

文章编号: 1001-3806(2011)04-0448-05

激光熔覆高厚度涂层技术研究现状及发展趋势

张昌春, 石岩*

(长春理工大学 机电工程学院, 长春 130022)

摘要: 激光熔覆是一项重要的材料改性新技术, 有着良好的应用前景。随着机械强度的提高, 低厚度的熔覆层已不能满足要求, 激光熔覆向着制备高厚度涂层方向发展。现在主要通过激光单层和多层熔覆两种技术手段来获得高厚度熔覆层, 其中多层熔覆技术分为恒定成分多层熔覆和梯度多层熔覆。综述了激光单层熔覆和多层熔覆的研究现状, 并着重介绍了梯度多层熔覆的研究现状, 最后展望了该技术的发展趋势。

关键词: 激光技术; 高厚度; 梯度多层熔覆; 研究现状

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.004

Current status and development of high thickness coating by laser cladding technology

ZHANG Chang-chun, SHI Yan

(School of Electromechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Laser cladding is an important new technology of material modification and has a good prospect. With the improvement of mechanical strength, low thickness of the cladding layer can not meet the performance requirements, so laser cladding trends to prepare the high thickness coating. Now, the single and multi-layer laser cladding techniques are the main measures to achieve the high thickness coating, and the multi-layer laser cladding is divided into a constant chemical composition multi-layer cladding (CCMMLC) and functionally gradient material multi-layer cladding (FGMMLC). The research status of high thickness coating by single-layer and multi-layer laser cladding and highlights status of the FGMMLC were summarized. Finally, the development trend of the technology in the future was prospected.

Key words: laser technique; high thickness; functionally gradient material multi-layer cladding; research status

引言

激光熔覆作为新兴的表面改性技术, 利用高功率激光的快速熔覆效应, 可以在低成本基材表面获得优异的高硬度、耐蚀、耐磨、耐热等性能的涂层。由于其在材料表面改性方面有着显著的技术优势, 自从它诞生以来就一直备受关注。研究人员对其做了大量的研究, 其中一些研究成果已应用于摩擦件改性、零件修复等工业生产中, 并带来了可观的经济和社会效益。

激光熔覆对零件进行表面处理, 可以显著提高零件的硬度、强度和使用寿命。但是低厚度的熔覆层抗挤压强度较小, 随着机械工作载荷的增大, 涂层受强力挤压有时会发生局部垮塌, 之后会出现表面磨损严重、表层脱落等现象, 导致零件使用寿命无法满足设计要求和使用寿命要求。仅靠获得低厚度的熔覆层也已不能满

足要求, 熔覆层需达到高厚度(2mm 以上)、高硬度(HRC60 以上)。而熔覆层厚度和硬度的提高会极大地增加出现裂纹的机率, 裂纹也一直是困扰激光熔覆技术发展的最大障碍。现在激光熔覆就围绕着如何制备高厚度、高硬度熔覆层及研究在该制备过程中采取恰当的工艺来减少裂纹产生。

1 激光单层熔覆获得高厚度涂层的研究现状

YANG 等人^[1]利用积分镜对 TEM₀₁ 模激光束进行整形获得宽带激光束, 在材质为 9Cr2Mo 的轧辊上进行宽带激光熔覆, 获得了厚度为 2.5mm ~ 3.0mm 的熔覆涂层, 熔覆层的硬度平均值为 830HV_{0.1}, 高于 9Cr2Mo 基体的硬度(782HV_{0.1})。他们使用的熔覆粉末是粒度为 40μm ~ 95μm 的 Fe 基合金粉末 + 铬的碳化物合金粉末, 并采用旁轴同步方式送粉。该实验表明: 通过采用合适的工艺参量, 使用合理的熔覆粉末及其配比, 适时地使用积分镜来提高激光熔覆层和喷涂层的均匀性和粉末的利用率, 并对基体实施预热和缓冷等必要的热处理, 可以获得无缺陷的高厚度熔覆层。

作者简介: 张昌春(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 281554724@sina.com

