

激光表面重熔蠕墨铸铁气门座微观特性 分析和裂纹抑制研究

庞铭*, 谭雯丹

中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 利用额定功率为 3 kW 的 Nd:YAG 固体激光器开展激光重熔蠕墨铸铁气门座实验,通过扫描电镜、显微硬度仪,采用荧光粉探伤方法分析激光表面重熔蠕墨铸铁气门座的宏观形貌、显微组织、硬度分布以及重熔层是否存在裂纹。结果表明:经激光表面重熔后,重熔层中部区域组织为枝晶组织,在枝晶组织间弥散分布着针状物和颗粒状物;石墨的扩散降低了材料熔点,由于激光的快速加热和冷却等,重熔层与基体交界处形貌为锯齿形,且在热影响区观察到马氏体壳和莱氏体壳的双壳组织;不同区域的加热和冷却速度的差异导致重熔区表面到基体硬度逐渐降低;调控激光参数可以有效抑制气门座激光重熔层的裂纹。在激光功率为 500 W,离焦量为 -1 mm,激光扫描速度小于等于 5 mm/s 的重熔工艺参数下,可以获得无裂纹的重熔层。

关键词 激光器;激光表面重熔;蠕墨铸铁;气门座;显微组织;硬度;裂纹

中图分类号 TG164.4; TG157

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.211402

Microscopic Characteristic Analysis and Crack Suppression of Laser-Surface Remelting of Vermicular-Graphite Cast-Iron Valve Seats

Pang Ming*, Tan Wendan

Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract Experiments on the laser-surface remelting of vermicular-graphite cast-iron valve seats are performed in this study using a Nd:YAG solid-state laser with a rated power of 3 kW. The macroscopic morphology, microstructure, hardness distribution, and cracks of the remelting layer of the laser-surface remelting of the vermicular-graphite cast-iron valve seats are analyzed using a scanning electron microscope, microhardness tester, and phosphor flaw detection method. The results show that after the surface of the vermicular-graphite cast-iron valve seats is remelted using a laser, the dendritic structures appear in the central region of the remelting layer and the needles and granules are dispersed among the dendritic structures. The morphology of the interface between the remelting layer and substrate is serrated, and the bivalve structure of the martensite and ledeburite shells is observed in the heat-affected zone because of factors such as the diffusion of graphite reducing the melting point of the material in the vicinity of the graphite and rapid heating and cooling of the laser. The hardness from the remelting-zone surface to the substrate gradually decreases because of the differences in the heating and cooling rates in the different regions of laser remelting of the valve seats. The cracks in the laser remelting layer of the valve seats can be restrained by adjusting the laser parameters. A remelting layer without cracks on the surface of the vermicular-graphite cast-iron valve seats of laser remelting can be obtained under the laser remelting process with parameters of laser power $P=500$ W, defocusing amount $\Delta f=-1$ mm, and laser scanning velocity $V\leq 5$ mm/s.

Key words lasers; laser-surface remelting; vermicular-graphite cast-iron; valve seats; microstructure; hardness; crack

OCIS codes 140.3390; 160.3900

收稿日期: 2019-02-20; **修回日期:** 2019-04-15; **录用日期:** 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(U1633111,51206179)、中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122018D020)、内蒙古自然科学基金(2017MS0540)、中国民航大学蓝天青年科研资金

* **E-mail:** pangming1980@126.com

1 引言

为了满足新型动力高强度和高紧凑的发展目标,气缸盖和气门座采用整体成型以提高结构的紧凑性,但整体成型的气缸盖区域会受到新型动力高温、高压燃气的周期性作用,因此要求气缸盖材料具备优良的高温性能^[1-2]。蠕墨铸铁材料力学性能良好,接近球墨铸铁,且具有与灰铸铁类似的减振、导热能力、铸造性能以及优于灰铸铁的韧性和耐热疲劳性能,常被作为新型动力气缸盖材料^[3-4]。与气缸盖整体成型的气门座会受到气门的连续冲击和拍打,因此要求气门座能够承受高温下抗冲击磨损,而气门座硬度为 8 HRC,不能满足使用工况下的可靠性需求。

