

激光辅助涂层技术和表面改性质量的研究概述

王士顺^{1a}, 张婷², 向梦辉^{1b}, 邱国桥³, 吴艺韫⁴

(1.同济大学 a.设计创意学院 b.化学科学与工程学院, 上海 200092; 2.上海电机学院
设计与艺术学院, 上海 200240; 3.上海应用技术大学 应用设计学院, 上海 201418;
4.上海济光学院 应用设计学院, 上海 201901)

摘要: 激光辅助涂层技术的目的是保护暴露的工业产品或易受化学损伤的部件和结构。概述了想要在材料表面的高性能和昂贵部件中权衡制造成本, 主体部件可由更便宜的材料制成, 通过涂覆技术以达到成本设计的最优化。重点综述了近年来激光辅助技术的研究进展。使用激光作为热源制造机械零件的一组革命性工艺, 包括采用基于激光的工艺在所选区域上产生材料沉积以提供保护层和增强基材的耐腐蚀和耐磨性、传热和机械性能。迄今为止, 已经引入和研究了多种激光辅助工艺, 包括增材制造 (AM)、激光表面合金化 (LSA)、激光表面熔覆 (LSC)、激光辅助等离子体喷涂 (LPS)、激光化学气相沉积 (LCVD) 及其他多种激光辅助涂覆技术。重点归纳了涂覆过程中每种工艺的优势及限制其应用的缺点。对激光辅助涂层方法进行了分类, 归纳了激光辅助涂覆方法, 并对其进行了比较研究, 用以提供更清晰的图片和选择合适的涂层技术, 从而根据实际应用获得最理想的涂层设计方案。最后展望了通过发展更先进的技术和材料, 可能会获得更高质量的保护性能。

关键词: 激光; 涂层; 表面改性; 覆层; 化学气相沉积

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0201-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.018

Research Overview of Laser-assisted Coating Technology and Surface Modification Quality

WANG Shi-shun^{1a}, ZHANG Ting², XIANG Meng-hui^{1b}, QIU Guo-qiao³, WU Yi-yun⁴

(1.a.College of Design and Innovation, b. School of Chemical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.School of Art and Design, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China; 3.School of Design and Application, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 4.School of Design and Application, Shanghai Jiguang University, Shanghai 201901, China)

ABSTRACT: The purpose of laser-assisted coating technology is to protect exposed manufacturing products or parts and structures that are vulnerable to chemical damage. To find a trade-off between good performance and high expense of materials, the main parts can be made of cheap materials to optimize the cost design through coating. In this paper, emphasis is placed on

收稿日期: 2021-03-14; 修订日期: 2021-05-07

Received: 2021-03-14; Revised: 2021-05-07

作者简介: 王士顺 (1988—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为设计学工程交叉学科。

Biography: WANG Shi-shun (1988—), Male, Ph. D., Lecturer, Research focus: design and engineering intersections.

通讯作者: 张婷 (1981—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为工业设计与数字媒体交叉学科。

Corresponding author: ZHANG Ting (1981—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: industrial design and digital media.

引文格式: 王士顺, 张婷, 向梦辉, 等. 激光辅助涂层技术和表面改性质量的研究概述[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 201-209.

WANG Shi-shun, ZHANG Ting, XIANG Meng-hui, et al. Research Overview of Laser-assisted Coating Technology and Surface Modification Quality[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 201-209.

the introduction of the research progress of laser-assisted technology in recent years, and a group of revolutionary processes using laser as heat source to manufacture mechanical parts are also introduced. This includes the use of laser-based processes to produce material deposits on selected areas to provide a protective layer and enhance the corrosion and wear resistance, heat transfer and mechanical properties of the substrate. Up to now, many laser-assisted technologies have been introduced and studied, including AM additive manufacturing, laser surface alloying (LSA), laser surface cladding (LSC), laser-assisted plasma spraying (LPS), laser chemical vapor deposition (LCVD) and many other laser-assisted coating technologies. This paper highlights the advantages of each process, as well as the disadvantages that always limit their application. In this paper, the methods of laser-assisted coating are classified and summarized, and a comparative study of these techniques is proposed in order to provide a clearer picture and select the appropriate coating technology, so as to obtain the optimal coating design scheme according to the practical application. Finally, a vision is given that better protection performance could be obtained through the development of more advanced technologies and materials in the future.

KEY WORDS: laser-assisted coating; surface modification technology; coating; chemical meteorological deposition

机械零件和结构本身是为特定应用而设计的。在制造这些零件之前，必须满足严格的材料选择限制。这些限制因素包括车身材料、机械性能（如拉伸、压缩、屈服、扭转、疲劳、弯曲和蠕变强度）^[1]及所需的功能性、材料^[2]、疏水性和耐磨性^[3]、热性能^[4-5]、电导率、动态承重^[6]以及表面电阻特性^[7-9]。此外，其他参数（如可用性、材料成本、安全性和毒性行为）也在材料选择的其他类别中^[10]，在材料选择过程中起着重要作用。例如，NiTi 合金以其对驱动应用有用的形状记忆效应（SME）和超弹性（SE）特性而闻名。该合金用作骨植人物，可获得用于人体内部显微外科手术的新生物医学设备，具有很高的生物相容性。然而，在普通生理环境中，NiTi 的腐蚀过程会释放出作为副产物的 Ni 离子，该副产物对器官有毒有害^[11-12]。铜是具有高导热性和导电性的材料，应用广泛，但铜的刚性低、耐磨性差^[13]。用于旋转式散热片时，铜的机械耐久性由于其对滑动磨损的高度敏感性而降低^[14]。为了克服这些问题，并进一步增强特定应用的材料性能，可采取不同的处理方法，如热处理工艺、选择性合金化方法和保护性涂层。在这些解决方案中，涂层工艺是有效的保护方法，可以通过降低涂层厚度（即几微米）来降低成本并避免材料的稀缺性。此外，涂层可以提供不同的性能，如耐腐蚀性、耐磨性，增强表面硬度，改善表面纹理，改善隔热或电绝缘性，增强润湿性、疏水性等^[15]。

为了获得可靠的保护，必须研究各种涂层工艺，并针对特定应用，从航空航天、汽车工业，到微型生物医学设备和人体内部植人物，选择最合适的涂层工艺。每种方法都有其特定的应用和功能，其中最重要的是腐蚀和磨损保护^[16]。腐蚀过程会通过改变材料的体积来降低材料的机械性能，并通过形成裂纹、凹坑、孔等降低强度。另一方面，形成的凹坑、孔、裂纹及离子和颗粒（腐蚀过程的副产品），会提高腐蚀速率，并加速材料降解。除了机械性能外，释放的副产物（如离子和细颗粒）还会对生物体产生有害影响。这种腐