收稿日期: 2010-12-17; 收到修改稿日期: 2010-12-28

随着对激光单层熔覆技术研究的深入,人们对熔覆层的微观结构、磨损率及产生裂纹的原因做了大量的研究。FERNANDE 等人^[2]重点研究了灰口铸铁(DIN GG30)表面激光熔覆 NiCrBSi 涂层的微观结构、涂层表面在高负荷下的粘附和氧化作用对摩擦系数、磨损率的影响。实验表明,残余应力是产生裂纹的内因,激光熔覆前 250℃ 预热、熔覆后缓冷可以减少裂纹,但不能完全地消除应力进而消除裂纹;由于应力的存在,随着时间的增加,获得的表面无缺陷的熔覆层可能会出现裂纹,如图 1 所示,因此,熔覆层同样需要进行时效处理。相同粉末熔覆的涂层具有相似的微观结构,且涂层表面形成的氧化层在摩擦过程中起润滑作用,可以减少摩擦系数进而降低磨损率。

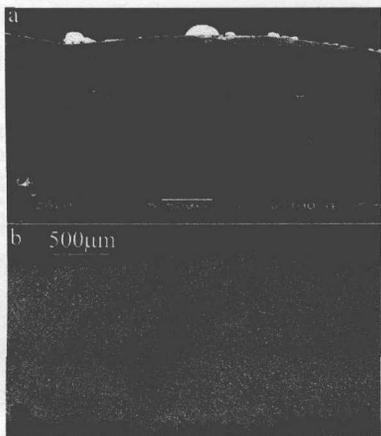


图 1 同一 NiCrBSi 激光熔覆层的横截面显微照片

a—激光熔覆后立即观察没有裂纹 b—4 个月后观察出现裂纹

上述研究对高厚度涂层的制备和使用提供了有益的借鉴。单层熔覆高厚度涂层的技术,熔覆过程中涂层极易产生裂纹,且对激光光束质量、熔覆材料的选取及成分间的配比要求较高,对工艺参量的匹配精确性也比较敏感,工艺过程很复杂。近年来,国内外多研究激光与母材或熔覆粉末的作用机理,且多局限于熔覆低厚度涂层,而用激光熔覆获得高厚度的涂层却鲜见报道,因此,我国研究人员应在该方向多做研究,填补技术空白。

2 激光多层熔覆获得高厚度涂层的研究现状

激光单层熔覆对于确定的激光工艺参量,只能达到一定的极限厚度,想要获得高厚度的涂层一般都需采取多层熔覆的工艺^[3]。激光多层熔覆按过程中是否改变工艺参量和合金粉末配比分恒成分激光多层熔覆和梯度激光多层熔覆。

2.1 对恒成分激光多层熔覆的研究

恒成分激光多层熔覆是指在原熔覆层上预涂覆合金粉末或直接送粉,再重复一次或多次熔覆的工艺

过程。在恒成分激光多层熔覆过程中,按照敷粉方式的不同可分为预置粉末法和同步送粉法。

WANG 等人^[4]为了修复某型涡轮导向器损伤的叶片,在 K418 材料上进行了多层多道激光熔覆实验。他们采取预置粉末法在基体表面涂敷了自配比例的镍基合金粉末。实验在 2kW 横流多模连续 CO₂ 激光加工设备上进行。主要工艺参量如下:激光功率为 730W,对聚焦镜的保护气流量为 1.5L/min,扫描速率为 8mm/s,对工件的保护气流量为 0.5L/min ~ 1L/min,并同轴吹氩气保护。实验中采用搭接系数为 50% 的多道搭接方式来增加熔覆层的宽度,并采用相同的工艺参量重复熔覆两次,得到了无缺陷的具有理想厚度的熔覆层。实验表明,仅通过优化工艺参量进行多层熔覆,可达到修复和强化叶片的目的。

同步送粉法可以实时地控制送粉量、送粉速率及停止熔覆进行检测,并且可以在熔覆过程中适时添加微量新材料,因此激光多层熔覆大多都采用该类方法。DESALE 等人^[5]采用 4kW 快速轴流 CO₂ 激光器用同步送粉方法,在 AISI316L 钢基体上多层熔覆获得的激光熔覆层硬度高达 746VHN,其耐磨性是基体的 1.75 倍 ~ 4.5 倍。MASANTA 等人^[6]在铝合金上多层熔覆粉末(添加纳米陶瓷材料)成功制得了高硬度纳米结构复合陶瓷涂层,显微硬度达 2500HV_{0.025}。