为了提高蠕墨铸铁气门座表面硬度,增加抗摩擦磨损能力,需要采用特殊工艺处理方式,现有的提高蠕墨铸铁表面硬度的方法主要采用高频感应强化、电子束强化和激光强化等方式。高频感应强化主要针对加热面积较大的区域^[5],在空间上能量均匀分配的难度较大,对气门座局部区域的精确强化优势不明显;电子束强化需要真空箱^[6-7],由于真空箱尺寸限制,其对零件的形状和大小有一定要求;激光强化具有功率密度高、熔凝速度快、热影响区域小等优势,在空间和时间上的能量分配可调^[8-12],因此采用激光强化蠕墨铸铁气门座的优势明显。

本课题组采用激光开展新型动力蠕墨铸铁气门座强化研究,目前已经通过激光相变硬化方法提高了材料的表面硬度,增加了耐磨性,但该方法会使材料表面形成马氏体组织,马氏体在 500 °C 会发生组织变化,进而导致材料硬度降低。而新型动力气门座的温度可达 500 °C,为了突破气门座在高温下的硬度设计关键技术,本课题组采用激光表面重熔的方法对蠕墨铸铁气门座进行激光强化,利用激光重熔过程的快速加热和冷却,在蠕墨铸铁气门座的激

光重熔区域形成细晶莱氏体组织,从而保证气门座 在 500 °C 具有优良的抗摩擦磨损能力。激光表面重熔蠕墨铸铁气门座的技术瓶颈是如何抑制重熔过程中形成的裂纹,而蠕墨铸铁在激光重熔过程中的裂纹敏感性强,因此需要优化激光工艺参数调控激光重熔过程中的热力耦合,从而抑制裂纹的形成。为了突破这一技术瓶颈,本课题组先后开展了 RuT300 气门座激光熔凝温度场数值模拟^[13]、不同预热温度对激光熔凝 RuT300 温度场的影响研究^[14]、预热温度对激光熔凝 RuT300 气门座残余应力场的影响研究,以及大量的工艺实验,研究发现,虽然蠕墨铸铁的热裂纹敏感性强,但通过调控激光参数,改变激光表面重熔过程中的热力耦合强度,即可有效抑制裂纹。

本文通过分析激光表面重熔蠕墨铸铁气门座过程中的宏观形貌和组织演变机理,探明硬度分布规律,提出抑制激光重熔蠕墨铸铁气门座裂纹的工艺参数,为工程上参数的优选提供参考。

2 实验材料和方法

激光表面重熔实验的气门座材料为蠕墨铸铁,材料型号为 RuT300,其化学成分如表 1 所示^[1],基体组织主要为弥散分布的蠕虫状石墨、铁素体和珠光体组织,如图 1 所示。实验设备为 3 kW 额定功率的 Nd:YAG 连续激光器,激光波长为 1.05 μm,聚焦镜焦距为 200 mm,焦点半径为 0.6 mm,采用高纯度的氩气作为保护气,吹气方式为同轴吹气,流量固定为 5 L/min。在前期大量实验的基础上,确定一种改变激光扫描速度的实验方案,即固定激光功率为 500 W,离焦量为 -1 mm,激光扫描速度分别为 5, 3, 1 mm/s,基于此方案,通过改变激光工艺参数,进一步分析激光扫描速度和激光功率对气门座重熔层裂纹数的影响。

表 1 蠕墨铸铁 RuT300 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of vermicular-graphite cast-iron RuT300 (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
Content	3.5-3.9	2.2-2.8	0.4-0.8	<0.06	<0.04	Bal.

