

文章编号:1000-6893(2002)05-0473-06

# 金属材料激光表面改性与高性能金属零件激光快速成形技术研究进展

王华明

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院 激光材料加工与表面工程实验室,北京 100083)

## RESEARCH PROGRESS ON LASER SURFACE MODIFICATIONS OF METALLIC MATERIALS AND LASER RAPID FORMING OF HIGH PERFORMANCE METALLIC COMPONENTS

WANG Hua-ming

(Laboratory of Laser Materials Processing and Surface Engineering, School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘要:** 简要报道本实验室目前在先进航空金属材料激光表面改性及高性能金属零件激光快速成形技术研究与应用的新进展。主要内容包括:(1)钛合金耐磨阻燃激光表面合金化与激光熔覆表面改性技术;(2)刷式密封及指尖密封跑道高温自润滑耐磨涂层新材料及其激光熔覆制备新技术;(3)难熔金属硅化物复合材料高温耐磨耐蚀多功能涂层新材料及激光熔覆涂层技术;(4)高性能/梯度性能钛合金及高温合金结构件激光快速成形技术。

**关键词:** 激光表面改性;钛合金;金属间化合物复合材料涂层;高温磨损;激光快速成形

**中图分类号:** TG665;V252 **文献标识码:** A

**Abstract:** Progress of research and applications on laser surface modifications (laser surface alloying, laser cladding) of advanced aeronautical metallic materials and laser rapid forming of high-performance metallic components currently undertaken in the Laboratory of Laser Materials Processing and Surface Engineering is briefly reviewed and the potential applications in the aircraft and gas turbine engines are prospected. The main contents include (1) laser surface alloying and cladding of titanium alloys for wear, oxidation and burr-resistance; (2) laser cladding for advanced high-temperature self-lubrication wear-resistant metal and ceramic matrix composite coatings for high-temperature brush seal and finger-tip seal applications; (3) microstructure and mechanical properties of laser clad advanced high-temperature wear and corrosion resistant multi-functional refractory metallic silicide composite coatings and processing; (4) laser rapid forming of high-performance/functionally graded titanium and superalloys components.

**Key words:** laser surface modification; titanium alloys; intermetallic composite coatings; high-temperature wear; laser rapid forming

激光技术是 20 世纪对人类文明及社会进步影响最深远的重大科技成果之一,激光技术在材料科学及制造科学中的应用,大大促进了材料科学与工程及先进制造技术的发展,实际上,微-纳米低维材料(薄膜、多层膜、微-纳米粉体及原子簇材料等)及三维块体新材料激光合成与加工等新材料合成技术,激光焊接、激光切割、激光打孔、激光微细加工、激光清洗、激光快速原型制造等先进激光制造技术,激光表面相变强化、激光冲击强

化、激光表面熔化、激光表面合金化、激光熔覆等激光表面改性技术,高性能/梯度性能金属零件激光快速成形等材料设计、制备与快速成形一体化先进激光快速制造技术,一直是材料科学与工程、制造科学与工程等领域中最活跃、发展最迅速的前沿热点研究课题,这些技术对未来航空航天及工业技术的进步和发展将产生深远的影响。

### 1 钛合金高温耐磨阻燃激光表面合金化与激光熔覆表面改性新技术

钛合金具有密度低、比强度及屈强比高、高温力学性能及耐蚀性优异等突出特点,在高推比航空发动机及先进战斗机等国防武器装备中的用量及对武器装备技术水平的作用越来越大。但是,钛合金摩擦系数高、耐磨性低、高温高速摩擦易燃

收稿日期:2002-06-02; 修订日期:2002-07-01

基金项目:国家 863 计划(2001AA337020,2002AA331030)、国家自然科学基金(50071004,50101001)、十五总装科技预研、航空基础科学基金(99H51042,98H51017,00H51013,02H51011)、北京市自然科学基金(2022012)及武器装备预研基金资助项目

