

# 感应淬火对合金铸铁组织与油摩擦性能的影响

林少阳<sup>1</sup>, 刘东<sup>1</sup>, 程超增<sup>2</sup>

(1.福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116; 2.福建龙生机械有限公司, 福州 350112)

**摘要:** **目的** 优化感应淬火工艺, 为提高合金铸铁表面硬度及耐磨性能提供理论依据。**方法** 通过热力学计算和同步热分析法测试分析了合金铸铁相变规律, 并对该材料在 6 kW 和 8 kW 功率下进行了 2~8 s 高频表面淬火。采用扫描电镜 (SEM)、洛氏硬度计、摩擦磨损试验机, 研究了不同感应淬火工艺对合金铸铁显微组织、硬度和摩擦磨损性能的影响。**结果** 合金铸铁经感应淬火后, 组织为珠光体+马氏体+石墨+磷共晶, 随加热时间延长, 马氏体含量增多, 珠光体与磷共晶逐渐减少, 直至 6 kW/8 s、8 kW/6 s 时消失, 但是继续延长时间会产生裂纹。硬化区硬度随加热时间增长而提高, 峰值为 50HRC, 二者的关系可用 Logistic 曲线描述。硬度升高会提升耐磨性, 超过一定硬度后, 摩擦系数在 0.11 波动。不同形式的裂纹会造成磨痕宽度具有不同的变化规律。**结论** 感应淬火可有效提升合金铸铁的表面硬度及油摩擦性能。

**关键词:** 感应淬火; 合金铸铁; 相转变; 显微组织; 硬度; 油摩擦

**中图分类号:** TG156.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0236-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.027

## Effect of Induction Hardening on Microstructure and Oil Friction Properties of Alloy Cast Iron

LIN Shao-yang<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>1</sup>, CHENG Chao-zeng<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2.Fujian Longsheng Machinery Co., Ltd, Fuzhou 350112, China)

**ABSTRACT:** The work aims to optimize the induction hardening process, and provide a theoretical basis for improving the surface hardness and wear resistance of alloy cast iron. The phase transformation law of alloy cast iron was analyzed by Thermo-Calc and differential scanning calorimetry (DSC), and high-frequency surface hardening was carried out to the material at a power of 6 kW and 8 kW for 2~8 s. The effects of different induction hardening processes on the microstructure, hardness and friction and wear properties of alloy cast iron were studied by scanning electron microscope (SEM), Rockwell hardness tester and friction and wear tester. After induction hardening of alloy cast iron, the microstructure was composed of pearlite, martensite, graphite and phosphorus eutectic. With the increase of heating time, the martensite content increased and pearlite and

收稿日期: 2019-12-20; 修订日期: 2020-10-15

Received: 2019-12-20; Revised: 2020-10-15

基金项目: 福州市科技计划项目 (2018-G-68)

Fund: Supported by Fuzhou Science and Technology Bureau (2018-G-68)

作者简介: 林少阳 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料改性及成形技术。

Biography: LIN Shao-yang (1994—), Male, Master, Research focus: metal material modification and molding technology.

通讯作者: 刘东 (1984—), 男, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为钢铁材料制备、性能表征与表面处理技术。邮箱: ldfzu@fzu.edu.cn

Corresponding author: LIU Dong (1984—), Male, Master, Senior experimentalist, Research focus: preparation, performance characterization and surface treatment technology of iron and steel materials. E-mail: ldfzu@fzu.edu.cn

引文格式: 林少阳, 刘东, 程超增. 感应淬火对合金铸铁组织与油摩擦性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 236-244.

LIN Shao-yang, LIU Dong, CHENG Chao-zeng, et al. Effect of induction hardening on microstructure and oil friction properties of alloy cast iron[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 236-244.

phosphorus eutectic gradually decreased until disappeared at 6 kW/8 s and 8 kW/6 s. However, the cracks occurred over time. The hardness of the hardening zone increased with the increase of heating time, and the peak value was 50 HRC. The relationship between the both could be described by the Logistic curve relationship. Increasing the hardness increased the wear resistance. After certain hardness was exceeded, the friction coefficient fluctuated at 0.11. Different forms of cracks could cause different changes in the width of the wear scar. The process of induction hardening can effectively improve the surface hardness and oil friction properties of alloy cast iron.

**KEY WORDS:** induction hardening; alloy cast iron; phase transition; microstructure; hardness; oil lubrication

铸铁具有良好的工艺性、导热性、减噪性和耐磨性，广泛应用于汽车工业当中<sup>[1-3]</sup>。为满足各组件不同的性能要求，常添加微量的合金元素调控铸铁的性能，其中磷、铬、锰、铜可以提高铸铁的硬度<sup>[4-7]</sup>及其耐磨性能<sup>[8]</sup>。除调整化学成分外，表面热处理可以调控合金铸铁表面的组织，从而使表层获得与心部不同的性能，既延长了使用寿命，又拓宽了应用范围。

感应淬火具有快速、高效、易于自动化等优点<sup>[9]</sup>，是广泛应用于工业生产的表面处理方法之一，与其他表面处理相比，其性能具有独特优势。Slatter 等<sup>[10]</sup>发现感应淬火能有效改善材料抗冲击磨损性能，且强化效果比激光淬火更强。程祥军等<sup>[11]</sup>研究认为，感应淬火与软氮化、复合强化（软氮化+感应淬火）相比，在油摩擦试验中表现出更低的磨损量与磨损深度。

感应淬火所产生的强化与硬化层的马氏体含量息息相关<sup>[10]</sup>，且硬化层厚度也有可能影响材料的耐磨性能<sup>[12]</sup>。此外，硬化层的硬度分布也是研究者们关注的焦点，一般认为，感应淬火试样表面硬化层的硬度会随深度增加而持续降低<sup>[13-15]</sup>。但有研究者发现，硬化层硬度分布可能出现波动式下降<sup>[16]</sup>或发生二次硬化<sup>[17]</sup>的现象。

目前，感应淬火的研究多集中于强化后的性能，对于合金铸铁经感应淬火后的相变行为及硬化层的硬度分布尚未见系统报道。综上，本文采用 Thermo-Calc、同步热分析仪（DSC）对合金铸铁的相变点进行计算、测定，并结合感应加热硬化层显微组织、硬度分布规律与摩擦磨损试验进行分析讨论。

