

激光熔覆自润滑复合涂层研究进展及发展趋势

王志文¹, 庄宿国², 刘海青¹, 刘和剑¹, 职山杰¹, 李东亚¹, 刘秀波³

(1.苏州大学 应用技术学院, 江苏 苏州 215325; 2.西安航天动力研究所, 西安 710100;

3.中南林业科技大学 流变力学与材料工程研究所, 长沙 410004)

摘要: 结合激光熔覆自润滑涂层实例, 从材料设计、制备工艺、性能优化等方面综述了激光熔覆自润滑涂层的研究现状、存在的问题及发展方向。总结了常用固体润滑材料的摩擦学性能特点, 并就如何选择自润滑材料、包覆技术和宽温域润滑的研究进展进行了简要阐述。讨论了激光熔覆制备自润滑复合涂层中软质润滑相和硬质耐磨相之间的关系, 以及熔覆材料成分对涂层摩擦学性能的影响。简要分析了裂纹成因及控制涂层质量的常用手段, 重点探讨了激光工艺参数对涂层中润滑相体积分数和分布状态的影响, 并总结了激光熔覆自润滑涂层在工程中的应用, 以期能为激光熔覆技术的发展提供参考。目前激光熔覆自润滑涂层的应用已初具规模, 但在润滑剂的失效与防护、新材料的研究与应用、制备工艺的优化以及针对特殊环境下的摩擦磨损实验研究等方面仍存在较大发展空间。

关键词: 激光熔覆; 自润滑涂层; 熔覆材料; 固体润滑; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0104-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.016

Research Progress and Development Trend of Self-lubricating Composite Coatings by Laser Cladding

WANG Zhi-wen¹, ZHUANG Su-guo², LIU Hai-qing¹,
LIU He-jian¹, ZHI Shan-jie¹, LI Dong-ya¹, LIU Xiu-bo³

(1. Applied Technology College, Soochow University, Suzhou 215325, China; 2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China; 3. Institute of Rheological Mechanics & Materials Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China)

ABSTRACT: The work summarized research status, existing problem and development direction of self-lubricating coatings by laser cladding from four aspects including material design, preparation process, performance optimization, etc. based on practical examples of self-lubricating coating. The tribological properties of common solid lubricants were summarized and the research progress on how to choose self-lubricating materials and encapsulation technology and lubrication on wide temperature ranges was explained briefly. The relationship between soft lubricating phase and hard wear-resistant phase in self-lubricating coatings by laser cladding was discussed and the influence of the material proportion on tribological performance of coating was

收稿日期: 2017-12-31; 修订日期: 2018-02-12

Received: 2017-12-31; Revised: 2018-02-12

基金项目: 国家自然科学基金 (U1737112); 湖南省自然科学基金 (2018JJ2677); 河南科技大学高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室开放基金 (201803); 苏州大学应用技术学院第二十批大学生课外学术科研基金项目 (KY2018727B) 资助

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1737112); Natural Science Foundation of Hunan Province (2018JJ2677); the Open Fund of National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Technology, Henan University of Science and Technology (201803); the Twentieth Undergraduate Extracurricular Academic Research Fund Project, Applied Technology College of Soochow University (KY2018727B)

通讯作者: 刘海青 (1987—), 男, 硕士, 助教, 主要研究方向为表面工程与摩擦学。

Corresponding author: LIU Hai-qing (1987—), Male, Master, Assistant, Research focus: surface engineering and tribology.

analyzed. The cause of the crack and the common means of improving coating quality were analyzed briefly. The influence of laser process parameters on the volume fraction and distribution of lubrication phases in coatings was discussed emphatically. The application of coating by laser cladding in engineering was also summarized to provide reference for laser cladding technology. The self-lubricating coating by laser cladding has took shape in application, but still has large development space in terms of failure and protection of lubricants, research and application of new materials, optimization of fabrication process and tribological experiment study in special environment.

KEY WORDS: laser cladding; self-lubricating coating; cladding materials; solid lubrication; friction and wear

磨损是现代机械零件失效的主要原因之一,液体润滑剂在降低常见配合组件间的摩擦力方面是非常有效的^[1]。随着近年来航空航天、核能等尖端科技的发展,在面向某些极端苛刻工况,如高温、重载、真空、辐射等,普通润滑油难以起到作用^[2-3]。鉴于此,通过激光熔覆技术在摩擦运动副零件表面制备一层耐磨自润滑涂层不失为一种经济高效的处理手段^[4-5]。

激光熔覆是以激光作为热源,将熔覆粉末熔化于基材表面,使之形成一层具有特殊功能且稀释率低的表面涂层^[6-7]。激光熔覆自润滑复合涂层的制备是在以金属或合金、陶瓷为基本组元的熔覆材料中加入单一或复合固体润滑剂,通过激光熔覆工艺,使熔覆材料与基材冶金结合成具有自润滑性能的涂层^[8-9]。

文中对近年来国内外有关激光熔覆技术制备自润滑耐磨涂层的研究进展及发展趋势进行了总结,并从选择润滑材料、设计材料配比、完善熔覆工艺、深化性能研究四个方面概括了现阶段的研究状况,以期对激光熔覆自润滑涂层制备技术的发展和應用有所裨益。

