

内燃机活塞环材料及表面处理技术研究 现状与发展趋势

刘伟, 谭泽飞*, 陈文刚, 戴一帆, 袁浩恩, 程家豪, 魏北朝, 周意皓

(西南林业大学 机械与交通学院, 昆明 650224)

摘要: 活塞环是内燃机中重要的零部件之一, 该部件的摩擦损耗占内燃机总摩擦损失的 26%。因此, 活塞环材料的选用及其表面处理研究对于优化提升内燃机性能、延长服役寿命具有重要意义。简单介绍并总结了内燃机活塞环常用材料及其发展趋势, 详细综述了激光表面织构技术、表面涂层技术以及表面复合技术在活塞环减摩抗磨方面的研究和应用现状。其中, 激光表面织构技术 (LST) 可起到接纳磨屑、保持油膜等作用, 从而降低活塞环表面摩擦和磨损, 但由于织构形貌和几何参数特征对摩擦学性能的影响较为复杂, 仍需结合实际工况进一步研究并优化。以镀铬、热喷涂、气相沉积及激光熔覆为代表的涂层技术也常用于活塞环的表面强化处理, 但涂层材料种类繁多, 难以形成统一的行业标准进而规模应用。此外, 通过合理复合多种表面处理技术, 比如微弧氧化与电泳沉积复合、超声滚压与离子渗氮技术复合、磁控溅射和低温离子渗硫复合等, 可实现优势互补、发挥协同作用, 有效改善接触表面的摩擦性能, 为活塞环的减摩增寿研究开拓了新的思路。最后对未来活塞环材料开发应用及其减摩抗磨方面的研究发展进行了展望。

关键词: 活塞环; 减摩抗磨; 激光表面织构; 表面涂层; 复合处理

中图分类号: TG174.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)12-0036-14

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.12.003

Research Status and Development Trend of Piston Ring Material and Surface Treatment Technology for Internal Combustion Engine

LIU Wei, TAN Zefei*, CHEN Wengang, DAI Yifan, YUAN Haoen,
CHENG Jiahao, WEI Beichao, ZHOU Yihao

(School of Machinery and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

ABSTRACT: The friction, wear, and lubrication of machinery and power systems are several major characteristics that attract the attention of scholars in the field of surface engineering. As one of the important mechanical components in the internal combustion engine, the friction loss of the piston ring accounts for 26% of the total friction loss of the internal combustion engine. Therefore, the selection of piston ring materials and their surface treatment research are of great significance for improving the performance and efficiency of internal combustion engines and extending their service life.

收稿日期: 2023-07-20; 修订日期: 2023-12-21

Received: 2023-07-20; Revised: 2023-12-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51865053); 云南省 Dongyang Li 院士工作站 (202305AF150019); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2022J0499)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51865053); Academician Dongyang Li Workstation in Yunnan Province (202305AF150019); Scientific Research Fund Project of Yunnan Education Department (2022J0499)

引文格式: 刘伟, 谭泽飞, 陈文刚, 等. 内燃机活塞环材料及表面处理技术研究现状与发展趋势[J]. 表面技术, 2024, 53(12): 36-49.

LIU Wei, TAN Zefei, CHEN Wengang, et al. Research Status and Development Trend of Piston Ring Material and Surface Treatment Technology for Internal Combustion Engine[J]. Surface Technology, 2024, 53(12): 36-49.

*通信作者 (Corresponding author)

The work aims to introduce and summarize the commonly used materials and their development trends for internal combustion engine piston rings. Currently, cast iron and steel are mainly used as production and manufacturing materials for piston rings. Due to the inherent characteristics of the materials, the research and development of new materials has always been an important topic. In addition, the focus is placed on the research status of laser surface texture technology, surface coating technology, and surface composite technology in the friction reduction and wear resistance of internal combustion engine piston rings. Among them, laser surface texture technology (LST) has good controllability and convenient processing, which can prepare micro shapes on the surface of piston rings that can accept wear debris and maintain the effect of oil film, thereby reducing surface friction and wear. At the same time, the application research progress of LST in piston ring cylinder liner is reviewed from two aspects: texture morphology characteristics and geometric parameter characteristics. As for the surface coating technology, the research on the surface strengthening treatment of piston rings represented by chromium plating, thermal spraying, vapor deposition and laser cladding is discussed. Among them, chromium plating treatment is the most common application, but the chromium plating layer is prone to fragmentation and detachment, posing great harm to human health and the environment. Secondly, thermal spraying technology represented by HVOF and APS is an important method for piston ring surface strengthening and repair. However, at present, thermal spraying coating still has defects such as pores, cracks, easy peeling, etc. In addition, the high energy consumption in the spraying process limits its popularization and application to a certain extent. Vapor deposition technology effectively improves the wear resistance of piston rings by coating them with a ceramic film, but the thickness of the film limits its load-bearing capacity. Laser cladding is a newly emerging surface engineering technology and its research and application in piston ring materials is discussed from two aspects: cladding system and process parameters. In addition, by reasonably combining a variety of surface treatment technologies, such as plasma electrolytic oxidation and electrophoretic deposition, ultrasonic rolling and ion nitriding, complementary advantages and synergistic effects can be achieved, thus effectively improving the friction performance of the contact surface, which opens up a new idea for the research on friction reduction and life extension of piston rings. Finally, some prospects are made for the development and application of piston ring materials in the future, as well as the research and development of friction reduction and wear resistance.

KEY WORDS: piston ring; anti friction and anti wear; laser surface texture; surface coating; composite treatment

内燃机因其热效率高、功率范围宽、适应性好、整体结构紧凑,而被广泛应用于社会生产和日常生活之中。作为内燃机中关键的零部件之一,活塞环的摩擦损耗高达内燃机总摩擦损失的 26%,其接触面的磨损失效将直接导致内燃机出现功率下降、油耗增加及排放超标等问题,换言之,活塞环的工作状况很大程度影响着内燃机的动力性、可靠性以及经济性等。随着人们环保意识的不断提高与节能政策的日益严格,对汽车发动机的使用寿命、排放和油耗提出了新的要求。

在内燃机工作时,活塞环具有控制活塞位置、引导活塞运动并对外传递热量、保证油膜均匀分布、防止缸内燃气泄漏等作用,但是其工作环境较为恶劣,这也对活塞环自身的摩擦学性能、力学性能、传热及密封性能提出了较高的要求。由于活塞环是易损零件,在检修活塞环时一般需要先将其从缸内取出,然后才能进行活塞环的修复或更换等,工作比较细致烦琐,通常也将检修或更换活塞环的时间作为内燃机检修工程中的第一次检修期限^[1]。内燃机中活塞环-缸套摩擦副的工作条件极为恶劣,在高温、高压和冲击载荷作用下使得摩擦副表面的润滑条件极差,巨大

的摩擦损耗导致发动机机械效率大幅下降,因此减少活塞环-缸套摩擦副之间的摩擦损耗,提高内燃机燃油经济性和工作可靠性是目前亟待解决的问题之一^[2]。

为了降低活塞环磨损,提高其服役寿命,从零件制造与维护的角度来看,目前主要有 2 种途径,一方面,研究开发能更好地适应活塞环工作环境的新耐材料;二是在现有活塞环材料的基础上,对活塞环工作表面进行表面强化处理,使其具备更优异的减摩耐磨性能。对于活塞环的摩擦磨损机理及其表面防护问题的研究,已成为当前提高内燃机效率、延长内燃机使用寿命的有效途径。本文对近年来活塞环材料及其表面处理的相关研究进行综述,以期后续从事活塞环表面强化研究的学者提供参考文献。

1 活塞环材料选用及其发展

作为发动机中重要的零部件之一,活塞环材料性能的优劣直接影响着内燃机的使用可靠性和燃油经济性,甚至对整机性能而言也极为重要。由于活塞环工作环境较为恶劣,为保证活塞环的性能要求和服役寿命,在其材料的选用上应根据使用要求、制造工艺

以及发动机的工况等因素综合考虑,一般要求活塞环材料具有较好的耐磨性、导热性、低热膨胀系数、弹性、抗刮伤性、耐蚀性、贮油性和热稳定性等。传统活塞环的制造材料通常选用球墨铸铁、合金铸铁、粉末冶金材料以及合金钢材等,其性能比较见表 1。

如今,我国的活塞环制造材料大多是以铸铁或钢材为主。凭借出色的导热性、力学性能以及便于成形的优势,以铸铁或钢材为材料制成的活塞环得到广泛应用,但在某些性能方面也存在着不足。由于铸铁材料自身含有具备良好储油及自润滑能力的石墨,可以有效改善表面磨损,因此以往的活塞环普遍采用球墨铸铁或灰口铸铁制造,尽管制造技术成熟、成本偏低且具备良好的耐磨和导热性能,但在力学性能方面,并不能较好地适应当前发动机高速化、高载化发展的技术要求。为此,研究人员通过在铸铁材料中添加诸如 Cu、Ni、Cr、Mo、Mn、Si 等合金元素,进而逐步开发出铬钼铸铁、钼铜铸铁、镍铬硅铸铁、高硅铁素体铸铁等满足各类性能要求的合金铸铁。而用作活塞环的钢材目前主要以碳素钢、高铬合金钢、不锈钢、低合金钢、锰钢等为主。相较于铸铁活塞环,以钢材

