Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数超过1.0%时,合金化层的显微组织开始略有粗化,且树枝晶的择优生长取向性也随之发生改变。这一试验结果表明,当Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量在一定阈值内,其具有细化合金化层凝固组织的作用。值得一提的是,与先前研究的微米WC/Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金化层相比,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>细化晶粒的效果要弱,这可能是由于纳米WC颗粒本身也具有细化晶粒的作用,这种作用在一定程度上降低了Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>细化晶粒的效果。具体机制有待作进一步研究。

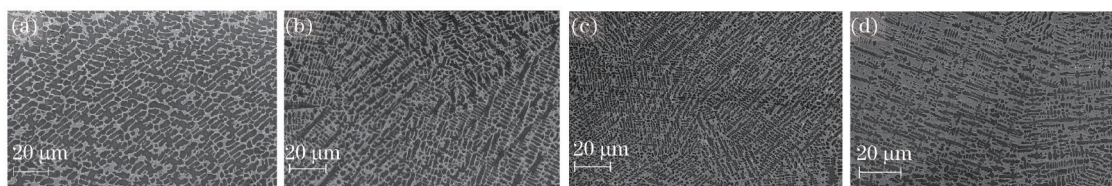


图5 不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数的合金化区典型的SEM组织形貌。(a) 0.0%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (b) 0.5%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (c) 1.0%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (d) 1.5%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fig.5 SEM micrographs of the alloying layers containing different Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mass fraction of contents.

(a) 0.0%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (b) 0.5%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (c) 1.0%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (d) 1.5%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>主要通过以下几个方面的机制来细化晶粒:1) Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作为表面活性物质,由于吸附效应易聚集在晶界表面,降低了临界形核功;2) Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的平衡分配系数很小,其在液相中可完全溶解,但在固相中的溶解度极小,当液相金属凝固时,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>将富集在正在生长的晶粒前沿,阻碍其长大,起到细化晶粒的作用;3) Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>具有净化液相成分的作用,这将有利于提高液相的过冷度,进而细化晶粒;4) 未熔化的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>可作为非均质形核的核心,提高形核率<sup>[18]</sup>。而Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>能否作为非均质形核的核心主要与二维点阵错配度相关,根据二维点阵错配度公式计算表明,在1200℃下Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)与奥氏体(110)两个低指数晶面间有着最低点阵错配度,其值为38.11%,远高于非均质形核的临界值(12%)。这表明Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作为非均质形核的核心是无效的,因此Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>更可能是通过前三种机制来细化凝固组织的。然而,当Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量超过某一阈值时,随着其净化液相作用的下降,势必导致液相过冷度的降低,进而不利于晶粒的细化<sup>[20]</sup>。因此,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量应控制在一定范围内。

### 3.2 显微硬度

图6所示为不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数合金化层显微硬度沿层深的分布曲线。可见,各合金化层有着十分相似的

硬度分布特征。在合金化区,因固溶强化、共晶组织和马氏体的形成、纳米WC硬质强化等机制的综合作用,而具有最高的硬度;在界面结合区,因其是由粗大的柱状晶所组成,使该微区的硬度有所降低;而至热影响区,硬度开始发生陡降,且随着层深的增加,因由马氏体组织逐渐向原始回火组织过渡,硬度也随之进一步降低。

从图6还可发现,随着Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数的增加,由于受晶粒细化、共晶组织和纳米WC数量增加这些主控因素的影响,合金化区的平均显微硬度逐渐增加;当Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数超过1.0%时,尽管共晶组织的数量进一步增加,但纳米WC和马氏体数量的降低,以及晶粒尺寸的增大,致使合金化区的平均显微硬度略有降低。

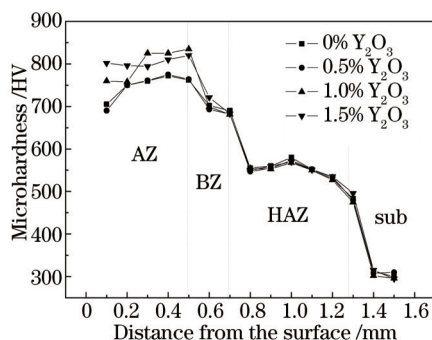


图6 不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量合金化层显微硬度沿层深分布曲线

Fig.6 Cross-section macro hardness curves of the alloying layers containing different mass fractions of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### 3.3 摩擦磨损性能

图7所示为合金化层摩擦系数和磨损量随Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数的变化曲线。可见,随着Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数的增加,合金化层的摩擦系数和磨损量呈现出先降后增的变化趋势,在Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为1.0%时,合金化层具有最低的摩擦系数和磨损量,其减摩性和耐磨性最高。

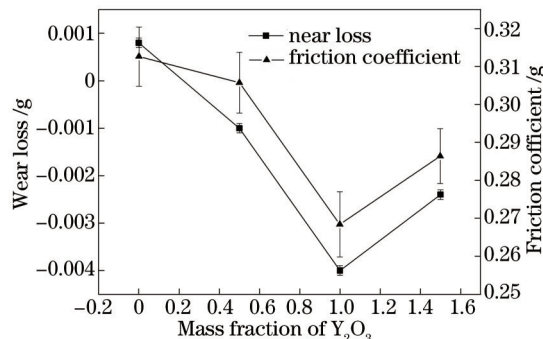


图7 合金化层摩擦系数和磨损量随Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数的变化曲线

Fig.7 Friction coefficient and wear loss of the alloying layers containing different mass fractions of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