1 选择润滑材料

目前,激光熔覆所用的基本熔覆材料多为金属材料 and 陶瓷材料,见表 1^[10]。为进一步降低磨损率,提高涂层耐磨性,可在熔覆材料中添加固体润滑剂类的润滑材料。润滑材料按照其特点,可大致将其分为三大类^[11]。一是层状固体类,包括石墨、h-BN 以及硫化物(MoS₂、WS₂)。层状固体内原子呈层状排列,同层原子间作用力大,邻层原子间作用力较小,层间易发生相对滑动^[12-14]。二是氟化物,此类固体润滑剂因在 500 ℃时发生脆-韧转变而使涂层具备自润滑能力。三是软金属,其中最常用的是 Ag,因其在摩擦过程中发生热软化而使涂层的摩擦系数降低。此外,以 Ag 为基础生成的 Ag 基三元氧化物更是一种优异的高温润滑剂。表 2^[11]为常用固体润滑剂的物理性质及摩擦学性能。除上述的润滑材料外,仍有许多润滑材料应用于自润滑涂层的制备,如氧化物、无机含氧酸盐等,其高温润滑潜力巨大^[15-16]。

表 1 激光熔覆功能复合涂层常用材料体系^[10]
Tab.1 Material systems for laser cladding functional composite coatings^[10]

Material systems of the coating		Improved properties
Metals	Self-fusing power: Ni, Co, Fe	Wear resistance, heat resistance.
	Intermetallic: TiSi, AlSi, TiAl, NiAl, NiSi	Biocompatibility, high temperature oxidation resistance, corrosion resistance, low-temperature resistance, et al.
Ceramics	Oxide ceramics: Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , TiO ₂	Heat resistance, high temperature oxidation resistance and abrasion resistance.
	Carbide ceramics: WC, TiC, SiC, CrC	Hardness, wear resistance and corrosion resistance.
	Nitride ceramics: TiN, ZrN, SiN, AlN, CrN	Hardness, wear resistance, heat resistance and corrosion resistance.
	Boride ceramics: TiB, TiB ₂ , ZrB ₂	Wear resistance and heat resistance.
	Silicide ceramics: Ti ₅ Si ₃ , TiSi, TiSi ₂	High temperature oxidation furnace.

表 2 自润滑涂层常用固体润滑剂的物理性质和摩擦学性能^[11]
Tab.2 Physical properties and tribological properties of solid lubricants for self-lubricating coatings^[11]

Lubricant	Density/(g·cm ⁻³)	Melting point/℃	Mohs' hardness	Friction coefficient
Ag	10.49	963	2.5	0.400
Graphite	2.23~2.25	3652	2.25	0.050~0.300
WS ₂	7.60	1250	7.5	0.030~0.070
MoS ₂	4.8	1185	1.0~1.5	0.006~0.250
h-BN	2.27	3000	2.29	0.160~0.200
CaF ₂	3.18	1402	4.0	0.200~0.400
BaF ₂	4.78	1353	3.0	0.200~0.400

注：生产固体润滑剂的公司有美国钼公司(MolyerorpIne)、比尔安达(上海)润滑材料公司、有研粉末新材料(北京)公司、东莞凯曼光电科技公司、南京牧科纳米科技公司、本溪化工集团润滑材料公司

由于润滑材料性质的不同,涂层中实际存在的润滑相可能是直接添加的固体润滑剂,此类润滑剂通常较为稳定,在高能激光下不易分解,如 h-BN、CaF₂ 等。另一类润滑剂在激光下则易分解,如 WS₂、MoS₂ 等,并

与熔池中的其他元素反应,原位生成新润滑相。相比之下,原位自生的润滑相与涂层和基材结合更加良好,减少了因相容性问题而导致的涂层缺陷^[17-18]。表 3^[19]列举了涂层中常见润滑相的适用温度及优缺点。

表 3 常见润滑相在适和温度下的润滑机制和优缺点^[19]

Tab.3 Lubrication mechanism and advantage/disadvantage of common lubrication phases in proper temperature^[19]

Adaptive mechanism	Typical temperature range (in air)/°C	Material examples	Benefits	Challenges
Structural transitions with hexagonal solid basal plane formation	20~500	Sulfide: MoS ₂ , WS ₂ , Graphite	Lowest friction and wear rates, low cost options	Oxidation at higher temperature
	500~900	Fluoride: CaF ₂ , BaF ₂ , h-BN		
Diffusion of soft metals to contact surface	200~500	Ag, Au	Oxidation stable, temperature self-regulated	Fast diffusion to surface depletes metal lubricant reservoirs
	400~800	Pb		
Lubricious oxide formation at contact surface	500~1000	Magnéli phases: V ₂ O ₅ , MoO ₃ , TiO ₂ , WO ₃ , PbO, ZnO. Double oxides: -silver molybdates, -silver vanadates, -silver niobates, -silver tantalates.	Very low friction, environment supplies oxygen, wear track self-healing, some (glasses) use counterpart to form lubricant	Abrasion at low temperatures, lubricant extrusion from contact by the load

区别于传统润滑材料的作用机理,固体润滑剂的润滑性能主要源于材料本身,依靠其在基材表面形成低剪切力的转移润滑膜,使涂层具备自润滑能力。在选择时既要考虑到涂层与基体间的物理性质以及结构和化学性质是否相匹配,同时也要考虑工作环境的特点,选择契合的润滑剂作为添加剂^[20-21]。再者,由于固体润滑剂在高能激光的作用下存在氧化分解以及上浮飞溅的现象,实际残留在涂层中的润滑相往往较少^[22]。如何最大程度地保留住熔池中的润滑剂,是在制备激光熔覆自润滑耐磨涂层时必须考虑的问题之一。

