

钛合金表面激光熔覆涂层及工艺研究进展

秦成, 侯红苗, 郭萍, 张永强, 潘浩, 强菲

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 钛合金具有密度低、比强度高等多种优点, 但存在摩擦因数高、耐磨性能差、高温易氧化等缺点。激光熔覆技术可根据需求提升钛合金的表面性能, 满足不同服役环境下对钛合金零部件的使用要求。为此, 重点介绍了钛合金表面激光熔覆材料, 包括自熔性合金粉末、陶瓷粉末、金属基陶瓷复合粉末等, 讨论了激光熔覆工艺对涂层性能的影响, 最后指出了钛合金表面激光熔覆涂层的发展方向: ①发展新型熔覆层材料体系; ②优化激光熔覆工艺参数; ③研发功能梯度涂层。

关键词: 钛合金; 激光熔覆; 涂层

中图分类号: TG174.44; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)04-044-05

Research Progress of Laser Cladding Coating and Technology on Titanium Alloy Surface

Qin Cheng, Hou Hongmiao, Guo Ping, Zhang Yongqiang, Pan Hao, Qiang Fei

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Titanium alloy has many advantages such as low density and high specific strength, but it also has some disadvantages such as high friction coefficient, poor wear resistance and easy oxidation at high temperature. Laser cladding technology can improve the surface properties of titanium alloy according to the requirements, and meet the requirements of titanium alloy parts in different service environments. The laser cladding materials on titanium alloy surface, including self-fusible alloy powder, ceramic powder and metal-based ceramic composite powder, are introduced. The influence of laser cladding technology on coating properties is discussed. Finally, the development directions of laser cladding coatings on titanium alloy surface are pointed out: ① develop new type of cladding material system; ② optimization of laser cladding process parameters; ③ research and develop functional gradient coatings.

Keywords: titanium alloy; laser cladding; coating

钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性能优异等优点, 被广泛应用于航天航空、国防工业、汽车、医疗等领域。然而, 钛合金也存在摩擦因数高、耐磨性能差、高温易氧化等缺点, 导致其服役环境及应用领域受到一定的限制。为此, 科研工作者围绕钛合金表面改性开展了大量研究。传统的表面强化技术(如热喷涂、热镀等)所制备的涂层较为薄弱, 与基体结合力差, 难以满足零部件在高接触应力下工作的使用要求。激光熔覆是一种有效的材料表面改性手段, 可以在氦气、氩气等惰性气体的

保护下, 以高功率密度的激光束为热源, 将涂层材料与基体材料经过重熔淬火、表面合金化等过程, 使二者达到冶金结合, 待激光束停止后, 熔液快速冷却, 在基体表面凝固形成高质量的熔覆层。该技术能够根据需求提升钛合金的表面性能, 满足不同服役环境下对钛合金零部件的使用要求, 推进钛合金在多个领域中的应用^[1-5]。本文对钛合金表面激光熔覆材料及熔覆工艺进行了重点介绍, 综述了不同激光熔覆层组织与性能的研究进展, 并对其发展方向进行了分析总结, 以期研究高耐热、耐蚀、耐磨的熔覆涂层提供参考。

1 钛合金表面激光熔覆材料

为了改善基体材料性能, 使其耐磨、耐腐蚀、高温抗氧化性能达到预期要求, 选择合适的熔覆材料是至关

收稿日期: 2023-05-17

基金项目: 西安市未央区科技计划项目(202105); 基础加强计划技术领域基金项目(2021-JCJQ-JJ-0197); 西安市未央区科技计划项目(202109)