实验前,利用 200 目(0.075 mm)的砂纸打磨激光表面重熔区域,并用丙酮溶液清洗;实验结束后,利用荧光粉探伤方法观察气门座重熔区表面是否有裂纹,采用线切割机沿激光扫描方向的垂直方向切割小试样,并进行金相镶样和抛光,再使用硝酸体积分数为 5% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀;最后,采用 NANOSEM 430 型扫描电镜观察重熔区的宏观形

貌和显微组织,采用 DHV-1000 显微硬度仪测试显微硬度。

3 结果分析与讨论

3.1 激光重熔区宏观形貌

图 2 所示为激光功率为 500 W,激光扫描速度为 5 mm/s,离焦量为 -1 mm 时的激光重熔区宏

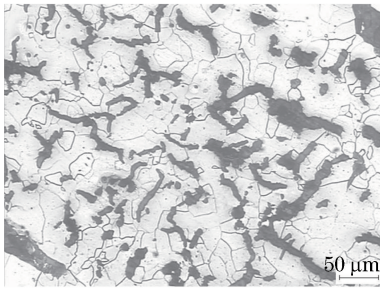


图1 蠕墨铸铁基体组织

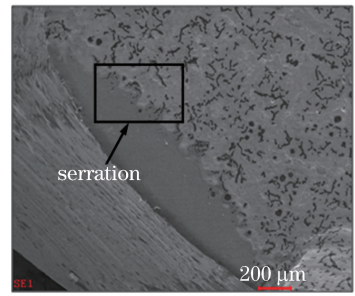


图2 激光重熔区宏观形貌

Fig. 1 Substrate structure of vermicular-graphite cast-iron
 观形貌。从图2可以观察到:激光重熔区的宏观形貌为月牙形,这是因为激光光束能量分布模式为高斯分布,激光辐照在蠕墨铸铁材料表面时,光斑中心激光能量密度高,光斑边缘激光能量密度低,高功率密度激光将材料表面熔化,在激光重熔层形成熔池,熔池通过热传导熔化周边的金属,激光光束空间能量分配与熔池和周边金属的热传导、熔池和外界的对流换热等综合作用,导致激光重熔区的宏观形貌为月牙形;重熔层与基体交界处形貌为锯齿形,这是因为基体材料中有弥散分布的蠕虫状石墨,石墨中碳含量较高,靠近石墨区域的材料熔点降低,而远离石墨区域的材料熔点偏高,不同区域熔点的差异导致重熔层与基体的交界形貌为锯齿形。

3.2 激光重熔区显微组织

利用扫描电镜观察激光重熔层,图3所示为激光功率为500 W,离焦量为-1 mm,不同激光扫描

Fig. 2 Macroscopic morphology of laser remelting zone
 速度下的激光重熔层横截面中部区域,在该区域没有观察到石墨,且重熔层晶粒细小,组织为细小的枝晶组织,枝晶组织之间弥散分布着针状物和颗粒状物,随着激光扫描速度的降低,枝晶有变粗大的趋势。细小枝晶的形成是因为激光加热温度高、加热速度快,基体材料发生组织转变的驱动力大,导致晶粒的形核率极高,当激光离开扫描位置后,扫描区域热量向周围快速传导,在与空气换热和向基体导热的双重激冷作用下,扫描区域温度急剧降低,这一过程使重熔层的金属形核后保温时间较短,以致于金属核来不及长大周围温度已降至很低,最终重熔层组织明显细化;在激光重熔过程中,蠕墨铸铁表面在极短的时间内加热至熔点以上,由于熔池表面及中部区域温度超过石墨和基体的熔点,结合激光重熔区域的快速冷却,熔化后的蠕虫状石墨不会形成石墨相,从而在重熔层中部区域观察不到蠕虫状石墨^[15-16]。