采用包覆技术,能有效保护、减弱高能激光对润滑剂的直接作用,在一定程度上可以缓解润滑剂的烧损、失碳、挥发等问题,同时也可以提升某些陶瓷相本质润滑材料的表面能,提高润湿性。YAN H 等^[23]在 h-BN 表面包覆了一层纳米 Ni,不仅改善了 h-BN 的润湿性,同时也降低了熔池的流动性,减少了上浮和飞溅现象,涂层摩擦学性能明显提升。但是,是否使用包覆技术应当根据实际情况而定。郑晨^[24]的实验表明, Ni 包覆虽然缓解了 WS₂ 的分解,但由于未包覆时 WS₂ 分解后的 W 元素能起到固溶强化的作用,且 Ni 包覆也变相地在熔覆材料中加入了软质的 Ni,导致涂层硬度有所降低,如图 1 所示。虽然采用了包覆手段,但是综合摩擦系数和磨损率来看,耐磨减摩效果的提升并不是特别显著,如图 2 所示。

目前来看,单一润滑剂大多在较小温度区间内的润滑效果较好,有着宽温域润滑能力的材料则较为少见,以多种润滑剂的组合使用来实现涂层宽温域内的连续润滑是常用的措施之一。XIN B B 等^[25]在钛合金表面制备的连续润滑涂层在 25~800 °C 温度不断升高

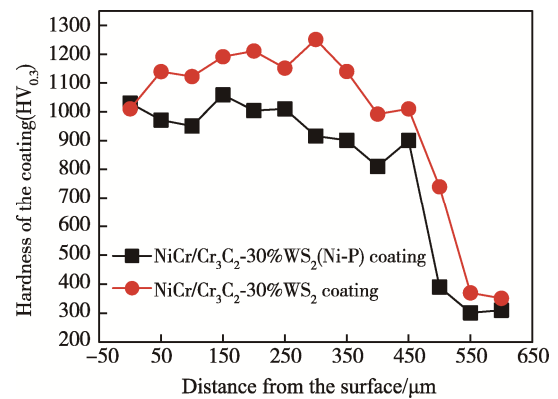


图 1 激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂ 和 NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂(Ni-P)涂层的显微硬度曲线^[24]
Fig.1 Microhardness curves of NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂ and NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂(Ni-P) coatings by laser cladding^[24]

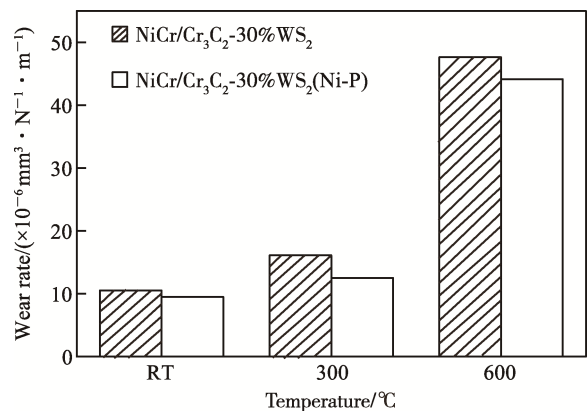


图 2 激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂ 和 NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂(Ni-P)涂层在不同温度下的磨损率^[24]
Fig.2 Wear rate of NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂ and NiCr/Cr₃C₂-30%WS₂(Ni-P) coatings by laser cladding at different temperatures^[24]

的环境下, 均能表现出良好的摩擦学性能。从室温到 800 °C 起到润滑作用的依次是 Ag、Cr₂O₃、V₂O₅、NiO、Ag₃VO₄ 以及 AgVO₃, 特别是在 800 °C 时, 其摩擦系数为 0.143, 这主要是由于反应生成的 Ag₃VO₄ 和 AgVO₃ 具有类似石墨的层状结构。合理选配复合润滑材料不仅能实现连续润滑, 同时也能产生协同润滑的效果。TORRES H 等^[26]在以 Ag 和 MoS₂ 实验制备自润滑涂层时指出, 涂层中的硫元素有利于减缓 Ag 的扩散率, 延长涂层使用寿命。

随着新材料探索研发工作的不断深入, 涌现出许多润滑性能优异的新材料, 如金属陶瓷材料 Ti₃SiC₂, 现已实验验证了其代替石墨制备金属基自润滑涂层的可行性^[27]。再如纳米润滑材料, 但由于其熔覆过程中的烧蚀和团聚现象比较严重, 其具体的自润滑涂层制备技术有待进一步优化。此外, 稀土元素除了可以用于解决激光熔覆涂层稀释、孔隙度、夹杂物湿润性以及裂纹敏感性等一些质量问题外, 也可以通过改变涂层磨损机理从而使得摩擦系数降低, 使涂层具备自润滑的能力^[28]。总体而言, 现阶段激光熔覆自润滑涂层制备存在着可选润滑材料范围较窄, 对现有润滑材料的属性认识尚不充分等问题。因此, 积极采用新技术、新方法, 着力避免润滑剂的固有缺陷, 深化对已知润滑材料本质属性和材料间相互作用机制的理论认识, 以及对新材料的研究应用应当是这一方向当前工作的重点。

2 设计材料配比

对于激光熔覆自润滑复合涂层而言, 软质润滑相形成的润滑膜只有在硬质涂层的支撑下才能发挥更好的润滑效果^[29]。为了获得高质量自润滑涂层, 通过对不同材料配比的熔覆粉末所制备的自润滑涂层进行摩擦磨损实验, 分析成分对比对涂层组织结构和性能的影响, 是有关自润滑涂层研究的基本内容。

WS₂ 是一种常用的金属相本质的固体润滑剂, 润湿性较好。吴少华等^[30]实验表明, 随着 WS₂ 量的增加, 涂层中硫化物含量上升, 摩擦系数有所降低。ZHAI Y J 等^[31]则以 Ti(40%) 和 19.5%TiC-40.5%WS₂(N1)、25.2%TiC-34.8%WS₂(N2)、29.4%TiC-30.6%WS₂(N3) 三种不同质量配比的复合粉末为原料在 TA2 表面制备自润滑涂层, 实验发现, 涂层的硬度与熔覆材料中的 TiC 含量呈正相关, 但摩擦系数却并没有随着 WS₂ 含量的上升而降低, 如图 3 和图 4 所示。硬度偏低的 N1 涂层在磨损过程中易剥落产生较大的块状磨屑, 这些磨屑在摩擦过程中不仅会产生较大的切向阻力, 还会阻碍润滑转移膜的形成, 但涂层中的硬质相过多不利于涂层整体性能的提升。LI J N 等^[32]在钛合金表

