

# 等温淬火处理对感应重熔镍基合金涂层摩擦学性能的影响

解芳<sup>1</sup>, 翟长生<sup>1</sup>, 王迎春<sup>2</sup>, 秦晓<sup>1</sup>, 翟群智<sup>3</sup>, 李超<sup>4</sup>, 马世榜<sup>4</sup>

(1. 南阳理工学院, 河南 南阳 473004; 2. 河南工业大学, 郑州 450001;  
3. 西安交通大学, 西安 710049; 4. 南阳师范学院, 河南 南阳 473061)

**摘要:** 目的 改善镍基合金涂层的摩擦学性能。方法 分别采用感应重熔工艺及感应重熔-等温淬火一体化工艺, 在 GCr15 钢基体表面制备了两种镍基合金涂层, 并通过销盘摩擦磨损试验、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、显微硬度测试对其摩擦磨损性能、微观组织、表面硬度进行了对比研究, 探讨了等温淬火处理对感应重熔镍基合金涂层摩擦学性能、微观组织、表面硬度的影响, 揭示了其增强机理。结果 经等温淬火后的重熔涂层比感应重熔涂层具有更低的摩擦系数和磨损失重, 摩擦稳定阶段的摩擦系数为 0.301, 比后者低 23.8%, 相对耐磨性是后者的 1.71 倍。感应重熔涂层同时存在着磨粒磨损和粘着磨损两种机制, 而经等温淬火后的重熔涂层以磨粒磨损为主, 比前者具有更优异的抵抗磨粒磨损和粘着磨损的能力。感应重熔涂层及经等温淬火处理后的重熔涂层平均显微硬度分别为 818.0、873.6HV<sub>0.5</sub>, 硬度极差分别为 170.9、132.6HV<sub>0.5</sub>, 形状参数分别为 18.5057、22.6189, 后者比前者具有更高的平均硬度值、更小的硬度极差以及更加稳定的涂层性能。经过微观组织分析发现, 重熔涂层在经等温淬火处理后, 其晶粒的细化、硬质相的相对均质弥散性、共晶相的减少、丰富的耐磨陶瓷相和快速凝固的定向晶粒结构的协同作用, 是其具有优异的显微硬度 Weibull 分布特性, 以及耐磨性得到进一步提高的根本原因。**结论** 合适的等温淬火热处理工艺能够改善感应重熔镍基合金涂层的微观组织, 从而有效减小其摩擦系数, 并提高其耐磨性。

**关键词:** 镍基合金涂层; 感应重熔; 等温淬火; 摩擦磨损; 微观组织; 显微硬度; 增强机理

**中图分类号:** TG174.4   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1001-3660(2020)04-0205-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.023

## Effect of Isothermal Quenching on Tribological Properties of Induction Remelting Nickel-based Alloy Coatings

XIE Fang<sup>1</sup>, ZHAI Chang-sheng<sup>1</sup>, WANG Ying-chun<sup>2</sup>, QIN Xiao<sup>1</sup>,  
ZHAI Qun-zhi<sup>3</sup>, LI Chao<sup>4</sup>, MA Shi-bang<sup>4</sup>

(1. Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China; 2. Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

收稿日期: 2019-07-25; 修定日期: 2020-03-07

Received: 2019-07-25; Revised: 2020-03-07

基金项目: 国家自然科学基金 (51605230); 河南省高等学校重点科研项目 (17B430003); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2016GGJS-148)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51605230), Key Research Program of Higher Education Institutions of Henan Province (17B430003) and Training Program for University Young Key Teachers of Henan Province (2016GGJS-148)

作者简介: 解芳 (1981—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为摩擦学理论及其工业应用。邮箱: xiefang811222@163.com

Biography: XIE Fang (1981—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: tribology theory and its application. E-mail: xiefang811222@163.com

引文格式: 解芳, 翟长生, 王迎春, 等. 等温淬火处理对感应重熔镍基合金涂层摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 205-212.

XIE Fang, ZHAI Chang-sheng, WANG Ying-chun, et al. Effect of isothermal quenching on tribological properties of induction remelting nickel-based alloy coatings[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 205-212.

3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the tribological properties of nickel-based alloy coatings. Two kinds of nickel-based alloy coatings were prepared on the surface of GCr15 steel by induction remelting and its isothermal quenching respectively. The friction and wear properties, microstructures and surface hardness of the two kinds of nickel-based alloy coatings were investigated comparatively by pin-disc friction and wear tests, scanning electron microscopy, X-ray diffractometer and microhardness tests. The effects of isothermal quenching treatment on the tribological properties, microstructure and surface hardness of nickel-based alloy coatings prepared by induction remelting were investigated, and the strengthening mechanism was revealed. The friction coefficient and wear loss of the remelting coatings after isothermal quenching were lower than that of the induction remelting coatings. The friction coefficient during the friction stabilization stage of the remelting coatings after isothermal quenching was 0.301, 23.8% lower than that of the latter, and the relative wear resistance was 1.71 times as much as that of the latter. There were two mechanisms of abrasive wear and adhesive wear in induction remelting coatings, while the remelting coatings after isothermal quenching were dominated by abrasive wear and had better resistance to abrasive wear and adhesive wear than the former. The average microhardness of the induction remelting coating and the coating after isothermal quenching was 818.0HV<sub>0.5</sub> and 873.6HV<sub>0.5</sub> respectively, the extreme hardness difference was 170.9HV<sub>0.5</sub> and 132.6HV<sub>0.5</sub> respectively, and the shape parameters were 18.5057 and 22.6189 respectively, thus the latter had higher average hardness, smaller extreme hardness difference and more stable coating properties than the former. Microstructure analysis showed that the synergistic effect of grain refinement, relative homogeneity and dispersion of hard phase, reduction of eutectic phase, abundant wear-resistant ceramic phase and directional grain structure of rapid solidification was the root cause of the excellent Weibull distribution of microhardness and the further improvement of the wear resistance. Therefore, the appropriate isothermal quenching heat treatment process can improve the microstructure of nickel-based alloy coating, thus effectively reducing the friction coefficient of the coating and improving its wear resistance.