蚀副作用可以在人体植人物中看到，而人体植人物必须在人体中保留相当长的时间^[17]。采用适当的涂覆方法可以消除这些风险。尽管涂覆工艺具有上述优势，但始终会降低材料的可靠性。在这些不利的影响中，最重要的是负面的热影响，其会导致涂层变形、破裂和分层。另外，保护层固有的材料特性，如熔点、可加工性、不同形式的可用性、生物相容性等会限制其应用。

基于激光的涂层工艺可在选定区域上沉积保护材料。激光辅助工艺较多，提供了各种沉积方法、材料、厚度和密度，每种工艺适用于不同的条件。选择材料是制造高性能坚固涂层的关键，可以使用不同的材料（包括金属、陶瓷和聚合物）来形成保护层^[18]。然而，涂覆工艺和材料特性的多样性可能会导致难以选择沉积层的最佳组成。每种原料都具有耐腐蚀性能或耐磨性能，同时具有不同的熔点、机械性能和化学性能。对于不同的应用，必须仔细考虑机械稳定性、腐蚀性能、生物相容性（应用于生物医学领域），以及由于特定类型的涂层而导致的材料性能增强^[19-20]。本文对实用的激光辅助涂层方法和材料及其表面改性质量进行了简要分类和讨论，并进行对比研究，用以提供更清晰的图片和选择合适的涂层技术，从而根据实际应用获得最理想的涂层。此外，还概述了其他保护性技术，包括热处理、机械处理、机械/化学精加工和抛光^[21-26]。

1 增材制造（AM）

增材制造（AM）的过程（见图 1）涉及逐层添加材料，是根据预定义的计算机辅助设计（CAD）模型生成复杂的三维组件。AM 最初用于制造零件的原型，以最大程度地减少设计和过程中的错误，随着时间的推移，AM 的潜力得以实现，现在已被用于生产功能性末端零件。目前，增材制造可以用于制造传统方法制造的多面结构^[27]。与传统方法相比，AM 最明

显的优势是无需使用工具，并且生产废品率低。常规方法主要是减材制造，在复杂几何形状的生产中，会产生极高的材料去除率，在涉及昂贵材料时，会产生极高的成本。常规的烧结工艺以最小的去除率成功地加工了多种材料，但其具有生产率缓慢和无法生产复

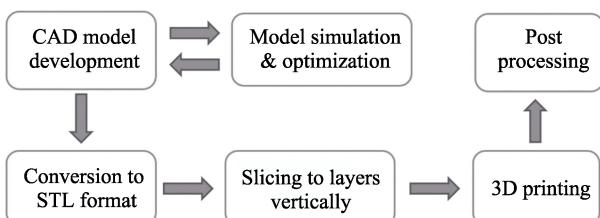


图 1 从零件设计到最终零件生产的增材制造过程
Fig.1 General steps of an AM process from part design to part production

杂结构的特性，AM 则是最合适的替代方法^[28]。

AM 对于复杂表面和小批量制作具有优势，已广泛应用于汽车、航空航天和生物医学等领域^[29]。随着新材料的不断探索，AM 加工技术得到进一步发展。根据涉及的过程和材料，AM 可以分为几个子类别^[30-31]，其中最突出的是激光粉末床熔合 (LPBF) 工艺。该工艺通过高强度激光束扫描并熔化几种微尺寸的粉末，以形成固体结构。最常见的 LPBF 方法包括选择性激光熔化 (SLM)、选择性激光烧结 (SLS) 和直接金属激光烧结 (DMLS) 工艺。根据最高温度和材料间的相互作用确定 DMLS 工艺参数^[32]。LPBF 是一个完整的熔融过程，在 AM 中使用最多^[33]，通过改变 LPBF 处理参数和后处理条件可以改变表面层的性质。图 2 为 LPBF 系统的示意图。

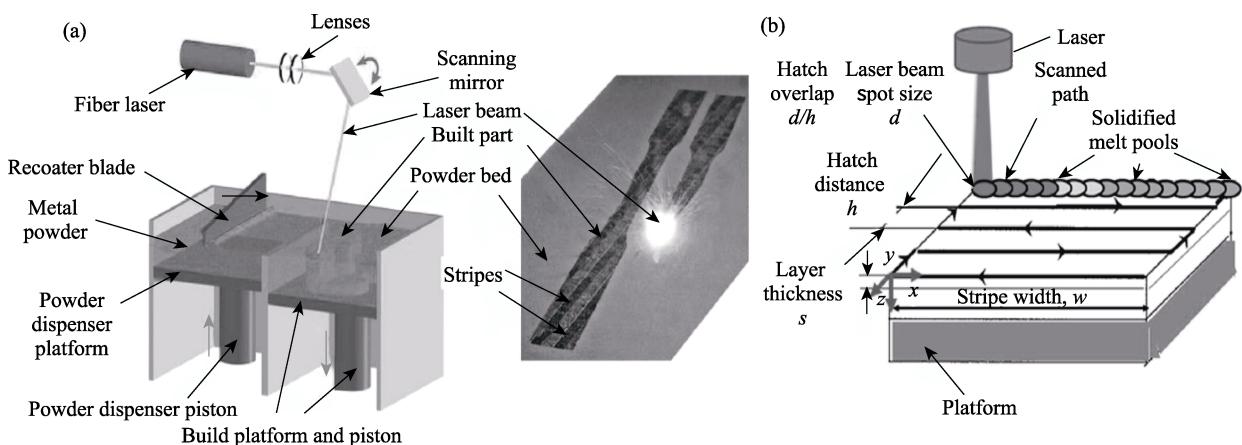


图 2 激光粉末床熔化 (LPBF) 系统^[34-35]
Fig.2 (a) Laser powder bed fusion (LPBF) system, and (b) LPBF terminology^[34-35]

2 激光表面合金化 (LSA)

在激光表面合金化过程中，激光束熔化金属表面的薄层，添加所需的合金元素，从而改变基材的表面化学组成。在 LSA 中添加合金元素的技术有多种，分为预沉积和共沉积。预沉积方法中，将添加合金元素作为单独的步骤放置在激光处理之前，而在共沉积方法中，合金元素在激光处理过程中添加。研究人员

对上述两种技术进行了研究和利用，生产出了具有高表面保护性能的理想涂料。Katakam 等^[36]采用 LSA，以无定形粉末（其组成 $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{Y}_2\text{C}_{15}\text{B}_6$ ）作为 AISI4130 钢基材上的前体粉末，开发具有优异耐腐蚀性的复合涂层。涂层耐蚀性和激光能量密度之间呈现负相关关系，这是因为在非晶相中形成精细非晶态 Cr_{23}C_6 相所致。激光表面合金化如图 3 所示。不同能量密度下样品的 SEM 显微照片如图 4 所示。