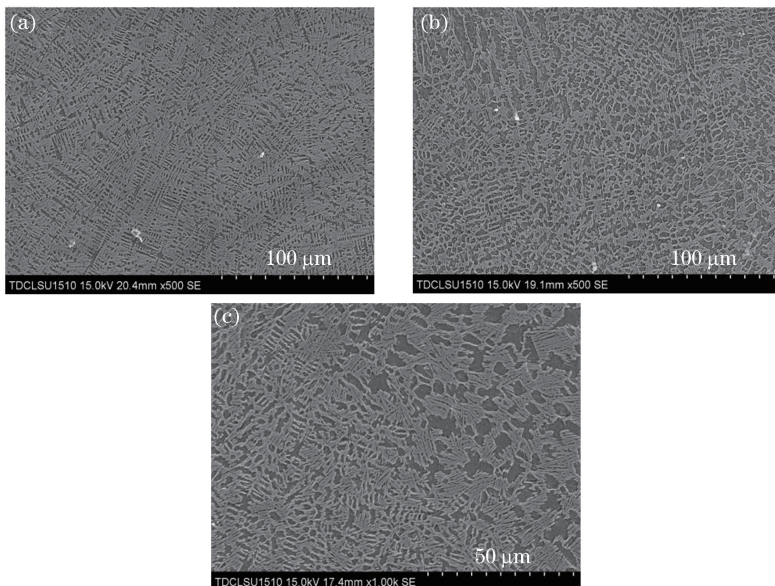
图3 激光重熔层中部区域显微组织。(a) $V=5$ mm/s;(b) $V=3$ mm/s;(c) $V=1$ mm/sFig. 3 Microstructures of central region of laser remelting layer. (a) $V=5$ mm/s; (b) $V=3$ mm/s; (c) $V=1$ mm/s

图4所示为固定激光功率为500 W,离焦量为-1 mm,不同激光扫描速度下观察到的激光重熔层与相变硬化层交界处显微组织的变化。图4(a)、(b)的激光扫描速度分别为5 mm/s和3 mm/s,在相硬化区观察到石墨外有莱氏体壳层组织,莱氏体壳外面被马氏体壳包围;图4(c)中激光扫描速度为1 mm/s,在其相硬化区的石墨外面同样有一层莱氏体壳,且莱氏体壳的厚度具有非均匀性,靠近重熔层的厚度大,远离重熔层的莱氏体壳厚度变小。在激光表面重熔蠕墨铸铁气门座过程中,激光热源辐照在材料表面,材料表面温度迅速升高到熔点以上形成熔池,熔池温度高于周边未熔化区域材料的温度,其通过热传导使周边金属温度升高,当熔池附近的基体材料温度升高到奥氏体化临界温度以上时,与熔池交界的基体材料奥氏体化,高温加速了石墨中的碳向周边扩散,碳浓度的增加使得材料的熔点降低,进而导致熔池与基体交界处的材料在低熔点下发生熔化,由于激光表面重熔蠕墨铸铁具有快速加热和冷却的特点,过渡区域石墨周边熔化的高

含碳材料冷却形成莱氏体,在莱氏体外侧区域形成马氏体。

对比图4(a)~(c)可知:当激光扫描速度为5 mm/s和3 mm/s时,在靠近激光相硬化区域的重熔层观察到未熔化的蠕虫状石墨,石墨数量随着扫描速度的降低而减少;当激光扫描速度为1 mm/s时,未观察到石墨。激光重熔蠕墨铸铁熔池中的温度分布不均匀,重熔层石墨是否熔化、石墨扩散量以及石墨扩散进入熔池的速度与熔池温度、熔池存在时间密切相关:当熔池局部温度超过石墨熔点时,石墨直接溶解;当熔池局部温度未超过石墨熔点,但超过基体材料熔点时,石墨在高温下通过扩散进入熔池,当扩散进入熔池的速度大于熔池凝固速度时,石墨就会在熔池中存在。激光扫描速度降低时,熔池的最高温度升高,熔池的存在时间延长,在熔池温度和存在时间的综合作用下,熔池中的石墨直接达到熔点而熔化,或者在低于熔点时扩散速度的提高导致其被溶解,最终,在靠近相硬化区域的重熔层中,石墨数量逐渐减少直至消失。

