

文章编号: 1673-9981(2017)03-0141-06

# 钛合金及钢表面激光熔覆涂层的研究进展\*

任鑫明, 马北越, 张博文, 张亚然, 于景坤

东北大学冶金学院, 冶金高温材料与技术研究所, 辽宁 沈阳 110819

**摘要:** 简要介绍了涂层技术的工作原理及特点, 重点阐述了钛合金及钢基体表面激光熔覆涂层的研究现状及进展, 具体对宇航用钛合金、生物医用钛合金, 以及不锈钢、模具钢进行了总结概括。

**关键词:** 激光熔覆; 钛合金; 钢; 涂层; 研究进展

**中图分类号:** TB31

**文献标识码:** A

工业时代以来, 钢因其简便的冶金流程、低廉的成本等一系列突出优点, 被广泛应用于各行各业中。相比钢材的广泛应用, 钛合金得益于其良好的力学性能、出众的生物相容性, 在航空航天和医疗领域大放异彩, 成为炙手可热的二十一世纪的金属<sup>[1]</sup>。然而, 科学技术在改变人们生活的同时, 对材料的性能也提出了更高的要求, 传统的一些材料已经无法满足现代科技发展的要求。通过表面改性技术来赋予材料新的性能, 可以有效解决材料性能不足的问题, 如其表面涂覆耐磨耐蚀的金属层可有效增加基体材料的耐磨性和耐蚀性。表面改性技术很多, 并且已在不同行业中衍生出多种表面技术。激光熔覆技术即是当下极具发展前景的一种涂层技术, 与其它表面技术相比, 其优越性突出, 如熔覆速度快、过程可控、生态无污染等。随着航空航天、3D打印、原子能等高精尖行业的发展, 激光熔覆技术将会日益受到重视, 并在更多领域中有广泛的应用前景<sup>[2-3]</sup>。

本文就常见的涂层技术, 如热镀、热喷涂、化学镀等的工作原理及技术特点做了简要的阐述, 总结了在钛合金、钢基体表面采用激光熔覆技术制备涂层的最新研究进展, 并对其存在的问题进行了分析, 同时展望了其今后发展的趋势。

## 1 涂层材料制备工艺

涂层技术源远流长, 人们很早就学会给家具涂覆油漆来保持美观和延长寿命, 但早期的涂层材料性能单一, 制作也很粗糙。近年来, 随着现代科学技术的发展, 涂层技术也在不断地更新迭代。新兴的激光技术, 可以快捷准确地改变材料表面的微观组织, 继而增强材料的某些关键性能, 如给航天材料涂覆优质合金来增加其热稳定性和蠕变抗力, 在医用材料表面涂覆生物活性材料以改进基体的生物活性<sup>[4-5]</sup>。

### 1.1 热浸镀

热浸镀是将锌、铝、锡等金属在液态下涂镀到基体材料上, 以获得耐热、耐蚀性涂层的一种方法。热镀要求基体金属的熔点必须低于被镀金属的熔点, 防护材料需要具有优异的耐蚀性及耐热性, 因此热镀经常被用来加工保护材料<sup>[6]</sup>。桑清莲等人<sup>[7]</sup>对经过热镀铝的15GrMo钢和未经处理的15GrMo钢进行等温氧化测试, 结果显示: 经过热镀获得了含FeAl和Fe<sub>3</sub>Al相的镀层, 使基体耐氧化性明显增强; 氧化增重曲线在650℃和850℃下仅有缓慢上

收稿日期: 2017-05-02

\* 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(N150204021)

作者简介: 任鑫明(1990-), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生

通讯作者: 马北越(1978-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授。

升,很明显  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在热氧化过程中有效地阻隔了氧气,起到了保护层作用。