通信作者: 秦成(1994—), 男, 工程师。

重要的一环。当前激光熔覆材料主要有自熔性合金粉末、陶瓷粉末、金属基陶瓷复合粉末以及其他特殊增强材料。

1.1 自熔性合金粉末

自熔性合金粉末主要有镍基、钴基、铁基3种,由于自熔性合金粉末中含有硼、硅以及较高含量的铬元素,故表现出优异的自脱氧及造渣能力,并且能够改善熔体对基体金属的润湿能力,降低熔覆层中的含氧量,减少熔覆过程中产生的夹杂,进而提高熔覆层的成形质量。镍基自熔性合金粉末具有良好的润湿性、耐蚀性以及抗氧化性,价格适中,应用较广,但高温性能较差,通常用于局部要求耐磨、耐腐蚀的构件,常用的镍基自熔性合金粉末有 Ni-B-Si、Ni-Cr-B-Si 以及 Ni-Cr-B-Si-Mo 等。马玲玲^[6]以不同比例的 Ti、Ni、AlN、Y 混合粉末作为熔覆层材料,选择合理的熔覆方法和工艺参数,在钛合金表面成功熔覆 Ti-Ni 基复合涂层。研究发现,当 Ti、Ni、AlN 的质量比为 56:34:10 时,熔覆层组织均匀,无宏观裂纹,硬度约为基体的 3.3 倍,耐磨性约为基体的 22.3 倍。钴基自熔性合金粉末具有良好的耐热性、耐磨性以及高温抗氧化性,高温时钴元素容易与其他添加元素形成新相,对熔覆层形成强化作用,其缺点是价格较高,使用成本较大,通常应用于石化、电力、冶金等领域。铁基自熔性合金粉末成本低,但由于自身熔点高,抗氧化性差,在熔覆过程中容易形成开裂、气孔等缺陷,不能满足绝大部分钛合金的应用条件,目前相关研究及应用报道较少^[7-8]。王胜等人^[9]选用激光功率为 2.3 kW、扫描速率为 9 mm s⁻¹、送粉速率为 10 g min⁻¹ 的工艺参数,利用激光熔覆技术在 TC4 钛合金表面制备出 Fe35A 熔覆层,其表面洛氏硬度为 40.2HRC,明显高于基体。

1.2 陶瓷粉末

相比于一般金属,陶瓷材料具有硬度高、耐磨性好等特点,常用于制备热障涂层及高温耐蚀涂层。陶瓷粉末通常可分为氧化物陶瓷粉末、氮化物陶瓷粉末,氧化物陶瓷粉末主要为氧化铝、氧化锆及少量稀土氧化物,能够在熔覆层中作为强化相,有效改善材料的使用性能。杨凡等人^[10]采用同轴送粉激光熔覆技术在 TC4 钛合金表面成功制备出添加 2wt% CeO₂ 的 Ti6Al4V+NiCr-Cr₃C₂ 多道搭接熔覆层。结果表明,添加 CeO₂ 可完全抑制熔覆层表面形成裂纹,显著降低气孔率(2.76%→1.65%);熔覆层主要由 β 固溶体(CrTi₄)和缺位型碳化钛(TiC_x)组成,基材、未添加和添加 2wt% CeO₂ 激光熔覆层的维氏显微硬度分别为 3559、4784、4519 MPa,磨损率分别为 5.62×10⁻⁶、2.5×10⁻⁷、2.43×10⁻⁶ g/(N min)。于坤等人^[11]探究了稀土氧化物 Y₂O₃ 添加量对 TC4 钛合金表面激光

熔覆层组织、摩擦磨损性能和抗高温氧化性能的影响。研究发现,当 Y₂O₃ 添加量为 1.0wt% 时,可生成高硬度碳化物和金属间化合物,涂层组织细密均匀,没有缺陷,性能均优于其他 Y₂O₃ 添加量的涂层。Weng 等人^[12]利用 TiN、Co42 自熔合金和 Y₂O₃ 混合粉末在 TC4 钛合金表面激光熔覆制备 TiN 增强复合涂层。结果表明,涂层主要由 γ -Co/Ni、TiN、CoTi、CoTi₂、NiTi、TiC、Cr₇C₃、TiB、Ti₅Si₃ 和 TiC_{0.3}N_{0.7} 相组成;涂层与基体为冶金结合,无孔洞和裂纹缺陷;相比于基体,涂层显微硬度和耐磨性分别提高了 3~4 倍和 9.5~11.9 倍。虽然陶瓷粉末具有很多优势,但其热物理性能与钛合金基体差异较大,所制备的熔覆涂层与基体结合力较差,容易开裂或脱落,同时熔覆过程中活泼的液相钛合金容易与陶瓷粉末发生反应,造成熔覆层中形成的陶瓷相形态、种类、数量不可控,难以形成稳定且高质量的熔覆层^[13]。安强等人^[14]研究了 TA15 钛合金表面熔覆 TiC 涂层的制备与性能。该研究表明,涂层主要由 β -Ti、Co₃Ti、CrTi₄ 和 TiC 等相组成,与基体结合性较强,表面显微硬度约为基体的 2.1 倍;同等条件下 TiC 涂层的磨损量为 30.14 mg,约为 TA15 钛合金基体磨损量(98.11 mg)的 30.7%,对于改善 TA15 钛合金表面硬度及抗磨损性能具有显著效果。