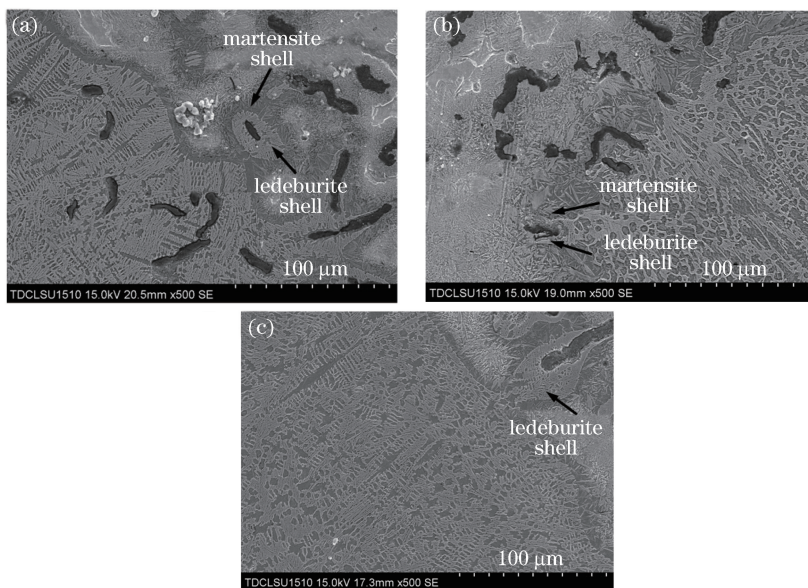


图4 激光重熔层与相变硬化层交界处的显微组织。(a) $V=5$ mm/s;(b) $V=3$ mm/s;(c) $V=1$ mm/s
Fig. 4 Microstructures at interface between laser remelting layer and phase-transformation hardening layer.

(a) $V=5$ mm/s; (b) $V=3$ mm/s; (c) $V=1$ mm/s

3.3 激光重熔区硬度分布

图5所示为当激光功率为500 W,激光扫描速度为5 mm/s,离焦量为-1 mm时基体到激光重熔层顶部的硬度分布。从图5可以观察到,重熔层硬度高于基体,从基体到重熔层,其硬度逐渐增加,这是因为激光的快速加热与快速冷却,使得晶粒组织细化,且石墨溶于熔池,增加了熔池的含碳量,在快

速冷却下形成了马氏体及莱氏体混合组织,硬度值较高;从重熔层顶部向下,熔池温度逐渐降低,激光表面重熔过程中的非平衡凝固导致马氏体和莱氏体含量发生变化,硬度逐渐降低^[17-18]。基体和熔池接触的区域为热影响区,该区域温度高于材料奥氏体化温度,但低于材料熔点,从靠近熔池区域到基体,其温度逐渐降低,温度的差异及冷却速度不同,导致

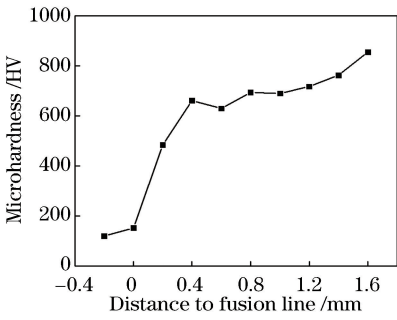


图5 基体至重熔层顶部的硬度分布

Fig. 5 Hardness distribution from substrate to top of remelting layer

不同区域马氏体含量不同,硬度从靠近熔池区域到基体逐渐降低。

3.4 激光重熔层裂纹抑制

激光表面重熔蠕墨铸铁气门座的最大技术难点是如何抑制重熔区表面的裂纹,研究表明,在所选取的3种激光扫描参数下,气门座重熔区表面均无裂纹产生,因此,需要继续增大扫描速度来观察裂纹数的变化。图6(a)所示为激光功率为500 W,离焦量为-1 mm时,不同激光扫描速度下的裂纹数。当扫描速度为1 mm/s时,在重熔区表面没有观察到裂纹,如图7(a)所示;随着激光扫描速度的增加,重熔层出现的裂纹数增加,当扫描速度为12 mm/s

时,重熔区表面观察到大量裂纹,如图7(b)所示。在无裂纹出现的激光参数基础上,改变激光功率,分析功率变化对裂纹数的影响,图6(b)所示为不同激光功率下的裂纹数,随着激光功率的增加,重熔层出现裂纹的倾向性增强。

激光重熔蠕墨铸铁气门座的裂纹形成与重熔过程的热力耦合密切相关,伴随激光扫描速度的增加,重熔区域单位面积的激光总输入能量降低,激光作用时间缩短,单位面积的激光输入能量降低,进而导致最高温度下降;激光作用时间缩短会导致温度分布均匀化趋势降低,温度梯度增加。热应力与温度及其梯度密切相关,最高温度降低可以使得高温区域的热膨胀变小,温度梯度增加会使高温区域出现非协调变形,从而导致热膨胀约束力增加,温度降低对热应力的降低效应与温度梯度增大对热应力的增加效应是竞争关系。由温度梯度增大引起的热应力增加占主导地位,随着激光扫描速度的增加,气门座热应力增大,导致裂纹数目增多。