恒成分激光多层熔覆和激光单层熔覆相比,由于多次加热、多次回火等原因,熔覆层数和层间停光时间对熔覆层组织和硬度会产生影响。LI 等人^[7]采用 CO₂ 激光器用同步送粉方法在 Q235 钢上进行大面积多道搭接恒成分激光多层熔覆实验。重点研究了熔覆层数和层间停光时间对熔覆层组织和硬度的影响。研究表明:在一定的实验条件下,熔覆层交界处(以两层为例)的硬度变化规律为:以界面为基准线,往第 2 层熔覆层方向(熔覆层表面方向),硬度随距离的增加而逐渐增加,往第 1 层熔覆层方向(基体方向),随着距离的增加,硬度先降低后增加最后降低。层数增加时层间硬度变化也有相同的规律。相邻熔覆层之间的停光时间对熔覆层的组织与硬度也有着显著的影响:在层间停光较长的条件下,熔覆层数的增加会使试样的平均硬度下降,由于回火次数较多,靠近基材的熔覆层硬度低于远离基材的熔覆层硬度,熔覆层的组织结构没有明显差异;停光时间极短甚至连续激光熔覆的条件下,熔覆层数的增加会导致试样平均硬度的急剧下降,主要是由于连续多层激光熔覆时,试样上的热积累对熔覆层产生了高温回火效应,靠近基材的熔覆层硬度高于远离基材的熔覆层硬度,而且熔覆层的组织结构有明显差异。该实验对以后的多层熔覆试验有很

好的指导作用,为更深入地研究多层熔覆提供了有益的理论依据。

2.2 对梯度激光多层熔覆的研究

梯度功能多层熔覆材料(functionally gradient material multi-layer cladding, FGMLC)^[8]是一种全新的材料,其性能随成分和结构的变化而缓慢变化,这一特点可以有效地减少裂纹与气孔,应用价值巨大。激光熔覆制备 FGMLC 是将混合好的粉末预置或通过喷枪涂敷在基材表面,然后利用高功率激光照射使粉末和母材熔化,在基材表面形成熔池,在此基础上通过改变粉末组成,并不断的向熔池中喷粉,获得 FGMLC 的方法^[9]。梯度熔覆按设置梯度层的方式不同分为:预置过渡层法和逐渐改变粉末比例法。

DONG 等人^[10]用 10kW CO₂ 激光器,采用预置过渡层的方法先在铜合金上熔覆了镍基韧性过渡层,之后在该过渡层表面制备了结合良好且组织致密、无缺陷的 Co-Ni-Cu 梯度涂层。经分析可知:该梯度涂层的成分、组织和热物理性能呈现梯度分布,缓解了熔覆过程中的热应力,完全避免了裂纹的产生。钴基工作层显微硬度高达 55HV,是铜合金硬度(90HV)的 7.3 倍,而且从铜合金基体至镍基过渡层再到钴基工作层,显微硬度也呈梯度平缓增大,因此涂层具有无裂纹、内韧外硬的特点。

ZHANG 等人^[11]在 45# 钢上进行激光梯度熔覆,熔覆过程中采取同步送粉的方式,在送粉时通过原位混合 316L 不锈钢和 Stellite31 合金两种粉末,熔覆时每一层内的粉末成分及工艺其量保持不变,最初两层为 100% 316L 不锈钢,然后逐层增加 10% Stellite31 合

金,最后两层为 100% Stellite31 合金,共沉积 13 层,每层的厚度约 0.5mm,最后得到厚度为 6.5mm 的梯度熔覆涂层。经分析发现:所制备的梯度涂层为完全冶金结合且沿梯度变化方向的微观组织、成分及硬度呈连续变化。