为代表的合金活塞环力学性能和热稳定性优异,但耐磨性、抗刮伤性能较差,通常需要对其进行表面强化处理才能使用^[3]。

近年来,随着材料科学与工艺的发展进步,一些新型材料(例如高性能陶瓷材料、复合材料)开始应用于活塞环的生产制造。研究人员发现,将聚乙醚酮(PEEK)或聚四氟乙烯(PTFE)等高分子聚合物与一些填充材料(例如青铜粉、玻璃纤维、石墨、二硫化钼等)按一定比例混合,经过烧结、加工后得到的塑料件可用于替代金属工件。PEEK 作为一种高性能热塑性聚合物,现已开始用于制造活塞环、座圈、垫片和其他机械密封部件^[4]。据报道 PEEK 活塞环在环槽 200 ℃左右的温度下,性能稳定,是油环的理想材料^[3]。此外,PTFE 活塞环韧性、导热性较好,具备良好的自润滑性能,且耐温性能优异,适用于中低压压缩机。由于活塞环新型材料的研发面临投入周期长以及成本高等困难,目前难以大范围推广应用。另一方面,材料本身的特性使得单一材料制造的活塞环不可避免地存在各类问题和不足。为了应对并解决这些问题,近年来对活塞环的应用研究主要集中在表面强化处理方面。

表 1 几种常见活塞环材料的性能比较
Tab.1 Performance comparison of several common piston ring materials

Material	Elastic modulus <i>E</i> /GPa	Bending strength σ_{bb} /MPa	Hardness	Characteristic
Grey cast iron	85-110	≥ 392	(97-102)HB	Low cost and easy casting
Nodular cast iron	150-170	900-1 300	(225-305)HB	High strength and plasticity
Vermicular Graphite cast iron	≥ 130	≥ 600	(230-300)HB	Good corrosion Resistance and thermal stability
Low-alloy steel	206-210	1 250	(47-53)HRC	High strength and good wear resistance
Martensite alloy steel	210	1 215	(40-44)HRC	High hardness and high temperature resistance

2 活塞环表面处理

随着内燃机对性能要求的不断提高,并且朝着高功率、高效率、低能耗、低排放、长寿命的方向持续发展,对活塞环的耐高温氧化性能、气密性能、耐蚀及耐磨性能等都有了更高的要求^[5]。为了保证活塞环在内燃机复杂多变工况下的工作可靠性,延长其使用寿命,减少维修、更换的频率及成本,对活塞环的表面强化处理研究成为极为重要的工作。目前研究人员对活塞环的表面处理主要从表面织构、表面涂层以及表面复合处理等 3 个有效途径进行探讨研究。

2.1 激光表面织构技术

表面织构已被大量研究证实是提高机械构件摩擦性能的一种有效方法。通过在工件接触表面制造一定形状大小、规则排列分布的微织构,有助于形成润滑油膜并提升油膜承载能力,达到改善运动副整体摩擦学性能的效果。随着表面织构技术的不断发展与应用,织构加工的手段也越来越多。目前,常用的表面

织构制备方法主要包括机械加工、激光加工、光刻加工、电化学加工、微细电解加工等。在众多的织构加工方式中,激光表面织构技术凭借可控性好、速度快、加工精密、对环境无污染等优势而备受青睐。作为新兴表面处理技术,近年来激光表面织构技术不断被应用于机械密封^[6]、推力轴承^[7]、切削刀具^[8]等,有效改善了运动副接触表面润滑状态,提升了材料表面耐磨性,因此引起了摩擦学领域广大学者的重视。

激光表面织构技术应用于活塞环-缸套摩擦副的研究始于 20 世纪末。Ryk 等^[9]研究了局部激光表面纹理(LST)对活塞环减摩效果的影响,试验发现相比常规桶形环,最佳局部 LST 活塞环的磨损降低了约 25%。随后 Ronen 等^[10]建立活塞环激光表面微织构理论分析模型,通过实验和对关键参数的分析,验证了半圆微孔织构在降低活塞环-缸套系统磨损方面的潜在应用,并提出面积占有率及最佳微坑深径比。Etsion 等^[11]通过实验测试了活塞环局部激光纹理化对内燃机燃油效率和废气成分的影响,测试结果显示,局部 LST 活塞环的燃油效率有一定提升,油耗下降了 4%,

但废气成分基本不变。Gao 等^[12]设计了不同深度的表面纹理,以提高活塞环-缸套的摩擦学性能。结果发现,与普通纹理相比,新型纹理在油膜厚度和摩擦力方面具备最佳整体性能,台架试验结果表明,摩擦损耗降低了 3%。Venkateswara 等^[13]研究了油润滑条件下活塞环凸起织构对活塞环-缸套运动副摩擦学性能的影响,通过对比试验,验证了织构化活塞环减摩耐磨性能大幅提升。目前,对活塞环-缸套摩擦副表面织构的研究,主要是围绕着织构形貌特征、几何参数特征等 2 个方面对摩擦学性能的影响。

2.1.1 形貌特征

为了优化活塞环-缸套运动副表面的摩擦学行为,采用激光加工技术设计并构造合理微观形貌的表面织构已成为内燃机摩擦学研究的一个重要方向^[14]。为此,研究人员在织构的形貌设计上进行了许多创新性尝试,在实际的设计研究过程中,考虑到成本低廉、加工方便等因素,表面织构形貌的常规设计主要有正方形凹坑、三角形凹坑、网格状凹痕、椭圆形凹坑、球形凸起或凹坑、V 形凹槽等几种。图 1 展示了几种常见的织构形状。

Pettersson 等^[16]研究了边界润滑条件下激光表面微织构对材料表面摩擦学性能的影响,结果发现微孔凹槽等微织构起到储油作用,流体动力润滑效果增强,摩擦学性能显著改善,从而延长了材料的使用寿命。麻凯等^[17]利用激光刻蚀技术在活塞环表面加工出圆形、椭圆和方形 3 种形状的织构,在同一转速、不

同载荷下对不同形状织构活塞环进行摩擦学试验,发现圆形凹坑织构的活塞环在降低摩擦因数、提高油膜润滑状态等方面效果最优。崔增霸^[18]设计了正方形、菱形、椭圆形以及圆形等 4 种不同造型的表面织构,发现在滑动面高速滑动时,圆形织构能产生更为明显的流体动压,其油膜承载能力最佳,减少了活塞环与缸套之间微凸体的接触面积,从而减轻了磨损。

现有的大多数研究通常聚焦于表面织构技术在某个摩擦副偶件的应用,作为内燃机中密不可分的一对摩擦副,为了避免配副磨损失效以及提高整体的表面摩擦性能,有学者关注到活塞环-缸套配副耦合织构作用机理(见图 2)研究。活塞环的往复运动将润滑油从表面纹理结构(如沟槽、凹坑)中刮出并挤压出来,使摩擦副界面形成足够厚的油膜,从而有助于实现二次润滑,此外,摩擦过程中产生的磨损颗粒被引入摩擦副表面微织构中,有效防止了对油膜的破坏^[19]。缪晨炜等^[20]分别在活塞环和缸套上制备了凹坑及沟槽织构,将织构试样与原始试样互相配对,摩擦试验结果显示,相较于无织构与单一织构表面,活塞环-缸套耦合织构具有最低的摩擦因数和磨损量,凹坑与沟槽织构均能有效捕捉并储存磨屑,防止接触表面持续遭受磨屑划伤。

2.1.2 几何参数特征

表面织构的几何参数特征主要包括直径、深度、长度、宽度、分布角度以及面积占有率等。研究者普遍认为,在表面织构的实际应用中,几何参数特征在很大程度上影响着机械构件的表面性能及其接触界

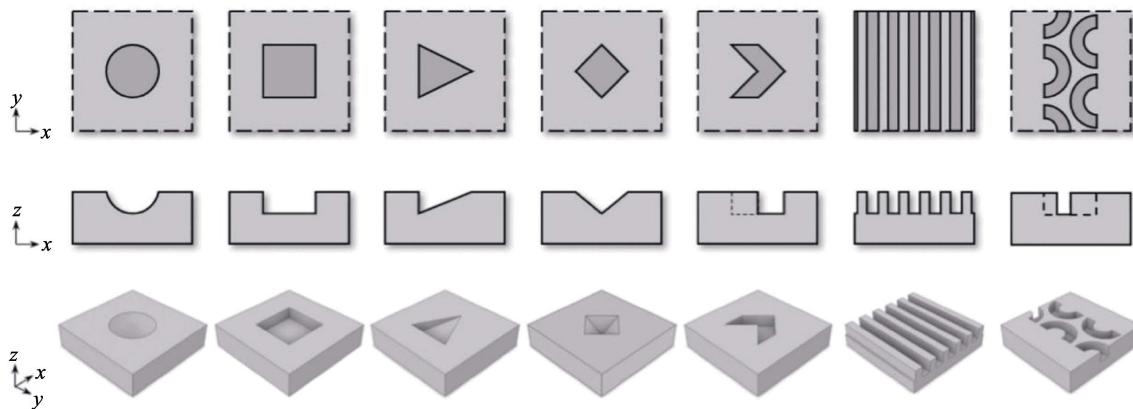


图 1 几种常见的织构形状^[15]
Fig.1 Several common texture shapes^[15]

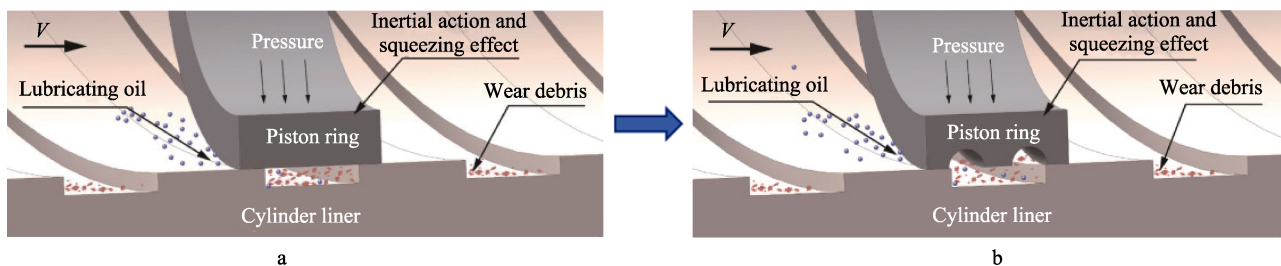


图 2 耦合机理示意图^[19]
Fig.2 Schematic diagram of coupling mechanism^[19]