## 1 试验材料与测试方法

试验所用材料为离心铸造浇铸成形的合金铸铁，其化学成分如表 1 所示。合金铸铁的碳当量  $CE^{[18]}=1\%C+0.31\%Si+0.33\%P\approx 4.06$ ，属于亚共晶铸铁。采用线切割将材料切割为 30 mm×7 mm×6 mm 的长条形试样。经 80~1000#金相砂纸打磨光亮后备用。采用 CR2100 SERIES 型感应加热器、单匝平板线圈对试样进行感应加热，然后水冷，试样位置如图 1a 所示（其中 1 为摩擦磨损试样，2 为测试硬化深度试样），试样与线圈间距为 2 mm，具体热处理工艺如表 2 所示。其中 GP-8/8 试样表面发生熔化，失去研究意义，故

后文不作分析讨论。为防止淬火应力导致试样开裂，必须立即通过回火处理释放内应力。此外，为了最大程度保持淬火后的组织形貌与硬度，感应淬火试样均为经低温回火试样，即在 260 ℃ SXL-1200C 箱式炉中保温 30 min 后空冷。

表 1 试验合金铸铁的化学成分  
Tab.1 Chemical compositions of tested alloy cast iron

wt%							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Fe
3.21	2.61	0.65	0.11	0.12	0.31	0.93	Bal.

表 2 试验合金的感应淬火工艺参数  
Tab.2 Process parameters of induction hardening of test alloy

Samples	Power/kW	Time/s
GP-6/2	6	2
GP-6/4	6	4
GP-6/6	6	6
GP-6/8	6	8
GP-8/2	8	2
GP-8/4	8	4
GP-8/6	8	6
GP-8/8	8	8

对试样剖面进行组织观察，经 600~3000#金相砂纸逐级打磨，2.5 μm 金刚石抛光膏抛光至镜面，而后用 4%硝酸酒精腐蚀，使用 MV5000 金相显微镜进行宏观观察，使用 PHENOM PROX 进行微观观察，并用配备的能谱仪进行元素分析。

利用 Thermo-Calc 2019a 与 TCFE9 铁基数据库计算试验材料的平衡相变温度。采用 STA 449 F5 同步热分析仪（DSC）以 10 ℃/min 的速率从 50 ℃升至 1000 ℃，使用自带软件分析试验材料的真实相变温度。

根据 GB/T 230.1—2018《金属材料洛氏硬度实验方法》，采用 HR-150A 洛氏硬度计对试样表面进行硬度测试，选用 120°圆锥金刚石压头，试验载荷为 150 kg。

采用 MMS-2A 摩擦磨损试验机进行油摩擦试验，试验前使用 1000#金相砂纸打磨，除去表面热处理氧化层。采用美孚 20W-40 润滑油作为润滑介质，对磨环为淬火 45 钢（表面硬度为 59HRC），试样与对磨

环的位置关系如图1所示。试验力为80 N, 试验转速200 r/min, 试验时间60 min。

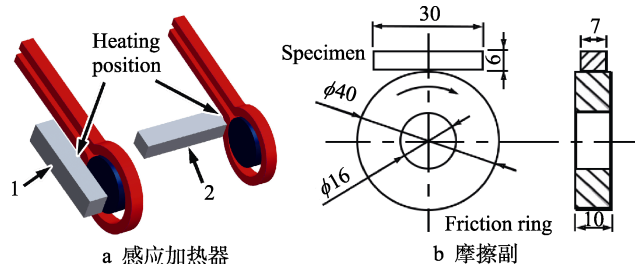


图1 实验装置示意图

Fig.1 Diagram of experimental equipment: a) induction heater, b) friction pair

## 2 结果及分析

### 2.1 铸件凝固相变规律

对相应成分的合金从液相至500℃液固相变进行热力学计算的结果如图2所示。图2a为平衡相变模拟, 由图可知, 在铸件凝固过程中, 随温度降低, 初生奥氏体(FCC-A1)首先析出, 固液相界面发生溶质再分配, 液相碳当量增高, 最后发生共晶反应,

凝固结束。共晶奥氏体与石墨相界面处的成分最接近共晶成分, 熔点最低, 在感应淬火过程中, 若发生过热熔化, 应先从共晶相界面处发生熔化, 金相检验过热情况应关注石墨边界。从图2a可以看出, 在加热过程中, 铁素体(BCC\_A1)向奥氏体转变, 由于奥氏体的碳元素固溶度更高, 在发生奥氏体转变时, 石墨相溶解。图2b是图2a红色虚框局部放大图, 可知铁素体向奥氏体转变的起始温度为768.0℃, 至820.0℃时奥氏体转变完成。

### 2.2 感应淬火对显微组织的影响

图3a为铸态试样的金相组织, 可以看到试验材料为珠光体基体, 在珠光体中还分布着少量亮白色磷共晶。利用Image-Pro Plus 6.0进行金相定量分析, 磷共晶含量约为1.43%。采用能谱仪分析磷共晶成分(图3b), 结果如表3所示, 可以看出磷共晶的磷含量最高, 共晶周围的珠光体次之, 远端珠光体不含磷。图2b显示磷共晶形成的温度较低, 有研究指出<sup>[19]</sup>, 磷在液相凝固过程中会产生区域偏析, 且铸铁的合金元素会抢占固溶磷原子所需间隙, 造成磷共晶析出往往比理论计算的结果粗大。与计算结果不同, 图2a的结果中并没有渗碳体, 这是由于渗碳体是亚稳相,