**KEY WORDS:** nickel-based alloy coatings; induction remelting; isothermal quenching; friction and wear; microstructure; microhardness; strengthening mechanism

磨损、腐蚀、疲劳破坏是设备零件表面失效的三个主要原因，特别是恶劣工况条件下，大部分零件表面的损坏会导致设备运行的失效，因此研制具有优良耐磨、耐腐蚀、抗疲劳特性的材料已成为业界关注的热点<sup>[1-6]</sup>。目前，高硬度镍基自熔性合金因其具有优异的综合性能，如耐磨、耐蚀、抗氧化和抗高温磨损等，被广泛用于零部件表面的强化与修复<sup>[7-15]</sup>。

传统的表面强化与修复技术主要采用激光熔覆、等离子喷焊、火焰喷焊等工艺制备镍基自熔性合金涂层。然而，激光熔覆的生产效率较低，且生产成本较高，不适用于大型零部件的表面强化和修复；火焰喷焊和等离子喷焊容易导致待强化零部件的变形和基体变性，因而制约了其广泛应用<sup>[16]</sup>。

为了解决上述问题，笔者课题组前期将热喷涂技术、感应加热技术、智能控制技术、人机交互技术融为一体，成功开发了具有自主知识产权的高效智能感应重熔工艺<sup>[16-19]</sup>，实现了感应重熔生产过程的智能跟踪可控，有效减小了金属基体热损伤和变形，不仅改善了涂层质量，而且提高了生产效率，降低了生产成本，改善了工人的劳动环境。然而，单一的表面强化工艺已不能满足特种环境的应用，科研工作者试图通过复合技术进一步提升涂层的性能，如 Xu 等<sup>[20]</sup>通过电接触表面强化对 Ni-40WC 感应重熔涂层进行表面

改性。杨效田等<sup>[21-23]</sup>采用定向凝固法对 Ni60/铝青铜感应重熔涂层进行强化处理，使重熔涂层的耐磨性得到改善。而将感应重熔工艺与等温淬火热处理进行复合利用，制备高性能镍基合金涂层的研究尚未见报道。基于此，本文拟采用高效智能感应重熔工艺制备镍基合金重熔涂层，并对重熔涂层进行等温淬火处理，以探讨等温淬火处理对感应重熔镍基合金涂层摩擦磨损性能的影响，以期获得具有更加优异的涂层组织、力学性能、摩擦学性能的镍基合金涂层。

## 1 试验

### 1.1 试验材料及涂层制备

本试验的涂层材料选用武汉汉工智造新材料科技有限公司生产的 NF201 镍基自熔性合金粉末，其化学成分如表 1 所示，粒度为 45~106 μm。涂层制备前，先对基体表面进行清洗和喷砂粗糙活化处理，再

表 1 NF201 粉末的化学成分  
Tab.1 Chemical components of the NF201 powers

C	Cr	Si	B	Fe	Ni	wt.%
0.5~1.0	14~19	3.5~5.0	3.0~4.5	<8.0	Bal.	

利用高能火焰喷涂在 GCr15 钢基体表面预制备厚度为 1 mm 的涂层。所用设备为河南汉工机械再制造技

术有限公司自主研制的 HG-FMS-II 型在线高能火焰喷涂系统，工艺参数见表 2。

表 2 高能火焰喷涂工艺参数  
Tab.2 Process parameters of high-energy flame spraying

Oxygen pressure /MPa	Acetylene pressure /MPa	Air pressure /MPa	Oxygen flux /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Acetylene flux /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Air flux /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Powder feed rate /(kg·h <sup>-1</sup> )	Spraying distance /mm
0.45	0.08	0.25	1.6	0.8	1.5	6	185

涂层工艺制度如图 1 所示，为了对比研究等温淬火前后镍基合金重熔涂层的特性，分别采用感应重熔工艺（图 1 中 Step1）及感应重熔-等温淬火一体化工艺（图 1 中 Step1 和 Step2）对预制备的涂层进行重熔及热处理，获得感应重熔涂层和等温淬火重熔涂层两种涂层。

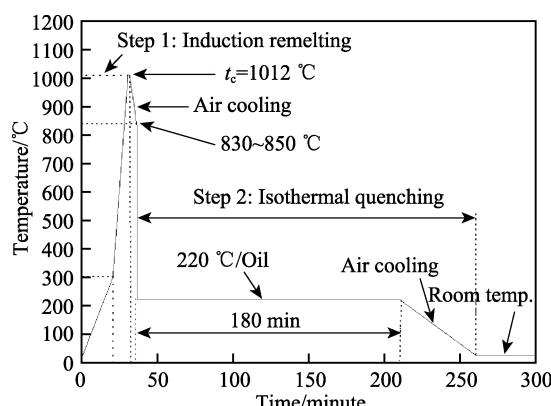


图 1 感应重熔工艺及感应重熔-等温淬火一体化工艺制度  
Fig.1 Induction remelting process and induction remelting isothermal quenching integrated process system

其中，感应重熔（Induction Remelting）所用设备为河南汉工机械再制造技术有限公司自主研制的高效智能感应重熔系统。该系统利用“功率-温度”的自适应 PID 闭环控制，其 PLC 能够根据涂层的重熔温度自动调节加热功率的输出，以保证重熔温度的稳定性，从而实现重熔涂层质量的均匀性和一致性。感应重熔过程中，涂层材料的预热温度为 300 °C，重熔温度为 1012 °C，精度为±3 °C。等温淬火是将上述感应重熔后的试样先空冷至 830~850 °C，再迅速放置于油温为 220 °C 的淬火液中保温 180 min，最后取出空冷至室温。