面间的润滑状态。

符永宏等^[21]建立了具有规则凹腔结构的活塞环表面润滑理论模型,研究了微织构几何参数对润滑性能的影响规律。结果表明:活塞环表面织构化处理使摩擦副表面产生显著的流体动压效应,从而改善润滑状态,提升活塞环的耐磨性能。另外,还发现织构直径比对最小油膜厚度和无量纲平均摩擦力影响显著,存在的最佳深度为 2~7 μm 。赫冬等^[22]对 CKS 活塞环进行激光织构化处理并进行摩擦学试验,研究了织构几何形貌及排布方式对摩擦副减摩耐磨的影响,发现摩擦过程中织构的存在提升了油膜承载力,而油膜承载力受织构分布位置和几何参数的影响。Shen 等^[23]通过台架试验对不同参数的凹坑织构活塞环进行摩擦试验研究,结果发现,凹坑面密度和深度对摩擦性能的影响显著,当凹坑织构面密度为 25%,深度为 5 μm 时可以显著改善 CLPR 的摩擦学性能。Zhan^[24]研究了干摩擦条件下激光表面织构分布角在降低缸套-活塞环系统磨损方面的效果,结果表明,与机械珩磨相比,激光织构的磨损率较低,当凹口排列分布角 $\theta=60^\circ$ 时,磨粒收集能力最佳,摩擦磨损性能最佳。Ezhilmaran 等^[25]在活塞环试样表面制备了不同直径、面密度和直径比的凹坑织构,试验结果表明,当面密度为 16% 时摩擦因数最低,另外直径比对摩擦因数的影响随凹坑直径的增大而趋于稳定(见图 3)。许长坤等^[2]在活塞环表面通过激光加工不同织构密度的圆形凹坑,发现在一定载荷下,织构密度为 20.9% 时活塞环-缸套运动副的摩擦因数大幅下降,同时磨损体积减小,综合摩擦性能得到有效提升。

综上可知,表面织构技术能够有效改善摩擦副表面的减摩抗磨性能。由于织构几何形貌的多样性和分布位置的随机性,并且影响活塞环减摩抗磨性能的因素比较多,研究人员对摩擦学性能评价方法不同,尚未形成规范统一的标准,因此目前的研究工作受到一定限制。除此以外,对于常规形状的单种织构在特定

试验条件下的研究有较大局限性,可能因不同工况条件而使结果产生较大差别,难以形成一致的结论。因此,表面织构研究应综合考虑织构形貌和几何参数特征、润滑模式,以及耦合织构的协同作用,同时兼顾工况环境、油膜承载力等因素,以便更加全面地揭示活塞环表面织构处理的减摩抗磨机理,为实现织构合理应用提供丰富的理论基础和科学的设计准则。

2.2 表面涂层技术

作为一种重要的表面强化手段,涂层技术可以通过灵活选择材料,在工件表面制备性能优异的涂层,为优化活塞环-缸套摩擦副表面的摩擦学行为、延长工件服役寿命和提高内燃机燃油经济性提供了一种新思路。近年来,研究人员对活塞环减摩耐磨涂层的研究主要围绕以表面镀铬、热喷涂、气相沉积和表面熔覆为代表的工艺方法。表 2 展示了部分应用于活塞环表面的涂层。

2.2.1 表面镀铬技术

对活塞环进行镀铬处理是其表面强化处理应用较为常见的工艺方法之一,通过电镀方法在活塞环工件表面获得厚度均匀、结构致密的镀铬层,可以有效提升活塞环表面硬度以及耐磨性能,从而使其能够承受并适应内燃机内部高压、高温、高速环境下的冲击和磨损。有资料表明,与铸铁活塞环相比,镀铬活塞环服役寿命可延长 3~5 倍,同时对缸套的磨损量降低一半,此外镀铬层组织结构细小致密,耐腐蚀性能良好,镀层硬度可达 700~1 000HV^[35]。随着电镀工艺方法的发展与进步,镀铬涂层已由传统单一的硬铬层逐渐发展为形式和功能多样化的高性能涂层,例如松孔镀铬层、高效镀铬层、抗疲劳镀铬层、功能梯度镀铬层以及陶瓷增强镀铬复合涂层等,都在内燃机活塞环应用方面得到了一定成效^[36]。

然而,由于镀铬层自身脆性较大,容易出现碎裂脱落,而脱落的细小硬质颗粒会造成磨粒磨损,甚至

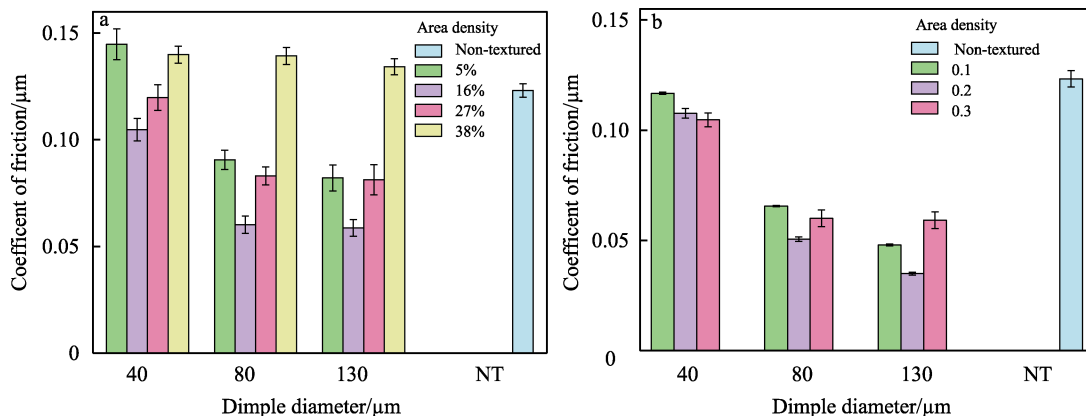


图 3 凹坑面密度对平均摩擦因数的影响(织构样品 $a=0.3$) (a) 以及凹坑直径比对平均摩擦因数的影响(织构样品 $A_d=16\%$)^[25] (b)

Fig.3 Effect of pit surface density on average friction coefficient (texture sample $a=0.3$) (a) and effect of pit depth-diameter ratio on average friction coefficient (texture sample $A_d=16\%$) (b)^[25]

表 2 部分应用于活塞环表面的涂层
Tab.2 Coating partially applied to the surface of piston rings

Author	Coating	Method	Substrates	Conclusion
Patel 等 ^[26]	Mo	APS	Cast-iron piston ring	Using Mo coated ring instead of cast iron ring, the wear and exhaust emission are reduced
Karamış 等 ^[27]	Al-Mo-Ni	APS	AISI 440C steel	The coating is suitable for piston rings of two-stroke engines
Ferreira 等 ^[28]	CrN	PVD	Gas nitrided stainless steel piston ring	The coating exhibits good wear resistance under severe tribological conditions
Rastegar ^[29]	Cr ₃ C ₂ -NiCr	HVOF	Ductile iron ring	HVOF coating has good crack resistance, and the wear amount is 3 to 6 times lower than that of chromium
Ficici ^[30]	Mo	HVOF	Piston ring	The main parameter affecting piston ring cylinder liner wear is load, and abrasive wear dominates
Davis 等 ^[31]	Cr ₂ AlC/Ni-Mo-Al	APS	Stainless steel piston ring	The composite coating has good adhesion, hardness, and wear resistance
Feng 等 ^[32]	Fe ₃ Al-Cr ₃ C ₂	Laser Cladding	Carbon structural steel	Composite coatings have superior tribological properties compared to cast iron
Lin 等 ^[33]	TiSiCN	PEMS (PVD)	AISI 304 stainless steel	This coating has good adhesion, mechanical properties, and anti friction effect
Karagöz 等 ^[34]	Graphene	CVD	Nodular cast iron piston ring	Graphene coated ring is slightly worn, but its shape is distorted when the temperature exceeds 800 °C

加剧缸套磨损。此外镀铬工艺能耗较高,镀铬工艺废液中的铬酸若不加以处理或控制,不仅会造成资源浪费、生产效率低,而且对人体和环境也会造成极大的危害,因此近年来,国内外活塞环的电镀铬处理工艺逐渐被淘汰。

2.2.2 热喷涂技术

热喷涂技术是指在某种热源作用下,将丝状或粉末状的喷涂材料加热至熔融状态,利用热源自身或外加气流使其雾化,以喷涂粒子束的状态,喷射到经过预处理的材料表面,从而获得性能优异表面涂层的加工工艺^[37]。热喷涂技术是金属材料表面强化处理的常用技术之一,其涂层适用范围广、经济性高、工艺方法多样,主要包括超音速火焰喷涂和等离子喷涂。

2.2.2.1 超音速火焰喷涂

超音速火焰喷涂技术(HVOF)具有加热时间短、焰流速度高,且制备的涂层拥有组织致密、硬度高、孔隙率低等诸多优点,在热喷涂工艺领域应用较为常见。该工艺方法不仅可以用于修复磨损工件,还可以用于生产制造高性能零件,特别适用于对涂层耐磨、耐蚀性能要求高的工况环境下。徐国等^[38]采用超音速火焰喷涂技术,将WC粉末喷涂在活塞环表面,结果发现,涂层各相分布均匀,孔隙率极小,平均显微硬度达到1 104HV300,极大地提升了活塞环的耐磨性和抗蚀性。Tyagi等^[39]利用HVOF技术在活塞环表面沉积制备了低摩擦碳涂层,结果发现涂层显微硬度提高了约11.5%,摩擦因数和磨损量大幅降低。Chourasia等^[40]开发了一种HVOF复合涂层以满足汽车行业对活塞环减摩环保涂层的需求,并研究了涂层的微观硬