文章网址:<http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2002/05/0473/>

着火(“钛火”)等致命缺点,严重限制了钛合金零部件在高推比航空发动机等先进国防武器装备中的应用并进而严重影响国防武器装备技术水平的提高。因此,提高钛合金关键零部件的耐磨性能、阻燃性能、微动疲劳性能等“表面性能”,成为先进航空发动机等武器装备研制进程中必须攻克的重要课题。然而,由于受钛合金本性的限制,沿用发展新型钛合金的传统合金设计思路,难以有效克服钛合金的上述固有性能缺点。由于摩擦、粘着、磨损、“钛火”等失效行为均为起源于零件表面并逐渐发展的破坏行为,因此,采用先进的表面工程技术,直接在钛合金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、优异阻燃性能、与钛合金零件基材之间为牢固冶金结合的特殊材料冶金涂层,无疑是在保持钛合金固有性能优点的条件下、从根本上解决钛合金摩擦系数高、耐磨性低、高速高温摩擦易燃着火等固有性能缺点的最有效、最经济、最灵活和最具可设计性的方法之一<sup>[1~7]</sup>。

TiN 及 TiC 等高硬度高熔点间隙相具有优异的耐磨性与化学稳定性,若能在钛合金零件表面制备出含有较高体积分数 TiN 及 TiC 等耐磨增强相的复合材料冶金涂层,则可望有效解决钛合金耐磨性低的问题,据此,分别以元素氮及元素碳为合金元素分别对 BT9, TC4 等钛合金进行激光表面合金化,利用氮气及碳粉与钛合金表面激光熔化高温熔池之间的冶金化学反应,在钛合金表面分别制得了以高硬度高耐磨 TiN 及 TiC 初生树枝晶为耐磨相的“原位”耐磨复合材料表面改性层,其与钛合金基材之间为完全梯度渐变冶金结合(如图 1 所示)、厚度在 0.4~2.0mm 内灵活可调、平均硬度达 HV1000 以上,实验室常温干滑动磨损试验结果表明其耐磨性较钛合金基材提高了 45~93.8 倍<sup>[1,3~5]</sup>。



图1 Ti-6Al-4V 钛合金激光气体表面合金化 TiN/Ti“原位”耐磨复合材料表面改性层组织 SEM 照片

Fig. 1 SEM micrograph showing the microstructure of laser surface alloyed TiN/Ti composite coating on Ti-6Al-4V

由于 TiN 及 TiC 在 450℃ 以上高温抗氧化性能较低,上述以 TiN 及 TiC 硬质化合物为增强相的耐磨复合材料激光合金化表面改性层,主要适用于在室温及 450℃ 以下摩擦磨损条件下工作,在更高温度条件下,必须需求新的耐磨涂层材料体系。难熔金属硅化物  $Ti_5Si_3$  具有熔点高、密度低、室温及高温硬度高、抗磨料磨损及粘着磨损能力强、同金属之间摩擦系数低、高温抗氧化性能好等突出特点,可望成为一种优异的高温耐磨新材料,据此,本文以 Si 作为合金元素对钛合金进行激光表面合金化,制得了由块状难熔金属硅化物  $Ti_5Si_3$  初生相及  $\sim Ti/Ti_5Si_3$  共晶组织组成、与基材间为完全冶金结合的  $Ti_5Si_3/\sim Ti$  耐磨复合材料表面改性层(如图 2 所示),合金层平均硬度根据需要可在 HV600~HV1100 范围内灵活可控且分布均匀,激光表面合金层中  $Ti_5Si_3$  体积分数及显微组织,根据需要可通过改变合金层中元素 Si 的含量及激光表面合金化工艺参数而得到灵活控制,与钛合金基材相比,室温干滑动磨损耐磨性提高 85~125 倍以上<sup>[2,3,6]</sup>。

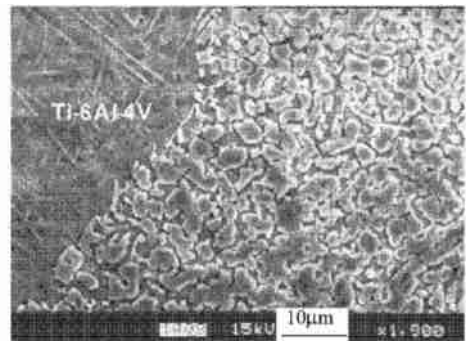
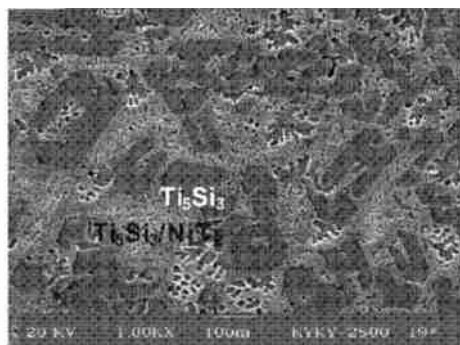