1.3 金属基陶瓷复合粉末

金属基陶瓷复合粉末是一种将高熔点的硬质陶瓷颗粒添加至自熔性金属粉末中形成的新型熔覆材料,可同时发挥金属粉末材料自熔性强、润湿性好、低成本以及陶瓷粉末耐高温、耐磨等优势,从而制备出高质量的熔覆涂层^[1,3-5]。乔世杰等人^[15]以 Ni60-10%hBN(质量分数)复合粉末为增强材料,通过激光熔覆技术在 TC4 钛合金表面制备出 γ -Ni/TiC/TiB₂+CrB-Ni₃B/hBN 高温自润滑耐磨复合涂层。经 600 °C 长时间时效处理后,该复合涂层表现出良好的高温稳定性。夏思海等人^[16]在 TC4 钛合金基体表面制备了添加不同质量分数(0%、2%、4%、6%) TiC 的 Ni60 复合熔覆层。研究发现,未添加 TiC 的熔覆层组织主要为树枝晶,添加 TiC 后出现了花瓣状物相;经 XRD 分析发现,熔覆层中出现了 AlCCr₂、Al_{0.24}B_{0.01}Ni_{0.75} 等硬质增强相;硬质相显著提高了熔覆层的硬度,且随着 TiC 含量的增加,熔覆层硬度呈现先增加后降低的趋势,TiC 含量为 4% 时熔覆层的硬度最大,相比基体提高了 213.3%。

1.4 其他特殊增强材料

除自熔性合金粉末、陶瓷粉末以及金属基陶瓷复合粉末外,钛合金表面激光熔覆材料还包含高熵合金涂层、稀土增强涂层等。高熵合金是以 5 种或者 5 种以上主要元素以等摩尔比或近等摩尔比混合形成的固溶体合

金。研究表明,在钛合金表面激光熔覆高熵合金,可以提高其表面硬度、提升耐磨性、强化高温抗氧化性^[17-19]。邸英南^[20]采用激光熔覆技术在 TC4 钛合金表面制备出 AlCoCrFeMoVTi 高熵合金熔覆层,其物相组织为 BCC + FCC 二元共晶相,且随着 Al 含量的增加,其物相组织由 FCC 逐渐向 BCC 转化。研究发现,Al_xCoCrFeMoVTi (x=0, 0.5, 1, 1.5) 高熵合金熔覆层的显微硬度分别为基体的 2.64、2.81、3.44、2.61 倍,耐磨性为 TC4 钛合金基体的 2.78、4.19、8.33、2.64 倍。

稀土元素包含元素周期表中第三副族中原子序数从 57 至 71 的 15 个镧系元素及钪和钇共计 17 个元素,其原子半径较大,具有独特的外层电子结构,表现出极强的理化性能。通过向熔覆材料中添加稀土元素能够提高熔体流动性,起到细化晶粒、提高熔覆层致密度以及改善涂层硬度、耐磨性等作用。在熔覆层材料中,稀土元素作为各种性能的改良剂,多以稀土化合物的形式存在,如 CeO₂、La₂O₃、Y₂O₃、LaF₃、CeF 等,由于化学活性较强,稀土氧化物容易与硫、氧、硅、氮等杂质元素形成高熔点化合物,增加熔区共晶温度,提高形核质点数量,达到细化晶粒作用;在陶瓷材料中添加稀土元素,能够改变合金的润湿性,提高合金致密度,降低孔洞边缘的应力集中,提升熔覆层的界面结合强度,改善陶瓷涂层的组织和耐磨性能^[21-22]。张志强等人^[23]采用同轴送粉方式在 TC4 钛合金表面制备出含稀土 CeO₂ 的 TiC 增强钛基激光熔覆层,涂层内无裂纹缺陷,耐磨性相比基材提高近 52%。