### 1.2 热喷涂

热喷涂是我国目前大力推广的表面技术之一。热源的加热效率、喷嘴的喷射速率及送粉方式均会影响热喷涂的效果。热喷涂具有工艺过程简单、涂层和基体材料来源广泛及涂层稳定耐用等优点,已被广泛应用于“三航”(航空、航天、航海)领域中<sup>[8]</sup>。韩志海等人<sup>[9-10]</sup>对等离子喷枪的结构做了改进,并采用改进后的喷枪制备了  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  陶瓷材料。研究表明:金属相上附着了大量的 20~50 nm 的晶粒,结合界面分明;新的送粉方式解决了过熔、过氧化问题,有利于改善基体抗热震性能和隔热效果。该研究结果为航空、航天发动机部件材料的探索提供了方向。

### 1.3 电镀

电镀是利用电化学方法将金属离子富集到阴极表面,使基体获得优异新性能的工艺过程。电镀通常用来制备金属镀层,如锌、锰、铅等镀层。电镀可根据材料服役要求调整制备流程,精细化高,尤其适合应用在电子领域中<sup>[11]</sup>。邓晓光等人<sup>[12]</sup>以铜棒为基底,镍和镍磷合金为镀材,选取电流密度为  $4 \text{ A/dm}^2$  的直流电源进行电镀,在铜棒表面生成了总厚度为 340 nm 的镍磷合金镀层,该镀层提高了基体的抗冲击性,以及增强了基体的耐磨性和防腐蚀性。

### 1.4 化学镀

化学镀也称无电解镀,是通过选取恰当的还原剂,将镀液中的金属离子还原沉积到零件表面的方法,常用的沉积方式主要有置换沉积、接触沉积和还原沉积三种方式。化学镀无需外加电源,其具有工艺简单、技术成熟及节能环保等优点,备受腐蚀防护和装饰领域青睐<sup>[13]</sup>。张含卓等人<sup>[14]</sup>在经表面预处理过的 45 钢基体上,采用化学镀手段制备得到 Ni-Co-Cu-P 合金镀层。通过扫描电子显微镜的观察发现,材料表面有直径 240~500 nm 的球形微粒,其间有纳米级空隙。盐雾试验和电化学腐蚀实验结果显示,自腐蚀电位升高到 0.26 V,腐蚀电流密度下降为  $19.17 \mu\text{A/cm}^2$ ,显然四元合金镀层的耐蚀性优于 45 钢,实验结果对四元合金化学镀提供了一定的参考性。

### 1.5 气相沉积

气相沉积是利用气相中发生的物理化学反应,

在镀件表面形成功能性或装饰性镀层的表面工程技术。常用的气相沉积技术主要有化学气相沉积、物理气相沉积及物理化学气相沉积。化学气相沉积(CVD),能够制备性能优异的多层多相涂层。物理气相沉积可在特殊钢表面制备超硬涂层,以改善其机械性能、延长服役年限。气相沉积能制备成型度高的金属或合金膜层,镀层致密均匀,在电子、刀具及食品包装等行业中发展迅速<sup>[15]</sup>。McInerney 等人<sup>[16]</sup>在  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基底上先镀上 200 nm 镍层,然后以 CVD 方法成功合成了大面积的高质量石墨烯。Chen 等人<sup>[17]</sup>对镍层厚度是否影响 CVD 合成石墨烯的最终效果进行了研究并发现,当镍层厚度为 300 nm 时,再采用 CVD 合成石墨烯效果最好。

## 2 激光熔覆技术原理

激光技术是上世纪人类的伟大发明之一,可有效应用在汽车、宇航、电子及医疗等重要行业中,应用范围之广、影响力和重要性不言而喻。经过几十年的发展,激光技术不断开花结果,衍生技术越来越多,技术细节也日臻完善。激光熔覆是当前发展较为迅速、前景更好的激光技术。近年来,因为激光处理技术的大范围应用,各国都开始投入大量资金和科研人员进行相关研究,并已经取得了长足的进步。