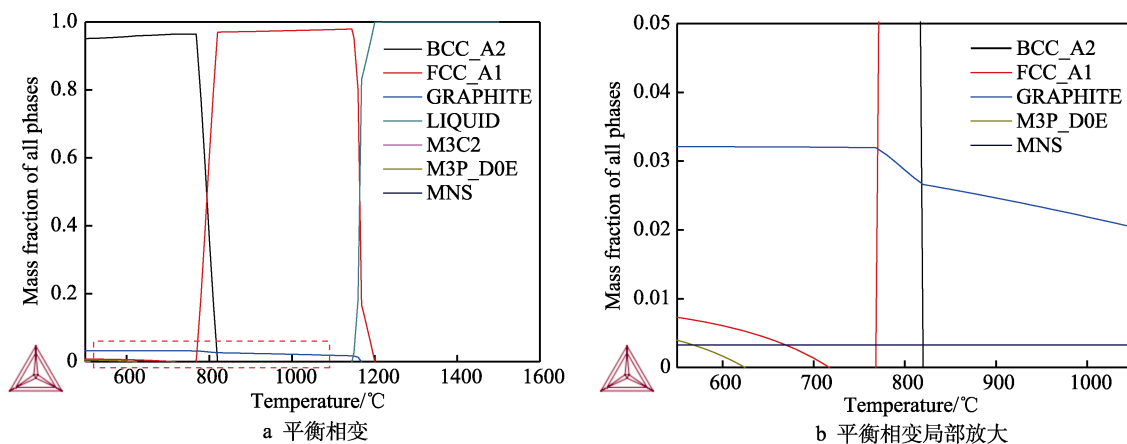
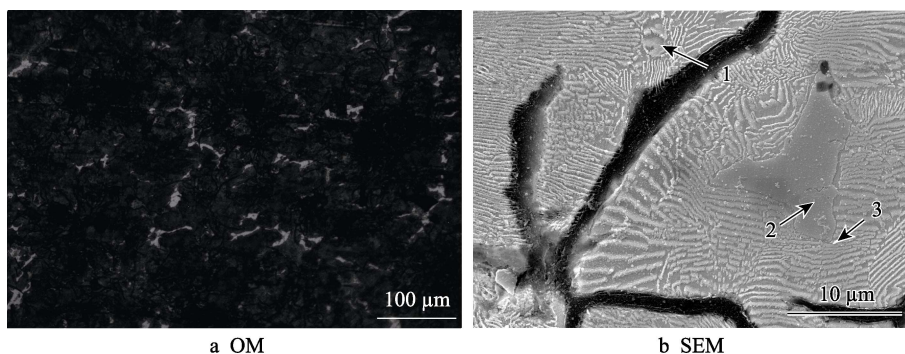


图2 合金铸铁的相转变模拟计算结果

Fig.2 Phase transformation simulation results of alloy cast iron: a) equilibrium phase transition; b) local enlargement of equilibrium phase transition



a OM

b SEM

图3 合金铸铁铸态试样显微组织

Fig.3 Microstructure of as-cast alloy cast iron

在奥氏体发生共析反应时，虽然形成石墨会使体系自由能达到最低，但是渗碳体具有更低的形核自由能，且在实际冷却中，极少存在冷却速度无限慢的情况，

因此试验材料的组织中存在渗碳体与石墨。

低温回火后的感应淬火试样的金相组织如图 4 所示。原始基体由层片状的珠光体、白亮色的磷共晶以及黑色片状石墨构成。6 kW 功率下，GP-6/2 的基体组织与铸态组织无明显区别。当加热时间达到 4 s 时，基体中部分奥氏体转变为透镜状的高碳马氏体，同时一部分碳原子以初生石墨为核心进行长大，形成团状石墨，另一部分于原始奥氏体晶界处发生石墨的形核长大，出现细小的片状石墨，此外，磷共晶在边界出现少部分溶解，如图 4c 虚线圈所示。加热 6 s 时，试样马氏体含量增多，析出的石墨片更加细小。加热至 8 s 时，由于加热时间延长，样品表层温度升高，使得珠光体的层片状组织消失。这是由于磷原子的扩散无层片状结构阻碍，造成磷共晶溶解，另一方面还可能和感应淬火时的交变磁场促进扩散与相变

表 3 图 3b 铸态试样的能谱分析结果  
Tab.3 EDS results of as-cast sample in fig.3b

Element	Point 1		Point 2		Point 3	
	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%
C K	0.64	2.82	0.99	4.34	0.74	3.26
Si K	2.81	53.32	—	—	2.26	4.27
P K	—	—	2.62	4.46	0.68	1.16
Cr K	0.25	0.26	1.66	1.68	0.53	0.54
Mn K	0.86	0.84	1.85	1.78	1.06	1.02
Fe K	94.15	89.68	92.88	87.73	94.04	89.18
Cu K	1.29	1.08	—	—	0.70	0.58