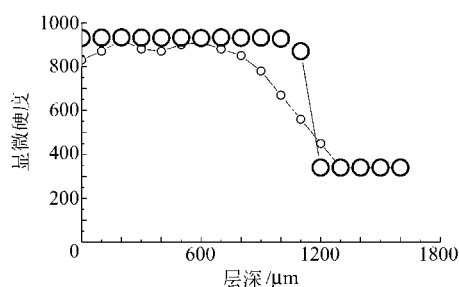
图2 Ti-6Al-4V 钛合金激光表面合金化  $Ti_5Si_3/\sim Ti$  耐磨复合材料表面改性层显微组织 SEM 照片

Fig. 2 SEM micrograph showing the microstructure of a laser surface alloyed  $Ti_5Si_3/\sim Ti$  composite coating on Ti-6Al-4V

由于钛合金表面  $Ti_5Si_3$  增强耐磨复合材料表面改性层的基体组织仍为钛基固溶体,虽然其体积分数很低,但由于受钛合金本性的决定作用,涂层基体组织中少量  $\alpha$  相的存在仍然在一定程度上影响了涂层的耐磨性及摩擦系数。为进一步提高激光表面改性层的摩擦学性能,以 Ti-Si-Ni 合金粉末为原料,采用激光熔覆技术在 BT9 及 TC4 钛合金表面上制得了以规则块状  $Ti_5Si_3$  金属硅化物为耐磨增强相、以  $Ti_5Si_3/NiTi_2$  金属间化合物共晶组织为基的新型金属间化合物耐磨复合材料涂层(见图3)。涂层组织中块状初生相  $Ti_5Si_3$  及块状初生相之间  $Ti_5Si_3/NiTi_2$  共晶组织



(a) 显微组织 SEM 照片



(b) 沿层深硬度分布曲线

图 3 钛合金 BT9 表面激光熔覆  $\text{Ti}_5\text{Si}_3/\text{NiTi}_2$  耐磨耐蚀复合材料涂层显微组织及沿层深硬度分布曲线Fig. 3 Microstructure and hardness profile of a laser clad  $\text{Ti}_5\text{Si}_3/\text{NiTi}_2$  intermetallic matrix composite coating

的相对量,根据需要可以方便地通过改变合金粉末成分而进行灵活设计与控制。由于上述激光熔覆金属间化合物耐磨涂层的组织组成相全部均为金属间化合物,金属间化合物  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  及  $\text{NiTi}_2$  高的室温及高温硬度、独特的金属键与共价键共存性质,使得该新型金属间化合物耐磨复合材料涂层不仅具有极低的磨损速率,而且还具有很低的摩擦系数,与原始钛合金基材相比,激光熔覆  $\text{Ti}_5\text{Si}_3/\text{NiTi}_2$  金属间化合物耐磨复合材料涂层耐磨性可提高 140 倍以上、摩擦系数降低一倍以上<sup>[7]</sup>。

为进一步提高钛合金零件的高温抗氧化性能及高温耐磨性与阻燃性能,采用 Ni80Cr20- $\text{Cr}_3\text{C}_2$  混合合金粉末为原材料,采用激光熔覆技术在 TC4 钛合金表面制得了以高体积分数  $\text{Cr}_7\text{C}_3 + \text{TiC}$  为耐磨增强相、以高温抗氧化性能及高温强韧性优异的 NiCr 镍基高温合金固溶体为基、涂层厚度为 0.5 ~ 2.0mm 的高温耐磨阻燃复合材料冶金涂层,涂层与基体为完全冶金结合,涂层中高温耐磨相的体积分数可在 20% ~ 80% 范围内灵活调节,涂层平均硬度达 HV800 ~ HV1400、耐磨性可提高 35 ~ 180 倍。