度和抗滑动磨损性能。Meena等^[41]采用HVOF方法在活塞环常用钢基材上制备了Al₂O₃涂层,实验结果表明,在一定范围内,随着载荷的增加,Al₂O₃涂层的硬度、残余应力和摩擦因数都相应增大。有关报道显示,添加适量稀土氧化物可以有效改善HVOF涂层的微观结构和力学性能^[42-43]。Chauhan等^[44]在研究中发现,均匀分散的纳米CeO₂的添加对提升Cr₃C₂-NiCr热喷涂涂层的摩擦学性能是有利的,3类涂层磨损机理(图4)均为磨粒磨损,磨屑中的硬质颗粒引起表面疲劳,并不断擦伤破坏摩擦氧化层,从而导致磨损率偏高。然而微量CeO₂的添加相对提高了基体相的硬度、断裂韧性和内聚强度,减少了硬质碳化物颗粒,促进形成致密且稳定的氧化摩擦层。

2.2.2.2 等离子喷涂

等离子喷涂技术也叫作APS技术,是以非转移型等离子弧为热源,对粉末材料加热喷涂的工艺方法。相较于超音速火焰喷涂,等离子喷涂具有能量集中、控制方便、生产效率高、氧化物和杂质含量少等特点,并且适用范围广,各种陶瓷以及高熔点、耐热、耐磨材料均可采用等离子喷涂工艺。在活塞环热喷涂涂层的开发应用方面,Mo及Mo基复合涂层一直是APS涂层研究的主要热点。为提高活塞环-缸套运动副的耐磨性能,Patel等^[26]利用等离子喷涂技术在活塞环表面喷涂Mo涂层,并通过试验验证了活塞环涂层具备较好的减磨效果。Ankit等^[45]采用APS技术开发出Mo-C复合涂层,并应用于活塞环,发现随着试验温度上升,涂层平均摩擦因数逐渐降低,但磨损率增加。李辉等^[46]利用空气等离子喷涂法制备了活塞环

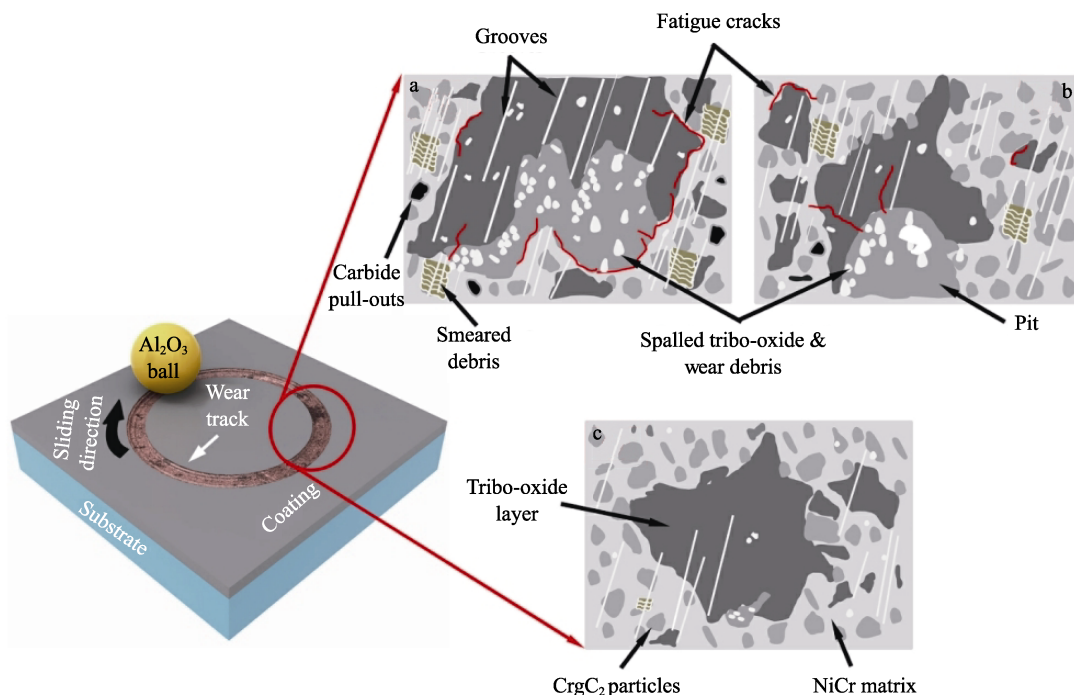


图 4 HVOF 喷涂 CP (a)、CMR (b) 和 CNR (c) 涂层的磨损机理示意图^[44]

Fig.4 Schematic diagram of wear mechanism of HVOF spraying CP (a), CMR (b) and CNR coatings (c)^[44]

Mo-(NiCr-Cr₃C₂)耐磨复合涂层,摩擦学试验结果表明:添加适量的 Mo 有利于降低涂层孔隙率,但过量则会导致涂层硬度下降。Mo 质量分数为 20%时,涂层具有最佳的力学及摩擦学性能,但 NiCr-Cr₃C₂ 含量高的涂层剥离现象较为严重。此外,以 Cr₂C₃、Cr₂O₃、Al₂O₃、Cr₂AlC 等陶瓷材料为代表的耐磨涂层也是研究热点之一。张楠楠等^[47]采用等离子喷涂方法在 304N 不锈钢表面分别制备了 NiCr/Cr₂C₃ 涂层、Ni/C 涂层及其复合涂层,磨损试验结果显示,复合涂层磨损程度最低,原因是该涂层保留了 CrC 硬质相的同时兼具良好自润滑性能的 Ni/C,可以有效防止涂层剥离与黏着磨损的产生。张珠让等^[48]利用超声速等离子喷涂法在活塞环用 45 钢表面制备了 Ni60A-Cr₂O₃ 复合涂层,分析了复合涂层的组织及性能,并优化了涂层的成分配比。Güney 等^[49]采用 APS 技术在石墨铸铁表面获得 Cr₂O₃-40%TiO₂ 复合涂层,结果发现,涂层硬度和耐磨性都比较高,但在微观条件下,涂层表现为多孔隙、微裂纹,并夹杂一定量氧化物等非均匀结构。

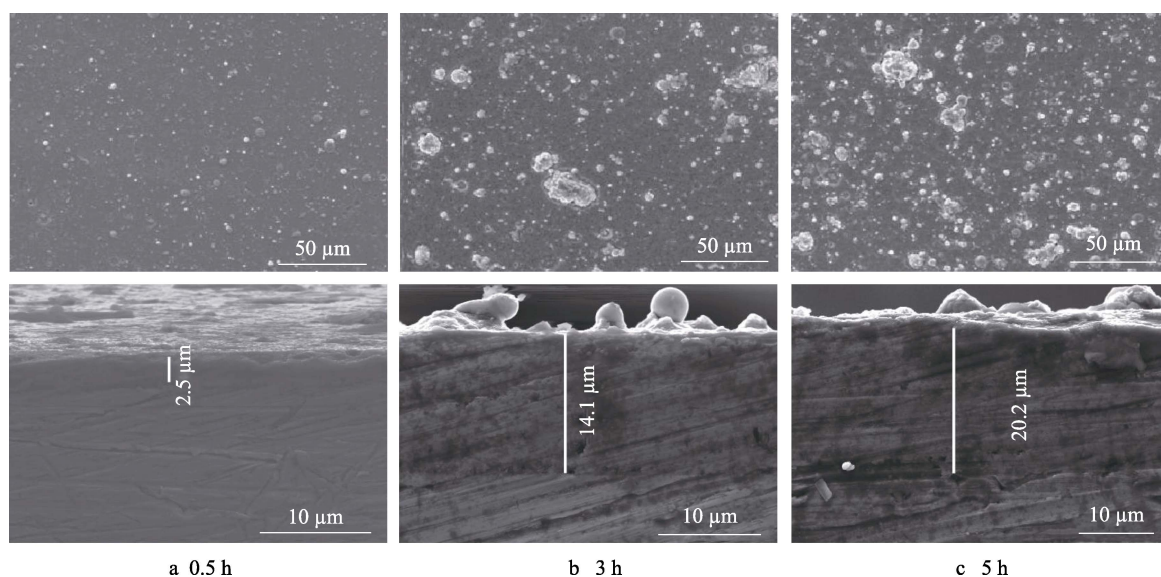
综上所述,以 HVOF 和 APS 为代表的 2 种热喷涂技术,均可以为活塞组件-缸套系统涂层的制备与应用提供行之有效的方案,但是目前热喷涂涂层仍存在诸如孔隙、裂纹、易剥落等问题,此外喷涂过程容易造成工件轻微热变形以及噪音等环境污染,在一定程度上限制其推广应用。针对以上问题,一方面,研究人员通过设计功能梯度涂层并合理调控结构参数,可有效抑制残余应力,提升涂基结合强度。另一方面,通过优化喷涂工艺参数(如喷涂距离、速度、温度等)以及改善作业环境(如真空、惰性保护气),从而避免粉末颗粒在喷涂过程中发生氧化。

2.2.3 气相沉积

气相沉积技术最早在 20 世纪 80 年代就在内燃机活塞环表面得到了应用,主要包括物理气相沉积和化学气相沉积。沉积制备的薄膜具有优异的耐磨性以及杂质少、硬度高、结构致密、结合强度高等诸多优势。