激光熔覆是由激光技术延伸出来的一种表面改性手段。通过利用激光束( $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ )使预制熔覆层与基材表面熔凝在一起,形成具有某种特殊性质的复合表面涂层。通过激光熔覆可以提高材料的力学性能、物理化学性能及生物性能,改善材料的强度、刚度、弹性模量和生物活性等。激光熔覆技术的送料方式也会影响最终的熔覆效果,常用的送料方式有预制式和同步式。预置式是将待涂覆材料喷涂到基体表面之后,再用高能激光将其与基体快速熔凝在一起;同步式是喷涂和激光辐射同时在合金池里进行,直接成型。激光熔覆的优劣标准主要是看熔覆层与基体材料的结合情况,以及涂层表面形态的完整性。影响熔覆层质量的因素主要有送料方式、离焦量、基体材料、涂层材料和搭接率<sup>[18]</sup>。与传统表面工程技术比较,激光熔覆有如下优点<sup>[19-20]</sup>:(1)材料适应范围广,按熔覆材料在加工前的形态分类有粉末状、丝状、薄板状等,粉末状材料用的较多,包括纯金属粉、合金粉和陶瓷粉;(2)冷却速率快,一般控制在  $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ,快速冷

却使得加工过程对基体的热影响微乎其微,熔覆层与基体的结合更好;(3)熔覆过程可控,自动化水平很高,可有效减少人为影响,设备与计算机相接,工艺参数、制备过程一目了然,既方便了实验记录,也为进一步优化过程提供了依据;(4)高效节能且环保,因为是非接触处理工艺,不会产生污染,并且可以选择价格低廉的金属做基底来生产新材料,能够降低材料成本,在可持续发展的背景下此特点显得尤为重要。

### 3 激光熔覆制备涂层的研究现状

早期的激光技术并没有得到重视,直到九十年代左右才真正发展起来.随着激光技术的发展,激光熔覆逐渐成为最具优势和发展潜力的表面改性技术.目前主要在航空航天、石油化工、生物模具及光伏等行业中推广应用,研究工作主要集中在光纤激光器、熔覆材料体系选择、基体界面结合、送粉系统及机制等方面。

#### 3.1 钛合金表面激光熔覆制备涂层

钛合金具有屈服强度高、密度小、比强度高、耐腐蚀性能优异等优点,已广泛应用于航空和航天领域中.经过半个世纪的应用探索与研究发展,钛合金已被证明是最佳的“三航”材料,而且因其密度小、生物相容性好,在医疗领域中也备受重视.最早被开发并投放应用的是 Ti-6Al-4V 合金(TC4),其综合力学性能优异、生物相容性好.然而,随着研究的深入,人们希望钛合金能具有更高的表面硬度、更好的摩擦性能,以及更优秀的生物性能.因此,提高硬度、耐高温、抗氧化及降低弹性模量成为目前研究的热点.激光熔覆具有速度快、操作准确、无污染等优点<sup>[21]</sup>,在改善钛合金性能方面卓有成效.目前,激光熔覆主要被应用在“三航”用钛合金和医用钛合金方面。

##### 3.1.1 宇航用钛合金

航空航天材料一般工作在高温、高酸碱的恶劣环境中,这要求其必须具备高强轻质、耐高温、耐高温氧化等性能.航海材料要承受海水的侵蚀和冲击,因此必须具备好的耐腐蚀性和抗冲击性.林英华等人<sup>[22]</sup>通过在 Ti-6Al-4V 合金(TC4)表面激光熔覆 TiB 和 TiB<sub>2</sub> 来增强 TC4 的表面强度,在激光功率为 2~3 kW、激光束速率为 4~8 mm/s、光斑尺寸为 3.7 mm×5.2 mm 的条件下,制备了结合良好、无裂

痕的陶瓷涂层.扫描电镜观测显示:涂层从外至内成分依次是 TiB<sub>2</sub> 相、TiB 与 TiB<sub>2</sub> 混合相及 TiB 相;同时还发现,激光功率的增加能诱发原位反应的发生,随着激光功率的增加,块状 TiB<sub>2</sub> 相开始熔化减少, TiB 相开始明显增多,在激光功率为 2.7 kW 时原位反应最激烈,细针状的 TiB 陶瓷相最多;经激光熔覆后 TC4 表面的显微硬度可达 700~800 HV,远高于 TC4 基体的 330 HV.