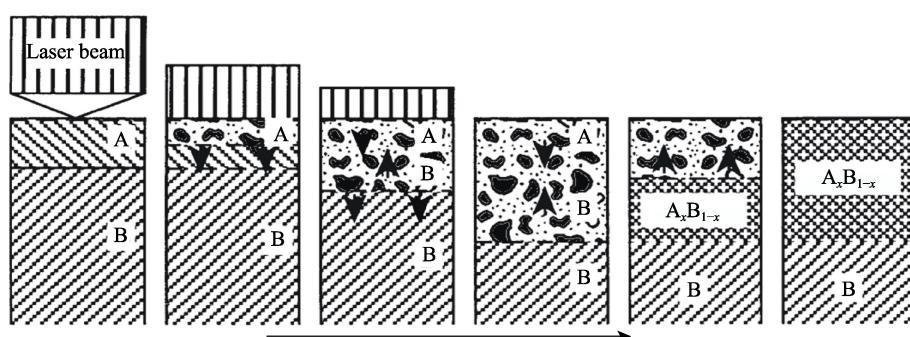


图 3 LSA 过程中合金元素 A 在基板 B 上形成 A_xB_{1-x} 的原理图^[36]

Fig.3 Stages of LSA the alloying element A is applied on the substrate B using a laser beam, and surface alloy of A_xB_{1-x} is formed^[36]

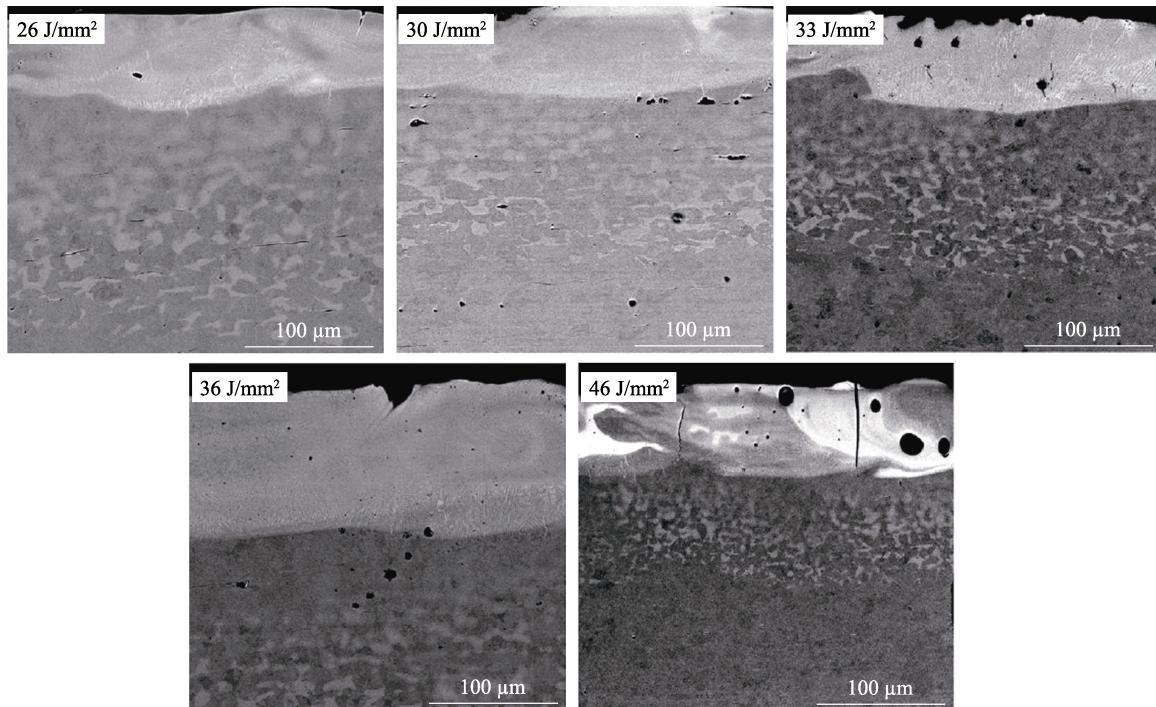


图 4 不同能量密度的涂层样品的 SEM 显微照片^[36]
Fig.4 SEM micrographs of coated samples in different energy densities^[36]

LSA 可以明显地改善材料的表面耐磨性和耐腐蚀性，同时又不损害基体性能。激光束照射在材料表面，使合金元素实现原位冶金反应，并快速凝固成形^[37]。关于使用 LSA 改善钛、铝和镁合金的表面性能，已有许多研究^[38]。此外，Kulka 等人^[39]采用激光技术，在 316 L 不锈钢表面制备硼合金化层，发现形成了硼化物 Fe₂B，与 316 L 不锈钢相比，合金层中的 B 将表面硬度提高到约 880 HV，并且质量损失显着降低。Song 等人^[40]研究了 LSA 中 WC 颗粒对 316 L 不锈钢修复区机械性能的影响，发现合金层的微观结构由过饱和奥氏体枝晶和枝晶间碳化物组成，随着 WC 含量的增加，合金层的硬度逐渐增加到基底硬度的 2 倍。显微组织的细化和硬质相（Fe₆W₇C、W₂C）的形成，大大提高了显微硬度，并降低了表面摩擦因数。

3 激光表面熔覆 (LSC)

与 LSA 相似，激光表面熔覆可实现特定的表面性能，除了对基材的稀释程度最小之外，还可以减少由于热变形、沉积孔隙率和后处理而造成的材料浪费。要达到最小稀释度，需要结合功率密度和相互作用时间。与 LSA 相比，这会限制过程参数。脉冲激光特性控制着熔覆层的高度，而熔覆层的高度决定了熔覆层的沉积速率。尤其是熔覆层高度与粉末进给速度、脉冲持续时间和脉冲频率有直接关系，而与基材进给速度成反比^[41]。两者最主要的区别有两点：(1) 激光熔覆过程中，覆层材料完全熔化，而基体熔化层极薄，因而对熔覆层的成分影响极小；(2) 激光熔覆