## 1.2 性能测试及组织观察

1) 利用 MM-W1A 万能摩擦磨损试验机进行销盘摩擦磨损试验。盘状摩擦试样的尺寸为 φ30 mm×10 mm，其对偶摩擦销选用淬火 GCr15 轴承钢，硬度为 63HRC，销尺寸 φ4.5 mm×13 mm。摩擦条件为：室温，干摩擦，试验机主轴转速 50 r/min，载荷 50 N，摩擦时间 60 min。

2) 利用 HXD-1000 型显微硬度计对两种重熔涂层的显微硬度进行测试，压头载荷 500 g，保荷时间 15 s。

3) 对两种重熔涂层试样进行切样、嵌样、磨样和抛光，以制备金相试样。利用附带电子背散射衍射系统和能谱仪的 Quanta 250 FEG 型场发射扫描电子显微镜（SEM/EDS），分别对两种重熔涂层及压痕进行微观组织测试和元素分析。

4) 采用 D-MAXLL A 型 X 射线衍射仪分别对两种重熔涂层的物相进行分析。衍射仪的扫描速度为 2 (°)/min，步长为 0.02°，扫描范围为 30°~80°。

## 2 结果及分析

### 2.1 重熔涂层的摩擦学行为

感应重熔涂层及等温淬火重熔涂层的摩擦曲线如图 2 所示，二者在稳定阶段的平均摩擦系数、绝对磨损失重如表 3 所示。由图表可知，在其他工艺参数相同的条件下，等温淬火重熔涂层在稳定摩擦阶段具有更低的摩擦系数和更小的离散特性，其稳定阶段的摩擦系数为 0.301，比感应重熔涂层的摩擦系数（0.395）小 23.8%。等温淬火重熔涂层的磨损失重为 0.0153 g，仅为感应重熔涂层磨损失重（0.0262 g）的 58.4%。为了进一步对比两种重熔涂层的耐磨损性能，以相对耐磨性对其进行评价。相对耐磨性是指在试验条件相同的情况下，标准试样材料的磨损失重与待测试样的磨损失重的比值，其表达式如下：

$$\varepsilon_{\text{r}} = \frac{m_s}{m_{\text{un}}} \quad (1)$$

将感应重熔涂层作为标准试样，等温淬火重熔涂层作为待测试样，利用式(1)和表 3 中二者的绝对磨损失重值，可以得到等温淬火重熔涂层相对耐磨性是感应重熔涂层的 1.71 倍。由此可知，合适的等温淬火热处理工艺可以有效降低镍基合金重熔涂层的摩擦系数，并提高其抗磨损能力。

图 3 所示为两种重熔涂层的磨损表面 SEM 形貌。通过对比分析发现：感应重熔涂层的磨损表面分布着相对密集的微犁削磨痕（如图 3a 箭头 1 所示），此外其摩擦表面存在相对密布、面积占比较大的粘着磨损磨痕（如图 3a 箭头 2 所示）。这是由于涂层在轻微粘着磨损过程中发生了细小磨屑的迁移，进而粘附在摩擦表面或脱落成磨屑。因此，感应重熔涂层同时存在微犁削磨损和粘着磨损。而等温淬火重熔涂层的磨损表面仅有微量的微犁削磨痕（如图 3b 箭头 3 所示），

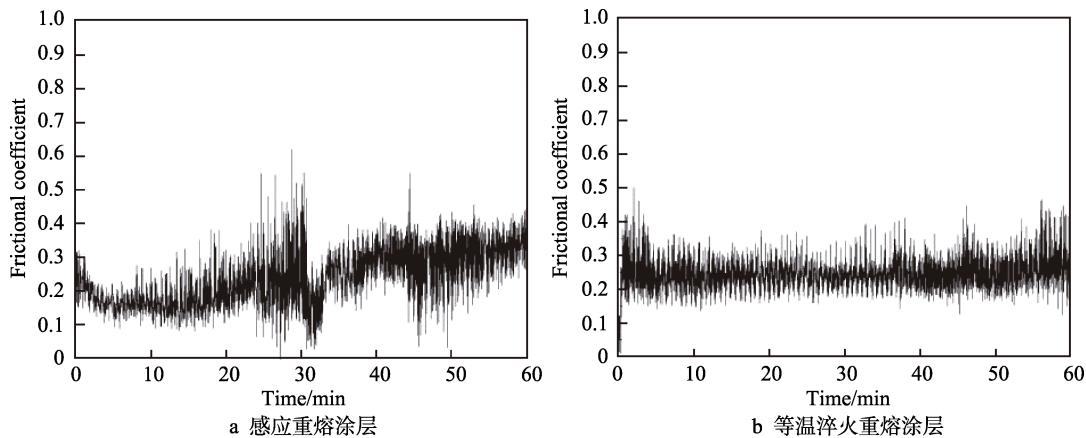


图2 重熔涂层摩擦曲线

Fig.2 Friction curve of remelting coatings: a) induction remelting coating; b) remelting coating after isothermal quenching

表3 重熔涂层的平均摩擦系数及耐磨性  
Tab.3 Average friction coefficient and wear resistance of the remelting coatings

Tribological parameters	Induction remelting coating	Remelting coating after isothermal quenching
Friction coefficient	0.395	0.301
Absolute weight loss/g	0.0262	0.0153
Relative wear resistance	1	1.71