高温抗氧化性是宇航材料的关键性能,改善高温抗氧化性是宇航材料的研究热点之一.余鹏程等人<sup>[23]</sup>以 8 mm 厚的 Ti-6Al-4V 合金为基体,以 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Al-Si 为熔覆材料,采用激光熔覆技术制备涂层.在激光功率 1.0 kW、扫描速度 4 mm/s 及光斑尺寸 6 mm×3 mm 的工艺条件下,所制备涂层的高温及常温摩擦系数分别为 0.45 和 0.40,优于 Ti-6Al-4V 合金基体的 0.52 和 0.42;将涂层在 800 °C 下氧化 32 h 后检测其抗氧化性发现,经过熔覆后的材料抗氧化能力大约是未处理前的 8.4 倍,表明其高温抗氧化性大幅度提升.Liu 等人<sup>[24]</sup>通过在 TA2(工业纯钛)基体上激光熔覆 Ti-Ni 梯度涂层,观察 TA2 抗氧化性及强度的变化.研究发现,TA2 表面形成了 420~490 μm 的两相涂层,主要相为 NiTi/NiTi<sub>2</sub> 复合相和 Ni<sub>3</sub>Ti 相,经激光熔覆处理后 TA2 基体的高温抗氧化性及微观强度均明显增强。

##### 3.1.2 生物医用钛合金

钛合金本身就具有很好的生物相容性,但临床实验发现,钛合金中的 Al 和 V 等元素会产生细胞毒素,影响人体健康.因此,开发出稳定易用、安全可靠、生物性能优异的医用钛合金是当今生物材料领域中人们追寻的目标.采用激光熔覆技术制备生物涂层或多孔涂层,均可改善钛合金的生物性能,以满足临床医用要求.李敏杰等人<sup>[25]</sup>选取平均粒径为 75 μm 的 Ni 粉、50 μm 的 Ti 粉和 60~120 μm 的 B<sub>4</sub>C 粉为熔覆材料以制备涂层,研究发现:在 TC4 合金表面生成了硬质颗粒增强金属间化合物基复合涂层,涂层整体结构均匀致密、基本无气孔和裂纹等缺陷,厚度约为 1~2 mm,硬度较基体提高了 3 倍;在模拟人体体液中进行了耐腐蚀性测试发现,腐蚀电位正移、钝化宽容区增大,耐蚀性大约增大至基体的 3 倍。

涂层与基体的结合紧实度直接影响着医用合金的性能,同时也对医用制品的使用寿命产生重要影

响。石磊等人<sup>[26]</sup>在 TC4 合金表面通过激光熔覆制备 HA(羟基磷灰石)/HT(HA 和 TiO<sub>2</sub> 混合涂层)/T(TiO<sub>2</sub>)及 HA/TiO<sub>2</sub> 和 HA 生物陶瓷涂层,选择粒度 12 μm 的 HA 和粒度 40 μm 的 TiO<sub>2</sub>,通过同轴送粉方式,成功制备了 300 μm 的陶瓷涂层。研究表明:HA/HT/T 梯度涂层表面平滑、无明显裂痕,界面结合良好;界面的 Ca/P 比为 1.64,最接近 HA 的 1.67;基体硬度升高至 35.11 MPa。很明显,梯度陶瓷涂层性能优越,能够有效降低残余应力,基体材料的硬度也随之升高。