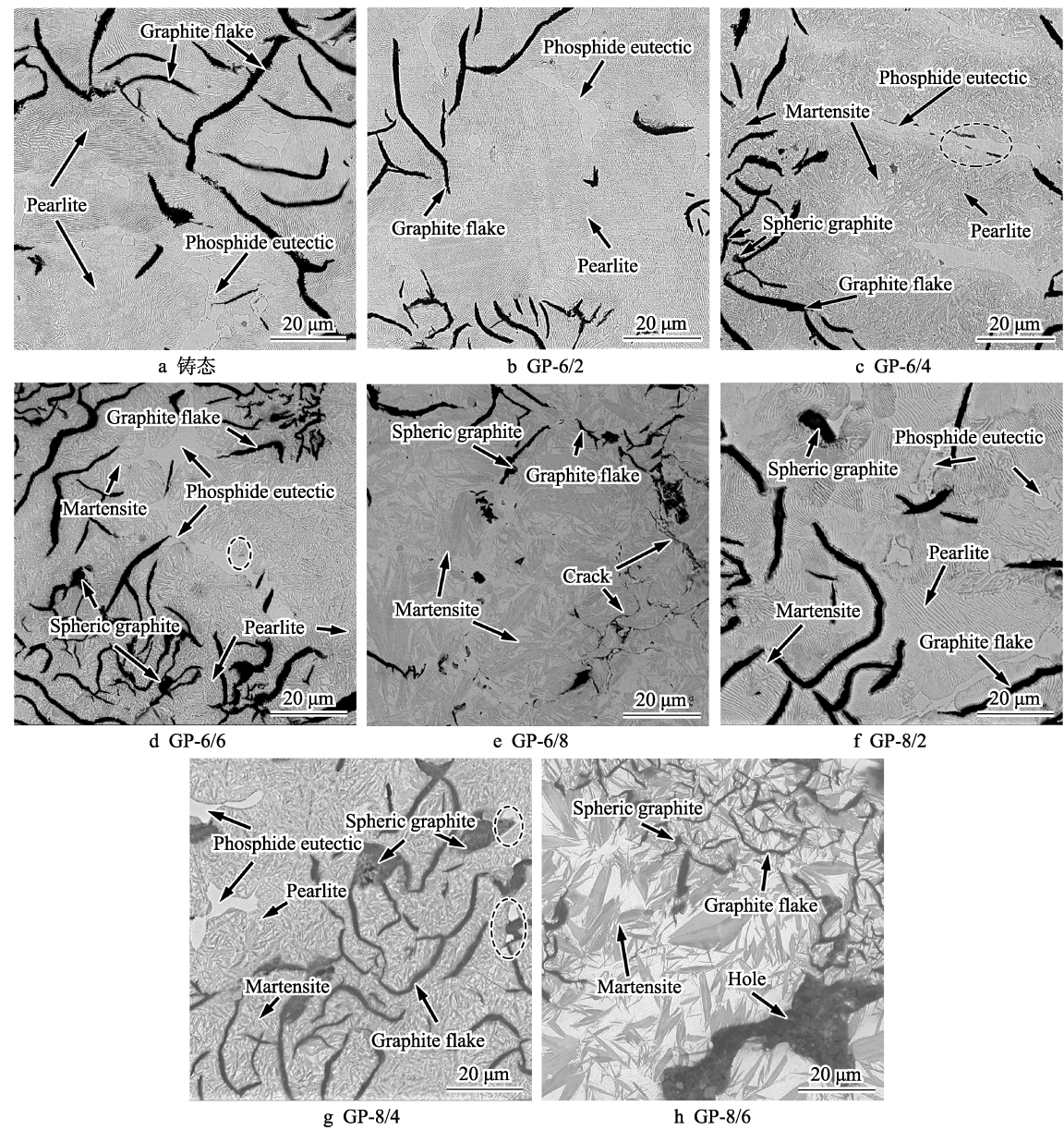


图 4 不同感应淬火工艺处理后试样表面的金相组织  
Fig. 4 Microstructures of sample surface treated by induction hardening: a) as-cast



有关<sup>[20-21]</sup>。8 kW 功率下, GP-8/2 珠光体片层间距明显增加, 这可能会导致摩擦性能恶化。与 GP-6/6 相比, GP-8/4 除磷共晶发生了明显溶断外, 其马氏体含量更多, 且马氏体与珠光体混杂得更加均匀, 这部分残余的珠光体作为软相, 还可以起到吸收部分应力、防止开裂的作用。从图 4e、h 中可以看出, 当珠光体消失, 晶界、相界处出现许多显微裂纹, 甚至显微裂纹相互连接造成部分材料脱落, 形成孔洞。

## 2.3 合金铸铁固态相变规律

由于能垒的存在, 真实相变温度总会滞后于平衡相变温度。为了测试样品的真实相变温度, 采用 DSC 进行测量, 结果如图 5 所示。由图可知, 试样存在两个相变峰, 低温峰 (656.0~763.2 °C) 表示奥氏体形核, 高温峰 (772.4~865.8 °C) 为珠光体溶解与奥氏体长大<sup>[22]</sup>。奥氏体形核与长大存在的温度差, 可能是导致 GP-8/2 珠光体片层间距增大的原因。

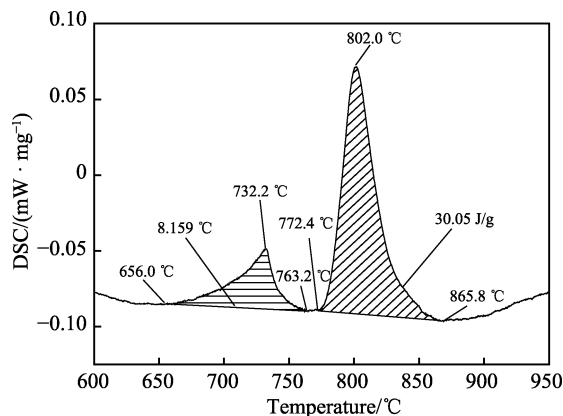


图 5 合金铸铁真实相变点

Fig.5 Real transformation temperature of alloy cast iron

## 2.4 残余应力与裂纹成因分析

裂纹的形核与扩展与试样在淬火过程中产生的残余应力密切相关。根据传统理论, 试样表面残余应力成因分为两种: 1) 热应力理论。热处理冷却初期, 表面遇冷收缩, 而心部还保持高温状态, 表面承受拉应力; 冷却后期, 试样表面停止收缩, 心部收缩冷却, 试样表面受压应力。2) 组织应力理论。试样在冷却过程中发生相变, 引发残余应力, 奥氏体向马氏体发生转变时, 体积会膨胀约 8.8%。在冷却初期, 马氏体相变导致表层体积膨胀, 心部未发生相变, 试样表面承受压应力; 在冷却后期, 表层相变完成, 体积不变, 心部发生相变膨胀, 表面承受拉应力。依照上述理论, 应力的产生源自试样表面与心部不同步的线膨胀, 而在感应淬火中, 只有表层发生加热冷却, 才可将心部视为无膨胀收缩的刚体。试样表面在淬火过程中的总膨胀可用式(1)表示。

$$\varepsilon_{SI} = \varepsilon_{BMI} + \varepsilon_{\gamma \rightarrow M} - \varepsilon_{AMT} \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon_{SI}$  (Surface Inflation) 为淬火过程中的表面总膨胀,  $\varepsilon_{BMI}$  (Before Martensitic Transformation) 为马氏体相变前试样表面的线膨胀,  $\varepsilon_{\gamma \rightarrow M}$  为冷却过程中试样表面马氏体相变所产生的体积变化,  $\varepsilon_{AMT}$  (After Martensitic Transformation) 为马氏体相变后试样表面的线膨胀。表面的膨胀收缩直接影响残余应力类型。 $\varepsilon_{SI}$  为正时, 体积膨胀, 残余应力为压应力; 为负时, 体积收缩, 残余应力为拉应力。

有研究指出<sup>[23]</sup>, 感应淬火处理后, 表面残余应力为压应力, 而 Homberg 等<sup>[24]</sup>对齿轮件进行感应淬火后的应力场模拟发现, 试样齿根部表面残余应力为压应力, 齿尖为拉应力。分析可知, 齿尖处的拉应力是由于形状突出, 尖端左右两侧无材料阻碍, 膨胀时的应力得以释放所致。因此, 试样在冷却过程中所产生的总应力主要来自马氏体相变。对于本工作中所使用的样品形状来说, 表面残余应力应为压应力。但当试样表面应力状态为压应力时, 不易诱发裂纹的形核与扩展, 因此显微组织中的裂纹并不是由于冷却末期的压应力造成的。