实质上不是把基体表面层的熔融金属作为溶剂，而是将另行配制的合金粉末熔化，使其成为熔覆层的主体合金^[42]。

对极端条件下失效的零部件进行修复与再制造，受到世界各国科学界和企业的高度重视，实际过程参数之间的相关性引起了研究人员的兴趣。Dahotre 等^[43]将涂覆 FeO 涂层的铸造 A319 铝合金发动机汽缸与铸造基体相比，发现其形成了精细的微观结构。与未涂覆的铸造基材相比，其表面的耐磨性更佳。Corbin 等^[41]评估了使用各种工艺参数沉积的 Fe-Al 熔覆层的质量，发现使用特定工艺条件形成的致密熔覆层，与基体形成了良好的熔接。Smurov 等^[44]用分散的陶瓷相及增强固体润滑剂基质制备了 Stellite/CuSn/nanoWC/Co 涂层，如图 5 所示。可以观察到，辐照模式是决

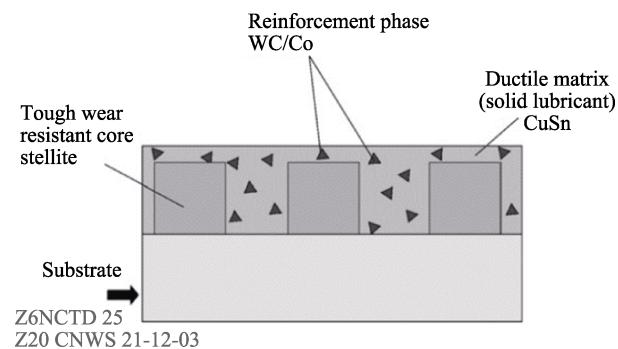


图 5 工程涂层结构（坚硬的芯棒表面覆盖相对较软的固体润滑剂并用陶瓷加固）^[44]

Fig.5 Engineering coating structure (tough core bars covered with relatively soft solid lubricant, reinforced by ceramic)^[44]

定涂层微观结构及其机械性能(如磨损)最关键的参数,涂层的最佳稳定干摩擦因数为0.12。

4 激光辅助等离子体喷涂(LPS)

在激光辅助等离子体喷涂过程中,将基材和喷雾粉末颗粒暴露于激光束下,激光对基板进行预热,除去氧化物层,同时将粉末颗粒预热至熔点以下,温度为颗粒熔点的30%~70%,热量使颗粒变软,因此它们在与基材碰撞时会变形并形成涂层。在此过程中,激光功率会影响沉积机理和涂层的微观结构,可以通过控制激光功率获得所需的涂层特性。Olakanmi等^[45]在2.5 kW的最佳激光功率下,获得了无孔隙和裂纹的Al-12%Si涂层。LPHS系统采用高强度的CO₂激光束作为热源,辅助低压等离子喷涂系统,该系统包含等离子喷涂系统,内径为2 m、长为3 m的真空腔,6轴数控机械手,最大输出功率可达6 kW的多模态CO₂激光发生器,以及红外线温控系统^[46]。Ouyang等^[47]采用激光辅助等离子体混合喷涂(LPHS)系统,在AISI 304不锈钢上沉积ZrO₂-Y₂O₃陶瓷涂层,发现ZrO₂-Y₂O₃涂层的摩擦磨损性能与温度之间存在直接关系,并获得具有高硬度(937~1234 HV)、均匀微观结构、较低孔隙率以及高膜基结合强度等性能的涂层。为了提高Al₂O₃-13%TiO₂涂层的硬度和耐磨性,Dubourg等^[48]使用激光辅助空气等离子喷涂(LAAPPS)方法,研究了激光辐照密度对涂层机械性能和微观结构的影响,发现涂层的耐腐蚀性和耐磨损性分别提高了12%和38%。TiO₂含量的增加导致该方法具有优异的耐磨性^[49]。Bray等^[50]开发了一种将金属粉末颗粒撞击到基材上的制备工艺,该基材使用二极管激光器进行局部加热,并使用高温计和控制系统记录并保持撞击部位的温度。图6显示了该激光辅助冷喷涂(LCS)系统的布局。该系统可以达到最高的喷涂速度(45 g/min),并且沉积层的孔隙率小于1%,氧质量分数低于0.6%,氮质量分数低于0.03%。

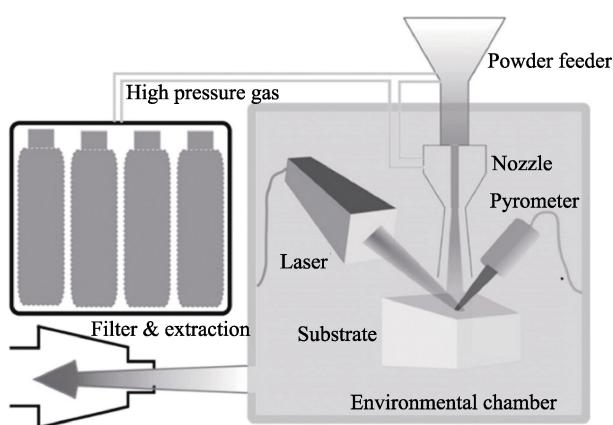
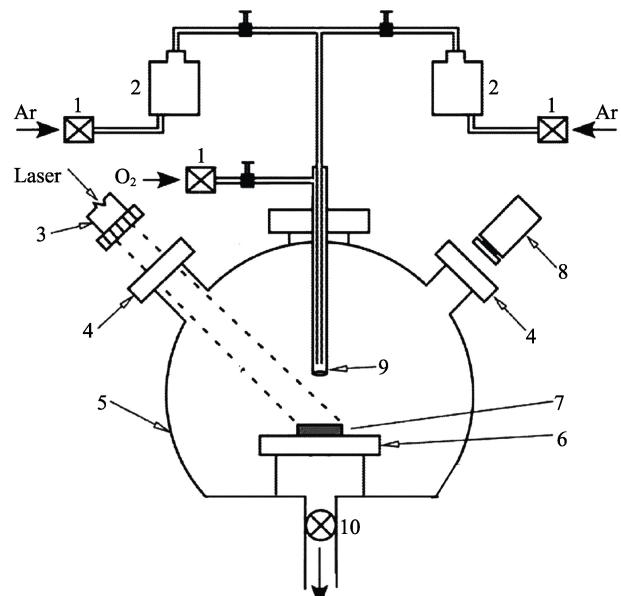


图6 LCS系统的布局^[50]

Fig.6 Layout of an LCS system^[50]

5 激光化学气相沉积(LCVD)