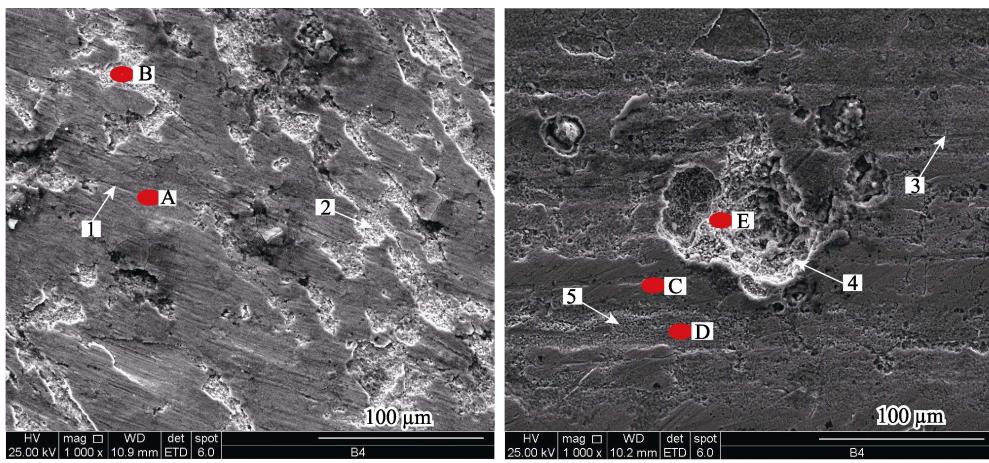


图3 重熔涂层的磨痕形貌

Fig.3 Wear scar morphology of remelting coatings: a) induction remelting coating;  
b) remelting coating after isothermal quenching

以及少量的粘着磨痕面（图3b箭头4所示）和粘着磨损磨削（图3b箭头5所示）。

为了进一步分析摩擦表面状态，利用EDS对图3所示感应重熔涂层的磨痕表面微区A、B，以及等温淬火重熔涂层的磨痕表面微区C、D、E的主要元素进行扫描分析，其能谱图和磨痕成分分别如图4、表4所示。通过对分析可知：两种重熔涂层磨痕表面的氧元素含量均较多，且铬元素含量均明显高于镍元素含量，表明两种重熔涂层中的铬元素比镍元素具有更高的亲氧能力，因而发生了铬的氧化。两种重熔涂层磨痕表面均含有大量的铁，这是由于

在摩擦过程中，其对偶件GCr15轴承钢中的铁元素发生了迁移，附着在重熔涂层表面，从而使重熔涂层磨痕表面富含铁及其氧化物。在微犁削磨损区域，等温淬火重熔涂层磨痕（微区C）表面的含氧量明显低于感应重熔涂层（微区A），表明等温淬火重熔涂层的抗磨粒磨损能力优于感应重熔涂层；在粘着磨损区域，等温淬火重熔涂层磨痕（微区D、E）表面的含氧量明显高于感应重熔涂层（微区B），这说明在摩擦过程中，粘着磨损区域的温度更高，证明了合理的等温淬火热处理工艺可以明显改善感应重熔涂层的抗粘着磨损性能。

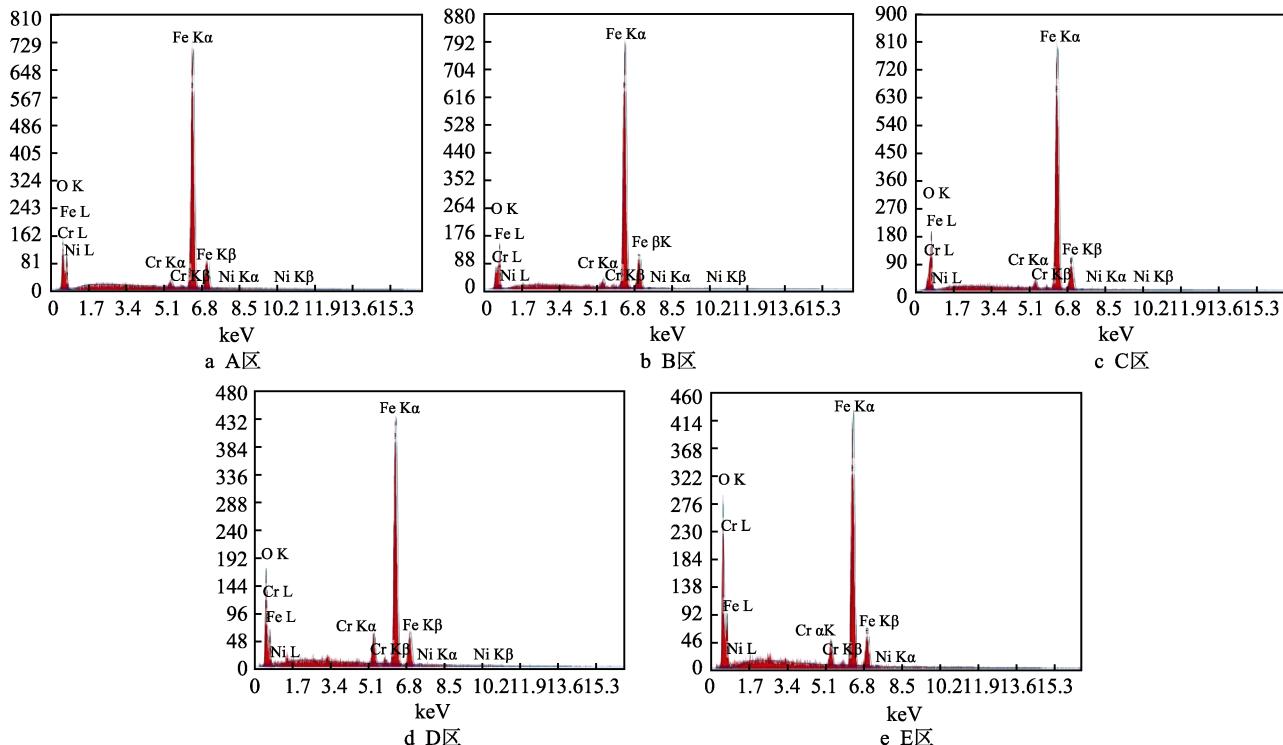


图4 重熔涂层磨痕区域面能谱分析

Fig.4 EDS plane scanning analysis of wear scar of the remelting coating: a) zone A; b) zone B; c) zone C; d) zone D; e) zone E