### 3.2 钢表面激光熔覆制备涂层

虽然钢铁冶炼开始较早,但直到十八世纪工业革命之后,钢冶炼技术才等到真正的黄金时代。借着工业革命的顺风车,钢铁凭借低廉的冶炼成本、易加工及可靠的性能,逐渐在建筑、土木、石油化工等行业中被广泛应用。2016 年,我国的粗钢产量约占到世界总产量的 50%,但特殊钢方面仍依赖于进口<sup>[27]</sup>。因此,优化钢铁企业模式,增加钢铁单品利润,从低端钢材到高品质钢过渡则是当下钢铁行业的主题。表面改性技术是生产高附加值特殊钢的有效方法,其中激光熔覆技术主要被用于改善钢铁的强度及耐磨和耐蚀性。

#### 3.2.1 不锈钢

不锈钢是铬含量比较高的钢合金,耐蚀性及韧性优异,被应用于航空、汽车、建筑等行业中。通过激光熔覆可改善不锈钢的缺陷和提升其性能,研究发现,经激光熔覆 Stellite6 合金(钴基合金)所制备的涂层能有效提升基体的耐蚀性,但同时也会对基体的其它性能产生影响。赵文雨等人<sup>[29]</sup>通过在 17-4PH 不锈钢(沉淀硬化型不锈钢)基体上制备 Stellite6 合金涂层,以观察高周疲劳强度的变化。在激光器功率为 2800 W、光斑大小为 2.0 mm×3.3 mm、扫描速度为 12 mm/s、送粉速率为 13.56 g/min,以及选择氩气在熔覆过程中作为保护气的条件下,研究发现:17-4PH 不锈钢的疲劳极限从 470 MPa 下降至 440 MPa,大约下降了 6%;涂覆 Stellite6 合金,虽然牺牲了 6%的疲劳极限,但却提升了对轮船材料更为关键的耐海水腐蚀性。任超等人<sup>[30]</sup>在赵文雨等人的研究基础上,对 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层做了进一步的耐水蚀性研究,结果发现:在熔覆参数保持一致条件下,将 Stellite6 合金粒度增大为 80~120 μm,涂层

的平均硬度升高到 499.7 HV,是 17-4PH 不锈钢基体(367.5 HV)的 1.4 倍;经过 30 h 耐海水腐蚀模拟测试,基体材料的水蚀最大深度 2.44 μm,表面粗糙度 0.361 μm,而涂覆了 Stellite6 合金涂层的 17-4PH 不锈钢基体水蚀深度仅有 1.19 μm,表面粗糙度也下降到 0.098 μm,表明经熔覆后基体的强度及耐水蚀性都得到了增强,可有效延长汽轮机使用年限。

#### 3.2.2 模具钢

模具是机械制造、电机电器等工业部门必不可少的装备工具,其质量直接影响产品的最终效果。因此,模具钢在工业领域中的重要性不言而喻。然而,高品质模具钢生产技术要求严格,我国目前仍依赖进口<sup>[31]</sup>。骆芳等人<sup>[32]</sup>在塑料模具钢 P20 表面通过激光熔覆制备陶瓷复合涂层,X 射线衍射分析显示:涂层的相组成为 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 WC 和 FeSi 相,其中 WC 相有高的硬度及良好耐磨性;当涂层厚度在 1.5 mm 时,硬度可达 620 HV,大约是基体的 2 倍多;通过摩擦磨损试验也证实了,经熔覆的基体的摩擦磨损性能的确得到了提高,其中摩擦系数及失重分别是 Cr12MoV 冷作模具钢的 1/6 和 1/15,效果明显。

戴晓光等人<sup>[33]</sup>以自制的 SiC/Fe-Al 合金粉末在 Cr12MoV 冷作模具钢表面进行激光熔覆,得到了无明显冶金缺陷的涂层,涂层的主要成分为 α-Fe 及 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 和部分金属间化合物。电化学腐蚀测试表明,自腐蚀电位从 -0.662 V 升高至 -0.292 V,自腐蚀密度也相应的减小,表明合金涂层的存在增强了冷作模具钢的电化学腐蚀性能。后来,戴晓光等人<sup>[34]</sup>在 P20 塑料模具钢基体上通过激光熔覆技术制备了 Fe 基 SiC 金属陶瓷涂层,基体模具钢的显微硬度从 377 HV 提升到 572 HV,大约增加了 52%,表明通过激光熔覆可有效解决模具钢的失效恢复问题,而且成本较低。