2 钛合金表面激光熔覆工艺

2.1 熔覆材料供给方式对熔覆层的影响

激光熔覆是一个复杂的物理、化学冶金过程。熔覆材料的供给方式可以分为预置式和同步式 2 类,其中预置式主要包括热喷涂法和粘结剂法 2 种。热喷涂法主要是利用热源将被熔覆粉末加热至半熔融或熔融状态,然后将其以一定速度喷射至基体表面,待冷却沉积后形成熔覆层。通过这种方法获得的熔覆层相对均匀且粘性较好,缺点是操作流程较为繁琐,并且熔覆粉末的利用率较低,导致成本高。此外,由于温度较高,会对基体产生一定的热影响,甚至造成基体形变^[7]。粘结剂法是指通过粘结剂提前将熔覆粉末混合,均匀涂覆在钛合金基体表面的方法。相比于热喷涂法,粘结剂法不会对基体材料产生热影响,基体几乎不会发生被动变化,并且该熔覆方法成本较低,操作也相对简单;缺点是所获得的熔覆层均匀度较差,与基体结合强度较低,且容易在熔覆过程中产生气孔等缺陷。根据 2 种方法自身的特点,实际中预置板材、丝材时通常采用粘结剂法,预置

粉末材料时多采用热喷涂法^[6-7]。不同于预置式,同步式激光熔覆是指在熔覆过程中,利用粉末喷嘴装置直接将熔覆材料送至激光束中,保证供料和热熔覆同步进行,在钛合金表面直接形成熔覆层。该方法操作简单,熔覆效率高,自动化程度高,加工工艺难度低,熔覆层几乎无气孔等缺陷,可极大提升熔覆层质量^[6-7,24]。任翠霞^[25]分别利用预置粉末法和同步送粉法 2 种方式在 TC4 钛合金表面添加 B₄C 粉末,发现同步送粉法比预置粉末法制备的单道 TiC/TiB_x 复合涂层产生的粗大棒状相更多,且硬度更高。

2.2 熔覆工艺参数对熔覆层的影响

在实际工艺中常用比能量 E 来评价熔覆层质量,如式(1)所示^[24-25]:

$$E = \frac{P}{VDH} \quad (1)$$

式中: E 为激光能量密度, J/mm³; P 为激光功率, W; V 为激光束扫描速度, mm/s; D 为光斑直径, mm; H 为铺粉厚度, mm。

激光功率 P 为激光发生器在单位时间内所能提供的激光能量,能够影响激光束在熔覆区的能量辐照强度,控制熔覆层的质量和性能。激光功率过大,会使熔池深度增加,基体材料受到影响,发生变形或开裂现象;反之,激光功率过小,熔覆材料难以完全熔化,熔覆层易产生孔洞或夹杂等缺陷,导致熔覆层质量下降。激光束的光斑直径 D 决定着熔覆层的宽度,通常光斑越小,熔覆效果越好,但不宜过小,否则难以获得大面积的熔覆层。激光束扫描速度 V 即激光熔覆的快慢,能够间接影响熔覆区的能量强度。激光束的扫描速度不宜过快或过慢,激光熔覆速度过快,熔覆区的温度较低,熔覆材料熔化不完全,容易产生夹杂,降低熔覆层质量;反之,激光束扫描速度过慢,熔覆区的温度过高,容易造成元素流失或基体损伤。因此,需要协调激光功率、激光束的光斑直径以及激光束扫描速度 3 个工艺参数,根据各自作用特点选择合适的参数,从而获得高质量的熔覆层^[23-26]。龚玉玲等人^[27]为了提高 TC4 钛合金的耐腐蚀性能,运用激光熔覆同轴送粉技术,分别采用 1200、1500、1800、2100、2400 W 激光功率在 TC4 钛合金表面上制备 Ni60A/CeO₂ 复合熔覆层。研究发现,随着激光功率的增加,熔覆层逐渐趋于均匀致密,耐腐蚀性表现出先增大后减小的特点。