熔覆粉末的选取对涂层的性能会产生很大的影响,为了选取合理的梯度熔覆粉末来获得理想的梯度熔覆涂层,SÖRN 等人^[12]利用 1kW 五轴联动光纤激光器,采用同步送粉方式在基体 1.23434 (Cr5MoSiV) 上分别分层熔覆 3 种不同的合金粉末,均获得了厚度大于 3.5mm 的梯度涂层,他们对上述涂层进行分析,得出了适合于模具表面改性的工艺。熔覆过程中采用优化的激光工艺参量,并使送粉率逐渐变化,其渐变层的建立方式如图 2 所示。

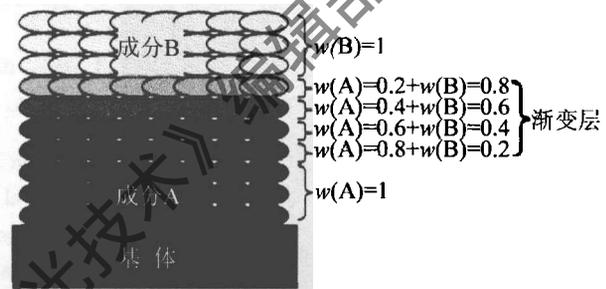


图2 渐变层建立的原理图

实验中具有高延展性的压铸模用钢 Marlok 作为衬底(A)来减少过渡层裂纹的产生。在 A 上分别添加 Stellite 31; 1.2365 (X33WCrVMo12); Dievar 作为 B, 进行对比试验。经扫描电镜观察发现上述 3 种熔覆涂层中 Fe, Cr, Co 等元素均成线性平稳变化。涂层的显微硬度变化如图 3 所示。

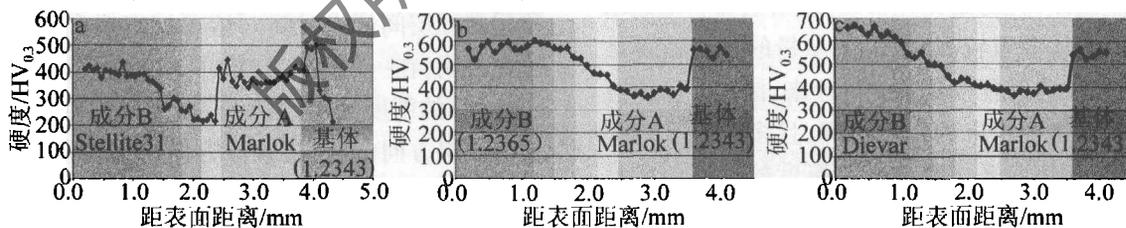


图3 不同成分粉末的显微硬度

a—Marlok + Stellite 31 组合 b—Marlok and 1.2365 组合 c—Marlok + Dievar 组合

经分析可知:Marlok + Stellite 31 显微硬度低且波动很大,受强力冲击易发生断裂;Marlok + 1.2365 稍好于前者,但靠近表面显微硬度波动,易产生细微裂纹;Marlok + Dievar 显微硬度很高,成梯度变化,且变化比较平稳,采用该组合的合金粉末的涂层性能最为理想。

近年来,随着人们对稀土、陶瓷、纳米材料等新材料的特异性能认识的加深,相关研究人员在激光 FGMLC 过程中加入新材料后获得了具有优异性能的涂层,相信新材料在获得高厚度涂层的研究中也将展现其独特的优势。

陶瓷作为一种重要的结构材料,具有高强度、高硬度、耐高温、耐腐蚀等优点,无论在传统工业领域还是在新型的高技术领域都有着广泛的应用^[13]。激光熔覆制备的陶瓷涂层可分为:纯陶瓷涂层、金属基陶瓷复合涂层、反应自生陶瓷涂层、生物陶瓷涂层。其中,金属基陶瓷复合涂层、反应自生陶瓷涂层、生物陶瓷涂层既可以提高硬度和耐磨性又能减少裂纹的产生。LIU 等人^[14]研究了在 AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Al + Al₂O₃ 合金粉末,得到了由 Al₂O₃ 和 Mg₁₇Al₁₂ 组成的金属基陶瓷梯度复合涂层,随着 Al 含量的增加,金属间