在马氏体转变开始前, 试样冷却产生线收缩, 表面呈拉应力。马氏体转变初期, 根据高碳马氏体相变特性, 单个原始奥氏体晶粒内第一片形成的马氏体总是贯穿晶内, 其相变速率达 1600  $\mu\text{m/s}$ , 是奥氏体长大速率的 1000 倍以上<sup>[25]</sup>, 高速的相变伴随体积膨胀, 相当于对晶界微区内加载了一个冲击载荷, 而透镜状的马氏体在晶界处为尖角状, 易产生应力集中。因此, 图 4e、h 中的裂纹形成于马氏体转变完全之前。

裂纹从晶界、石墨相界等结合力薄弱处开始形核、扩展。GP-6/8 淬火温度较低, 石墨形成的网状结构尚未连接, 过热产生的晶粒长大不及 GP-8/6 明显, 裂纹形核后扩展过程受阻碍, 无法相连。GP-8/6 的裂纹在扩展过程中沿晶界、石墨边界发生相连, 晶粒成块脱落。

## 2.5 感应淬火工艺对合金铸铁硬度及其分布的影响

为研究不同感应淬火工艺下的硬化深度, 将图 1a 中所示的 2 试样沿长度方向进行洛氏硬度测试, 用游标卡尺测量压痕中心与端面的距离, 每个淬火工艺试样测试 3 组, 结果如图 6 所示。根据硬度的变化规律, 可以将感应淬火硬化层分为三个区域: a) 硬化区, 在表面约 5 mm 深度, 硬度在 50HRC 左右达到饱和; b) 过渡区, 在硬化区之后, 硬度迅速减小, 其厚度约为 2 mm; c) 软化区, 硬度比基体低, 厚度受加热时间影响较大。

加热时间为 2 s 时, 不论是 6 kW 还是 8 kW 功率, 加热温度不足, 奥氏体无法长大, 造成珠光体片层间距增大, 硬度下降。有趣的是, 这种软化现象在加热时间延长后并未消失, 且软化区总是存在于过渡区与

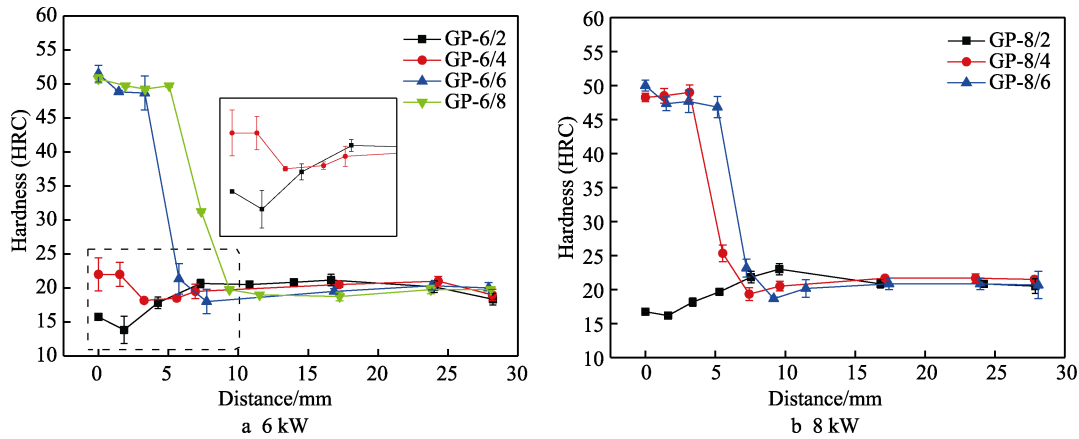


图 6 感应淬火后沿深度方向的硬度分布  
Fig.6 Hardness distribution along the depth direction after induction hardening

基体中间，证明这种软化是由特定温度区间造成的。  
绘制经感应淬火后表层硬度与加热时间的散点图（图 7）。从图中可以看出，硬度在加热前期变化平缓，随后急剧增长，达到最高硬度后又趋于平稳，其规律可用 Logistic 曲线（式(2)、(3)）进行描述：

$$H = \frac{K}{1 + e^{-f(t)}} \tag{2}$$

$$f(t) = At^2 + Bt + C \tag{3}$$

式中， $H$  为材料表面洛氏硬度， $t$  为加热时间， $K$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$  为常数， $f(t)$  为感应淬火因子。若  $f(t)$  单调递增，则  $H$  单调递增。 $A$  与  $B$  可影响抛物线的顶点是否落在  $t$  的定义域内，若顶点在定义域内，则  $H$  会出现极值。回火软化现象可由  $A$ 、 $B$  两个常数描述。试验中两种功率拟合图形如图 7 的曲线所示，可知曲线具有较好的拟合效果，拟合参数如表 4 所示。

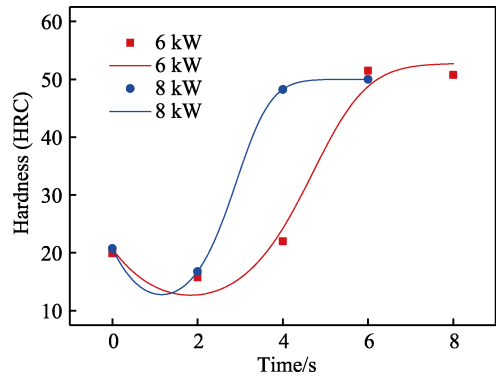


图 7 感应加热时间与表面硬度关系  
Fig.7 Relationship of induction heating time and surface Rockwell hardness

表 4 Logistic 曲线拟合结果参数  
Tab.4 Fitting parameters of Logistic curve

Power/kW	$K$	$A$	$B$	$C$
6	52.728	-0.211	0.775	0.440
8	50.000	-0.543	1.257	0.343

$A$  影响抛物线  $f(t)$  开合大小，因此  $A$  的绝对值越大， $f(t)$  随  $t$  变化越剧烈。因此，可以通过  $A$  值来比较

不同感应淬火工艺在硬度急剧增长阶段的变化速率。硬化速率大小也能从图 7 曲线的陡峭程度看出。此外，该曲线还可用于实际生产工艺的确定。

2.6 感应淬火工艺对合金铸铁摩擦磨损性能的影响

将材料磨痕等分为五块区域，测量每块区域磨痕最宽处，并将其均值作为该试样的磨痕宽度，采用摩擦 5~60 min 的平均摩擦系数作为该试样的摩擦系数，结果如图 8 所示。