3 激光熔覆层的组织与性能研究

3.1 耐磨涂层

截至目前,关于钛合金表面激光熔覆的研究中,耐磨涂层的研究最为广泛。耐磨涂层多选择金属基陶瓷材料,主要通过调整其增强相的种类、性能以及在熔覆层

中的含量和分布状况,从而有效提高钛合金基体的耐磨性能^[1,4,23-25]。Li 等人^[28]利用同轴送粉技术在 Ti811 合金和 TC4 钛合金表面分别熔覆 TC4、Ni45、Al₂O₃、MoS₂ 和稀土氧化物 Y₂O₃ 混合粉末,研究了激光熔覆自润滑耐磨涂层的组织与性能。研究发现,熔覆层内原位生成了大量 TiC、Ti₂Ni、Cr_xS_y 新相,其中金属间化合物 Ti₂Ni 呈网状分布,在熔覆层中起到“骨架”支撑作用,提高了熔覆层的耐磨性能。

3.2 耐腐蚀涂层

通常在钛合金表面激光熔覆金属基陶瓷复合材料以制备耐腐蚀涂层,其中典型的有以镍基自熔合金为基,通过添加 SiC、B₄C、WC 等颗粒形成复合材料,以提高熔覆层的耐蚀性。同样,以钴基自熔合金为基的硬质合金熔覆层也表现出优异的耐腐蚀性能^[7,12]。Tao 等人^[29]在 TC4 钛合金表面熔覆 TiNi/Ti₂Ni 双相金属基复合涂层,提升了基体的耐腐蚀性能,并且以 TaC 作为增强相,提升了涂层表面钝化膜的化学稳定性。

3.3 高温抗氧化涂层

在钛合金表面进行激光熔覆能够在不改变材料整体性能的前提下,有效避免其在高温下发生氧化^[30]。于坤等人^[31]通过在金属基合金粉末中添加 Cr₃C₂ 等材料,在试样表面形成连续完整的 Cr₂O₃ 熔覆层,且组织均匀致密,与基体结合性较好,高温抗氧化性能明显提高。覃鑫等人^[32]为了提高 TC4 钛合金的摩擦磨损性能和高温抗氧化性能,以 NiCrCoAlY+20wt%Cr₃C₂ 混合粉末作为熔覆材料,采用激光熔覆技术在 TC4 钛合金表面制备出 NiCrCoAlY-Cr₃C₂ 复合涂层。研究发现,经过 850 °C 恒温氧化 100 h 后,复合涂层的氧化增重为 6.01 mg cm⁻²,约为钛合金基体(氧化增重为 25.10 mg cm⁻²)的 24%,有效改善了 TC4 钛合金的摩擦磨损性能和高温抗氧化性能。

3.4 生物涂层

当前,在钛合金表面制备生物陶瓷涂层的方法有等离子喷涂、磁控溅射和脉冲激光沉积等。与以上几种制备方法相比,激光熔覆生物涂层与基体的结合性较好、生物活性较高、植入体服役寿命长,因而在生物涂层领域的应用研究也越来越多。钛合金表面激光熔覆生物涂层的研究主要集中在金属表面熔覆羟基磷灰石(HAP)、氟磷灰石以及含 Ca 生物陶瓷材料,TC4 钛合金因具备良好的生物相容性被用作生物陶瓷涂层的载体^[33-35]。孙楚光等人^[35]以 HAP 和 SiO₂ 混合粉末为熔覆材料,选用 5 kW 横流 CO₂ 激光器在 TC4 钛合金表面激光熔覆低含硅量生物陶瓷涂层。该生物陶瓷涂层与基体呈冶金结合状态,在模拟体液(SBF)中熔覆层的