2.2.3.1 物理气相沉积 PVD

以 CrN、TiN、SiN、BN 为代表的 PVD 陶瓷薄膜已逐渐开发应用于活塞组件-缸套的减摩耐磨研究。目前,应用于活塞环表面的 PVD 涂层主要包括 TiN 薄膜和 CrN 薄膜。与氮化处理相比,活塞环 TiN 涂层耐磨性是其 6 倍以上,耐熔着磨损性也达到 2 倍,抗拉缸性能显著提升^[50]。但是 TiN 涂层厚度偏薄,通常小于 10 μm,承载能力有限。相比 TiN 涂层,CrN 涂层虽在硬度和摩擦因数方面有所欠缺,但其抗氧化性和耐腐蚀性更好、涂层较厚且韧性更高。研究表明,CrN 涂层抗高温黏着磨损性能良好,且具备较好的摩擦匹配性能,适用于活塞环服役的高温磨损环境^[51]。赵晚成等^[52]利用 PVD 方法在不锈钢渗氮活塞环表面制备了 CrN 涂层,试验结果表明,CrN 涂层活塞环摩擦因数较低且稳定保持,同时活塞环及缸套的磨损量也大幅降低。田灿鑫等^[53]在高速钢表面制备了 CrN 涂层(图 5),从图 5 可以看出,涂层表面颗粒数量和尺寸随沉积厚度增大而增大,膜基界面无明显分界,表明附着力良好。另外发现,相较镀铬活塞环,CrN 涂层磨损较轻,附着力良好并无脱落,服役寿命更长。Rozario 等^[54]利用 SRV 仪器对比评价了 3 种活塞环涂层对 PCC 组件摩擦磨损的影响,结果发现,PVD CrN-TiN 活塞环涂层平均摩擦因数最低,磨损量

图 5 CrN 涂层的表面形貌和截面形貌^[53]Fig.5 Surface morphology and cross-sectional morphology of CrN coating^[53]

最小。谢纬安等^[55]研究发现, 相比未经处理的试样, 镀铬与 PVD 处理均能有效减小活塞环配对副摩擦因数; 总体而言, PVD 活塞环与缸套配合表现最佳, 摩擦因数的变化稳定且磨损量最小。

2.2.3.2 化学气相沉积 CVD

化学气相沉积 (CVD) 技术具有成膜速度快、绕镀性能好、涂层纯度和密度易于控制、膜基结合力强等诸多优点, 现已广泛应用于耐磨、防腐抗蚀、抗氧化等功能涂层的制备生产。李明磊等^[56]利用 CVD 方法在活塞环表面制备了 MoS_2 涂层及改性的 MoS_2/Y 复合润滑涂层, 研究了沉积温度对涂层性能的影响, 评价了复合涂层在不同摩擦环境、载荷下的摩擦学性能。Karagöz 等^[34]采用 CVD 工艺在球墨铸铁活塞环上沉积石墨烯涂层, 研究了边界润滑条件下活塞环涂层的摩擦学性能, 结果发现, 与原始试样相比, 石墨烯涂层显著降低了表面磨损, 但温度超过 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时涂层环形状发生扭曲。在 CVD 工艺得到成功实践后, 又衍生出 PCVD、PECVD、PACVD 等新型镀膜技术。邢世凯等^[57]采用 PCVD 技术对活塞环表面进行强化处理, 磨损试验结果表明, PCVD 活塞环硬度较高, 与涂层的结合良好, 减摩抗磨能力出色, 其表面形成了具有自润滑特性的六方晶体结构 BN, 降低了摩擦因数。此外, 涂层表面存在的微孔隙有利于改善活塞环的润滑状态, 进而降低摩擦副的磨损。

综上所述, 气相沉积方法凭借优异的减摩耐磨性能为应用于活塞环的表面改性提供了新的思路。但沉积制备得到的薄膜厚度普遍偏薄, 一般在几十微米以下, 承载能力较差, 容易出现局部剥落, 并不能较好地满足高速、高载工况下内燃机的性能指标。除此以外, 由于工艺复杂、处理条件苛刻、生产效率低且成

本高昂等诸多原因, 很大程度上限制了沉积镀膜活塞环的推广应用。

2.2.4 激光熔覆

激光熔覆技术是一种涉及材料、物理和冶金等多学科领域的新型表面改性技术, 它通过高能密度激光束将熔覆材料与基材表面薄层一起熔凝, 最后形成一种与基材表面冶金结合的致密涂层。与热喷涂、气相沉积、电镀等其他表面涂层技术相比, 激光熔覆技术具有加热速度快, 对基材的热影响区域小, 涂层晶粒细小、组织致密, 涂层与基体结合强度高, 稀释率低, 材料选择性广, 无环境污染等诸多优势^[58-59]。

张庆茂等^[60]在球墨铸铁活塞环表面激光熔覆制备了 FeCSiB-Zr-Ti 复合涂层, 通过 SRV 磨损试验发现, 相比镀铬环, 熔覆层活塞环耐磨性较好, 并且摩擦副整体磨损大幅减小。为了解决活塞环易磨损失效的问题, 姜盛鑫^[61]利用激光熔覆工艺在 H13 钢基材表面制备了镍基 Cr_3C_2 涂层, 研究了工艺参数及 Cr_3C_2 含量对涂层组织与性能的影响, 提出了适用于提升汽车活塞环表面性能的涂层。目前, 国内外对激光熔覆应用于活塞环方面的研究还比较少, 大多围绕涂层材料体系设计及熔覆工艺参数 2 个方面展开探讨。Li 等^[62]在 H13 钢表面激光熔覆制备了不同 Cr-Ni 质量比的 Cr-Ni 涂层, 并评价了 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 下各组涂层的摩擦学性能, 结果发现, 涂层孔隙率和耐磨性均随 Cr 含量增加而增大, 其中 20%Cr-80%Ni (质量分数) 涂层的平均摩擦因数最低, 耐磨损性能表现最佳。为了解决熔覆过程中涂层与基材热性能不匹配的问题, 抑制裂纹等缺陷的形成, 路世盛等^[63]在球墨铸铁表面制备 Co 基涂层的过程中添加 Ni 基合金作为中间过渡层。随着固液界面的不断推进, 基材与涂层之间的热传导

作用逐渐减弱,使熔池各部位凝固速率不同,进而造成涂层各区域组织生长差异(图6)。试验结果发现,与基材相比,Co基涂层硬度是其2.1倍,且表现出更好的高温耐磨耐蚀性能,另外引入Ni基过渡层抑制

了C元素的扩散,并有效缓解了结合界面处的白口化趋势。由此可见,通过调控熔覆材料比例、引入过渡层等方式可提高涂层硬度与耐磨性,优化涂层应力状态,也有利于促进熔覆涂层的制备及发展。

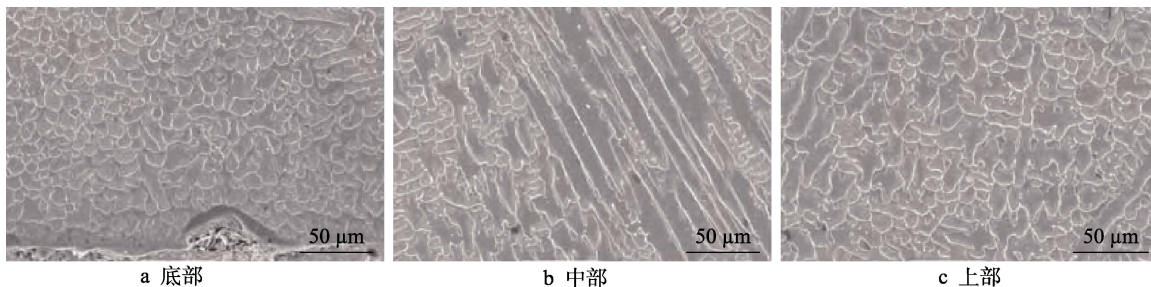


图6 Ni基过渡层不同区域截面形貌^[63]

Fig.6 Cross-sectional morphology of different regions of Ni-based transition layer: a) bottom; b) middle; c) upper region^[63]

此外,激光熔覆工艺参数在很大程度上决定了熔覆涂层的微观结构、组织形态等,进而影响涂层的成形质量及其综合性能。其中工艺参数包括激光扫描速度、送粉速率、气体流量、激光功率、搭接率等。韩立影等^[64]在316L不锈钢表面制备了镍基WC涂层,发现随着激光功率的增加,涂层微观组织逐渐细化,但功率过大则会导致组织粗大并伴随烧蚀现象。Lian等^[65]研究了激光熔覆加工参数(激光功率、扫描速度、气体流量)对镍基TiC复合涂层摩擦学性能的影响。研究表明,采用最佳工艺参数可使基材表面耐磨性提高约6.17倍,磨损量减少约83.8%。Fernández等^[66]利用激光熔覆技术在灰铸铁表面制备NiCrBSi涂层,研究发现,采用最佳熔覆参数可使涂层与基材完美结合,几乎没有孔隙,平均硬度达900HV300,但涂层裂纹无法完全消除。由此可见,工艺参数的变化调整对熔覆涂层的几何形貌、微观结构及力学性能有很大影响。当工艺参数变量或考察指标较多时,可以考虑利用正交试验设计方法进行涂层优化研究。

综上可知,利用激光熔覆技术可在基材表面制备涂层,从而进一步提高活塞环的耐磨、润滑、密封等性能,延长工件的使用寿命,达到降低材质和更换成本的要求,具有广泛的应用前景。但是,目前熔覆涂层还存在不少问题,例如涂层残余内应力,涂层表面的裂纹和孔隙等缺陷。为了弥补这类涂层的缺陷,基于激光熔覆技术的UVALC技术(图7)近年来得到了快速发展,将超声振动引入激光熔覆过程中,可有效抑制熔覆层缺陷,其作用机理是在声流效应和超声空化效应的综合影响下,气液界面发生改变,促使熔池中的未溶解气体溢出,避免产生孔隙;同时声流效应将促进整个熔池更均匀地流动,减小因温度梯度过大而导致的残余应力,从而避免出现裂纹。但目前还没有建立起熔覆参数与超声振动参数之间的耦合关系,如何调控超声参数,提升熔覆层表面质量的稳定性仍是研究学者今后研究的重点。