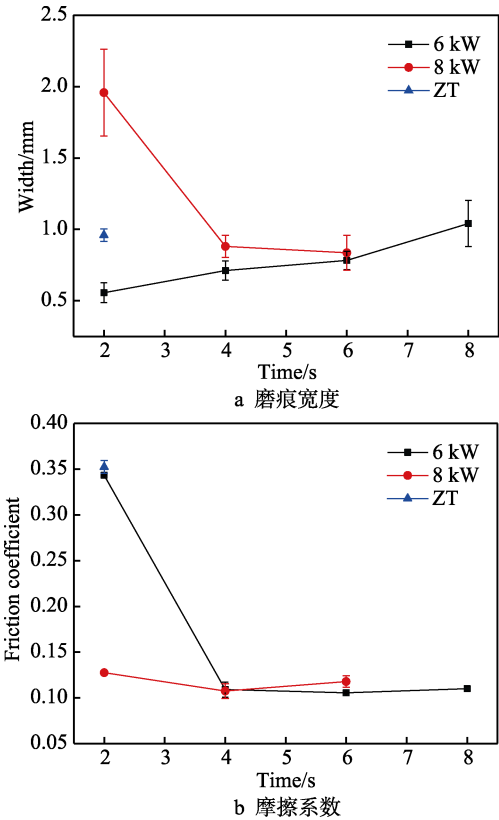


图 8 感应淬火试样的磨痕宽度与摩擦系数  
Fig.8 Width of wear mark (a) and friction coefficient (b) of induction hardening samples

由图可知, GP-6/2 基体与铸态相似, 硬度较低, 在法向载荷作用下, 表面发生弹塑性变形, 对磨环“压入”试样, 接触面的小凸点被压平, 试样实际接触面积增大, 摩擦系数增大, 卸载后由于试样回弹, 磨痕收缩, 导致磨痕宽度下降。具有相似硬度的 GP-8/2 磨痕宽度却远高于其他样品, 这是由于: 1) GP-8/2 表面存在少量马氏体, 在磨损过程中剥落, 加剧材料的磨粒磨损; 2) 片层间距增加, 导致层片状珠光体的细晶强化作用衰退<sup>[26]</sup>。当马氏体含量提高, 试样表面硬度足以抵御塑性变形时, 可具有相似的磨痕宽度与摩擦系数。但当加热时间进一步升高时, GP-6/8 表面产生裂纹, 在摩擦磨损过程中, 裂纹持续扩展, 且剥落的硬质点也加剧材料的磨损。由图 4h 可知, GP-8/6 中的裂纹互相连接, 使部分硬质点与基体脱

离, 在摩擦试验磨合期, 硬质点就完全脱落, 但对磨痕宽度影响不大, 脱落的空位反而有利于存储润滑油。

图 9 为感应淬火试样的摩擦磨损形貌。可以看出, 铸态试样表面的石墨露头成片状, 随着感应淬火的功率升高与时间延长, 石墨发生球化, 这与金相检验结果一致, 此外, 表面犁沟的深浅与硬度测试结果也有较好的对应性。铸态与 GP-6/2 由于基体较软, 在磨损过程中, 石墨露头处的金属基体易发生蠕曲、剥离, 若在长时间摩擦工况下, 将会出现金属剥离, 使石墨暴露, 导致石墨快速损耗, 又暴露出新的金属的恶性循环, 说明该试样并不利于长期工作, 使用寿命较短。在 GP-6/4 与 GP-8/2 的磨损形貌中还观察到塑性变形, 说明表面硬化层并不连续, 软相产生切向的塑性变形, 又在硬相边界堆积, 形成挤压唇。在