为进一步分析摩擦磨损性能随Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量变化的内在机制,在SEM下对合金化层磨损表面进行了观察。由图8可见,在干滑动摩擦磨损过程中,合金化层因受GCr15摩擦副表面微突体的犁削作用,在其磨损表面出现了明显的表征磨粒磨损的特征犁沟,且随着磨损过程的进行,反复的犁削作用使合金化层亚表面产生很高的局部应力,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。随着Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的增加,由于合金化层硬度的增加,有效地增加了其抗磨粒磨损和抗疲劳磨损的能力,这使得犁沟

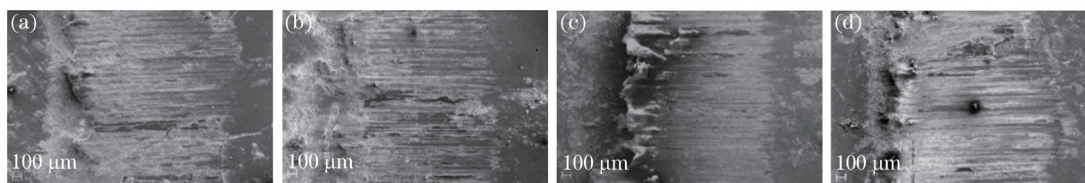


图8 不同Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数的合金化层磨损表面形貌。(a) 0.0% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (b) 0.5% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (c) 1.0% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (d) 1.5% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fig.8 Worn micrographs of the alloying layers containing different mass fractions of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (a) 0.0% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (b) 0.5% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

(c) 1.0% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (d) 1.5% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

逐渐变得浅而窄,疲劳剥落坑的数量和尺寸明显降低,合金化层的减摩性和耐磨性得到提高[图 8(a)、(b)和(c)];当  $Y_2O_3$  质量分数超过 1.0% 时,合金化层硬度的降低,使其表面抵抗磨粒磨损和疲劳磨损的能力有所降低,犁沟开始变得深而宽,疲劳剥落坑的数量和尺寸增加[图 8(d)],合金化层的减摩性和耐磨性下降。

## 4 结 论

1) 不同  $Y_2O_3$  质量分数的激光合金化层主要是由马氏体、残余奥氏体、 $Fe_3W_3C$  和 WC 相所组成。随着  $Y_2O_3$  质量分数的增加,具有亚共晶组织形貌特征的凝固组织逐渐细化,奥氏体、 $M_3C$  和纳米 WC 的数量增加,马氏体数量减少;而当  $Y_2O_3$  的质量分数超过 1.0% 时,纳米 WC 的数量有所降低,凝固组织略有所粗化。