## 2 高温自润滑耐磨涂层新材料及激光熔覆涂层制备新技术

先进高推比航空发动机等先进国防武器装备中存在着许多在高温条件下承受强烈摩擦磨损作用的相对运动付耐磨零部件。它们不仅要求具有优异的高温耐磨性与抗氧化性,而且由于高温条件下无法实现外加润滑而必须具有优异的高温自润滑性能。例如,刷式密封及指尖密封技术是高推比航空发动机高温气体密封的两大先进核心技术之一,由于密封跑道耐磨涂层要在高温高压氧化性气体环境中、在和丝刷或指尖环紧密接触、相对滑动速度达 300m/s 以上条件下承受强烈的高温摩擦磨损作用,转子跑道表面高温耐磨涂层材料的高温摩擦学性能及涂层质量(涂层组织必须完全致密、涂层与基材间的结合必是无界面冶金结合)对刷式密封及指尖密封装置的密封性能及使用寿命具有决定性影响,因而,密封转子跑道表面高温耐磨涂层材料的高温耐磨性能、同金属丝刷之间的摩擦学相容性(如摩擦系数、粘着倾向等)、涂层质量(致密性、均匀性等)及其与转子基材之间的结合强度,对刷式封严效率及封严性能具有决定性的影响。对密封跑道高温耐磨涂层材料性能及涂层质量与涂层技术均提出了严峻的要求和挑战。

针对高推比航空发动机研制及现役航空发动机改型的需要,本课题组在国内外率先采用激光熔覆技术开展了高温自润滑金属基及陶瓷基高温耐磨复合材料涂层新材料及其优质涂层激光熔覆制备技术的研究探索<sup>[8-12]</sup>。以 NiCr- $\text{Cr}_3\text{C}_2$ - $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$  及 Ag 混合粉末为原材料、采用激光熔覆技术在铁基及镍基高温合金表面上,制得了以 NiCr 镍基高温合金固溶体为基体、以  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  高硬度碳化物为高温耐磨相、以  $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$  共晶为高温自润滑相、以金属 Ag 为中低温自润滑相的快速凝固高温自润滑金属基耐磨复合材料涂层,该涂层与金属基材之间为完全冶金结合、涂层平均硬度约 HV1000、耐磨相体积分数最高可达 80% 以上,该涂层在我国某航空发动机高压压气机丝刷密封耐磨跑道上进行了初步激光熔覆工艺及应用试验。目前正集中精力开展以金属间化合物为耐磨相、以金属间化合物为高温及低温自润滑相的新型高温自润滑耐磨金属间化合物基复合材料(IMCs)涂层新材料及其激光熔覆技术的研究。

随着航空发动机工作温度的不断升高,金属

基高温自润滑耐磨复合材料涂层难以满足压气机特别是涡轮燃气高温密封跑道的性能要求,为此,我们近期开展了陶瓷基高温自润滑耐磨复合材料涂层新材料及其激光熔覆涂层新技术的探索,分别以  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NiO}$  陶瓷粉末为原材料,采用激光熔覆涂层技术在金属及氧化铝结构陶瓷基材上制得了以氟化钙(见图 4(a))及 NiO(见图 4(b))为高温自润滑相、以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为基的氧化物陶瓷基复合材料高温自润滑耐磨涂层。图 4(a)中片状骨架相为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、球状相为  $\text{CaF}_2$ ;图 4(b)中树枝状相为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、枝晶间为 NiO。系统地研究了涂层中高温自润滑相的体积分数(10%~50%)及激光熔覆工艺参数对涂层组织、耐磨性及摩擦系数的影响,室温干滑动磨损试验结果表明,大量  $\text{CaF}_2$  及 NiO 等高温自润滑相的加入,尽管使涂层硬度大幅度降低,但涂层的耐磨性却大幅度提高、摩擦系数显著降低(详见表 1),与激光熔覆 100% $\text{Al}_2\text{O}_3$  相比,即使在 NiO 及  $\text{CaF}_2$  等高温自润滑相几乎无明显作用的室温干滑动磨损条件下,激光熔覆陶瓷基高温自润滑陶瓷基复合材料涂层耐磨性最高可提高近 30 倍、摩擦系数也显著降低。