激光功率的增加导致激光在重熔区单位面积和单位时间的输入能量增大,激光快速加热和冷却的特点,导致功率增加既提高了气门座的温度,又提高了气门座的温度梯度,二者均导致气门座热应力增大,因此提高功率会使裂纹数增多。

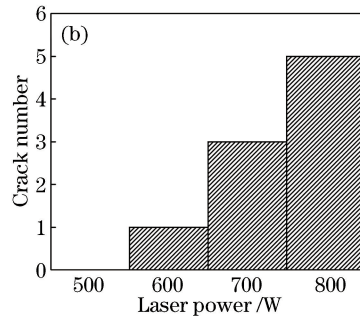
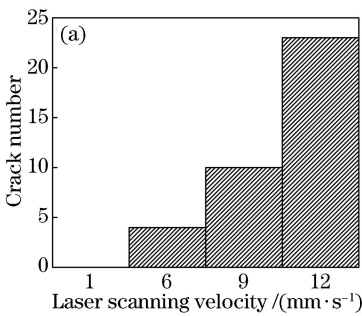


图6 变激光参数下的裂纹数。(a)变激光扫描速度;(b)变激光功率

Fig. 6 Crack numbers under variable laser parameters. (a) Variable laser scanning velocities; (b) variable laser powers

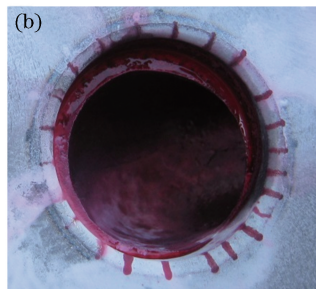
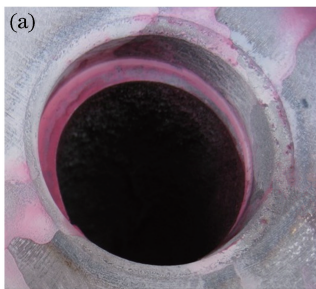


图7 重熔区表面裂纹。(a) V=1 mm/s;(b) V=12 mm/s

Fig. 7 Cracks on surface of remelting zone. (a) V=1 mm/s; (b) V=12 mm/s

4 结 论

激光表面重熔蠕墨铸铁 RuT300 气门座的重熔区横截面宏观形貌为月牙形,蠕墨铸铁基体中石墨的扩散降低了附近材料的熔点,导致重熔层和基体交界处形貌呈现锯齿状;石墨在熔池中是否熔解与熔池最高温度、熔池的存在时间密切相关,通过降低激光扫描速度可以熔解熔池中靠近热影响区的石墨;当激光功率为 500 W,离焦量为 -1 mm,激光扫描速度不大于 5 mm/s 时,激光表面重熔蠕墨铸铁气门座的重熔层可以没有裂纹出现。