2) 随着  $Y_2O_3$  含量的增加,合金化层显微硬度呈现出先增后减的变化趋势,而摩擦系数和磨损损失量则呈相反的趋势变化,即在  $Y_2O_3$  的质量分数为 1.0% 时,合金化层具有最高的硬度和最好的减摩性和耐磨性。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Binxiu, Tian Xinguo. Application and development direction of laser surface alloying[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2012, (7): 90-92.  
王斌修,田新国. 浅析激光表面合金化技术的应用及发展方向[J]. *制造技术与机床*, 2012, (7): 90-92.
- 2 Zang Chenfeng, Liu Changsheng, Zhang Xiaobin, *et al.*. Research progress of laser modification techniques used on roller surface[J]. *Materials Review*, 2010, 24(2): 6-10.  
臧辰峰,刘常升,张小彬,等. 轧辊表面激光处理技术的研究进展[J]. *材料导报*, 2010, 24(2): 6-10.
- 3 Lo K H, Cheng F T, Kwok C T, *et al.*. Improvement of cavitation erosion resistance of AISi 316 stainless steel by laser surface alloying using fine WC powder[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 165(3): 258-267.
- 4 Dobrzanski L A, Domagala J, Tanski T, *et al.*. Laser surface treatment of magnesium alloy with WC and TiC powders using HPDL[J]. *J Achie Mater Manu Eng*, 2008, 28(2): 179-186.
- 5 Galun R, Weisheit A, Mordike B L. Laser surface alloying of magnesium base alloys[J]. *Journal of Laser Applications*, 1996, 8(6): 299-305.
- 6 Jiang Ping, Zhang Jijuan, Yu Ligen, *et al.*. Wear-resistant  $Ti_3Si_3/Ti$  composite coatings made by laser surface alloying[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, 29(4): 269-272.  
蒋平,张继娟,于利根,等.  $Ti-6Al-4V$  合金激光表面合金化制备  $Ti_3Si_3/Ti$  耐磨复合材料涂层研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, 29(4): 269-272.
- 7 Chiu K Y, Cheng F T, Man H C. Corrosion behavior of AISI 316L stainless steel surface-modified with NiTi[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(20): 6054-6061.
- 8 Yu Ligen, Li Xiaoxuan, Wang Huaming. Microstructure and wear resistance of a laser surface alloyed C-TiAl intermetallic alloy Ti-48Al-2Cr-2Nb[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, 29(5): 328-331.  
于利根,李晓轩,王华明. Ti-48Al-2Cr-2Nb 金属间化合物激光表面合金化组织与耐磨性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, 29(5): 328-331.
- 9 Zhao Gaomin, Wang Kunlin, Li Chuangang. Effect of  $La_2O_3$  on microstructure of laser cladding ferrite-based alloy coatings[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, 29(4): 9-13.  
赵高敏,王昆林,李传刚.  $La_2O_3$  对激光熔覆 Fe 基金属熔覆层显微组织的影响[J]. *金属热处理*, 2004, 29(4): 9-13.
- 10 Wang Liqin, Ying Lixia, Zhang Sanchuan, *et al.*. Microstructure and performance of laser alloying  $Si_3N_4$ /graphite composite coating[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(9): 855-858.  
王黎钦,应丽霞,张三川,等. 氮化硅/石墨激光合金化涂层的组织结构与性能研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(9): 855-858.
- 11 Pu Fei, Liu Yuanfu, Xu Xiangyang, *et al.*. Microstructure and TiC evolution behavior of TiC/ $Fe_3Al$  composite coating fabricated by laser surface alloying[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0703002.  
蒲飞,刘元富,徐向阳,等. TiC/ $Fe_3Al$  复合涂层组织及 TiC 演变规律[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0703002.
- 12 Chen Chuangzhong, Wang Diangang, Lei Tingquan. Structure characteristics of laser clad ceramic and its composite coatings[J]. *Laser Technology*, 2001, 25(6): 401-405.  
陈传忠,王佃刚,雷廷权. 激光熔覆陶瓷及其复合涂层的组织特征[J]. *激光技术*, 2001, 25(6): 401-405.
- 13 Han Tian, Wang Aihua, Peng Jin, *et al.*. Submicron MC-type reinforced coating produced by laser alloying[J]. *Laser Technology*,

- 2012, 36(4): 441-444.
- 韩 甜, 王爱华, 彭 锦, 等. 激光合金化引入亚微米 MC 型增强相的研究[J]. 激光技术, 2012, 36(4): 441-444.
- 14 Zhang Guangjun, Li Jun, Li Wenge, *et al.*. Microstructure and anti cracking property of Ni/WC-Co composite coatings prepared by laser cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(5): 1-5.
- 张光钧, 李 军, 李文戈, 等. 激光熔覆纳米 WC/Co 复合涂层组织与抗裂性能的研究[J]. 金属热处理, 2007, 32(5): 1-5.
- 15 Wang Huiping, Dai Jianqiang, Zhang Guangjun. Research on laser cladding nanometer WC/Co composite coating[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2005, 24(12): 21-24.
- 王慧萍, 戴建强, 张光钧. 激光熔覆制备纳米 WC/Co 复合涂层的研究[J]. 实验室研究与探索, 2005, 24(12): 21-24.
- 16 Wang Yu, Du Jianshi, Yao Jianhua. The research of laser alloying on the surface of 40Cr steel screw[J]. Applied Laser, 2007, 27(6): 470-472.
- 王 珏, 杜鑑时, 姚建华. 激光纳米合金化表面强化螺杆的研究[J]. 应用激光, 2007, 27(6): 470-472.
- 17 Ma Wenyong, Tan Youhong, Liu Min. Microstructure and wear resistance of laser alloying on 60CrMnMo steel with WC-BFe-TiC[J]. Applied Laser, 2013, 33(4): 376-381.
- 马文有, 谭友宏, 刘 敏. 60CrMnMo 钢表面激光合金化 WC-BFe-TiC 的组织及耐磨性能[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 376-381.
- 18 Zhang Shihong, Li Mingxi, Li Huisheng, *et al.*. Nano-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersion strengthened Ni-based alloy laser coating[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(6): 17-19.
- 张世宏, 李明喜, 李辉生, 等. 纳米 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 弥散强化 Ni 基合金激光熔覆层[J]. 热加工工艺, 2006, 35(6): 17-19.
- 19 Wu Anqi, Liu Qibin, Sun Guixiang, *et al.*. Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content on microstructure and properties of laser alloying layer on 40Cr steel[J]. Transitions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(9): 141-145.
- 吴岸琪, 刘其斌, 孙桂祥, 等. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量对 40Cr 钢激光表面合金化组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(9): 141-145.
- 20 Liu Qibin, Long Yun. Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on microstructure and properties of laser clad HT-1 alloy coating on 4Cr<sub>5</sub>W<sub>2</sub>SiV mould steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(8): 62-65.
- 刘其斌, 龙 运. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 4Cr<sub>5</sub>W<sub>2</sub>SiV 模具钢表面激光熔覆 HT-1 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(8): 62-65.

栏目编辑: 张浩佳