激光化学气相沉积工艺使用激光加热基板上的斑点、线条或区域,以实现涂层性能。图7为Parames和Conde使用的LCVD示意图,其在TiC₄、CH₄、H₂反应气氛下,在二氧化硅衬底上沉积碳化钛膜^[51],发现沉积物的形态和微观结构取决于激光功率和照射时间。Sankur等^[52]使用该方法制备薄膜,发现该方法可重现多元素化合物原料的化学计量。为了研究B₄C膜在二氧化硅基底上的生长,以及BCl₃、C₂H₄、H₂反应气氛对沉积物结构的影响,Santos等人^[53]进行LCVD实验,发现气相表面的反应机理和质量传递会控制薄膜的生长。LCVD也制备复合涂层。Yu等^[54]制备了包含SiOC和SiC的碳氧化硅复合膜,这些膜是通过Si—O键断裂、TEOS热解以及硅烷低聚物的聚合反应而形成的。他们将硅在较高温度下的出现归因于SiO分解和SiC的进一步氧化。XU等^[55]制备了石墨烯/SiC复合涂层,将石墨烯添加到SiC基体中,并改变反应室中的总压力。通过研究其生长机理,他们观察到激光的光解在沉积过程中发挥了重要作用,并且石墨烯在SiC(111)晶面上成核。Sun等^[56]通过LCVD制备了3C-SiC/石墨烯纳米膜,该膜在水电解质中的电化学性能显着改善,并具有电化学能量存储的能力。



1. Mass flow controller; 2. Precursor evaporator; 3. Optical lens;
4. Quartz lenses; 5. Chamber; 6. Substrate holder; 7. Substrate;
8. Pyrometer; 9. Double tube nozzle; 10. Vacuum pump

图7 LCVD设备的示意图^[51]
Fig.7 Schematic diagram of LCVD device^[51]

6 其他技术

除上述技术外,还有多种方法可以使结构的表面

性能满足服役要求，而不会损害结构的整体性能。使用这些技术，可以获得亚稳相和非平衡相，从而有助于开发具有新特性的新材料。Sahasrabudhe 等^[57]使用 LENS 工艺，在商业纯钛基板上制备了 250~650 μm 厚的 Ti-Si-N 陶瓷涂层，发现涂层表面的显微硬度和耐磨损性分别随 Ti 和 Si 组分的增多而增加。Balla 等人^[58]在 Ti 基体上沉积了 Zr/ZrO₂ 涂层，以增加膝盖和髋部植入物的耐磨损性，防止材料过早失效。他们采用连续的 Nd:YAG 激光源，将 Zr/ZrO₂ 涂层沉积在薄的 Ti 基底上，发现植入物的耐磨损性、耐腐蚀性和生物相容性得到了显著改善。Balla 等人^[59]采用 LENS 工艺，在钽基板上沉积钽 (Ta)，以增强植入物的生物相容性，同时改善其耐腐蚀性。研究发现，细胞存活率提高了 6 倍。Hagedorn 等^[60]使用 SLM 技术熔化 Al₂O₃-ZrO₂ 粉末并制备高性能牙科材料。研究发现，材料的机械性能得到增强，同时实现了细晶粒结构，从而提高了印刷零件的耐腐蚀性。文献中还报道了许多利用增材制造工艺进行防护的研究^[61-64]。

Roy 等人^[65]使用激光工程净成形 (LENS) 来改善钛 (Ti) 植入物的生物相容性。他们用磷酸三钙 (TCP) 涂覆钛表面，并采用不同浓度的硝酸银 (AgNO₃) 溶液来电沉积银 (Ag)。研究发现，与裸露的基材相比，涂覆 TCP 和 Ag-TCP 的 Ti 表面具有更好的细胞增殖能力，且细胞材料的相互作用增强。Balla 等人^[59]用 Ti 作衬底，使用相同的技术来增强骨整合特性，发现高表面能和 Ti 表面的可润湿性使细胞-材料的相互作用更好。此外，所获得的无孔结构赋予了涂层优异的耐疲劳性。为了研究激光辅助激光消融 (LALA) 方法对生物相容性的影响，Katto 等人^[66]将基板浸入模拟体液中，发现非晶相在模拟体液中溶解。通过辅助激光的照射，可以改善涂层的结晶度和附着力。图 8 为 LALA 方法示意图。Yadroitsev 等人^[67]使用选择性激光熔化 (SLM) 技术，选用不同的粉末 (Inox 904 L、Ni625、Cu/Sn、W) 来制备各种功能梯度 (包括尖锐、光滑和多层) 涂层，并通过改变工艺参数来调控不同的成分，实现了最小 FGM 壁厚 200 μm。图 9 显示了梯度涂层的横截面以及不同区域的 SEM 图像。

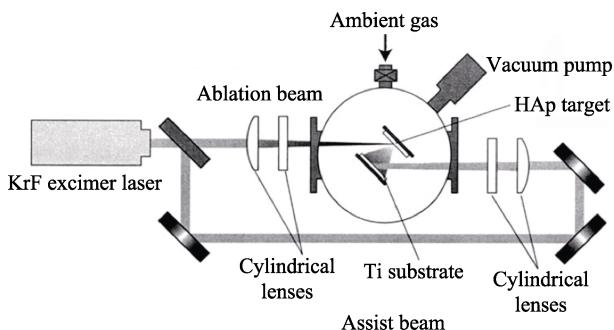
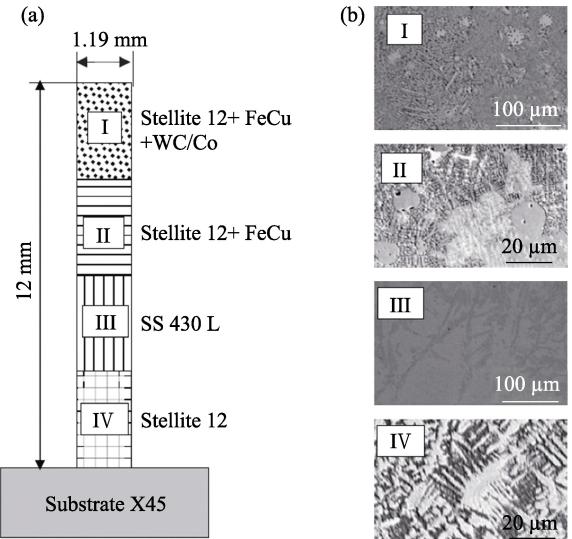


图 8 LALA 涂覆方法的示意图^[66]

Fig.8 Schematic view of the LALA method of coating^[66]



a 梯度涂层的横截面示意图

b 不同区域的SEM显微照片

图 9 梯度涂层^[67]

Fig.9 Multi-component wall: (a) general scheme of the graded wall (cross-section); (b) SEM micrographs of the four different zones^[67]