化合物 $Mg_{17}Al_{12}$ 的含量也随之增加,与基体相比,涂层的耐磨性和显微硬度都得到了显著提高。MONTE-MOR 等人^[15]利用激光熔覆技术在 45# 钢表面原位自生 Ni 基金属陶瓷 TiB_2 颗粒增强涂层,涂层主要由 γ -Fe, γ -Ni 固溶体和 TiB_2 , TiB 颗粒以及 Ni_4B_3 等硬质相组成,其中 TiB_2 , TiB 分布在枝晶内和枝晶间,对材料起到了弥散强化作用。LIU 等人^[16]采用宽带激光熔覆技术,在 Ti-6Al-4V 合金表面制备含 HA + β -TCP 的生物陶瓷梯度涂层(HA 为羟基磷灰石)。结果表明:生物陶瓷梯度涂层分为基材、合金化层以及生物陶瓷层 3 个层次,且各梯度层的结合界面均为良好的冶金结合。

稀土元素具有弥散强化、细化晶粒的作用,提高了材料的界面结合强度、抗弯强度和拉伸强度。在激光熔覆过程中加入稀土元素,会显著降低涂层内的裂纹数量和长度,极大地削弱涂层的开裂敏感性。HUANG 等人^[17]在 QT-600 基体上激光熔覆合金粉末(铁基粉末 + 50% WC),实验中将熔覆粉末分为两组:其中一组熔覆粉末加入 10% 单质稀土 Ce,另一组为纯熔覆粉末。在相同的工艺条件下激光熔覆,之后对获得的两种涂层进行微观组织分析发现,稀土元素 Ce 可以细化组织晶粒,并可以增加金属液态时的流动性,使组织更加均匀,显著提高了熔覆层的硬度和耐磨性。

纳米材料有许多奇特的物理化学性能,如优良的力学性能、高的反应活性和催化性能等。且纳米材料有小尺寸效应和表面效应,能显著降低激光搭接重叠扫描熔覆层的开裂敏感性,消除熔覆层中的孔洞。SHENG 等人^[18]在低碳钢表面激光熔覆了纳米 TiAl 合金涂层,经分析发现:熔区的晶粒大小仅为 $0.8\mu m \sim 1.2\mu m$;在熔覆过程中有一定量的 Ti, Al 熔入表层熔区,并有一部分在熔区的表层形成致密的氧化物。细小的晶粒组织和致密的氧化物可以显著地提高涂层性能。YAN 等人^[19]在 Ni 基熔覆粉末中添加了纳米级稀土材料 CeO_2 并熔覆于 Q235 低碳钢表面,获得了纳米复合涂层。加入纳米 CeO_2 的熔覆层等轴晶细小且组织致密,出现裂纹的机率大为减少,耐磨性能加强。另外熔覆层表面形成了相对稳定的钝化膜,耐蚀性能大幅度提高。

虽然暂时并未出现稀土元素、陶瓷及纳米材料应用于激光熔覆高厚度涂层的报道,但是由于其细化晶粒等自身优点,必将成为新的研究热点。

2.3 恒定成分激光多层熔覆和梯度激光多层熔覆性能对比

以往对激光熔覆研究可知,熔覆粉末中添加 WC 可以有效地增加涂层硬度,但同时也会增加脆性,带来

了出现裂纹的危险。恒定成分激光多层熔覆和梯度激光多层熔覆获得的高厚度涂层具有各自的性能特点,为了分析它们, XU 等人^[20]利用 2.4kW 连续 CO_2 激光器在低碳钢 SM400B 基体上分别进行恒定成分激光多层熔覆和梯度激光多层熔覆,如图 4 所示,所用的合金粉末为 Stellite 6 + WC,在相同的工艺下,得到了 2.0mm ~ 2.5mm 的熔覆涂层。