面制备复合涂层时发现, 当 TiC 的质量分数大于 40% 时, 陶瓷层的热应力值大于材料屈服强度极限, 涂层出现微裂纹, 耐磨性下降。研究发现, 多数情况下涂层的磨损率随着涂层中软质润滑相的增加呈现出先减小后增大的趋势。因此, 在实际应用时, 要综合考量涂层耐磨性和减摩性的协调问题, 合理配置润滑材料和其他材料的比例, 才能充分发掘材料的润滑能力。

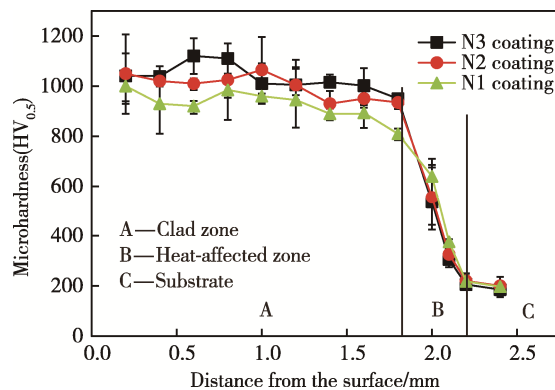


图 3 三种涂层的显微硬度分布^[32]

Fig.3 Microhardness distribution of three coatings^[32]

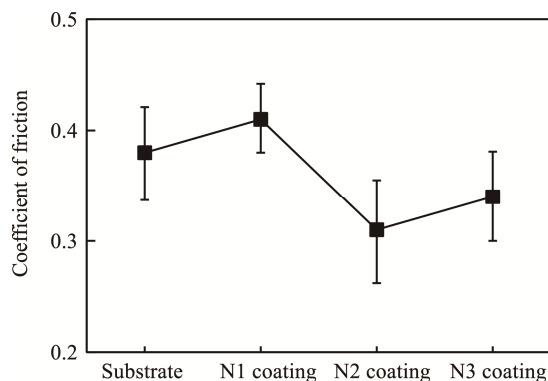


图 4 TA2 基材以及三种涂层的平均摩擦系数^[32]

Fig.4 Average friction coefficient of TA2 substrate and three coatings^[32]

就目前来看, 对于激光熔覆自润滑涂层的研究大都局限于在不同的基材上熔覆不同的复合粉末, 而后对熔覆层的组织结构、硬度、耐磨减摩性进行定性实验测定, 确定最佳的材料配比, 最终指出基材性能得到提高的研究模式。此类实验大都是在 1000 °C 以内的空气中进行, 但固体润滑剂在不同的环境中所表现出的物理性质和摩擦学性能是不同的。例如 h-BN 在空气中的摩擦系数约为 0.16~0.20, 而在真空中却为 0.8; WS₂ 在空气中 450 °C 时分解, 而在真空中为 1100 °C 分解。WU J S 等^[33]研究表明, 摩擦环境对于摩擦表面温度、磨损机制及摩擦副表面润滑膜的形成都具有重要影响。因此, 针对特殊环境下应用的激光熔覆自润滑涂层制备, 所选用熔覆材料的种类和配比问题仍有待研究。

3 完善熔覆工艺

在激光作用下,熔覆层表面与基材间会产生很大的温度梯度。由于基体材料和涂层的物理性质存在差异,在随后快速冷却的情况下,温度梯度易造成熔覆层内部以及熔覆层与基材间的胀缩不一致,导致熔覆过程中产生很大的热应力。当熔覆层内应力超过材料屈服极限时,就会出现裂纹^[34-35]。

除通过改进材料的方法外,对复合粉末机械合金化处理,制备前后对基材进行预热和缓冷处理,对激光熔覆自润滑涂层进行后热处理,对于削减残余应力,消除裂纹产生的潜在因素是有益的。LU X L 等^[36]对自润滑涂层进行了热处理实验,涂层的微观结构得到细化,残余应力降低,断裂韧性提升。热处理 1 h 后,涂层中的 h-BN 更易于在摩擦表面形成润滑转移膜,涂层摩擦学性能有所提升。采用逐级过渡的梯度涂层则有利于缓解应力集中,能使应力分布更加合理,也是一种解决涂层质量问题的理想手段之一。此外,在涂层制备过程中辅以其他手段也能有效提高涂层质量。通过外加电磁场作为感应热源,能改善金属和陶瓷材料间的润湿性,而震动或机械冲击则能起到细化晶粒、降低残余应力的作用^[37-38]。