表4 重熔涂层磨痕的EDS微区扫描成分

Tab.4 EDS microarea scanning composition of wear scar of the remelting coating

wt.%

Element	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone E
O K	13.28	5.66	2.50	20.03	30.20
Cr K	1.27	1.56	1.70	4.75	3.16
Fe K	85.09	92.16	95.33	74.51	66.16
Ni K	0.36	0.62	0.47	0.71	0.48

## 2.2 重熔涂层微观组织及增强机理

### 2.2.1 重熔涂层微观组织演变及其与摩擦学耦合机制

感应重熔涂层及等温淬火重熔涂层摩擦学特性

的差异,反映了两种重熔涂层微观组织的差异。图5所示为两种工艺的重熔涂层表面SEM形貌。由图可知,感应重熔涂层主要由大面积的亮白色组织、弥散分布的黑色组织(如图5a箭头1—3)和灰色组织(图5a箭头4)组成。结合文献[20-22]的研究成果可知,亮白色组织为Ni固溶体;弥散分布的黑色组织为碳化物、硼化物等硬质相;而灰色组织为Ni、Cr合金的软质共晶组织。与感应重熔涂层相比,等温淬火重熔涂层的组织更为致密,其黑色硬质相(如图5b箭头5—8)的晶粒明显细化,且分布更加均匀,而灰色软质相含量则大幅度减少。

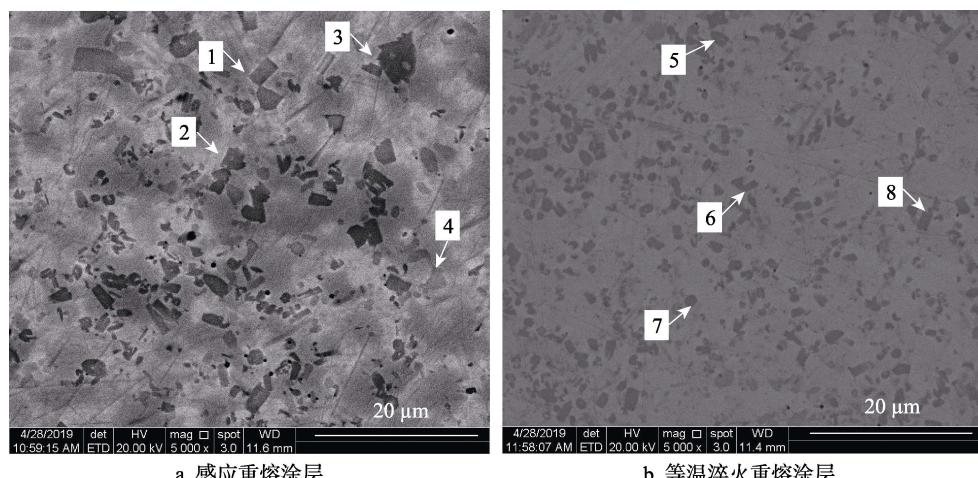


图5 重熔涂层表面SEM形貌

Fig.5 SEM surface morphology of the remelting coatings: a) induction remelting coating; b) remelting coating after isothermal quenching

为了进一步分析涂层微观组织与摩擦学性能的内在联系,对两种重熔涂层分别进行了面能谱分析,如图6所示。其中图6a为感应重熔涂层Cr元素、Ni元素的分布情况;图6b为等温淬火重熔涂层Cr元素、Ni元素的分布情况。通过对比分析可知:感应重熔涂层中的Cr元素局部富集,形成了贫铬区和富铬区,表明感应重熔涂层中的硬质相分布均匀性较差;而等

温淬火重熔涂层中的Ni元素和Cr元素的分布均匀性和弥散性均明显优于感应重熔涂层,说明了等温淬火重熔涂层中,各相组织具有更为优异的弥散分布特征。因此,重熔涂层的微观组织与其摩擦学特性具有内在的耦合关系,等温淬火重熔涂层的晶粒细化、硬质相的相对均质弥散性、软质共晶相的减少,是其具有更小的摩擦系数和更高耐磨性的主要原因。