使用激光辅助直接沉积法，Mansour 等^[68]开发了羟基磷灰石 (HA) +Ti-6Al-4V 的复合涂层。该涂层具有不同的两层，包括在热影响区的顶部硬质陶瓷层，其中 Ti 扩散到 Fe 中。他们发现，激光功率和移动速度 (即能量密度) 的结合可控制重要的涂层特征，如机械性能、微观结构和化学性质。能量密度为 167 J/mm² 时，获得的 Ca/P 比小于 1.67 (与人体骨骼最接近)，这有利于细胞凋亡和临床实践。Rytlewski 等^[69]对比分析了含质量分数为 5% 的 Cu(Ac)₂ 和质量分数为 15% 的氧化铜 (II) (CuO) 或氢氧化铜 (II) (Cu(OH)₂) 的涂层的特征。与含 Cu(OH)₂ 的涂层相比，在包含 CuO 的涂层表面形成金属铜可以以更高的辐射剂量对铜进行电镀。作者观察到，含 CuO 的涂层的孔隙率比含 Cu(OH)₂ 的涂层小，其原因是水的形成，表明 Cu(OH)₂ 发生了热分解。

Yilbas 等人^[70]研究了在高压氮气辅助气体环境中，采用激光和溶胶-凝胶法制备的氧化铝涂层受泥浆及颗粒的影响。他们还评估了表面干泥的附着力。在苛刻的环境中观察到优异的表面特性，这归因于泥浆与涂层表面之间的接触面积较小，从而降低了溶胶-凝胶涂层的表面能。Zhou 等人^[71]研究了激光辅助下且经 100~200 °C 退火后的乙酸锌-聚乙烯 (ZnAc₂-PE) 复合涂层的特征。与单一 ZnAc₂ 或 PE 涂层中的球形颗粒相比，该涂层显示出含有不同长度的细长附聚物。由于目标组分分解导致活性气相发生变化，ZnAc₂ 涂层的分子结构和键组成由脉冲激光助剂和 PE 控制。表 1 总结了各种激光辅助涂层技术中使用的激光工艺参数。研究结果显示，激光辅助涂层技术改进显著，但仍然需要进一步的研究。

表 1 激光辅助涂层工艺中使用的激光工艺参数摘要
Tab.1 A summary of laser process parameters used in laser-assisted coating processes

Coating method	Laser type	Laser power/W	Laser wavelength/ μm	Scanning speed/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Laser beam dia./mm	Laser energy density/($\text{J}\cdot\text{mm}^{-2}$)	Fill spacing/mm	Ref.
LSA	Nd-YAG CW	700~1300	1.064	60,100	0.6	26~46 and 17 000~35 000	0.2~0.6	[36], [69]
LCVD	CO ₂ CW	135~250	10.6	NR*	12~13	0.9~1.6	NR	[51], [53]
	Nd-YAG CW	1500	NR	58	NR	NR	NR	[43]
LSC	Nd-YAG Pulsed	304~343	NR	NR	0.4~1.2	NR	NR	[41]
	CO ₂ CW	5000	NR	5~15	NR	NR	NR	[44]
LPS	Nd-YAG CW	1000~1650	1.064	8~30	4,12	NR	2	[47], [48], [50]

7 结语

通过控制有影响力参数, 包括沉积材料、基底材料、原料形态(粉末、金属丝、棒、前体等)和沉积方法, 可以在基材上成功沉积涂层。沉积工艺是重要因素之一, 会影响涂层材料的化学变化和组成元素的合金化。此外, 根据不同原料和基材的特性, 可以选择最佳的沉积方法。本文综述了采用不同的沉积技术在基材上沉积特定类型的材料, 材料选择对于获得最高涂层效率非常重要。此外, 某些技术适用于导电金属材料, 而其他技术则可以沉积聚合物、陶瓷和金属合金。

激光沉积方法以其优异的基材/涂层附着力以及涂层柔韧性而受到广泛关注, 且基于激光技术的高质量和高处理速度, 在一定程度上弥补了设备的高昂成本。然而, 大多数工艺必须在受控的条件下进行, 尽管这些工艺是可靠的材料沉积和表面保护手段, 但在实际应用中, 这些工艺都有缺点。因此, 已有许多关于结合这些技术的优点同时最小化每种方法负面影响的研究。多涂层沉积技术可用于表面改性和增强涂层的保护性能, 每一层单独的沉积层可以具有不同的厚度、组成和物理或化学性质。同时, 众多相关文献表明, 为使保护层的效率最高和功能最好, 必须仔细考虑层厚、涂层组成、沉积技术与特定原料的相容性, 同时也应考虑基材、沉积层的物理或化学性质以及激光规格, 这些都是直接影响最终防护效果的关键因素。

参考文献

- [1] CALLISTER W D, RETHWISCH D G. Materials science and engineering[J]. New York: John Wiley & Sons NY, 2011.
- [2] MOOSAIE A, SHEKOUHI N, NOURI N M, et al. An algebraic closure model for the DNS of turbulent drag reduction by Brownian microfiber additives in a channel flow[J]. Journal of non-Newtonian fluid mechanics, 2015,
- [3] GHOREISHI R, ROOHI A H, DEHGHAN GHADIKO-LAEI A. Analysis of the influence of cutting parameters on surface roughness and cutting forces in high speed face milling of Al/SiC MMC[J]. Materials research express, 2018, 5(8): 086521.
- [4] KHODABANDEH E, ROZATI S A, JOSHAGHANI M, et al. Thermal performance improvement in water nanofluid/GNP-SDBS in novel design of double-layer microchannel heat sink with sinusoidal cavities and rectangular ribs[J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2019, 136(3): 1333-1345.
- [5] ROOHANI ISFAHANI S N, SALIMPOUR M R, SHIRANI E. Numerical study and sensitivity analysis on convective heat transfer enhancement in a heat pipe partially filled with porous material using LTE and LTNE methods[J]. Heat transfer—Asian research, 2019, 48(8): 4342-4353.
- [6] NAMDARI N, DEHGHAN A. Natural frequencies and mode shapes for vibrations of rectangular and circular membranes: A numerical study[J]. International research journal of advanced engineering and science, 2018(2): 304.
- [7] FOTOVVTI B, NAMDARI N, DEHGHANHADIKO-LAEI A. On coating techniques for surface protection: A review[J]. Journal of manufacturing and materials processing, 2019, 3(1): 28.
- [8] 李玲, 麻诗韵, 阮晓光, 等. 加载相位差对微动磨损影响的数值模拟研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 93-100.
LI Ling, MA Shi-yun, RUAN Xiao-guang, et al. Numerical simulation of the effect of loading phase difference on fretting wear[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 93-100.
- [9] NAMDARI N, MOHAMMADIAN B, ALIDAD S, et al. A numerical study on two-dimensional fins with non-constant heat flux[J]. The international journal of engineering science, 2018, 2: 12 - 16.
- [10] SHIGLEY J, MISCHKE R, BROWN T H. Standard handbook of machine design[M]. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [11] IBRAHIM H, JAHADAKBAR A, DEHGHAN A, et al. *In vitro* corrosion assessment of additively manufactured porous NiTi structures for bone fixation applications[J]. Metals, 2018, 8(3): 164.
- [12] 薛燕, 王振国. 医用 NiTi 合金在 Hank's 模拟体液中的微磨损行为[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 97-101.