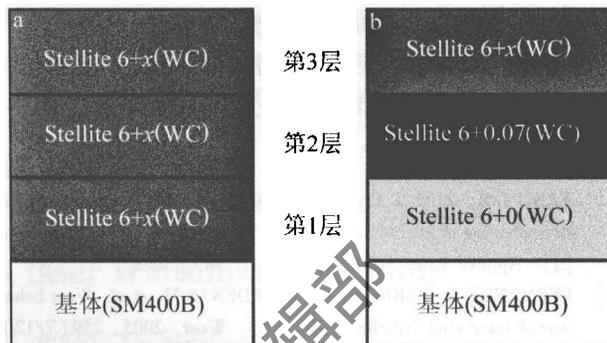


图4 多层熔覆(图中 x 为 WC 的质量分数)

a—恒定成分的多层熔覆 b—梯度功能材料的多层熔覆

对涂层进行对比分析,得出如下结论:恒定成分激光多层熔覆涂层各层的硬度不变,梯度激光多层熔覆涂层各层的硬度是变化的,由于熔化扩散和二次加热的原因,在层与层间的结合区都会出现硬度降低的现象。由于在两种涂层的表面层上都熔覆了相同比例的 WC,因此两种涂层总体硬度和耐磨性相近。梯度激光多层熔覆和恒定成分激光多层熔覆相比可以有效地降低裂纹敏感性,且具有内韧外硬的特点。

3 发展趋势

激光熔覆制备的高厚度涂层可以显著提高零件的抗冲击能力和使用寿命,国内外研究人员一直在对其进行积极研究,并取得了可喜的成果。但是,由于激光熔覆的作用机理还不甚明确,熔覆层会随机出现裂纹、孔洞、熔覆层韧性下降等问题。要解决上述问题,会遇到很多挑战,需克服很多困难,这也激起了科研工作者更大的工作热情,对激光熔覆技术进行更深入的研究。目前激光熔覆技术大体向着如下方向发展:(1)对激光与母材及熔覆粉末的作用机理的研究;(2)对激光熔覆过程温度场、熔凝规律等模拟和模型的建立;(3)进一步研究激光熔覆过程中关键因素的实时检测;(4)对激光熔覆获得高厚度、高质量、无缺陷熔覆层的工艺优化;(5)专用于激光熔覆材料系统的开发;(6)激光熔覆技术在工程中的应用研究。

4 结论

激光熔覆制备高厚度涂层的障碍还是裂纹,应力是产生裂纹的内因。现在,人们对应力及裂纹产生机

理的研究只停留在定性分析阶段,有待更深入的研究。要获得高厚度的熔覆层,国内外一般都采取多层熔覆,其中梯度多层熔覆的优势比较大,潜力也比较突出,有不错的应用前景。另外,稀土元素、纳米材料等新材料的加入,对细化熔覆层晶粒有显著帮助,梯度多层熔覆过程中加入该类新材料可以很大程度地减少裂纹,得到无缺陷的高厚度梯度功能熔覆涂层。但对高厚度熔覆涂层的研究总体来说起步较晚,技术还很不成熟,相信随着激光熔覆技术的发展,存在的问题会不断地得到解决与完善,该技术的工程应用也将越来越广泛。