工艺参数对熔覆层形貌、熔覆质量、裂纹和润滑相的形成有决定性作用,因此,有关工艺参数优化和控制的研究是目前最为广泛的研究课题之一。在进行激光熔覆时,激光以高能电磁波形式作用在熔覆材料上,材料中的电子被激发,与晶格中的原子相互作用并产生热能,最终作用在材料表面的能量取决于扫描速度(V)、激光功率(P)、光束直径(D)和光斑面积(S)等工艺参数的设定^[39]。其中,比能量密度公式为:

$$\rho = \frac{P}{D \times V}$$

张天刚等^[40]考察钛合金激光熔覆 Ni60-WS₂ 涂层时发现,扫描速度对于涂层中生成润滑相的种类和数量都有很大影响。扫描速度过低会使得熔覆过程中产生强烈的对流作用,导致润滑相的碰撞、团聚,影响润滑效果。张祥林等^[41]实验发现,比能量和激光能量大的 Nd:YAG 激光器会加速涂层中 WS₂ 和 CaF₂ 的分解和上浮,进而影响涂层的自润滑效果。综上可见,降低激光功率和加快扫描速度对于缓解润滑剂的上浮和分解是有利的,但当激光能量输入不足时也会产生一系列问题。周丹丹等^[42]实验发现,扫描速度过快时,涂层中原位反应产生的硬质相减少且分布不均,难以起到支撑的作用,涂层的润滑性能也将受到影响。王培等^[43]则发现在激光能量低时 h-BN 飞溅严重,且与基体合金不润湿,同时也增大了涂层裂纹的形成几率。除了比能量密度 ρ 外,功率密度 E 和线能量 γ

也是反映熔覆情况的指标,其中功率密度 E ($E=P/S$) 与熔池对流强度和温度梯度有关,为了减少轻质润滑剂的上浮,宜采用较小功率密度。线能量 γ ($\gamma=P/V$) 则影响着基材的熔化量^[44]。对于不同的润滑材料,工艺参数的选择一般不同,而当拓展到多道搭接实验时,情况会更为复杂。张天刚等^[45]实验发现,多道搭接时,熔覆层硬质相和润滑相分布密度小且组织粗大,涂层硬度降低,且易生裂纹,宜采用较小的线能量密度。因此,在选择工艺参数时要考虑实际情况,切不可一概而论。

在涂层的实际制备过程中,熔池中的变化情况往往无法直接知晓,激光熔覆技术研究中,数值模拟是一种常用的研究手段。通过对激光熔覆温度场、应力场、流场进行数值模拟,了解其瞬态分布和变化情况,对于揭示激光熔覆多源复杂信息的基本性质和作用规律,建立系统复杂信息尤其是非常规信息的处理、决策机制,提出激光熔覆制备自润滑涂层过程优化控制模型有着重要意义^[46-47]。激光熔覆本质上是一个多源耦合复杂信息作用下的加工过程,目前研究的主要内容多为对某种材料采用不同的工艺参数,经多次试验,而后分析得出这种材料的最佳工艺参数,但对工艺参数加工过程中多源复杂耦合信息间的相互作用规律和决策机制,以及不确定信息的处理问题,仍缺乏定性和定量的认识。

4 性能评价研究

性能研究是激光熔覆自润滑复合涂层应用中最为关键的环节之一。常见实验多是在固定的载荷、摩擦时间、旋转半径、线速度、对磨球(Si₃N₄陶瓷球)直径等实验参数的情况下,分析摩擦系数和磨损率随实验温度的变化情况,重点研究涂层的高温稳定性,讨论涂层在高温下的物相和组织变化,结合对偶件和涂层表面磨损形貌 SEM 图,分析在不同温度下摩擦磨损机理和形成原因。在实际工程应用中,多数零件都工作于交变载荷、高应力、摩擦对偶件、摩擦时间和摩擦速度不定的环境下^[48-49],因此,完善相关实验研究对于激光熔覆自润滑复合涂层有着巨大的工程实践意义。

对于自润滑涂层而言,摩擦表面是否形成良好的转移润滑膜,是影响涂层摩擦学性能的关键因素。任佳等^[50]测试了金属陶瓷和固体润滑剂 h-BN(5%)制备自润滑耐磨复合涂层在不同载荷下的摩擦学性能,发现复合涂层的摩擦系数和磨损率均呈现出先降低后升高的趋势。分析认为 2 N 时对磨球对涂层的碾压作用较弱,不能形成润滑膜,8 N 时对磨球对涂层表面外法向正压力增大,转移膜易剪切断裂而剥落,相对而言,涂层在 5 N 载荷下的自润滑和耐磨性能最好。

段文博等^[51]发现, 以 Ag 作为润滑相, 通过感应烧结技术制备的自润滑涂层在低速磨损和高速磨损下的摩擦机理相同, 但随摩擦速度的提高, 磨损表面产生摩擦热, 形成 Ag 润滑膜, 涂层摩擦系数降低。黄丽坚等^[52]在考察聚合物材料的自润滑性能时发现, 与硬质钢和镍铬合金摩擦时, 摩擦系数有所降低, 而与软质铜摩擦时, 因铜磨损严重, 无法形成稳定的润滑膜, 材料的摩擦性能较差。

激光熔覆自润滑涂层最初是为航空发动机某些在高温高压氧化性气体中工作的特殊零件而设计的, 但随着航空航天、海洋工程、极地探索、核工程等相关领域的发展, 受限特殊环境无法添加润滑油或润滑油无法发挥作用的情况下, 迫切要求自润滑涂层能够适应其他极端工况环境。目前有关激光熔覆自润滑耐磨复合涂层在超高温 ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$)、重载、高速、变速、辐射、低温、真空以及酸碱等环境下的摩擦磨损、耐腐蚀等性能的实验研究尚少。

5 结语

文中结合激光熔覆自润滑涂层的具体实验制备和应用, 从选择润滑材料、设计材料配比、完善熔覆工艺、深化涂层性能研究几个角度综述了激光熔覆自润滑耐磨涂层的研究现状、存在的问题以及发展方向:

1) 激光熔覆自润滑复合涂层在理论研究和实际应用中已取得一定进展, 在高温绝热发动机轴承、汽轮机叶片、缸套、核阀等摩擦运动零部件中均有应用。

2) 在面向极端条件, 如高温 (大于 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$)、真空、重载等无法通过润滑油润滑的环境下, 激光熔覆自润滑涂层的应用潜力巨大, 但目前相关实验研究较少。