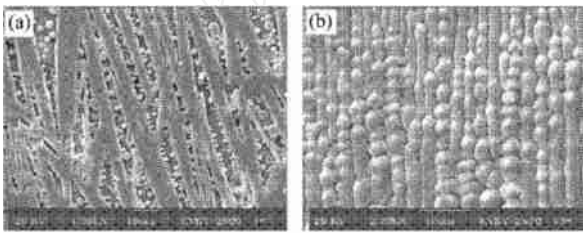


图 4 激光熔覆两种材料高温自润滑陶瓷基耐磨复合材料显微组织 SEM 照片

(a)  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\%\text{CaF}_2$ ; (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}20\%\text{NiO}$

Fig. 4 SEM micrographs showing the microstructure of laser clad  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\%\text{CaF}_2$  (a) and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}20\%\text{NiO}$  (b) high-temperature self-lubrication wear resistant ceramic matrix composite coatings

表 1 激光熔覆高温自润滑陶瓷基耐磨复合材料涂层硬度及室温干滑动磨损试验结果

Table 1 Relative wear resistance and friction coefficient of laser clad high-temperature self-lubrication wear resistant ceramic matrix composite coatings

| 涂层成分  | 硬度     | 相对耐磨性 | 摩擦系数 |
|---|--------|-------|------|
| 100% $\text{Al}_2\text{O}_3$                    | HV1620 | 1     | 0.60 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\%\text{NiO}$   | HV1250 | 4.5   | 0.48 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}40\%\text{NiO}$   | HV1190 | 8.7   | 0.45 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}50\%\text{NiO}$   | HV970  | 3.7   | 0.48 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\%\text{CaF}_2$ | HV760  | 29.3  | 0.48 |

### 3 难熔金属硅化物高温耐磨耐蚀多功能涂层材料及其激光熔覆涂层技术

Mo-Si, Cr-Si, Nb-Si, Ti-Si, Ni-Si 等过渡金属硅化物具有熔点高、高温抗氧化性能优异、耐蚀性好、高温蠕变强度高突出特点,被誉为在航空航天、船舶等工业中很有发展前途的新一代高温结构候选材料之一。然而,严重的室温及中温脆性、低的高温强度是目前阻碍其走向工业应用的主要障碍。但是,从耐磨耐蚀耐高温氧化涂层材料及表面工程观点来看,由于其很高的硬度及其反常的硬度-温度关系、金属键、离子键及共价键共存的强原子间结合力性质及其独特的化学成分特点,上述金属硅化物无疑会具有优异耐磨料磨损、粘着磨损、高温磨损性能、低的摩擦系数、优异的高温抗氧化性能与耐蚀性能,因而有望成为一类在航空发动机高温运动摩擦副等部件上具有广阔应用前景的高温耐磨耐蚀多功能涂层新材料。据此,本课题组率先在国内外开展了激光熔覆  $\text{MoSi}_2$ ,  $\text{Cr}_3\text{Si-Cr}$ ,  $\text{Cr}_3\text{Si-Cr}_2\text{Ni}_3\text{Si}$ ,  $\text{Ti}_5\text{Si}_3\text{-NiTi}_2$ ,  $\text{NiSi-Ni}_2\text{Si}$ ,  $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{15}\text{-FeNi}$  等金属硅化物复合材料涂层新材料及其优质涂层激光熔覆制备技术的研究与开发。研究表明,上述激光熔覆新型高温耐磨耐蚀多功能涂层新材料组织致密均匀;同零件金属基材间为牢固的冶金结合;涂层硬度在 HV600~HV1800 之间;具有优异的室温及高温磨料磨损、粘着磨损性能;具有很低的摩擦系数、十分优异的耐化学腐蚀及电化学腐蚀性能具有优良的高温抗氧化及耐蚀性能<sup>[13~23]</sup>。由于篇幅的限制,在此仅给出激光熔覆  $\text{Cr}_3\text{Si-Cr}_2\text{Ni}_3\text{Si}$  金属硅化物复合材料涂层组织(见图 5)及其部分性能试验结果(图 6)。由图 5(a)可见,涂层组织均匀致