参 考 文 献

- [1] YANG J X, ZUO T Ch, WANG X B, *et al.* The repairing and strengthening of 9Cr2Mo cold rolls by laser wide-strip cladding method [J]. *Applied Laser*, 2008, 28(1):1-5 (in Chinese).
- [2] FERNANDE E, FERNANDEZ E, CADENAS M, *et al.* Wear behaviour of laser clad NiCrBSi coating [J]. *Wear*, 2005, 259(7/12): 870-875.
- [3] GUAN Zh Zh. *Laser processing manual* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1998:255-307 (in Chinese).
- [4] WANG Z P, HU F Y, HU B, *et al.* Research on laser cladding super alloy K418 by multipass and multi-layer method [J]. *New Technology & New Process*, 2009(4):78-80 (in Chinese).
- [5] DESALE G R, PAUL C P, GANDH B K, *et al.* Erosion wear behavior of laser clad surfaces of low carbon austenitic steel [J]. *Wear*, 2009, 266(9/10):975-987.
- [6] MASANTA M, GANESH P, KAUL R, *et al.* Development of a hard nano-structured multi-component ceramic coating by laser cladding [J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, A508(1/2):134-140.
- [7] LI Sh, ZENG X Y, HU Q W. Influence of multilayer cladding on microstructure and hardness of laser-clad layers [J]. *Heat Treatment of Metal*, 2007, 32(7):44-47 (in Chinese).
- [8] NIINO M, HIRAI T, WATANABE R. Functionally gradient materials [J]. *Japan Society for Composite Materials*, 1987, 13(6):257-264.
- [9] YUAN Q L, HU R, LI J Sh, *et al.* Progress in manufacturing technology of functionally graded materials [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2003, 26(6):66-69 (in Chinese).
- [10] DONG J, LIU F, CHENG S Y, *et al.* Preparation of Co-Ni-Cu gradient coatings by CO₂ laser cladding on copperplate [J]. *Journal of Northeastern University*, 2008, 29(11):1581-1584 (in Chinese).
- [11] ZHANG Y Zh, XI M Zh, SHI L K. Multi-layer functional gradient materials of 316L stainless steel to Stellite 31 alloy prepared by laser clad deposition [J]. *Heat Treatment of Metal*, 2007, 32(9):45-47 (in Chinese).
- [12] SÖRN O, ANDREAS W, INGOMAR K. Functionally graded multi-layers by laser cladding for increased wear and corrosion protection [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5(1):359-367.
- [13] HUANG W R, XIAO Z H. Current status of laser cladding about ceramic coating [J]. *Surface Technology*, 2009, 38(4):57-59 (in Chinese).
- [14] LIU Y H, GUO Z X, YANG Y, *et al.* Laser a pulsed Nd:YAG cladding of AZ91D magnesium alloy with Al and Al₂O₃ powders [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(4):1722-1728.
- [15] MONTEMOR M F, SIMOES A-M, CARMEZIM M J. Characterization of rare earth conversion films formed on the AZ31 magnesium alloy and its relation with corrosion protection [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(16):6922-6931.
- [16] LIU D, LIU Q B. Preparation and bioactivity of bioceramic gradient coating by wide-band laser cladding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4):741-745 (in Chinese).
- [17] HUANG F X, JIANG L, JIANG D M. Effect of rare earth element on microstructure and properties of laser cladding [J]. *Casting Forging Welding*, 2008, 37(17):119-121 (in Chinese).
- [18] SHENG Y F, HUANG Y H, YU Ch Y, *et al.* Microstructure of nano-TiAl coating on low carbon steel surface processed through laser melting [J]. *Laser Journal*, 2005, 26(2):70-71 (in Chinese).
- [19] YAN Y G, LI M X, ZHANG Sh H, *et al.* Effect of nano-CeO₂ on microstructure and corrosion resistance of Ni-based alloy coating by laser-melting [J]. *Journal of The Chinese Rare Earth Society*, 2007, 25(5):620-624 (in Chinese).
- [20] XU G J, MUNNAHARU K, LIU Zh J, *et al.* Characteristic behaviours of clad layer by a multi-layer laser cladding with powder mixture of Stellite-6 and tungsten carbide [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201(6):3385-3392.

(上接第447页)

- [9] WANG F, MEI J, JIANG H, *et al.* Laser fabrication of Ti6Al4V/TiC composites using simultaneous powder and wire feed [J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, A445/446(1/2):461-466.
- [10] LIU D, ZHANG S Q, LI A, *et al.* Microstructure and tensile properties of laser melting deposited TiC/TA15 titanium matrix composite [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 485(1/2):156-162.
- [11] WU W L, YANG D E zh, SUN R L. Microstructure of laser clad Ti + TiC powders on Ti6Al4V alloy substrate [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4):307-310 (in Chinese).
- [12] ZHANG S, ZHANG Ch H, WU W T, *et al.* An in situ formed TiC particle reinforcement composite coating induced by laser melting on surface of alloy Ti6Al4V and its wearing performance [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(3):315-320 (in Chinese).
- [13] WANG W F, WANG M C, SUN F J. Morphological characteristics and growth mechanism of in situ TiC in titanium-based coating formed by laser cladding [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2009, 34(2):65-69 (in Chinese).