## 4 结 语

激光熔覆因具有高效清洁的技术特点而已经取得了长足的发展,配套设施及操作流程也得到了进一步的优化升级。目前亟待解决的主要问题有激光熔覆成型理论的深化研究、熔覆材料的新体系开发,以及如何消除熔覆层裂纹和气泡等缺陷。目前,尽管激光熔覆技术发展和应用已趋于完善,但真正由我国自主研发的关键技术甚少,与欧洲、美国和日本等

发达国家相比我国在激光熔覆技术方面仍有一定差距。因此,我国政府部门和相关企业应进一步加大资金投入,并引入或培养一批高级人才,加强创新性研究,通过产学研深入合作,以推动激光熔覆涂层技术在我国的发展及应用迈入新的台阶。

#### 参考文献:

- [1] LEYENS C, PETER M. Titanium and titanium alloys [M]. Weinheim: Wiley-VCH GmbH and Co. KGaA, 2005.
- [2] 夏光明,周建桥,闵小兵,等. 涂层技术概述及工程应用[J]. 金属材料与冶金工程, 2012, 40(1): 53-59.
- [3] 马北越,张博文,于景坤,等. 3D打印技术及先进应用研究进展[J]. 材料研究与应用, 2016, 10(4): 233-237.
- [4] 金和喜,魏克湘,李建明,等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280-292.
- [5] SHMNSMKE F, MASASHI N, HYMN-MIN K, et al. Osteoinduction of porous bioactive titanium metal[J]. Biomaterials, 2004, 25(4): 443-450.
- [6] 李安敏,郑良杰,胡武,等. 钢材热浸镀铝的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(5): 96-99.
- [7] 桑清莲,张兰,王峰. 热浸镀铝对15CrMo水冷壁管热氧化行为的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(14): 171-173.
- [8] 郑学斌,谢有桃. 热喷涂生物陶瓷涂层的研究进展[J]. 无机材料学报, 2013, 28(1): 12-20.
- [9] 韩志海,王海军,王斌利,等. 超音速等离子喷涂制备先进陶瓷涂层的特点[J]. 有色金属:冶炼, 2008(增刊): 61-66.
- [10] HAN Z H, XU B S, WANG H J, et al. A comparison of thermal shock behavior between currently plasma spray and supersonic plasma spray  $\text{CeO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  graded thermal barrier coatings[J]. Surface and Coating Technology, 2007, 201(9): 5253-5256.
- [11] 高海桓,卜路霞,王为. 浅谈电镀技术的发展及应用[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(5): 29-34.
- [12] 邓晓光,王睿鑫,高泽之,等. 铜基电镀复合镀层的制备工艺与耐腐蚀摩擦性能的研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(12): 127-130.
- [13] 陈步明,郭忠诚. 化学镀研究现状及发展趋势[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(11): 11-16.
- [14] 张含卓,李晶,欧雪梅,等. 化学镀 Ni-Co-Cu-P 非晶镀层及其耐蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(11): 2965-2969.
- [15] 李一,李金普,柳学全,等. 金属有机化学气相沉积的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(增刊): 153-156.
- [16] MCNERNY D Q, VISWANATH B, COPIC D, et al. Direct fabrication of graphene on  $\text{SiO}_2$  enabled by thin film stress engineering [J]. Scientific Reports, 2014 (4): 5049.
- [17] CHEN C Y, DAI D, CHEN G X, et al. Rapid growth of single-layer graphene on the insulating substrates by thermal CVD[J]. Applied Surface Science, 2015, 346: 41-45.
- [18] 张坚,吴文妮,赵龙志. 激光熔覆研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2013, 42(6): 131-135.
- [19] 李养良,金海霞,白小波,等. 激光熔覆技术的研究现状与发展趋势[J]. 热处理技术与装备, 2009, 30(4): 1-5.
- [20] PAN C G, WANG H C, WANG H F, et al. Microstructure and thermal physical parameters of  $\text{Ni60-Cr}_3\text{C}_2$  composite coating by laser cladding [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 25(6): 991-995.
- [21] 王恩庭,李崇桂,黄茜,等. 钛合金表面激光熔覆研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(20): 27-30.
- [22] 林英华,陈志勇,李月华,等. TC4钛合金表面激光熔覆原位制备 TiB 陶瓷涂层的微观组织特征与硬度特性[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2694-2698.
- [23] 余鹏程,刘秀波,陆小龙,等. Ti6Al4V合金激光熔覆复合涂层的摩擦学和高温抗氧化性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 89-96.
- [24] LIU F C, MAO Y Q, LIN X, et al. Microstructure and high temperature oxidation resistance of Ti-Ni gradient coating on TA2 titanium alloy fabricated by laser cladding[J]. Optics and Laser Technology, 2016, 83: 140-147.
- [25] 李敏杰,吴国龙,张杰,等. 医用钛合金激光熔覆金属间化合物基复合涂层研究[J]. 应用激光, 2015, 35(4): 423-427.
- [26] 石磊,李兰兰,张立君,等. 钛合金表面激光熔覆生物陶瓷梯度涂层的组织性能分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(1): 64-69.
- [27] 王一德,唐荻. 中国特殊钢行业的发展现状及思考[J]. 钢铁, 2013, 48(7): 1-6.
- [28] 武明雨,胡凯,王丛,等. 不锈钢冶炼的研究进展[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集, 北京:冶金工业出版社, 2015: 1183-1188.
- [29] 赵文雨,芦凤桂,李铸国,等. 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 合金涂层高周疲劳行为研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 131-136.
- [30] 任超,李铸国,疏达,等. 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层组织及耐水蚀性能[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 101-108.