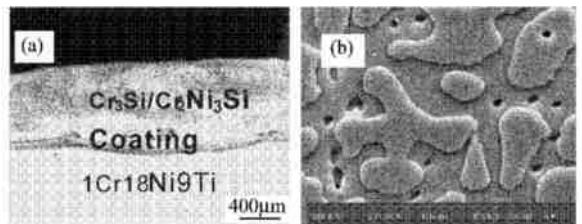


图 5 激光熔覆  $\text{Cr}_3\text{Si-Cr}_2\text{Ni}_3\text{Si}$  金属硅化物高温耐磨耐蚀多功能复合材料涂层 (a) 横断面低倍组织 OM 照片; (b) 涂层典型组织 SEM 照片

Fig. 5 OM photograph showing the overview transverse section (a) and typical microstructure (b) of a laser clad  $\text{Cr}_3\text{Si-Cr}_2\text{Ni}_3\text{Si}$  metal silicide wear and corrosion resistant composite coating

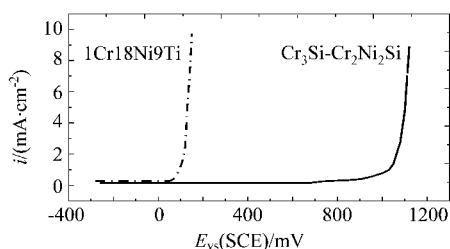


图 6 不锈钢 1Cr18Ni9Ti 与平均化学成分为 Cr<sub>47</sub>Ni<sub>40</sub>Si<sub>13</sub> 的激光熔覆 Cr<sub>3</sub>Si-Cr<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si 金属硅化物高温耐磨耐蚀多功能复合材料涂层在 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液中的阳极极化曲线

Fig. 6 Anodic polarization curves of a laser clad Cr<sub>3</sub>Si-Cr<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si metal silicide composite coating and the austenitic stainless steel 1Cr18Ni9Ti in 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> water solution

密、涂层与基材间为牢固的无界面冶金结合;由图 5(b)可见,其组织由 Cr<sub>3</sub>Si 初生树枝晶均匀分布于 Cr<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si 三元金属硅化物基体中。激光熔覆 Cr<sub>3</sub>Si-Cr<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si 金属硅化物复合材料涂层硬度高而且分布非常均匀。随着 Cr<sub>3</sub>Si 初生树枝晶体积分数不同,涂层平均硬度可在 HV400 ~ HV1200 范围内调节,室温干滑动磨损耐磨性较 1Cr18Ni9Ti 提高 37 ~ 78 倍、摩擦系数降低 50% 以上。由图 6 可见,即使在 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液中,激光熔覆 Cr<sub>3</sub>Si-Cr<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si 金属硅化物复合材料涂层的耐电化学腐蚀性能也远远优于奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti。本文研究结果表明,上述 Mo-Si, Ti-Si, Cr-Si 等金属硅化物复合材料涂层系一类在航空发动机等领域中具有重要应用前景的新型高温耐磨耐蚀多功能涂层新材料。

#### 4 高性能/梯度性能钛合金及高温合金结构件激光快速成形技术

随着航空等武器装备技术水平的不断提高和研制、生产周期及装备部队使用周期的不断缩短,对武器装备中钛合金、高温合金等关键金属零件的制造技术及材料性能都提出了越来越高的要求,在制造技术上,要求高效、快速并具有快速响应能力及柔性;在材料技术上,对武器装备中关键金属结构件材料性能要求越来越高,甚至要求同一金属零件不同部位用不同的材料来制造以满足同一金属零件不同部位的特殊材料性能,因此,现代制造技术要求高性能材料设计、制备与近净成形复杂金属零件快速成形一体化。