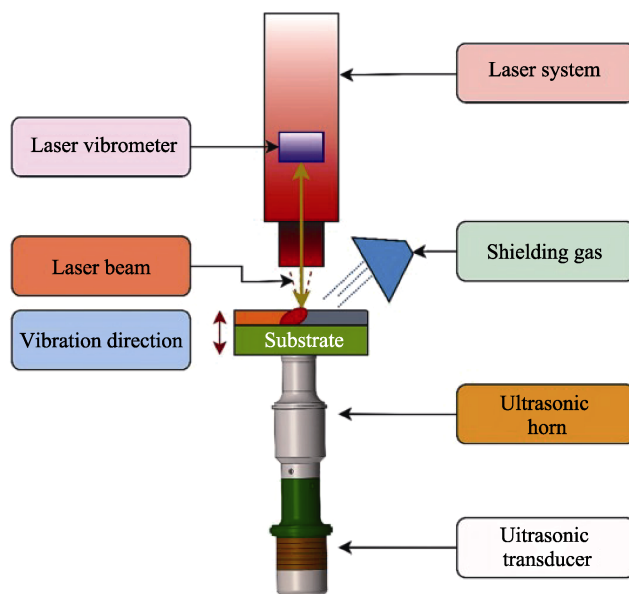


图7 超声波振动辅助激光熔覆装置示意图^[67]

Fig.7 Schematic diagram of ultrasonic vibration-assisted laser cladding device^[67]

2.3 表面复合处理

活塞环复杂的工况环境要求其表面应具有较低的摩擦因数、较高的硬度和耐磨性,以及耐高温、防腐蚀性能好等特点,仅依靠单一表面处理技术很难兼顾其所需的多项性能指标。在此情形下,表面复合处理技术应运而生,它可以通过合理地结合多种表面强化手段,发挥出各自的技术优势,达到“1+1>2”的协同效应。例如,将表面织构与表面涂层复合应用是目前较为常见的表面复合技术。由于表面织构捕获磨屑的同时存储并释放涂层内部的固体润滑颗粒,摩擦表面在此复合润滑结构的协同作用下表现出优异的减摩耐磨性能^[68]。表面复合处理技术为活塞环-缸套摩擦副的减摩增寿开拓了新的研究思路。

研究发现,与仅应用一种表面处理的活塞环相

比, 纹理化+涂层组合不仅减少了 50% 的磨合时间, 还降低了 12.5% 的摩擦损耗, 另外缸套和活塞组件之间的总摩擦在宽速度范围内减少了 11%~15%^[69]。另一方面, 利用润滑剂预填充微织构目前成为一个比较热门的研究方向。Wang 等^[70]发现相较于光滑表面, 织构表面产生的磨屑平均尺寸要小很多(图 8), 较小的颗粒更容易捕获和储存。基材与 PTFE 的磨损形式为黏着磨损, 受剪切效应作用, PTFE 迁移至基材表面则会加剧磨损。因此, 合理利用凹坑织构可以更高效地填充磨屑和润滑介质。朱凯等^[71]采用超声滚压(USRP)技术和离子渗氮技术对 316L 不锈钢活塞环进行了复合强化处理。结果发现, 相比直接渗氮环, USRP-渗氮环表面改性层结构更致密, 孔隙更少, 硬度和耐磨性均有效提高。孙灼等^[72]将多弧离子镀与磁控溅射 2 种工艺复合, 在铸铁活塞环表面制备了 Ti-TiN 多层膜, 结果证实, 相比镀铬环和磷化环, 多层复合膜活塞环的磨损量显著降低。Ma 等^[73]结合微弧氧化与电泳沉积技术, 在活塞环基体上制备了 MoS₂ 增强 Al₂O₃ 新型陶瓷基复合涂层。万轶等^[74]将织构处理与电脉冲沉积法相结合, 在活塞环表面制备

了 Ni-MoS₂ 复合涂层, 通过摩擦试验评价了织构与涂层协同作用下的减摩抗磨性能, 结果发现, 在干摩擦条件下, 活塞环表面织构可以有效存储摩擦副之间的固体润滑剂和磨屑, 使接触表面形成连续润滑膜, 从而减少磨粒磨损。Wang 等^[75]采用磁控溅射和低温离子渗硫复合技术在活塞环表面沉积了 CrMoN/MoS₂ 多层膜, 结果发现, 沉积多层膜结构致密, 显微硬度值高达 26.7 GPa, 具备优异的抗塑性变形能力。在此基础上, Di 等^[76]采用同样的复合技术制备了 CrMoN/MoS₂ 涂层, 发现复合涂层表面晶粒结构致密, 并具有优异的高温耐磨性。孙韶^[77]以活塞环为研究对象, 结合表面镀铬与激光织构技术, 通过试验确定了合理的加工顺序及参数, 为活塞环应用复合表面加工技术的可行性提供了参考。以上研究表明, 通过结合 2 种或多种表面工程技术可以有效改善摩擦副的摩擦学性能, 达到更理想的减摩抗磨效果。然而, 目前国内外应用于活塞环的表面复合技术鲜有报道, 工艺成本及空间狭小等问题严重限制了其在活塞环方面的推广应用, 合理且高效的新型表面复合方法仍有待发掘和进一步发展。

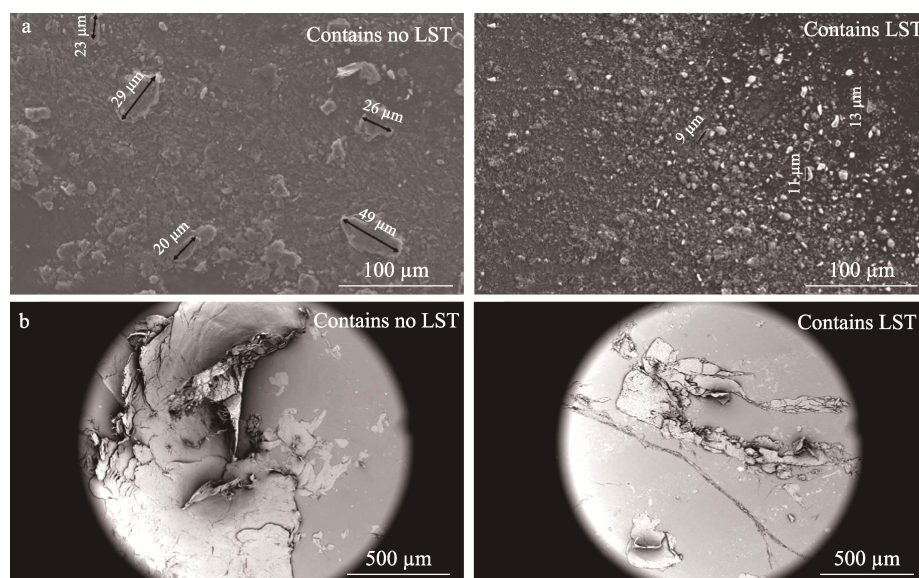


图 8 石墨磨屑 (a) 和 PTFE 磨屑 (b)^[70]
Fig. 8 Graphite abrasive (a) and PTFE debris (b)^[70]

3 结论与展望

如今, 内燃机工业正处于日益严格的排放标准和日益激烈的国际竞争的大背景下, 提升燃油经济性、减少能量损耗与环境污染将是内燃机长远发展的主要方向。作为内燃机关键零部件, 活塞环的材料选用及其表面处理和润滑环境对内燃机整机的可靠性、经济性有着不可忽视的影响。对发动机活塞环材料以及其减摩抗磨研究作以下几点展望:

1) 在新材料研究方面, 目前来看, 内燃机趋向

于高功率、低损耗、轻量化的方向发展, 因此对于活塞环新型材料, 可考虑高温陶瓷材料、高强度轻质合金、自润滑复合材料等的研发应用, 以此满足发动机日益严苛的工况。同时, 还应兼顾结构组合的优化设计和实际生产的工艺成本等因素。

2) 在活塞环表面处理研究方面, 激光表面织构技术可谓大放异彩, 但现有的大多数研究主要是单独对某个摩擦配偶件织构化处理, 对于整个摩擦副系统耦合织构及配副性的研究鲜有报道。此外, 表面织构的摩擦性能研究结果受试件材料、工况环境、润滑状

态等多方面的影响,有必要针对试验条件和评价方法制定规范统一的标准,对已有研究资料中的数据参数进行科学分类。表面涂层技术可以通过灵活选择材料,在活塞环表面制备性能优异的涂层,具备一定实用性优势,但涂层存在的诸如孔隙、裂纹、界面结合强度等问题仍需进一步研究优化。因此,目前亟待开发新技术、新工艺,以实现涂层组织结构缺陷的有效调控、结合强度的大幅提升、性能优异涂层的高效制备,进而拓宽涂层技术的应用领域。另外,采用不同制备工艺、不同材料都将导致涂层的摩擦学性能存在差异,需要建立和完善涂层性能评价标准。表面复合技术将多种工艺科学合理结合,相得益彰,可以充分发挥出各自的优点,是当前活塞环表面改性减摩的研究热点。然而,在制定复合技术前,必须对每一种工艺的原理和特征有较为全面的认识,避免产生不良影响。

参考文献:

- [1] 王所潇. 具有自润滑涂层的内燃机活塞环磨损机理研究及仿真分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
WANG S X. Wear Mechanism Research and Simulation Analysis of Internal Combustion Engine Piston Ring with Self-Lubricating Coating[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.
- [2] 许长坤, 郭智威, 缪晨炜, 等. 活塞环表面织构密度对缸套-活塞环摩擦性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(10): 1489-1496.
XU C K, GUO Z W, MIAO C W, et al. Effect of Texture Density in Surface of Piston Ring on Tribological Performance of Cylinder Liner-Piston Ring[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(10): 1489-1496.
- [3] 龚曦, 何云信, 彭程. 活塞环结构和材料的现状与发展方向[J]. 装备制造技术, 2012(1): 115-117.
GONG X, HE Y X, PENG C. Status and Development Direction of Piston Rings' Materials and Structures[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(1): 115-117.
- [4] SMALL G. Outstanding Physical Properties Make PEEK Ideal for Sealing Applications[J]. Sealing Technology, 2014, 2014(4): 9-12.
- [5] 唐令, 何鹏飞, 马国政, 等. 缸套-活塞环摩擦副表面性能强化研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 185-198.
TANG L, HE P F, MA G Z, et al. Research Progress in Surface Performance Reinforcement of Cylinder Liner and Piston Ring Friction Pair[J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 185-198.
- [6] ETSION I, HALPERIN G. A Laser Surface Textured Hydrostatic Mechanical Seal[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(3): 430-434.
- [7] ETSION I, HALPERIN G, BRIZMER V, et al. Experimental Investigation of Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearings[J]. Tribology Letters, 2004, 17(2): 295-300.
- [8] 郝秀清, 宋晓路, 李亮. 表面织构化刀具的研究现状与进展[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 170-181.
HAO X Q, SONG X L, LI L. Development and Perspective of Surface Texturing Tools[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 170-181.
- [9] RYK G, ETSION I. Testing Piston Rings with Partial Laser Surface Texturing for Friction Reduction[J]. Wear, 2006, 261(7/8): 792-796.
- [10] RONEN A, ETSION I, KLIGERMAN Y. Friction-Reducing Surface-Texturing in Reciprocating Automotive Components[J]. Tribology Transactions, 2001, 44(3): 359-366.
- [11] ETSION I, SHER E. Improving Fuel Efficiency with Laser Surface Textured Piston Rings[J]. Tribology International, 2009, 42(4): 542-547.
- [12] GAO D S, JIA H K, SUN S, et al. Research on the Profile Design of Surface Texture in Piston Ring of Internal Combustion Engine[J]. Journal of Tribology, 2018, 140(6): 061701.
- [13] VENKATESWARA BABU P, SYED I, BEN BEERA S. Influence of Positive Texturing on Friction and Wear Properties of Piston Ring-Cylinder Liner Tribo Pair under Lubricated Conditions[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2019, 71(4): 515-524.
- [14] 吕延军, 罗宏博, 张永芳, 等. 内燃机活塞组件-缸套系统表面技术研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(1): 24-41.
LYU Y J, LUO H B, ZHANG Y F, et al. Research Progress of Surface Technology in Piston Assembly-Cylinder Liner System of Internal Combustion Engines[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 24-41.
- [15] LU P, WOOD R J K. Tribological Performance of Surface Texturing in Mechanical Applications: A Review[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2020, 8(4): 043001.
- [16] PETTERSSON U, JACOBSON S. Influence of Surface Texture on Boundary Lubricated Sliding Contacts[J]. Tribology International, 2003, 36(11): 857-864.
- [17] 麻凯, 郭智威, 缪晨炜, 等. 活塞环表面织构对缸套-活塞环摩擦学性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(7): 1109-1117.
MA K, GUO Z W, MIAO C W, et al. Influence of Surface Textured Piston Ring on Tribological Performance of Cylinder Liner-Piston Ring[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(7): 1109-1117.

- 1109-1117.
- [18] 崔增霸. 表面织构对活塞环-缸套系统摩擦性能的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- CUI Z B. Effect of Surface Texture on Friction Performance of Piston Ring-Cylinder Liner System[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [19] RAO X, SHENG C X, GUO Z W, et al. Effects of Textured Cylinder Liner Piston Ring on Performances of Diesel Engine under Hot Engine Tests[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 146: 111193.
- [20] 缪晨炜, 郭智威, 袁成清, 等. 缸套-活塞环织构化耦合机理及减摩性能研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(3): 124-133.
- MIAO C W, GUO Z W, YUAN C Q, et al. Coupling Mechanism and Friction Reduction Performance of Textured Cylinder Liner-Piston Ring[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(3): 124-133.
- [21] 符永宏, 张华伟, 纪敬虎, 等. 微造型活塞环表面的润滑性能数值分析[J]. *内燃机学报*, 2009, 27(2): 180-185.
- FU Y H, ZHANG H W, JI J H, et al. Numerical Analysis on the Lubrication Performance of Piston Ring by Surface Micro-Texturing[J]. *Transactions of CSICE*, 2009, 27(2): 180-185.
- [22] 赫冬, 韩晓光, 陈广聪, 等. CKS 活塞环表面微织构几何形貌及排布方式对摩擦学性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2021, 34(2): 59-69.
- HE D, HAN X G, CHEN G C, et al. Effect of Geometrical Morphology and Arrangement of Micro-Texture on Friction Property of CKS Piston Ring[J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(2): 59-69.
- [23] SHEN C, KHONSARI M M. The Effect of Laser Machined Pockets on the Lubrication of Piston Ring Prototypes[J]. *Tribology International*, 2016, 101: 273-283.
- [24] ZHAN J, YANG M J. Investigation on Dimples Distribution Angle in Laser Texturing of Cylinder-Piston Ring System[J]. *Tribology Transactions*, 2012, 55(5): 693-697.
- [25] EZHILMARAN V, VASA N J, VIJAYARAGHAVAN L. Investigation on Generation of Laser Assisted Dimples on Piston Ring Surface and Influence of Dimple Parameters on Friction[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 335: 314-326.
- [26] PATEL P D, PATEL R N, PATEL H C, et al. Experimental Investigation on Life Cycle Analysis of the Moly (Mo) Coated Piston Ring in C. I. Engine[C]//PATEL H, DEHERI G, PATEL H, et al. *Proceedings of International Conference on Advances in Tribology and Engineering Systems*. New Delhi: Springer, 2014: 321-329.
- [27] KARAMİŞ M B, YİLDİZLİ K, ÇAKIRER H. An Evaluation of Surface Properties and Frictional Forces Generated from Al-Mo-Ni Coating on Piston Ring[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 230(1/2/3/4): 191-200.
- [28] FERREIRA R, CARVALHO Ó, SOBRAL L, et al. Influence of Morphology and Microstructure on the Tribological Behavior of Arc Deposited CrN Coatings for the Automotive Industry[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 397: 126047.
- [29] RASTEGAR F, RICHARDSON D E. Alternative to Chrome: HVOF Cermets Coatings for High Horse Power Diesel Engines[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1997, 90(1/2): 156-163.
- [30] FICICI F, KURGUN S. Analysis of Weight Loss in Reciprocating Wear Test of Cylinder Liner and Piston Ring Coated with Molybdenum[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(8): 7801-7813.
- [31] DAVIS D, SRIVASTAVA M, MALATHI M, et al. Effect of Cr₂AlC MAX Phase Addition on Strengthening of Ni-Mo-Al Alloy Coating on Piston Ring: Tribological and Twist-Fatigue Life Assessment[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 449: 295-303.
- [32] FENG Y K, SHAN J G, ZHAO L, et al. Effect of Cr₃C₂ Content on the Microstructure and Wear Resistance of Fe₃Al/Cr₃C₂ Composites[J]. *Coatings*, 2022, 12(12): 1980.
- [33] LIN J L, WEI R H, BITSIS D C, et al. Development and Evaluation of Low Friction TiSiCN Nanocomposite Coatings for Piston Ring Applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 298: 121-131.
- [34] ACUNAŞ KARAGÖZ Z B, DEMİRTAŞ S, KALELİ H, et al. Review of Tribological Behavior of Graphene Coatings on Piston Rings in Engines[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2019, 72(2): 243-254.
- [35] 汤春峰, 曲选辉, 段柏华. 内燃机活塞环材料及其表面处理[J]. *内燃机配件*, 2006(5): 3-6.
- TANG C F, QU X H, DUAN B H. Materials and Surface Treatments of Piston Ring for Internal Combustion Engine[J]. *Internal Combustion Engine Parts*, 2006(5): 3-6.
- [36] 谭勇敢, 张新国, 肖静岚. 内燃机车柴油机活塞环镀铬涂层发展综述[J]. *机车车辆工艺*, 2016(1): 12-14.
- TAN Y G, ZHANG X G, XIAO J L. Review on Development of Chromium Plating for Diesel Engine Piston Ring of Diesel Locomotive[J]. *Locomotive & Rolling Stock Technology*, 2016(1): 12-14.
- [37] 张玉坤. 热喷涂技术在汽车零部件中的应用及其工艺[J]. *汽车实用技术*, 2022, 47(9): 129-132.
- ZHANG Y K. Applications of Thermal Spray Technology to Automobile Parts and Its Processing Method[J]. *Automobile Applied Technology*, 2022, 47(9): 129-132.
- [38] 徐国, 郑卫刚. 超音速火焰喷涂在活塞环表面改性中的应用探究[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(14): 167-168.
- XU G, ZHENG W G. Research on Application of HVOF