参 考 文 献

- [1] Tan W D, Pang M, Jiang G Y, *et al.* Numerical simulation of temperature field in laser phase-transformation hardening of highly-enhanced diesel engine valve seats [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 111601.
谭雯丹, 庞铭, 江国业, 等. 高强度柴油机气门座激光相变硬化温度场的数值模拟[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 111601.
- [2] Pang M, Tan W D, Zhang X H, *et al.* Numerical simulation of temperature field of laser phase transformation hardening valve seat based on beam transformation[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(22): 202-205.
庞铭, 谭雯丹, 张啸寒, 等. 基于光束变换的激光相变硬化气门座温度场数值模拟[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(22): 202-205.
- [3] Yan J F. Research on microstructure and properties of compacted graphite iron [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
闫军芳. 蠕墨铸铁组织形貌及其性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [4] Dawson S. Compacted graphite iron—a material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads[J]. *Foundry Technology*, 2009, 30(4): 455-460.
史蒂夫·道森. 蠕墨铸铁——现代柴油发动机缸体和缸盖的材料[J]. *铸造技术*, 2009, 30(4): 455-460.
- [5] Huang B S, Gao Y X, Chen P, *et al.* Microstructural and mechanical properties of Co-based coating by high-frequency induction cladding [J]. *Materials Review*, 2018, 32(13): 2272-2277.
黄本生, 高钰泉, 陈鹏, 等. 高频感应熔覆 TiN/Co 涂层组织及性能研究[J]. *材料导报*, 2018, 32(13): 2272-2277.
- [6] Wei D Q, Liu K, Wang R. Research on the microstructure and hardness of transformation hardening of 45 steel during electron beam scanning [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(2): 127-132.
魏德强, 刘科, 王荣. 45 钢电子束扫描相变硬化组织和硬度的研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(2): 127-132.
- [7] Chen H C, Wei D Q, Wang X B. Cross-sectional hardness distribution of phase transition hardening zone by electron-beam treatment on 45 steel surface [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(10): 159-163.
陈虎城, 魏德强, 王晓冰. 45 钢电子束处理表面相变硬化的横截面硬度分布[J]. *金属热处理*, 2017, 42(10): 159-163.
- [8] Šebek M, Falat L, Kováč F, *et al.* The effects of laser surface hardening on microstructural characteristics and wear resistance of AISI H11 hot work tool steel [J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, 62(3): 1721-1726.
- [9] Elhadj S, Matthews M J, Yang S T. Combined infrared thermal imaging and laser heating for the study of materials thermophysical and processing properties at high temperatures[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2014, 39(3): 175-196.
- [10] Wu W P, Liu J W, Wang H, *et al.* Microstructure and tribological performance of NiAl-SiC composite coating by laser cladding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091406.
吴王平, 刘剑文, 王辉, 等. 激光熔覆 NiAl-SiC 复合涂层的组织与摩擦性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091406.
- [11] Wu G L, Ren F C, Yao J H, *et al.* Abrasion resistance mechanism of new Co-based alloy by diode laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0602006.
吴国龙, 任方成, 姚建华, 等. 半导体激光熔覆新型 Co 基合金耐擦伤性机制[J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0602006.
- [12] Ge M Z, Xiang J Y, Tang Y. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth rate of TC4 repaired parts [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071405.
葛茂忠, 项建云, 汤洋. 激光冲击处理对 TC4 修复件疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071405.

- [13] Pang M, Zhang X H, Fu W, *et al.* Numerical simulation of laser melting temperature field of RUT300 valve seat [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(22): 117-123.
庞铭, 张啸寒, 付威, 等. RuT300 气门座激光熔凝温度场数值模拟 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47(22): 117-123.
- [14] Pang M, Zhang X H, Liu G, *et al.* Effect of preheating temperature on temperature field of laser melting RuT300 [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 071601.
庞铭, 张啸寒, 刘光, 等. 预热温度对激光熔凝 RuT300 温度场的影响规律 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 071601.
- [15] Cheng X, Hu S B, Song W L, *et al.* Research on plasma beam melting microstructures and corrosion resistance of ductile iron [J]. *Journal of Wuyi University(Natural Science Edition)*, 2013, 27(3): 41-45.
程秀, 胡树兵, 宋武林, 等. 球墨铸铁的等离子束熔凝组织和耐蚀性研究 [J]. *五邑大学学报(自然科学版)*, 2013, 27(3): 41-45.
- [16] Li M Y. Study on modification of high chrome cast steel roller by laser surface melting [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.
李美艳. 高铬铸钢轧辊激光熔凝改性研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
- [17] Meng Y L, Yang J X, Zhang J Q, *et al.* Effect of laser melting on microstructure and performance of AerMet100 steel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021414.
孟云龙, 杨胶溪, 张健全, 等. 激光熔凝对 AerMet100 钢显微组织及性能的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021414.
- [18] Zhang Q M, Liu W J. Investigation on microstructures and tribological characteristic of laser remelting layers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(3): 389-392.
张庆茂, 刘文今. 激光熔凝层组织与摩擦学特性的研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(3): 389-392.