- XUE Yan, WANG Zhen-guo. Micro-wear behavior of the medical NiTi alloy in Hank's simulated body fluid[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 97-101.
- [13] BAGHBANI M G, HADIAN A M. Transient liquid phase bonding of Al/Mg₂Si composite using a Cu-Ni mixed powder[J]. Advanced materials research, 2013, 829: 632-637.
- [14] YAN Jian-feng, LINDO A, SCHWAIGER R, et al. Sliding wear behavior of fully nanotwinned Cu alloys[J]. Friction, 2019, 7(3): 260-267.
- [15] DINU C, BERCE C, TODEA M, et al. Bone quality around implants: A comparative study of coating with hydroxyapatite and SiO₂-TiO₂ of Ti6Al7NB implants[J]. Particulate science and technology, 2020, 38(8): 944-951.
- [16] ANTIL P, SINGH S, MANNA A. Analysis on effect of electroless coated SiC_p on mechanical properties of polymer matrix composites[J]. Particulate science and technology, 2019, 37(7): 791-798.
- [17] FOTOVVATI B, NAMDARI N, DEHGHANHADIKOLAEI A. Fatigue performance of selective laser melted Ti6Al4V components: State of the art[J]. Materials research express, 2018, 6(1): 012002.
- [18] YANG Yuan, YU Gui-hua, CHA J J, et al. Improving the performance of lithium-sulfur batteries by conductive polymer coating[J]. ACS nano, 2011, 5(11): 9187-9193.
- [19] SOUZA V A D, NEVILLE A. Corrosion and synergy in a WC-CoCr HVOF thermal spray coating—understanding their role in erosion-corrosion degradation[J]. Wear, 2005, 259(1-6): 171-180.
- [20] THAKARE M R, WHARTON J A, WOOD R J K, et al. Exposure effects of alkaline drilling fluid on the micro-scale abrasion-corrosion of WC-based hardmetals[J]. Wear, 2007, 263(1-6): 125-136.
- [21] PEYRE P, SCHERPREEEL X, BERTHE L, et al. Surface modifications induced in 316L steel by laser peening and shot-peening. Influence on pitting corrosion resistance[J]. Materials science and engineering: A, 2000, 280(2): 294-302.
- [22] LI Long-chuan, GAO Jia-cheng, WANG Yong. Evaluation of cyto-toxicity and corrosion behavior of alkali-heat-treated magnesium in simulated body fluid[J]. Surface and coatings technology, 2004, 185(1): 92-98.
- [23] DEHGHAN G A, VAHDATI M. Experimental study on the effect of finishing parameters on surface roughness in magneto-rheological abrasive flow finishing process[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part B: Journal of engineering manufacture, 2015, 229(9): 1517-1524.
- [24] CIUFFINI A F, BARELLA S, MARTÍNEZ L B P, et al. Influence of microstructure and shot peening treatment on corrosion resistance of AISI F55-UNS S32760 super duplex stainless steel[J]. Materials, 2018, 11(6): 1038.
- [25] DEHGHAN A, MOHAMMADIAN B, NAMDARI N, et al. Abrasive machining techniques for biomedical device applications[J]. Journal material science, 2018, 5 (1):1-11.
- [26] DEHGHANHADIKOLAEI A, FOTOVVATI B. Coating techniques for functional enhancement of metal implants for bone replacement: A review[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 12(11): 1795.
- [27] PLOCHER J, PANESAR A. Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures[J]. Materials & design, 2019, 183: 108164.
- [28] SUN Zhong-ji, TAN Xi-peng, TOR S B, et al. Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates[J]. Materials & design, 2016, 104: 197-204.
- [29] GOUZMAN I, GROSSMAN E, VERKER R, et al. Advances in polyimide-based materials for space applications[J]. Advanced materials, 2019, 31(18): 1807738.
- [30] GARDAN J. Additive manufacturing technologies: State of the art and trends[J]. International journal of production research, 2016, 54(10): 3118-3132.
- [31] PATTERSON A E, MESSIMER S L, FARRINGTON P A. Overhanging features and the SLM/DMLS residual stresses problem: Review and future research need[J]. Technologies, 2017, 5(2): 15.
- [32] OLAKANMI E O, COCHRANE R F, DALGARNO K W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties[J]. Progress in materials science, 2015, 74: 401-477.
- [33] LIU Yang, ZHANG Jian, YANG Yong-qiang, et al. Study on the influence of process parameters on the clearance feature in non-assembly mechanism manufactured by selective laser melting[J]. Journal of manufacturing processes, 2017, 27: 98-107.
- [34] CRIALES L E, ARISOY Y M, LANE B, et al. Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: Experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2017, 121: 22-36.
- [35] CRIALES L E, ARISOY Y M, ÖZEL T. Sensitivity analysis of material and process parameters in finite element modeling of selective laser melting of Inconel 625[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 86(9-12): 2653-2666.
- [36] KATAKAM S, KUMAR V, SANTHANAKRISHNAN S, et al. Laser assisted Fe-based bulk amorphous coating: Thermal effects and corrosion[J]. Journal of alloys and compounds, 2014, 604: 266-272.
- [37] DUTTA MAJUMDAR J, MANNA I. Laser material processing[J]. International materials reviews, 2011, 56(5-6): 341-388.
- [38] MEHRJOU B, SOLTANI R, SOHI M H, et al. Laser surface treatment of AZ91 magnesium alloy presprayed with WC-Co[J]. Surface engineering, 2016, 32(12): 893-901.
- [39] KULKAR M, MIKOŁAJCZAK D, MAKUCH N, et al. Wear resistance improvement of austenitic 316L steel by laser alloying with boron[J]. Surface and coatings technology, 2016, 291: 292-313.
- [40] SONG Li-jun, ZENG Guang-cheng, XIAO Hui, et al. Repair of 304 stainless steel by laser cladding with 316L stainless steel powders followed by laser surface alloying with WC powders[J]. Journal of manufacturing processes, 2016, 24: 116-124.
- [41] CORBIN S F, TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A. Cladding of an Fe-aluminide coating on mild steel using pulsed laser assisted powder deposition[J]. Materials science