(下转第 152 页)

of Li. Strength of the alloys was enhanced with increasing the contents of Li or Cu in the range of contents above. And different increasing extent of Li content enhanced the strength of the alloy with obviously different extent. Total non-solution atomic mole fraction of Cu and Li and their ratio determined the strength of the alloy by effecting the amount, types, and fractions of precipitates. To enhance the strength of Al-Li alloys largely, their atomic ratio should be kept high values, while increasing the total non-solution atomic mole fraction of Cu and Li.

**Key words:** aluminum-lithium alloy; aging strengthening phase; strength; microstructure; Cu/Li atomic mole fraction ratio

(上接第 145 页)

- [31] 潘金芝,任瑞铭,戚正风. 国内外模具钢发展现状[J]. 金属热处理,2008,33(8):10-15.
- [32] 骆芳,陈智君,楼程华,等. 塑料模具钢表面激光熔覆陶瓷复合涂层的性能研究[J]. 兵工学报,2010, 31(7): 933-938.
- [33] 戴晓光,周圣丰. Cr12MoV 冷作模具钢表面激光熔覆球磨 SiC 强化 Fe-Al 涂层研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(10):170-173.
- [34] 戴晓光,周圣丰. P20 塑料模具钢表面激光熔覆球磨 Fe 基 SiC 金属陶瓷涂层的研究[J]. 热加工工艺, 2016,45 (6):190-192.

## Research development of laser cladding coatings on the surfaces of titanium alloy and steel

REN Xinming, MA Beiyue, ZHANG Bowen, ZHANG Yaran, YU Jingkun

*Institute of High Temperature Materials and Technology for Metallurgy, School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China*

**Abstract:** The working principle and characteristics of the coating technology were briefly introduced. The research status and progress of the laser cladding coating on the surfaces of titanium alloy and steel substrate were emphatically expounded. The details of the research on the aerospace titanium alloy, biomedical titanium alloy, as well as stainless steel and mold steel were summarized.

**Key words:** laser cladding; titanium alloy; steel; coating; research development