高性能金属零件激光快速成形技术(Laser Rapid Forming)是 1995 年在美国发明并异常迅速发展的一种高性能全致密实际金属零件的低成

本、快速先进制造技术。它将快速原型制造技术、高功率激光熔覆技术与先进材料制备技术有机融为一体,在金属零件 CAD 三维实体模型切片数据的驱动下、通过金属材料的激光逐层熔覆沉积,在无需任何专用模具和任何专用工装条件下直接快速制造出具有快速凝固组织特征的高性能全致密复杂实际金属零件。利用该工艺可通过在激光逐层熔覆沉积成形过程中可灵活改变合金粉末的成分制造不同部位具有不同材料的梯度功能材料金属零部件。激光快速成形工艺有: 工艺简单、制造环节少、适应于各种复杂金属零件快速制造与柔性制造; 材料合成制备与复杂零件快速成形制造一体化; 具有快速凝固非平衡组织、机械性能优异并可方便地制造梯度性能零件; 制造工艺简单、生产成本低、材料利用率高等独特优点,尤其适合于飞机机身钛合金复杂结构件及航空发动机涡轮盘、叶片等关键高性能高温合金复杂结构件的快速制造,例如,美国 Aeromet 公司利用激光快速成形技术制造的多个钛合金关键大型承力结构件;如尺寸达到 2.5m、重达 130kg 的大型整体筋板加强钛合金发动机框、机翼拼接接头等已在 F-22 及 F-18E/F 上得到批量应用。

北京航空航天大学激光材料加工与表面工程实验室自 1998 年以来,以先进飞机机身带筋加强复杂钛合金关键承力结构件及高推比航空发动机高性能梯度性能高温合金涡轮盘的快速制造为研究目标,开展了 BT20, TC4 等钛合金带筋加强复杂结构件; Rene95, Rene88DT 等径向定向快速凝固高温合金零件; Ni-Si, Ti-Si 金属间化合物及 Cr-Si 金属间化合物基复合材料<sup>[15,17]</sup>; 高温耐磨耐蚀合金结构件激光快速成形关键材料技术、工艺技术及工艺装备技术的研究与开发。例如,针对高推比航空发动机涡轮盘的工作条件和性能要求,开展了超纯净、径向定向快速凝固梯度性能高温合金涡轮盘激光快速成形技术的探索研究,初步快速成形出了具有沿盘件径向方向定向快速凝固树枝晶组织的“径向定向快速凝固镍基高温合金盘件”样件,其沿径向方向定向生长的树枝晶非常细小挺直、组织致密均匀,其一次枝晶及二次间距十分细小并几乎不随盘件直径的增加而变化,与普通定向凝固组织相比,激光快速成形定向凝固组织直径间距降低近百倍。由于其组织完全致密且树枝晶生长方向与涡轮盘高温受力方向一致,具有优异的高温蠕变强度与疲劳强度,特别是其生产工艺简单、生产制造周期短、材料利用率

高(可达60%以上)、制造成本低。另外,本技术也特别适合于航空航天武器装备关键高温结构零部件的激光熔覆快速修复与性能升级再制造。由于其独特的优点,可以预见高性能金属零件激光快速成形技术将很快在飞机、发动机关键金属零件的快速制造及修复中发挥独特的作用。

## 5 结 论

(1)基于快速凝固新材料合成与制备的激光表面合金化及激光熔覆表面改性新技术,是提高钛合金等航空金属材料及其高温运动副零部件高温耐磨耐蚀等高温性能的最有效方法之一。

(2)集材料设计、制备与快速成形于一体的高性能/梯度性能金属零件激光快速成形技术,在钛合金、高温合金等复杂结构件的快速制造及修复中均具有十分重要的应用前景。

## 致 谢

有张凌云、于利根、于荣莉、何秀丽、蒋平、张强、刘秀波、段刚、刘元富、吕旭东、王春敏、蔡良续、李锁岐、张继娟、张立强、张长利、曹芳、徐亚伟、方艳丽等同志参加了本文研究工作,谨此致谢!