3) 对于制备激光熔覆自润滑涂层时, 熔覆层内应力的演变规律、裂纹的形成机理、内部组织的形成过程等基本问题的认识尚有不足, 而这也是控制涂层缺陷, 提高涂层性能的关键所在。

4) 熔覆材料是决定涂层性能的最重要因素之一, 立足于现有合金相图, 探索新型合金性能, 探求新型润滑材料、新配方, 方能从根源上减少熔覆缺陷, 提升自润滑涂层性能。

参考文献:

- [1] GUNDA R K, NARALA S K R. Evaluation of Friction and Wear Characteristics of Electrostatic Solid Lubricant at Different Sliding Conditions[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 332: 341-350.
- [2] 袁有录, 李铸国. 原位自生 WC 增强 Fe 基涂层的组织及干滑动摩擦磨损性能[J]. 材料工程, 2016, 44(5): 47-53.
- [3] YUAN You-lu, LI Zhu-guo. Microstructure and Dry Sliding Friction and Wear Properties of In-situ Synthesized WC Reinforced Fe-based Coating[J]. Journal of Material Engineering, 2016, 44(5): 47-53.
- [4] LIU X B, MENG X J, LIU H Q, et al. Development and Characterization of Laser Clad High Temperature Self-lubricating Wear Resistant Composite Coatings on Ti-6Al-4V Alloy[J]. Materials & Design, 2014, 55(6): 404-409.
- [5] LU X L, LIU X B, YU P C, et al. Synthesis and Characterization of Ni60-hBN High Temperature Self-lubricating Anti-wear Composite Coatings on Ti6Al4V Alloy by Laser Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78(5): 87-94.
- [6] XIN B B, YU Y J, ZHOU J S, et al. Effect of Copper Molybdate on the Lubricating Properties of NiCrAlY-Laser Clad Coating at Elevated Temperatures[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 313: 328-336.
- [7] 张佳虹, 孙荣禄. 钛合金表面激光熔覆的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(11): 89-93.
- [8] ZHANG Jia-hong, SUN Rong-lu. Research Progress of Laser Cladding on Surface of Titanium Alloy[J]. Material Review, 2014, 28(11): 89-93.
- [9] CHATTERJEE S, SHARIFF S M, PADMANABHAM G, et al. Study on the Effect of Laser Post-treatment on the Properties of Nanostructured $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2\text{-TiN}$ Based Coatings Developed by Combined SHS and Laser Surface Alloying[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(1): 131-138.
- [10] WENG F, YU H J, CHEN C Z, et al. Microstructures and Wear Properties of Laser Cladding Co-based Composite Coatings on Ti-6Al-4V[J]. Materials & Design, 2015, 80: 174-181.
- [11] 李博雅, 曹志强. 金属基固体自润滑复合涂层及其制备技术研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 32-38.
- [12] LI Bo-ya, CAO Zhi-qiang. Metal-based Solid Self-lubricating Composite Coating and Its Preparation Technology[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 32-38.
- [13] 张晓伟, 刘洪喜, 蒋业华, 等. Ti6Al4V 合金表面激光熔覆功能复合涂层研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(1): 178-183.
- [14] ZHANG Xiao-wei, LIU Hong-xi, JIANG Ye-hua, et al. Research Progress of Functional Composite Coatings on Ti6Al4V Alloy Surface Prepared by Laser Cladding Technique[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(1): 178-183.
- [15] 房刘杨, 姚延松, 闫华, 等. 激光熔覆自润滑复合涂层研究进展[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 459-465.