- and engineering: A, 2003, 354(1-2): 48-57.
- [42] 胡杰. 基于动力学仿真的激光器平台稳定性设计改进[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 16-20.
HU Jie. Stability design improvement of laser-device platform based on dynamic numerical simulation[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(7): 16-20.
- [43] DAHOTRE N B, NAYAK S, POPOOLA O O. The laser-assisted iron oxide coating of cast Al auto engines[J]. JOM, 2001, 53(9): 44-46.
- [44] SMUROV I. Laser cladding and laser assisted direct manufacturing[J]. Surface and coatings technology, 2008, 202(18): 4496-4502.
- [45] OLAKANMI E O, TLOTLENG M, MEACOCK C, et al. Deposition mechanism and microstructure of laser-assisted cold-sprayed (LACS) Al-12 wt.% Si coatings: Effects of laser power[J]. JOM, 2013, 65(6): 776-783.
- [46] 赵运才, 上官绪超, 张继武, 等. 激光重熔改性 WC/Fe 等离子喷涂涂层组织及其耐磨性能[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 20-27.
ZHAO Yun-cai, SHANGGUAN Xu-chao, ZHANG Ji-wu, et al. Microstructure and wear resistance of WC/Fe plasma sprayed coatings modified by laser remelting[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 20-27.
- [47] OUYANG J H, SASAKI S. Microstructure and tribological characteristics of ZrO_2 - Y_2O_3 ceramic coatings deposited by laser-assisted plasma hybrid spraying[J]. Tribology international, 2002, 35(4): 255-264.
- [48] DUBOURG L, LIMA R S, MOREAU C. Properties of alumina-titania coatings prepared by laser-assisted air plasma spraying[J]. Surface and coatings technology, 2007, 201(14): 6278-6284.
- [49] YANG Ke, LI Jia-qi, WANG Qiu-yu, et al. Effect of laser remelting on microstructure and wear resistance of plasma sprayed Al_2O_3 -40% TiO_2 coating[J]. Wear, 2019, 426-427: 314-318.
- [50] BRAY M, COCKBURN A, O'NEILL W. The Laser-assisted Cold Spray process and deposit characterisation[J]. Surface and coatings technology, 2009, 203(19): 2851-2857.
- [51] PARAMÈS M L F, CONDE O. Structure and morphology of laser assisted chemical vapour deposited TiC coatings[J]. Le journal de physique IV, 1993, 3(C3): C3-217.
- [52] SANKUR H. Deposition of optical coatings by laser-assisted evaporation and by photo-assisted chemical vapor deposition[J]. Thin solid films, 1992, 218(1-2): 161-169.
- [53] SANTOS M J, SILVESTRE A J, CONDE O. Laser-assisted deposition of r-B₄C coatings using ethylene as carbon precursor[J]. Surface and coatings technology, 2002, 151-152: 160-164.
- [54] YU Shu, TU Rong, GOTO T. Preparation of SiOC nanocomposite films by laser chemical vapor deposition[J]. Journal of the European ceramic society, 2016, 36(3): 403-409.
- [55] XU Qing-fang, DENG Zhao, SUN Qing-yun, et al. Electrically conducting graphene/SiC(111) composite coatings by laser chemical vapor deposition[J]. Carbon, 2018, 139: 76-84.
- [56] SUN Qing-yun, TU Rong, XU Qing-fang, et al. Nanofores of 3C-SiC/graphene by laser chemical vapor deposition with high electrochemical performance[J]. Journal of power sources, 2019, 444: 227308.
- [57] ZHANG Yan-ning, SAHASRABUDHE H, BANDYOPADHYAY A. Additive manufacturing of Ti-Si-N ceramic coatings on titanium[J]. Applied surface science, 2015, 346: 428-437.
- [58] BALLA V K, XUE Wei-chang, BOSE S, et al. Laser-assisted Zr/ZrO_2 coating on Ti for load-bearing implants[J]. Acta biomaterialia, 2009, 5(7): 2800-2809.
- [59] BALLA V K, BANERJEE S, BOSE S, et al. Direct laser processing of a tantalum coating on titanium for bone replacement structures[J]. Acta biomaterialia, 2010, 6(6): 2329-2334.
- [60] YVES-CHRISTIAN H, JAN W, WILHELM M, et al. Net shaped high performance oxide ceramic parts by selective laser melting[J]. Physics procedia, 2010, 5: 587-594.
- [61] CLEMENS H, KESTLER H. Processing and applications of intermetallic γ -TiAl-based alloys[J]. Advanced engineering materials, 2000, 2(9): 551-570.
- [62] DUTTA B, FROES F H. The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys[J]. Metal powder report, 2017, 72(2): 96-106.
- [63] ECKEL Z C, ZHOU C, MARTIN J H, et al. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics[J]. Science, 2016, 351(6268): 58-62.
- [64] AVERSA R, PERROTTA V, PETRESCU R V, et al. From structural colors to super-hydrophobicity and achromatic transparent protective coatings: Ion plating plasma assisted TiO_2 and SiO_2 nano-film deposition[J]. SSRN electronic journal, 2017, 213: 3074477.
- [65] ROY M, BANDYOPADHYAY A, BOSE S. In vitro antimicrobial and biological properties of laser assisted tricalcium phosphate coating on titanium for load bearing implant[J]. Materials science and engineering: C, 2009, 29(6): 1965-1968.
- [66] KATTO M, NAKAMURA M, TANAKA T, et al. Hydroxyapatite coatings deposited by laser-assisted laser ablation method[J]. Applied surface science, 2002, 197-198: 768-771.
- [67] YADROITSEV I, BERTRAND P, LAGET B, et al. Application of laser assisted technologies for fabrication of functionally graded coatings and objects for the International Thermonuclear Experimental Reactor components[J]. Journal of nuclear materials, 2007, 362(2-3): 189-196.
- [68] MANSUR M R, WANG J, BERNDT C C. Microstructure, composition and hardness of laser-assisted hydroxyapatite and Ti-6Al-4V composite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2013, 232: 482-488.
- [69] RYTLEWSKI P. Laser-assisted metallization of composite coatings containing copper(II) acetylacetone and copper(II) oxide or copper(II) hydroxide[J]. Surface and coatings technology, 2014, 259: 660-666.
- [70] YILBAS B S, ALI H, AL-AQEELI N, et al. Laser gas assisted nitriding and sol-gel coating of alumina surfaces: Effect of environmental dust on surfaces[J]. Surface and coatings technology, 2016, 289: 11-22.
- [71] ZHOU Bing, XU Bin, LIU Zhu-bo, et al. Synthesis of photoluminescent zinc acetate-polyethylene composite coatings by pulse laser-assisted electron beam dispersion[J]. Journal of materials science, 2018, 53(17): 12214-12230.