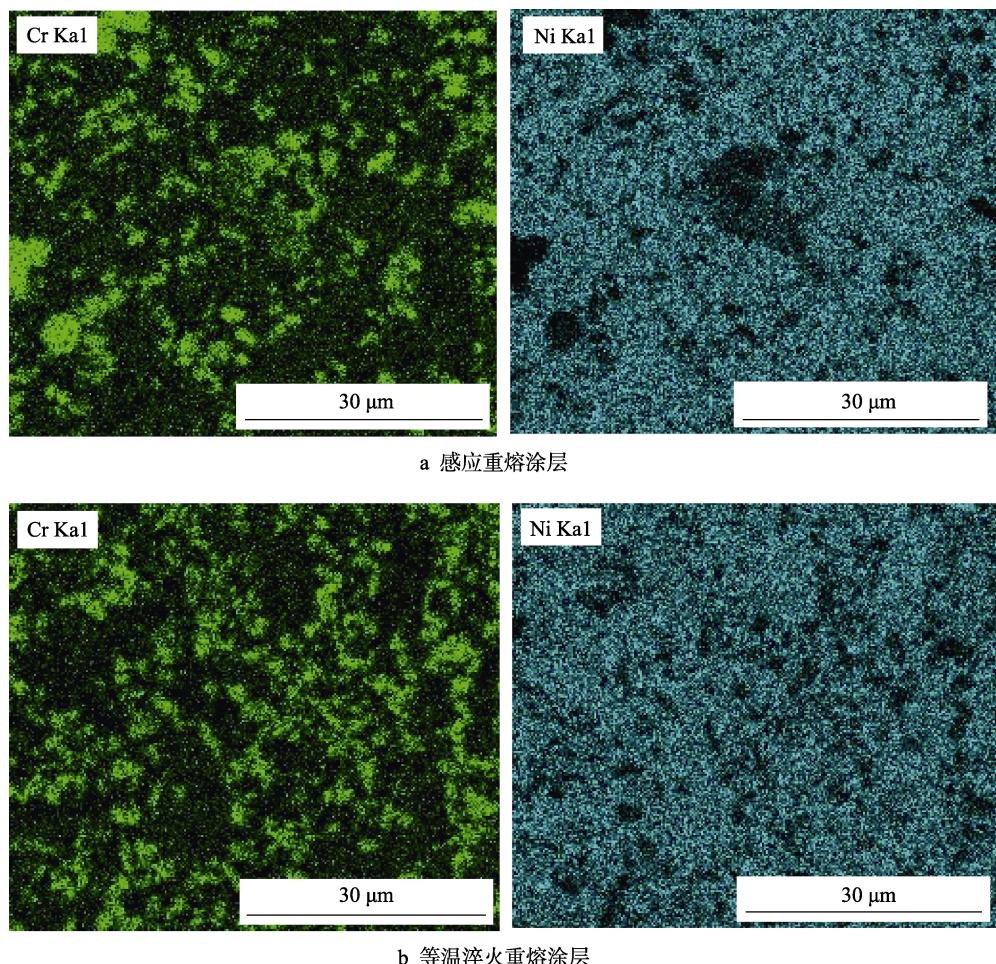


图6 重熔涂层区域面能谱分析

Fig.6 EDS plane scanning analysis of remelting coatings: a) induction remelting coating b) remelting coating after isothermal quenching

## 2.2.2 重熔涂层的物相演变及其对摩擦学性能的影响

图7所示为两种重熔涂层的XRD图谱。由图可知,两种重熔涂层的物相均由 $\gamma$ -Ni固溶体、Ni与其他元素的共晶体、碳化物及硼化物硬质相等组成,其硬质相包括 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $\text{Fe}_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Cr},\text{Fe})_7\text{C}_3$ 、 $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 等,共晶相由 $\text{Ni}_3\text{Si}_2$ 、 $\text{Ni}_4\text{B}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{Si}_{0.4}\text{B}_{0.6}$ 、 $\text{B}(\text{Fe},\text{Si})_3$ 、 $\text{Cr}_3\text{Ni}_5\text{Si}_2$ 、 $\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_{18.6}\text{B}_6$ 、 $\text{Cr}_{5-x}\text{Si}_{3-z}\text{C}_{5+z}$ 等组成。与感应重熔涂层相比,等温淬火重熔涂层的物相发生了演变,其硬质相 $\text{Fe}_7\text{C}_3$ 和共晶相 $\text{Fe}_2\text{Si}_{0.4}\text{B}_{0.6}$ 、 $\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_{18.6}\text{B}_6$ 消失,同时生成了新的硬质相 $\text{Cr}_7\text{BC}_4$ 、 $\text{CrB}_4$ 和 $\text{Fe}_3\text{C}$ 以及新的共晶相 $\text{Ni}_{16}\text{Cr}_6\text{Si}_7$ 。新硬质相的生成,对于提高重熔涂层的抗磨性有积极效应。由此可知,感应

重熔涂层经等温淬火后,物相会发生演变。感应重熔是以感应加热为热源,其特有的电磁涡流形成的温度场能够促使镍基自熔性合金的充分反应,促进涂层的熔化和再结晶,从而使重熔涂层富含大量的硬质相,并形成合金化合物和固溶体。而等温淬火过程则促使感应重熔涂层快速凝固,不仅能够促进晶粒细化,使Cr、C、B等溶质元素在晶界富集,生成更多陶瓷性质的强化相,而且会形成结构取向明显的定向晶粒结构,消除横向晶界,提高纵向力学性能<sup>[7,21]</sup>。在丰富的耐磨陶瓷相和快速凝固的定向晶粒结构的共同作用下,重熔涂层经等温淬火后,其耐磨性得到进一步提高。

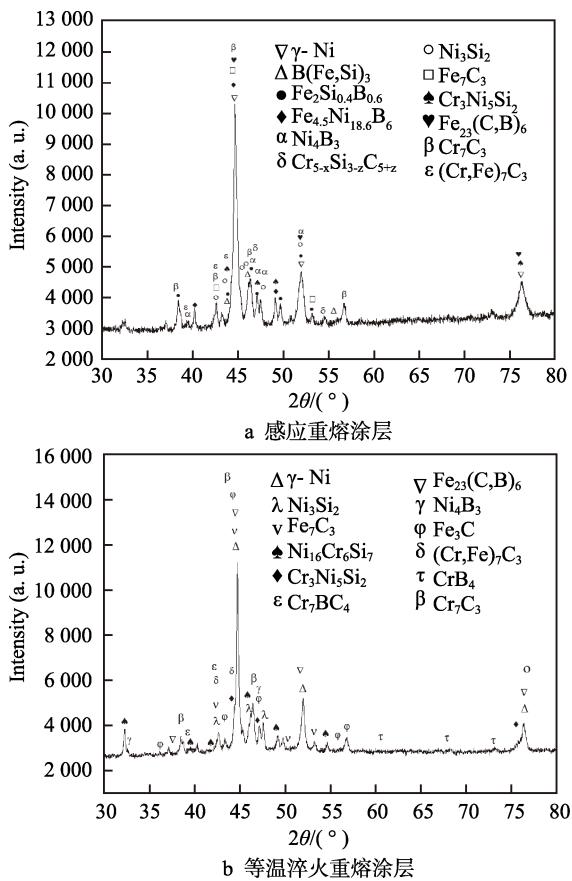


图 7 重熔涂层的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of remelting coatings: a) induction remelting coating; b) remelting coating after isothermal quenching