- FANG Liu-yang, YAO Yan-song, YAN Hua, et al. Research Progress of Self-lubricating Coating by Laser Cladding[J]. Apply Laser, 2017, 37(3): 459-465.
- [12] WANG Q Y, ZHANG Y F, BAI S L, et al. Microstructures, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Hastelloy C22 Coating Produced by Laser Cladding[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 553(6): 253-258.
- [13] SAHOO C K, MASANTA M. Microstructure and Tribological Behavior of TiC-Ni-CaF₂ Composite Coating Produced by TIG Cladding Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 229-245.
- [14] 刘秀波, 乔世杰, 翟永杰, 等. TA2 合金激光熔覆自润滑复合涂层组织与摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(1): 75-82.
- LIU Xiu-bo, QIAO Shi-jie, ZHAI Yong-jie, et al. Microstructure and Tribological Properties of Laser Cladding Self-lubricating Anti-wear Composite Coatings on TA2 Alloy[J]. Tribology, 2017, 37(1): 75-82.
- [15] WANG L Q, ZHOU J S, XIN B B, et al. Phase Transformation and Tribological Properties of Ag-MoO₃, Contained NiCrAlY Based Composite Coatings Fabricated by Laser Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93(1): 79-86.
- [16] 王蕊, 高东强, 何乃如, 等. 氧化物润滑材料的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 127-133.
- WANG Rui, GAO Dong-qiang, HE Nai-ru, et al. Research Progress of Oxide Lubricating Materials[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 127-133.
- [17] YAN H, ZHANG J Z, ZHANG P L, et al. Laser Cladding of Co-based Alloy/TiC/CaF₂ Self-lubricating Composite Coatings on Copper for Continuous Casting Mold[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 232(1): 362-369.
- [18] SHI X L, ZHAI W, XU Z, et al. Synergetic Lubricating Effect of MoS₂ and Ti₃SiC₂ on Tribological Properties of NiAl Matrix Self-lubricating Composites over a Wide Temperature Range[J]. Materials & Design, 2014, 55(3): 93-103.
- [19] VOEVODIN A A, MURATORE C, AOUADI S M. Hard Coatings with High Temperature Adaptive Lubrication and Contact Thermal Management: Review [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 257(50): 247-265.
- [20] 陈百明, 张俊喜, 郭小汝, 等. 高温金属基减摩材料的固体润滑剂的研究进展[J]. 矿山机械, 2016, 44(1): 7-11.
- CHEN Bai-ming, ZHANG Jun-xi, GUO Xiao-ru, et al. Research Progress on Solid Lubricant for Metal-matrix Anti-friction Material at High Temperature[J]. Mining Machinery, 2016, 44(1): 7-11.
- [21] 薛群基, 吕晋军. 高温固体润滑研究的现状及发展趋势[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(1): 91-96.
- XUE Qun-ji, LU Jin-jun. Research Status and Developing Trend of Solid Lubrication at High Temperatures[J]. Tribology, 1999, 19(1): 91-96.
- [22] 郑晨, 刘秀波, 杨茂盛, 等. 添加 WS₂/(Ni-P)包覆的激光制备高温自润滑耐磨复合涂层[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(6): 136-141.
- ZHENG C, LIU X B, YANG M S, et al. High Temperature Self-lubricating Wear-Resistant NiCr-Cr₃C₂/30%WS₂(Ni-P) Composite Coating Fabricated by Laser Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(6): 136-141.
- [23] YAN H, ZHANG P L, GAO Q S, et al. Laser Cladding Ni-based Alloy/Nano-Ni Encapsulated h-BN Self-lubricating Composite Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 332: 422-427.
- [24] 郑晨. 激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-WS₂ 高温自润滑耐磨复合涂层研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- ZHANG Chen. Study of NiCr/Cr₃C₂-WS₂ High-temperature Self-lubricating Wear-resistant Composite Coatings[D]. Soochow: Soochow University, 2013.
- [25] XIN B B, YU Y J, ZHOU J S, et al. Effect of Silver Vanadate on the Lubricating Properties of NiCrAlY Laser Cladding Coating at Elevated Temperatures[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 307(15): 136-145.
- [26] TORRES H, SLAWIK S, GACHOT C, et al. Microstructural Design of Self-lubricating Laser Claddings for Use in High Temperature Sliding Applications[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 337: 24-34.
- [27] 陈婷婷, 刘文扬, 张建波, 等. Ti₃SiC₂ 代替石墨金属基自润滑材料研究进展[J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(1): 56-60.
- CHEN Ting-ting, LIU Wen-yang, ZHANG Jian-bo, et al. Research Progress for Ti₃SiC₂ Replaced of Graphite on Metal-matrix Self-lubricating Composite[J]. Non-ferrous Metal Materials and Engineering, 2017, 38(1): 56-60.
- [28] QUAZI M M, FAZAL M A, HASEEB A S M A, et al. Effect of Rare Earth Elements and their Oxides on Tribo-mechanical Performance of Laser Claddings: A Review[J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34(6): 549-564.
- [29] 刘海青, 刘秀波, 孟祥军, 等. Ti-6Al-4V 合金激光熔覆 γ -NiCrAlTi/TiC+TiWC₂/CrS+Ti₂CS 高温自润滑耐磨复合涂层研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 75-80.
- LIU Hai-qing, LIU Xiu-bo, MENG Xiang-jun, et al. Study on γ -NiCrAlTi/TiC+TiWC₂/CrS+Ti₂CS High-