- in Surface Modification of Piston Ring[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(14): 167-168.
- [39] TYAGI A, CHOURASIA S, MURTAZA Q, et al. Evaluation of Tribological, Oxidation and Corrosion Behavior of HVOF Sprayed Sustainable Temperature-dependent Carbon Coating[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2021, 9(4): 045024.
- [40] CHOURASIA S, KUMAR MISHRA M, SHAHID M, et al. Evaluation of Sliding Wear, Oxidation, and Corrosion Behaviour Sustainable Hybrid Composite Coating[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 1490-1494.
- [41] MEENA S L, TYAGI A, MURTAZA Q, et al. Effect of Load on the Wear Behaviour of Al_2O_3 HVOF Sprayed Coating[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1950(1): 012011.
- [42] ZHANG Z Y, LU X C, LUO J B. Tribological Properties of Rare Earth Oxide Added Cr_3C_2 -NiCr Coatings[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(9): 4377-4385.
- [43] SHARMA S. Wear Study of Ni-WC Composite Coating Modified with CeO_2 [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(9): 889-900.
- [44] CHAUHAN H R, SALADI S, VARIYA S, et al. Role of Micro- and Nano- CeO_2 Reinforcements on Characteristics and Tribological Performance of HVOF Sprayed Cr_3C_2 -NiCr Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 467: 129684.
- [45] ANKIT T, PANDEY S M, QASIM M, et al. Effect of Temperature on Mo-C Blend Composite Coating for Piston Ring Applications[J]. Advanced Science, Engineering and Medicine, 2020, 12(8): 1077-1079.
- [46] 李辉, 孙日超, 杨海鑫, 等. 活塞环用 Mo-(NiCr- Cr_3C_2) 复合涂层的优化研究[J]. 材料工程, 2013, 41(12): 37-43.
- LI H, SUN R C, YANG H X, et al. Optimization of Mo-(NiCr- Cr_3C_2) Composite Coating for Piston Ring Application[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 41(12): 37-43.
- [47] 张楠楠, 曹文慧, 林丹阳, 等. 等离子喷涂 NiCr/ Cr_2C_3 、Ni/C 及其复合涂层的耐磨性能[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(1): 36-41.
- ZHANG N N, CAO W H, LIN D Y, et al. Wear Resistance of NiCr/ Cr_2C_3 , Ni/C and Composite Coatings Prepared with Plasma Spraying[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(1): 36-41.
- [48] 张珠让, 王乐让, 刘达娇, 等. 汽车活塞环表面 Ni60A- Cr_2O_3 复合涂层的制备与性能[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(2): 33-38.
- ZHANG Z R, WANG L R, LIU D J, et al. Preparation and Properties of Ni60A- Cr_2O_3 Composite Coating on Surface of Automobile Piston Ring[J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(2): 33-38.
- [49] GÜNEY B, MUTLU İ. Wear and Corrosion Resistance of Cr_2O_3 -40% TiO_2 Coating on Gray Cast-Iron by Plasma Spray Technique[J]. Materials Research Express, 2019, 6(9): 096577.
- [50] 邱复兴, 高阳. 活塞环的 PVP、CVD 表面处理[J]. 内燃机配件, 2003(2): 3-6.
- QIU F X, GAO Y. PVD, CVD Surface Treatment for Piston Ring[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2003(2): 3-6.
- [51] 蔡志海, 张平, 赵军军, 等. CrN 活塞环涂层的工艺制备与摩擦学性能研究[J]. 核技术, 2009, 32(6): 435-438.
- CAI Z H, ZHANG P, ZHAO J J, et al. Investigation of Preparation Technique and Tribological Properties of CrN Piston Rings Coatings[J]. Nuclear Techniques, 2009, 32(6): 435-438.
- [52] 赵晚成, 马亚军, 李生华, 等. CrN 活塞环涂层的摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2005, 30(2): 59-62, 66.
- ZHAO W C, MA Y J, LI S H, et al. Tribological Performance of Chromium Nitrided Piston Ring Coating[J]. Lubrication Engineering, 2005, 30(2): 59-62, 66.
- [53] 田灿鑫, 刘怡飞, 李助军, 等. 离子源增强电弧离子镀活塞环表面 CrN 涂层的制备[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 19-26.
- TIAN C X, LIU Y F, LI Z J, et al. Deposition of CrN Coatings on Piston Rings Using Cathodic Arc Plating with Ion Source[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 19-26.
- [54] ROZARIO A, BAUMANN C, SHAH R. The Influence of a Piston Ring Coating on the Wear and Friction Generated during Linear Oscillation[J]. Lubricants, 2019, 7(1): 8.
- [55] 谢纬安, 瞿磊, 王忠, 等. 表面处理对活塞环摩擦磨损性能影响的试验研究[J]. 车用发动机, 2021(6): 66-70.
- XIE W A, QU L, WANG Z, et al. Effect of Surface Treatment on Friction and Wear Property of Piston Ring[J]. Vehicle Engine, 2021(6): 66-70.
- [56] 李明磊. 活塞环表面 MoS_2/Y 复合涂层的制备及摩擦性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- LI M L. Preparation and Friction Performance of MoS_2/Y Composite Coating for Piston Ring[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [57] 邢世凯. 活塞环表面 PCVD 复合陶瓷涂层的摩擦性能研究[J]. 汽车技术, 2004(10): 27-29.
- XING S K. Study on Tribology Performance of PCVD Compound Ceramic Coating on the Surface of Piston Rings[J]. Automobile Technology, 2004(10): 27-29.
- [58] 杜学芸, 许金宝, 宋健. 激光熔覆再制造技术研究现状及发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2020(3): 15-19.
- DU X Y, XU J B, SONG J. Research Status and Development Trend of Laser Cladding Remanufacturing

- Technology[J]. *MW Metal Forming*, 2020(3): 15-19.
- [59] 江吉彬, 练国富, 许明三. 激光熔覆技术研究现状及趋势[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2015, 29(1): 27-36, 46.
- JIANG J B, LIAN G F, XU M S. Research on Status and Trend of Laser Cladding[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2015, 29(1): 27-36, 46.
- [60] 张庆茂, 刘文今. 激光强化铸铁活塞环的磨损性能[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(3): 447-452.
- ZHANG Q M, LIU W J. Wear Performance of Cast Iron Piston Rings Strengthened by Laser[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(3): 447-452.
- [61] 姜盛鑫. 面向汽车活塞环的激光熔覆镍基碳化铬涂层性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- JIANG S X. Research on the Performance of Laser Cladding Nickel-Based Chromium Carbide Coating for Automobile Piston Ring[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [62] LI J H, KONG D J. Micro-Structures and High-Temperature Friction-Wear Performances of Laser Cladded Cr-Ni Coatings[J]. *Materials*, 2018, 11(1): 137.
- [63] 路世盛, 周健松, 王凌倩, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆 Ni-Co 复合涂层的耐腐蚀及高温摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2022, 35(3): 122-131.
- LU S S, ZHOU J S, WANG L Q, et al. Corrosion Resistance and Elevated-Temperature Wear Properties of Laser Cladding Ni-Co Composite Coating on Ductile Cast Iron[J]. *China Surface Engineering*, 2022, 35(3): 122-131.
- [64] 韩立影, 张雪, 王亚男, 等. 激光功率对 Ni 基 WC 熔覆层组织的影响[J]. *金属热处理*, 2014, 39(9): 63-66.
- HAN L Y, ZHANG X, WANG Y N, et al. Influence of Laser Power on Microstructure of Ni-Based WC Clad Layer[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2014, 39(9): 63-66.
- [65] LIAN G F, ZHANG H, ZHANG Y, et al. Computational and Experimental Investigation of Micro-Hardness and Wear Resistance of Ni-Based Alloy and TiC Composite Coating Obtained by Laser Cladding[J]. *Materials*, 2019, 12(5): 793.
- [66] FERNÁNDEZ E, CADENAS M, GONZÁLEZ R, et al. Wear Behaviour of Laser Clad NiCrBSi Coating[J]. *Wear*, 2005, 259(7/8/9/10/11/12): 870-875.
- [67] MOHSAN A U H, ZHANG M N, WANG D F, et al. State-of-the-Art Review on the Ultrasonic Vibration Assisted Laser Cladding (UVALC)[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 107: 422-446.
- [68] XING Y Q, DENG J X, WANG X S, et al. Effect of Laser Surface Textures Combined with Multi-Solid Lubricant Coatings on the Tribological Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ Ceramic[J]. *Wear*, 2015, 342: 1-12.
- [69] AKBARZADEH A, KHONSARI M. Effect of Untampered Plasma Coating and Surface Texturing on Friction and Running-in Behavior of Piston Rings[J]. *Coatings*, 2018, 8(3): 110.
- [70] WANG H, SUN A N, QI X W, et al. Wear Properties of Textured Lubricant Films Filled with Graphite and Polytetrafluoroethylene (PTFE) via Laser Surface Texturing (LST)[J]. *Tribology International*, 2022, 167: 107414.
- [71] 朱凯, 王守忠, 向文华. 提高车用发动机活塞环摩擦学性能的试验研究[J]. *车用发动机*, 2017(5): 21-26, 33.
- ZHU K, WANG S Z, XIANG W H. Experimental Study on Improving Tribological Properties of Piston Ring for Vehicle Engine[J]. *Vehicle Engine*, 2017(5): 21-26, 33.
- [72] 孙灼, 张培鋈, 翟乐恒, 等. 铸铁活塞环表面多弧—磁控溅射复合镀研究[J]. *金属热处理学报*, 2000, 21(1): 6-11.
- SUN Z, ZHANG P J, ZHAI L H, et al. Multi-Layer Compound Coating on Cast Iron Piston Ring by Multi-Arc and Magnetron Sputtering Ion Compound Plating Technique[J]. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 2000, 21(1): 6-11.
- [73] MA C S, CHENG D, ZHU X H, et al. Investigation of a Self-Lubricating Coating for Diesel Engine Pistons, as Produced by Combined Microarc Oxidation and Electrophoresis[J]. *Wear*, 2018, 394: 109-112.
- [74] 万轶, 李建亮, 熊党生. 活塞环表面织构化镀层的摩擦性能研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(6): 195-201.
- WAN Y, LI J L, XIONG D S. Tribological Property of Textured-Coating on Piston Ring Surface[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(6): 195-201.
- [75] WANG X C, LI Q, LI R T, et al. Syntheses and Tribological Property of CrMoN/MoS₂ Multilayer Films on Piston Rings of Heavy Vehicle Engine[J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*, 2016, 31(2): 429-434.
- [76] DI Y L, CAI Z H, ZHANG P. The Tribological Performance of CrMoN/MoS₂ Solid Lubrication Coating on a Piston Ring[J]. *Lubricants*, 2017, 5(2): 13.
- [77] 孙韶, 刘强宪, 夏禹, 等. 活塞环表面镀铬与激光微织构的复合工艺研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(5): 1413-1422.
- SUN S, LIU Q X, XIA Y, et al. Research on Composite Process of Chromium Plating and Laser Surface Texturing of Piston Ring Running Face[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2016, 41(5): 1413-1422.