### 2.2.3 重熔涂层表面显微硬度分布特征

重熔涂层的显微硬度在表征材料性能方面也尤为重要。由于制备的涂层内部存在不均匀性, 从而导致了其组织内部可能会存在细小裂纹缺陷, 单凭显微硬度原始数据及其平均值很难精确描述涂层的结构性能, 为此, 本文采用 Weibull 分布对重熔涂层表面显微硬度进行描述。

Weibull 分布<sup>[24-25]</sup>的显微硬度值概率密度分布函数为:

$$F(H) = 1 - \exp[-(H/\eta)^\beta] \quad (2)$$

式中,  $H$  为显微硬度测试值,  $F$  为单个测试值对应的累积密度函数,  $\beta$  和  $\eta$  分别为形状参数和尺寸参数。其求解过程为: 1) 在坐标轴中标出  $\ln H - \ln(-\ln(1-F))$  坐标点; 2) 对所绘制的离散点进行直线拟合分析, 并求出拟合线的表达式; 3) 绘制其对应的显微硬度拟合曲线(式(3))。

表 5 重熔涂层的 Weibull 分布特征参数  
Tab.5 Weibull distribution characteristic parameters of remelting coating

Type of the coating	Surface shape parameters $\beta$	Range of surface microhardness (HV <sub>0.5</sub> )	Average of surface microhardness (HV <sub>0.5</sub> )	Limit difference of microhardness ( $\Delta HRC_{0.5}$ )
HEII-remelting coating	18.5057	746.5~917.4	818.0	170.9
Remelting coating after isothermal quenching	22.6189	819.2~951.8	873.6	132.6

$$y = kx + b \quad (3)$$

式中, 斜率  $k$  和拟合线在  $x$  轴上的截距分别就是形状参数  $\beta$  和尺寸参数  $\eta$  的值。本文中样本数为 15 个, 可以采用经验公式来进行计算, 故第  $i$  个测试值的累积密度函数  $F_i$  可表示为:

$$F_i = (i - 0.5)/n \quad (4)$$

形状参数  $\beta$  和尺寸参数  $\eta$  在表达涂层力学性能方面颇为重要, 形状参数  $\beta$  的值越大, 拟合线的离散性越低, 涂层性能越稳定, 反之, 离散性越大, 涂层性能越不稳定。本文研究的两种重熔涂层表面显微硬度测试值的 Weibull 分布和特征参数分别如图 8 和表 5 所示。由此可知, 两种重熔涂层的硬度 Weibull 分布特性有明显的区别。感应重熔涂层表面显微硬度的形状参数  $\beta_a = 18.5057$ , 而经等温淬火后的重熔涂层表面显微硬度的形状参数  $\beta_b = 22.6189$ , 比前者大 22.23%, 说明经等温淬火后的重熔涂层具有更小的离散性, 涂层性能更加稳定。感应重熔涂层及经等温淬火处理后的重熔涂层平均显微硬度分别为 818.0、873.6HV<sub>0.5</sub>, 硬度极差分别为 170.9、132.6HV<sub>0.5</sub>, 后者比前者具有更高的平均硬度值和更小的硬度极差。这是因为经等温淬火处理重熔涂层因快速冷却凝固, 形成了定向结构晶粒的取向特征以及硬质相对枝晶的包裹, 使其具有更优异的表面硬度 Weibull 分布特性, 能够抵抗横向剪切力和承受摩擦时的载荷力, 对于提高重熔涂层的耐磨性有着积极的作用。相对于感应重熔涂层, 等温淬火重熔涂层高硬度和高韧性的协同作用, 是其耐磨性得到进一步提高的根本原因<sup>[7,21,26]</sup>。

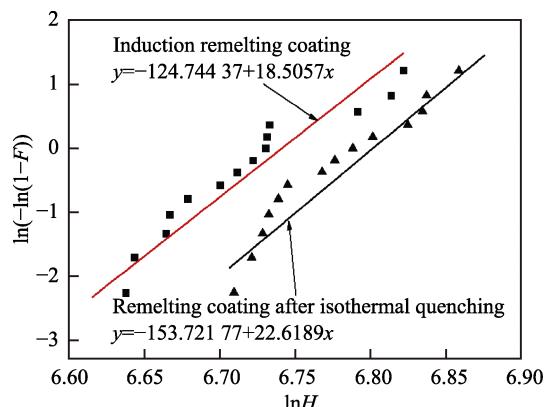


图 8 重熔涂层表面显微硬度 Weibull 分布  
Fig.8 Weibull distribution of microhardness on the remelting coating surface

### 3 结论

1) 在相同试验条件下, 经等温淬火后的重熔涂层比感应重熔涂层具有更低的摩擦系数和磨损失重, 摩擦稳定阶段的摩擦系数为 0.301, 比后者低 23.8%, 相对耐磨性是后者的 1.71 倍。