- temperature Self-lubricating Wear Resistant Composite Coatings on Ti-6Al-4V by Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Laser, 2014, 41(3): 75-80.
- [30] 吴少华, 石皋莲, 刘海青, 等. WS_2 含量对钛合金激光熔覆自润滑耐磨复合涂层的影响[J]. 应用激光, 2014, 34(2): 95-100.
- WU Shao-hua, SHI Gao-lian, LIU Hai-qing, et al. Effect of Different Addition of WS_2 on Laser Clad Self-lubrication Anti-wear Composite Coatings on Titanium Alloy[J]. Apply Laser, 2014, 34(2): 95-100.
- [31] ZHAI Y J, LIU X B, QIAO S J, et al. Characteristics of Laser Clad α -Ti/TiC+(Ti,W) C_{1-x} /Ti₂SC+TiS Composite Coatings on TA2 Titanium Alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 89: 97-107.
- [32] LI J N, CHEN C Z, SQUARTINI T, et al. A Study on Wear Resistance and Microcrack of the Ti₃Al/TiAl+TiC Ceramic Layer Deposited by Laser Cladding on Ti-6Al-4V Alloy[J]. Applied Surface Science, 2010, 257(5): 1550-1555.
- [33] WU J S, LI J F, ZHANG L, et al. Effects of Environment on Dry Sliding Wear Behavior of Silver-Copper Based Composites Containing Tungsten Disulfide[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(10): 2202-2213.
- [34] 孟浩, 刘国忠. 工艺参数对激光熔覆裂纹缺陷的影响[J]. 激光杂志, 2017, 38(10): 39-42.
- MENG Hao, LIU Guo-zhong. A Grey Preprocessing Method for Bessel-structured Light Fringe Image[J]. Laser Journal, 2017, 38(10): 39-42.
- [35] 刘海青, 刘秀波, 孟祥军, 等. 金属基体激光熔覆陶瓷基复合涂层的裂纹成因及控制方法[J]. 材料导报, 2013, 27(11): 60-63.
- LIU Hai-qing, LIU Xiu-bo, MENG Xiang-jun, et al. Crack Formation Mechanism and Controlling Methods of Laser Clad Ceramic Matrix Composite Coatings on Metal Substrate[J]. Material Review, 2013, 27(11): 60-63.
- [36] LU X L, LIU X B, YU P C, et al. Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ni60/h-BN Self-lubricating Anti-wear Composite Coatings on 304 Stainless Steel by Laser Cladding[J]. Tribology, 2016, 355(13): 350-358.
- [37] WENG F, CHEN C Z, YU H J. Research Status of Laser Cladding on Titanium and Its Alloys: A review [J]. Materials & Design, 2014, 58(6): 412-425.
- [38] 郑丽娟, 付宇明, 王好平, 等. 机械冲击对高硬激光熔覆层力学性能与微观组织的影响[J]. 中国机械工程, 2017, 28(13): 1608-1612.
- ZHENG Li-juan, FU Yu-ming, WANG Hao-ping, et al. Effects of Mechanical Shocks on Mechanics Properties and Microstructures of High Hardness Laser Cladding[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(13): 1608-1612.
- [39] QUAZI M M, FAZAL M A, HASEEB A S M A, et al. A Review to the Laser Cladding of Self-lubricating Composite Coatings[J]. Lasers in Manufacturing & Materials Processing, 2016, 3(2): 1-33.
- [40] 张天刚, 孙荣禄. 激光熔覆减摩自润滑涂层的研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(10): 169-172.
- ZHANG Tian-gang, SUN Rong-lu. Study on Laser Cladding Anti-Friction Self-lubricating Coating[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(10): 169-172.
- [41] 张祥林, 章小峰, 王爱华, 等. 激光熔覆金属基固体自润滑涂层的组织结构[J]. 中国机械工程, 2006, 17(19): 2084-2088.
- ZHANG Xiang-lin, ZHANG Xiao-feng, WANG Ai-hua, et al. Microstructure of Metal-based Solid Self-lubrication Coating by Laser Cladding[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(19): 2084-2088.
- [42] 周丹丹, 孙荣禄. 扫描速率对激光熔覆Ni基h-BN复合涂层组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(4): 167-171.
- ZHOU Dan-dan, SUN Rong-lu. Effect of Laser Scanning Rate on Microstructure and Properties of Nickel-based h-BN Composite Coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(4): 167-171.
- [43] 王培, 叶源盛. 钛合金表面激光熔覆h-BN固体润滑涂层[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 44-48.
- WANG Pei, YE Yuan-sheng. Solid Self-lubricating Coatings on TC4 Titanium Alloy by Laser Cladding with h-BN[J]. Surface Technology, 2015, 44(8): 44-48.
- [44] 高永建, 张世堂, 邓智昌, 等. 激光熔覆高温自润滑覆层的裂纹成因与控制[J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 13-18.
- GAO Yong-jian, ZHANG Shi-tang, DENG Zhi-chang, et al. Cause and Control of the Crack of Laser Clad High Temperature Self-lubricating Coatings[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(4): 13-18.
- [45] 张天刚, 孙荣禄. TC4表面单道与多道搭接激光熔覆自润滑涂层微观组织对比研究[J]. 材料导报, 2017, 31(4): 47-51.
- ZHANG Tian-gang, SUN Rong-lu. Comparative Study of Self-lubricating Coatings Microstructure on TC4 Alloy Surface Prepared by Single-pass Laser Cladding and Multitrack Laser Cladding[J]. Materials Review, 2017, 31(4): 47-51.
- [46] 胡吉成, 杨广楠. AISI316激光熔覆成形过程数值模拟研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(13): 35-41.
- HU Ji-cheng, YANG Guang-nan. The Numerical Si-

- mulation of AISI316 in Laser Cladding Forming[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(13): 35-41.
- [47] 党元晓, 祁文军, 芦丽丽. 激光熔覆技术数值模拟研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 23-27.
- DANG Yuan-xiao, QI Wen-jun, LU Li-li. Research Status and Development Trend of Numerical Simulation of Laser Cladding Technology[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(6): 23-27.
- [48] 黄思语, 王水波. 感应熔覆制备镍基合金涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 39-47.
- HUANG Si-yu, WANG Shui-bo. Research Progress in Preparation of Ni-based Alloy Coating by Induction Cladding Technology[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 39-47.
- [49] 郭纯, 陈建敏, 姚润钢, 等. 激光熔覆原位制备 Ti_3Al 金属间化合物涂层结构及摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(1): 14-21.
- GUO Chun, CHEN Jian-min, YAO Run-gang, et al. Microstructure and Tribological Properties of Ti_3Al Intermetallic Compound Coating by Laser Cladding[J]. Tribology, 2013, 33(1): 14-21.
- [50] 任佳, 刘秀波, 余鹏程, 等. 不同载荷下钛合金激光熔覆 Ni60/h-BN 自润滑耐磨复合涂层的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(4): 407-414.
- REN Jia, LIU Xiu-bo, YU Peng-cheng, et al. Effect of Normal Load on Tribological Properties of Ni60/h-BN Self-lubricating Anti-wear Composite Coating on Ti6Al4V Alloy by Laser Cladding[J]. Tribology, 2015, 35(4): 407-414.
- [51] 段文博, 孙岩桦, 丁春华, 等. 滑动速度对 IS304 涂层自润滑磨损机理的影响[J]. 摩擦学学报, 2015, 32(2): 147-153.
- DUAN Wen-bo, SUN Yan-hua, DING Chun-hua, et al. The Effect of Sliding Speed on the Wear Mechanisms of IS304 Self-lubricating Coating[J]. Tribology, 2015, 32(2): 147-153.
- [52] 黄丽坚, 朱鹏, 王晓东, 等. 聚酰亚胺复合材料与不同对偶材料滑动摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(6): 546-550.
- HUANG Li-jian, ZHU Peng, WANG Xiao-dong, et al. Friction and Wear of Polyimide Composites Sliding Against Different Counterpart Materials[J]. Tribology, 2008, 28(6): 546-550.