## 参 考 文 献

- [1] Jiang P, He X L, Li X X, *et al.* [J]. *Surf & Coatings Technol*, 2000, 130(1): 24 - 28.
- [2] Jiang P, Wang H M. [J]. *Proc of SPIE*, 2000, 3888: 476 - 481.
- [3] 蒋平,张继娟,王华明. [J]. *应用激光*, 1999, 19(5): 229 - 232.  
(Jiang P, Zhang J J, Wang H M. [J]. *Applied Lasers*, 1999, 19(5): 229 - 232.)
- [4] 王华明,何秀丽. [J]. *金属学报*, 1999, 35(10): S124 - S126.  
(Wang H M, He X L. [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35(10): S124 - S126.)
- [5] 刘元富,赵海云,王华明. [J]. *材料研究学报*, 2002, 16(3): 314 - 318.  
(Liu Y F, Zhao H Y, Wang H M. [J]. *Chinese Journal Material Research*, 2002, 16(3): 314 - 318.)
- [6] 蒋平,张继娟,于利根,等. [J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, 29(4): 267 - 272.  
(Jiang P, Zhang J J, Yu L G, Wang H M. [J]. *Rare Metallic Materials and Engineering*, 2000, 29(4): 267 - 272.)
- [7] Wang H M, Liu Y F. [J]. *Mater Sci Eng*, 2002, A338: 126 - 132.
- [8] Liu X B, Wang H M. [J]. *Proc of SPIE*, 1999, 3862: 423 - 427.
- [9] Liu X B, Wang H M. [J]. *Proc of SPIE*, 2000, 3888: 389 - 395.
- [10] 张强,于利根,王华明. [J]. *金属热处理*, 2001(3): 23 - 25.  
(Zhang Q, Yu L G, Wang H M. [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, (3): 23 - 25.)
- [11] Wang H M, Yu Y L, Li S Q. [J]. *Script Mater*, 2002, 47(1): 57 - 61.
- [12] 王华明,于荣莉. [J]. *应用激光*, 2002, 22: 86 - 89.  
(Wang H M, Yu R L. *Applied Lasers*, 2002, 22: 86 - 89.)
- [13] 王华明,张秋莉. [J]. *材料科学与工艺*, 2001, 9(增刊): 216 - 217.  
(Wang H M, Zhang Q L. [J]. *Journal of Materials Technology*, 2001, 9(Sup.): 216 - 217.)
- [14] 王华明,徐子文. [J]. *材料科学与工艺*, 2001, 9(增刊): 218 - 219.  
(Wang H M, Xu Z W. [J]. *Journal of Materials Technology*, 2001, 9(Sup.): 218 - 219.)
- [15] 段刚,王华明. [J]. *材料科学与工艺*, 2001, 9(增刊): 220 - 221.  
(Duan G, Wang H M. [J]. *Journal of Materials Technology*, 2001, 9(Sup.): 220 - 221.)
- [16] 张立强,王华明. [J]. *材料科学与工艺*, 2001, 9(增刊): 222 - 223.  
(Zhang L Q, Wang H M. [J]. *Journal of Materials Technology*, 2001, 9(Sup.): 222 - 223.)
- [17] 王春敏,王华明. [J]. *材料科学与工艺*, 2001, 9(增刊): 62 - 63.  
(Wang C M, Wang H M. [J]. *Journal of Materials Technology*, 2001, 9(Sup.): 62 - 63.)
- [18] 于荣莉,王华明. [J]. *材料科学与工艺*, 2001, 9(增刊): 290 - 291.  
(Yu R L, Wang H M. [J]. *Journal of Materials Technology*, 2001, 9(Sup.): 290 - 291.)
- [19] Liu X B, Wang H M. [J]. *J Mater Sci Lett*, 2001, 20: 1489 - 1492.
- [20] Duan G, Wang H M. [J]. *Script Mater*, 2002, 46(1): 107 - 111.
- [21] Duan G, Wang H M. [J]. *J Mater Sci*, 2002, 37(10): 1981 - 1985.
- [22] 段刚,王华明. [J]. *复合材料学报*, 2002, 19(1): 32 - 36.  
(Duan G, Wang H M. [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(1): 32 - 36.)
- [23] Wang H M, Duan G. [J]. *Mater Sci Eng*, 2002, A336: 117 - 123.

### 作者简介:



王华明(1962 - )男,四川合江县人,教授,博士生导师,博士,德国洪堡学者,从事激光材料加工与表面工程、高温耐磨耐蚀材料、凝固理论与技术等研究,表研究论文150余篇。Email: wanghuaming @263. net, 电话: 82317102.

(责任编辑:蔡斐)