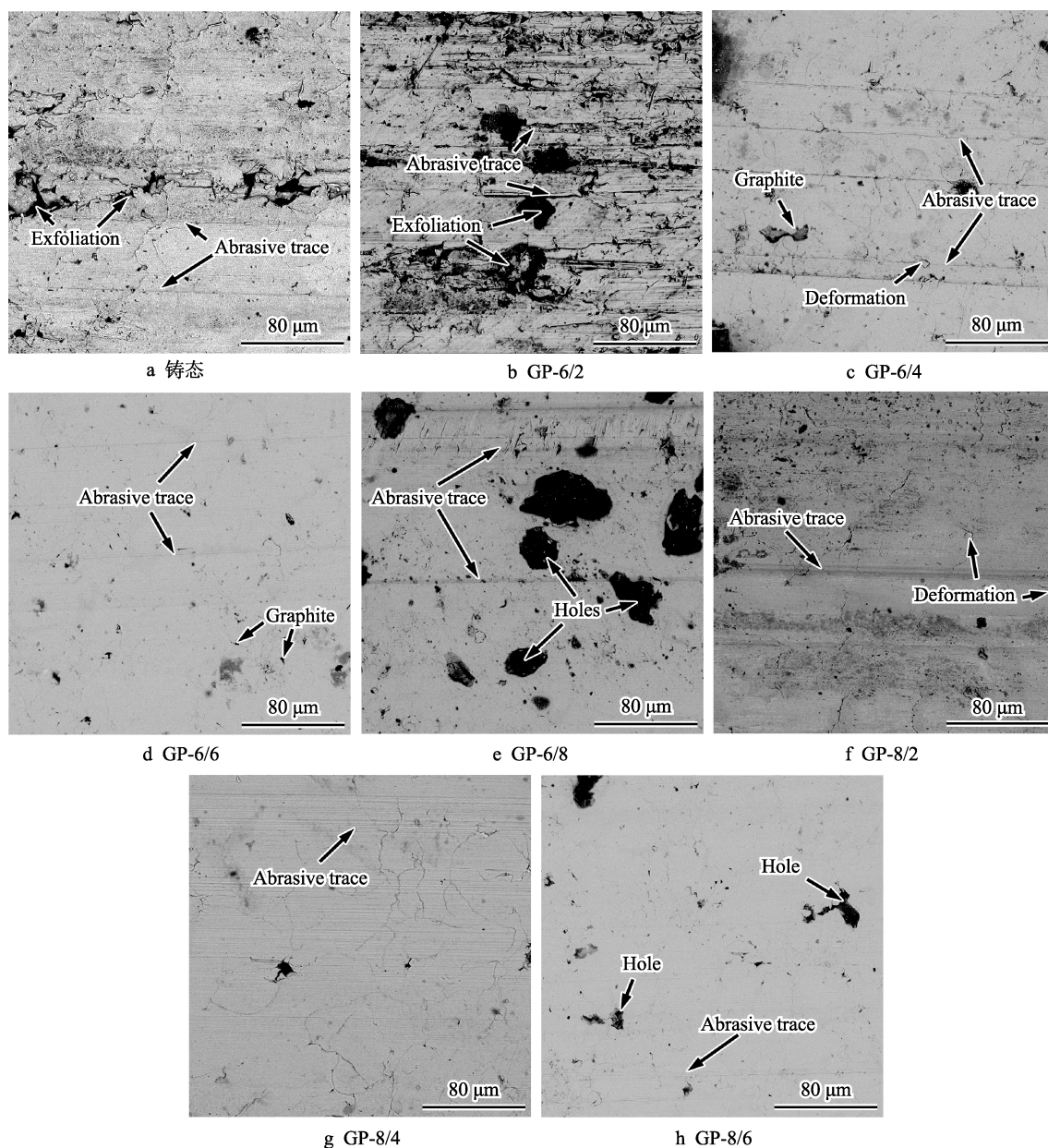


图 9 感应淬火试样磨损形貌

Fig.9 Wear morphology of induction hardening samples: a) as-cast

GP-6/8 与 GP-8/6 的磨损形貌中还观察到较大的孔洞, 这些孔洞应该是由感应淬火过程中裂纹所导致的金属基体成块脱落而产生。

### 3 结论

1) 当合金铸铁温度达到 656.0 °C 时, 开始奥氏体形核, 淬火后, 奥氏体转变为马氏体, 淬火组织为珠光体、马氏体、石墨、磷共晶。随加热时间延长, 马氏体增多, 珠光体与磷共晶含量不断减少, 直至 6 kW/8 s、8 kW/6 s 时消失。失去珠光体作为缓冲, 在马氏体转变阶段出现淬火裂纹。此外, 在 8 kW/2 s 时, 还观察到珠光体片层间距增大的现象。

2) 合金铸铁经感应淬火后, 硬化层由外至内分为硬化区、过渡区、软化区 3 个区域。硬化区硬度存在饱和现象, 饱和硬度在 50HRC 左右, 且感应加热时间与硬化区硬度符合 Logistic 曲线关系; 过渡区宽度在 2 mm 左右, 硬度持续下降; 软化区硬度比基体低, 是由于加热时特定的温度区间所造成的。

3) 感应淬火有效改善了合金铸铁油摩擦性能, GP-6/6 具有最优的综合摩擦性能, 磨痕宽度为 0.78 mm, 摩擦系数为 0.11。磨痕宽度受裂纹形态影响, 不连续的裂纹在摩擦过程中持续扩展, 持续脱落的质点加剧磨损, 磨痕宽度变宽, 而连续的裂纹形成的孔洞可以存储润滑油, 磨痕宽度变窄。

### 参考文献:

- [1] ORLOWICZ A W, MROZ M, TUPAJ M, et al. Shaping the microstructure of cast iron automobile cylinder liners aimed at providing high service properties[J]. Archives of foundry engineering, 2015, 15(2): 79-84.
- [2] REJOWSKI E D, SOARES E, ROTH I, et al. Cylinder liner in ductile cast iron for high loaded combustion diesel engines[J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2012, 134(7): 072807.
- [3] 徐安桃, 李锡栋, 周慧, 等. 基于灰色补偿 BP 神经网络优化组合模型的车辆装备冷却系腐蚀预测[J]. 装备环境工程, 2018, 15(11): 123-128.  
XU An-tao, LI Xi-dong, ZHOU Hui, et al. Corrosion prediction of vehicle equipment cooling system based on grey compensation BP neural network combined model [J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(11): 123-128.
- [4] POOLTHONG N, NOMURA H. Effect of alloying elements on structure and mechanical properties of semi-solid processed cast iron[J]. International journal of cast metals research, 2003, 15(5): 523-530.
- [5] MOONESAN M, RAOUF A H, MADAH F, et al. Effect of alloying elements on thermal shock resistance of gray cast iron[J]. Journal of alloys and compounds, 2012, 520: 226-231.
- [6] CATIPOVIC N, ZIVKOVIC D, DADIC Z. The effects of molybdenum and manganese on the mechanical properties of austempered ductile iron[J]. Tehnicki vjesnik-technical gazette, 2018, 25(2): 635-642.
- [7] ABBASI H R, BAZDAR A, HALVAEE A. Effect of phosphorus as an alloying element on microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron[J]. Materials science and engineering A, 2007, 444(1-2): 314-317.
- [8] 王庚祥, 刘宏昭. 多体系统动力学中关节效应模型的研究进展[J]. 力学学报, 2015, 47(1): 31-50.  
WANG Geng-xiang, LIU Hong-zhao. Research progress of joint effects model in multibody system dynamics[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2015, 47(1): 31-50.
- [9] LUCIA O, MAUSSION P, DEDE E J, et al. Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2014, 61(5): 2509-2520.
- [10] SLATTER T, LEWIS R, JONES A H. The influence of induction hardening on the impact wear resistance of compacted graphite iron (CGI)[J]. Wear, 2011, 270(3-4): 302-311.
- [11] 程祥军, 黄国龙, 刘军, 等. 不同表面技术对挺柱组织及耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 119-125.  
CHENG Xiang-jun, HUANG Guo-long, LIU Jun, et al. Effect of different surface treatment on tappet microstructure and wear resistance[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 119-125.
- [12] AUTAY R, KCHAOU M, DAMMAK F. Friction and wear behaviour of induction hardened ISO 42CrMo4 low-alloy steel under reciprocating sliding conditions[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part J: Journal of engineering tribology, 2015, 229(2): 115-125.
- [13] KARACA B, SIMSIR M. The effects of heat treatment on the tensile properties of camshaft made of GGG70 series spherical graphite cast iron[J]. Acta physica polonica A, 2019, 135(4): 811-818.
- [14] 张根元, 奚小青, 张维颖. 感应淬火工艺参数优化和组织硬度分布预测[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(6): 174-179.  
ZHANG Gen-yuan, XI Xiao-qing, ZHANG Wei-ying. Optimization of induction quenching process parameters and prediction of microstructure and hardness distribution for S45C steel shaft[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2013, 34(6): 174-179.
- [15] 丛树林, 时海芳, 姜昕彤, 等. 磨削淬火强化层与高频感应淬火强化层的对比研究[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 71-72.  
CONG Shu-lin, SHI Hai-fang, JIANG Xin-tong, et al. Study on comparison of grinding hardened layer with induction hardened layer[J]. Surface technology, 2012, 41(3): 71-72.
- [16] QIN X P, GAO K, WANG Z, et al. Effect of spot continual induction hardening on the tribological performance of grey cast iron with curved surface[J]. Tribology transactions, 2018, 61(1): 185-193.
- [17] 姜影, 刘志义, 郑业方. 9Cr18MoV 马氏体不锈钢的感