腐蚀电位与基材相比提高了 84.4 mV,腐蚀电流密度大幅下降;涂层材料在 SBF 中浸泡 7 d 后,表面沉积了大量的类骨磷灰石,表现出良好的耐腐蚀性和生物相容性。

4 结 语

激光熔覆作为一种先进的表面覆层技术,有着很大的发展前景,但受到基体材料的限制,存在新型熔覆材料体系研究较少、涂层工艺不易控制等问题,需要更多学者对钛合金表面激光熔覆技术进行进一步研究^[1-5,36-38]。激光熔覆技术的研究应主要着眼于熔覆材料、工艺参数等,具体如下。

(1) 发展新型熔覆层材料体系。根据目标涂层的使用要求,结合熔覆层材料成分设计,通过引入新的增强相或添加稀土元素,增强熔覆层的表面性能以及与基体的结合性能等。该研究方向对于提升熔覆层质量至关重要。

(2) 优化激光熔覆工艺参数。通过研究激光功率、激光束的光斑直径以及激光束扫描速度等工艺参数对熔覆层的影响,优化不同牌号钛合金基材的熔覆工艺,以获得较优异的工艺参数,减少熔覆层中气孔、裂纹、变形和表面不平等缺陷的出现,从而提高熔覆层的质量。采用自动送粉方式添加熔覆材料时,对送粉装置进行改进,以满足工业大规模生产的要求,同时可在熔覆过程中添加自动检测及自动控制装置。

(3) 研发功能梯度涂层。功能梯度涂层能够根据目标性能调整自身化学组成和微观结构,降低界面应力,提高界面结合强度,从而获得高质量的功能梯度涂层。

参考文献 References

- [1] 谢发勤,何鹏,吴向清,等. 钛合金表面激光熔覆技术的研究及展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(4):1514-1524.
- [2] Luo J, Li M Q, Yu W X. Microstructure evolution during high temperature deformation of Ti-6Al-4V alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(8): 1323-1328.
- [3] 林基辉,温亚辉,范文博,等. 钛合金表面激光改性技术研究进展[J]. 金属热处理, 2022, 47(3): 215-221.
- [4] 赵晖,孙旭,杜春燕,等. TC4 合金表面激光熔覆材料研究进展[J]. 沈阳理工大学学报, 2022, 41(1): 31-37.
- [5] 宋晓蕾. 基于激光熔覆 TiC/TiB₂ 的钛合金表面组织及性能研究[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(1): 64-68.
- [6] 马玲玲. 钛合金表面激光熔覆 Ti-Ni 基复合涂层的微观组织与耐磨性[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [7] 姜淙元. 钛合金表面耐磨改性层的制备及性能研究[D]. 江苏:

- 江苏科技大学, 2021.
- [8] 魏亚风. 激光熔覆增材 TiC_p/AlSi10Mg 复合材料工艺及组织性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [9] 王胜, 邵思程, 毕少平, 等. TC4 表层激光熔覆 Fe 基金层组织及性能研究[J]. 激光技术, 2022, 46(5): 653-656.
- [10] 杨凡, 张志强, 张宏伟, 等. CeO₂ 对 TiC_x 增强钛基激光熔覆层成形质量和组织的影响[J]. 中国表面工程, 2020, 33(3): 137-151.
- [11] 于坤, 祁文军, 李志勤, 等. Y₂O₃ 对 TC4 激光熔覆镍基复合涂层组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52(4): 101-107.
- [12] Weng F, Yu H J, Chen C Z, et al. Microstructures and properties of TiN reinforced Co-based composite coatings modified with Y₂O₃ by laser cladding on Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 178-184.
- [13] 姜淙元. 钛合金表面耐磨改性层的制备及性能研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2021.
- [14] 安强, 祁文军, 左小刚. TA15 钛合金表面原位合成 TiC 增强钛基激光熔覆层的组织与耐磨性[J]. 材料工程, 2022, 50(4): 139-146.
- [15] 乔世杰, 刘秀波, 翟永杰, 等. 时效处理对激光熔覆 Ni60-hBN 自润滑耐磨复合涂层的影响[J]. 应用激光, 2015, 35(6): 623-628.
- [16] 夏思海, 武美萍, 马毅青, 等. TiC 含量对 TC4 合金激光熔覆层组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(6): 212-215.
- [17] 蔡利芳, 张永忠, 石力开. 钛合金表面激光熔覆材料研究进展[J]. 钛工业进展, 2006, 23(1): 1-5.
- [18] 吴刚刚. TC4 表面激光熔覆 AlCoCrFeNiTi_x 高熵合金涂层组织与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [19] 刘均环. 钛合金表面激光熔覆制备含硼 GaP 生物陶瓷涂层[D]. 衡阳: 南华大学, 2019.
- [20] 邸英南. TC4 钛合金表面激光熔覆 Al_xCoCrFeMoVTi 高熵合金涂层的微观组织及性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [21] 龚美美, 谢林圻, 吴腾, 等. TC4 表面激光熔覆 Fe60-TiO₂ 涂层性能研究[J]. 激光技术, 2022, 46(4): 551-555.
- [22] 张杰. 钛合金表面 Al₂O₃-ZrO₂ (8%Y₂O₃) 激光熔覆涂层性能强化工艺与实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [23] 张志强, 杨凡, 张宏伟, 等. 含稀土 TiC_x 增强钛基激光熔覆层组织与耐磨性[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 43-56.
- [24] 游川川. TC4 钛合金表面激光熔覆 Ti-Al-N MAX 相复合涂层的组织结构与性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [25] 任翠霞. TC4 表面激光诱导原位制备 TiC/TiB_x 钛基复合涂层显微组织及性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [26] 战金明, 梁志刚, 黄进钰, 等. TC4 钛合金表面单道激光熔覆工艺研究[J]. 应用激光, 2020, 40(6): 955-961.
- [27] 龚玉玲, 武美萍, 崔宸, 等. 激光功率对 TC4 合金表面 Ni60A/CeO₂ 熔覆层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(8): 236-240.
- [28] Li R, Wang H. Effect of Ti811 and TC4 titanium alloy substrate on microstructures and properties of laser cladding self-lubricating composite coatings[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(12): 5984-5995.
- [29] Tao Y F, Li J, Lü H Y, et al. Residual stress distribution in different depths of TiNi/Ti₂Ni-based laser clad coating prepared at different environmental temperatures[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(9): 2043-2054.
- [30] 隋欣梦, 胡记, 张林, 等. 钛合金表面抗高温氧化涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 21-38.
- [31] 于坤, 祁文军, 李志勤. TA15 表面激光熔覆镍基和钴基涂层组织和性能对比研究[J]. 材料导报, 2021, 35(6): 6135-6139.
- [32] 覃鑫, 祁文军, 左小刚. TC4 钛合金表面激光熔覆 NiCrCoAlY-Cr₃C₂ 复合涂层的摩擦和高温抗氧化性能[J]. 材料工程, 2021, 49(12): 107-114.
- [33] 谭金花, 孙荣禄, 牛伟, 等. TC4 合金激光熔覆材料的研究现状[J]. 材料导报, 2020, 34(15): 15132-15137.
- [34] 齐超琪. TC4 表面激光熔覆 FeCoCrNi 高熵合金组织与性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [35] 孙楚光, 刘均环, 陈志勇, 等. 钛合金表面激光熔覆制备低含硅量生物陶瓷涂层[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 95-101.
- [36] 齐超琪. TC4 表面激光熔覆 FeCoCrNi 高熵合金组织与性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [37] 寇元哲, 郭晋昌. 不同送粉速度对 TC4 钛合金表面激光熔覆的影响[J]. 钛工业进展, 2021, 38(2): 25-29.
- [38] 李雅宁. TC4 表面激光熔覆高熵合金涂层的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.