- 应淬火工艺[J]. 金属热处理, 2018, 43(8): 206-208.
- JIANG Ying, LIU Zhi-yi, ZHENG Ye-fang. Induction hardening process of 9Cr18MoV martensitic stainless steel[J]. Heat treatment of metals, 2018, 43(8): 206-208.
- [18] WANG G, CHEN X, LI Y, et al. Effects of inoculation on the pearlitic gray cast iron with high thermal conductivity and tensile strength[J]. Materials, 2018, 11(10): 1876.
- [19] 韩成府, 路王珂, 孙玉福, 等. 磷对铝电解阳极用磷铸铁组织及性能的影响[J]. 铸造, 2017, 66(6): 613-617.
- HAN Cheng-fu, LU Wang-ke, SUN Yu-fu, et al. Effect of phosphorus on the microstructure and properties of phosphorus cast iron for the anode of aluminium electrolytic[J]. Foundry, 2017, 66(6): 613-617.
- [20] KINOSHITA T, KOHARA K, SHIMOJI H, et al. Effects of heat treatment under strong magnetic field of 1 T or more on magnetic properties of non-oriented electrical steel sheet[J]. IEEE transactions on magnetics, 2018, 54(11): 1-5.
- [21] IJIMA Y. Diffusion in high-purity iron: Influence of magnetic transformation on diffusion[J]. Journal of phase equilibria and diffusion, 2005, 26(5): 466-471.
- [22] 魏铁石, 王晶, 黄宝旭, 等. 连续加热球墨铸铁奥氏体化转变动力学[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(1): 152-158.
- WEI Tie-shi, WANG Jing, HUANG Bao-xu, et al. Austenite transformation kinetics of ductile cast irons during continuous heating[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2018, 39(1): 152-158.
- [23] QI X B, ZHU S G. Effect of electric contact surface treatment on microstructure and wear behaviour of ductile iron[J]. Materials science and technology, 2013, 29(11): 1310-1316.
- [24] HOMBERG D, LIU Q Z, MONTALVO-URQUIZO J, et al. Simulation of multi-frequency-induction-hardening including phase transitions and mechanical effects[J]. Finite elements in analysis and design, 2016, 121: 86-100.
- [25] 刘宗昌, 计云萍, 任慧平. 固态相变研究新观察、新发现、新理论[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(1): 100-110.
- LIU Zong-chang, JI Yun-ping, REN Hui-ping. New observation, new discoveries and new theory of solid state phase transformation[J]. Ordnance material science and engineering, 2015, 38(1): 100-110.
- [26] 王文宇, 刘德义, 赵秀娟, 等. 球化退火态重载车轮钢 CL70 磨损性能及组织演化[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(3): 357-365.
- WANG Wen-yu, LIU De-yi, ZHAO Xiu-juan, et al. Wear behavior and microstructure evolution of spheroidized annealed heavy load wheel steel CL70[J]. Tribology, 2019, 39(3): 357-365.
- (上接第 217 页)
- [6] FENG Z Z, XU H Y, YAN F Y. Preparation of flame sprayed poly(tetrafluoroethylene-co-hexafluoropropylene) coatings and their tribological properties under water lubrication[J]. Applied surface science, 2008, 255(5): 2408-2413.
- [7] 林锐, 刘朝辉, 王飞, 等. 镁合金表面改性技术现状研究[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 124-131.
- LIN R, LIU Z H, WANG F, et al. Development of corrosion surface modification technology for magnesium alloys[J]. Surface technology, 2016, 45(4): 124-131.
- [8] 王铀. 热喷涂纳米涂层 20 年回顾与展望[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 1-9.
- WANG Y. Review and prospects for 20-year development of thermal sprayed nanocoatings[J]. Surface technology, 2016, 45(9): 1-9.
- [9] ZHANG L W, CHEN J D, XIE B, et al. Formation of antithermal shock composite membrane on aluminum alloy through anodic oxidation[J]. Advanced materials, 2011, 239-242: 1414-1417.
- [10] WANG Y X, WANG L P, XUE Q J. Improvement in the tribological performances of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , SiC and WC by graphite-like carbon films under dry and water-lubricated sliding conditions[J]. Surface and coatings technology, 2011, 205(8-9): 2770-2777.
- [11] 高溥, 袁何东, 郑韶先, 等. 碳基和氮化物基涂层的摩擦-腐蚀交互行为的原位研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(2): 138-146.
- GAO P, HE D Q, ZHENG S X, et al. In-situ study of tribocorrosion behavior of carbon-based and nitride-based coatings[J]. Tribology, 2015, 35(2): 138-146.
- [12] 陈颢, 叶育伟, 王永欣, 等. 海水环境下均质和梯度 CrCN 薄膜摩擦学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(8): 2036-2040.
- CHEN H, YE Y W, WANG Y X, et al. Tribological properties of uniform and gradient CrCN coatings in seawater[J]. Rare metal materials and engineering, 2016, 45(8): 2036-2040.
- [13] 汪陇亮, 孙润军, 单磊, 等. CrAlN 涂层海水环境腐蚀磨损行为研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 639-646.
- WANG L L, SUN R J, SHAN L, et al. Tribocorrosion behaviors of CrAlN coating in seawater[J]. Tribology, 2017, 37(5): 639-646.
- [14] WU Z W, ZHOU F, WANG Q Z. Friction and wear properties of CrSiCN/SiC tribopairs in water lubrication[J]. Journal of materials engineering and performance, 2018, 27(6): 2885-2898.
- [15] CHEN N C, SUN F H. Friction and wear performances of hot filament chemical vapor deposition multilayer diamond films coated on silicon carbide under water lubrication[J]. J Shanghai Jiaotong Univ (sci), 2013, 18(2): 237-242.
- [16] 张而耕, 陈强. PECVD 制备 DLC 复合薄膜性能及模具应用[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 298-304.
- ZHANG E G, CHEN Q. Properties of DLC composite films prepared by PECVD and application of mold[J]. Surface technology, 2019, 48(1): 298-304.
- [17] 章杨荣. CrAlN 涂层的制备及其海洋摩擦学性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- ZHANG Y R. Preparation and tribological behaviors in seawater of CrAlN coating[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.