2) 感应重熔涂层同时存在着磨粒磨损和粘着磨损两种机制, 而经等温淬火后的重熔涂层以磨粒磨损为主导, 比前者具有更优异的抵抗磨粒磨损和粘着磨损的能力。

3) 感应重熔涂层及经等温淬火处理后的重熔涂层平均显微硬度分别为 818.0、873.6HV<sub>0.5</sub>, 硬度极差分别为 170.9、132.6HV<sub>0.5</sub>, 形状参数分别为 18.5057、22.6189, 后者比前者具有更高的平均硬度值、更小的硬度极差以及更加稳定的涂层性能。

4) 经等温淬火处理后, 重熔涂层晶粒细化, 硬质相的相对均质弥散分布、共晶相的减少、丰富的耐磨陶瓷相和快速凝固的定向晶粒结构的协同作用, 是其具有优异的显微硬度 Weibull 分布特性, 以及耐磨性得到进一步提高的根本原因。

### 参考文献:

- [1] BIAN D, XU R L, GUO Y X, et al. Tribological behavior of graphene reinforced chemically bonded ceramic coatings[J]. Ceramics international, 2020, 46(4): 4526-4531.
- [2] FRANCO M, SHA W, MALINO S, et al. Micro-scale wear characteristics of electroless Ni-P/SiC composite coating under two different sliding conditions[J]. Wear, 2014, 317(1-2): 254-264.
- [3] CHEN L Y, WANG H, ZHAO C, et al. Automatic remelting and enhanced mechanical performance of a plasma sprayed NiCrBSi coating[J]. Surface and coatings technology, 2019, 369: 31-43.
- [4] DONG T S, LIU L, LI G L, et al. Effect of induction remelting on microstructure and wear resistance of plasma sprayed NiCrBSiNb coatings[J]. Surface and coatings technology, 2019, 364: 347-357.
- [5] DONG T S, LIU L, FU B G, et al. Investigation of rolling/sliding contact fatigue behaviors of induction remelted Ni-based coating[J]. Surface and coatings technology, 2019, 372: 451-462.
- [6] SHI C, LEI J, ZHOU S, et al. Microstructure and mechanical properties of carbon fibers strengthened Ni-based coatings by laser cladding: the effect of carbon fiber contents[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 744: 146-155.
- [7] 杨效田, 付小月, 段军灵, 等. Ni60/铝青铜喷涂后定向凝固涂层的微观结构与耐磨性[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 182-190.
- [8] YANG Xiao-tian, FU Xiao-yue, DUAN Jun-ling, et al. Microstructure and friction properties of directional solidification coatings formed by Ni60/aluminium bronze after spraying[J]. Surface technology, 2019, 48(1): 182-190.
- [9] LI J, PAN L, FU Q, et al. Wettability and corrosion behavior of a Ni coating on 304 stainless steel surface[J]. Surface and coatings technology, 2019, 357: 740-747.
- [10] 肖逸峰, 曾凡检, 匡雯慧, 等. 真空烧结熔覆 Ni60 涂层的组织和性能[J]. 金属热处理, 2017, 42(7): 83-87.
- [11] XIAO Yi-feng, ZENG Fan-jian, KUANG Wen-hui, et al. Microstructure and properties of Ni60 coating by vacuum sintering cladding[J]. Heat treatment of metals, 2017, 42(7): 83-87.
- [12] CHEN L Y, XU T, LU S, et al. Improved hardness and wear resistance of plasma sprayed nanostructured NiCrBSi coating via short-time heat treatment[J]. Surface and coatings technology, 2018, 350: 436-444.
- [13] YANG X C, LI G L, WANG H D, et al. Effect of flame remelting on microstructure and wear behaviour of plasma sprayed NiCrBSi-30%Mo coating[J]. Surface engineering, 2018, 34(3): 181-188.
- [14] AFANASIEVA L E, RATKEVICH G V. Laser cladding of NiCrBSiFe-WC coating with multichannel laser [J]. Letters on materials, 2018, 8(3): 268-273.
- [15] 姜伟, 胡芳友, 黄旭仁. 工艺参数对激光熔覆层微观形貌的影响[J]. 表面技术, 2007, 36(4): 57-59.
- [16] JIANG Wei, HU Fang-you, HUANG Xu-ren. The influence of craft parameter on the microstructure by CO<sub>2</sub> laser cladding [J]. Surface technology, 2007, 36(4): 57-59.
- [17] LIU Y J, LI S J, ZHANG L C, et al. Early plastic deformation behaviour and energy absorption in porous β-type biomedical titanium produced by selective laser melting [J]. Scripta materialia, 2018, 153: 99-103.
- [18] DONG T S, LIU L, LI G L, et al. Effect of induction remelting on microstructure and wear resistance of plasma sprayed NiCrBSiNi coatings[J]. Surface and coatings technology, 2019, 364: 347-357.
- [19] 解芳, 张遥, 翟长生, 等. 高效稳定涂层预制备火焰喷涂枪的研制[J]. 机械设计与制造, 2019(1): 122-126.
- [20] XIE Fang, ZHANG Yao, ZHAI Chang-sheng, et al. Design of flame spraying gun for prefabricating high efficiency and stable coating[J]. Machinery design & manufacture, 2019(1): 122-126.
- [21] 翟长生. 一种感应预热熔涂集成装置: 中国, CN201510995789.3[P]. 2016-05-25.
- [22] ZHAI Chang-sheng. An integrated device for induction pre-heating fusion coating: China, CN 201510995789.3 [P]. 2016-05-25.

(下转第 229 页)

- 60(4): 2579-2584.
- [17] RADEK N, KONSTANTY N. Cermet ESD coatings modified by laser treatment[J]. Archives of metallurgy and materials, 2012, 57(3): 665-670.
- [18] RADEK N, WAJS E, LUCHKA M. The WC-Co electrospark alloying coatings modified by laser treatment[J]. Powder metallurgy and metal ceramics, 2008, 47(3): 197-201.
- [19] 张怡, 陈志国, 魏祥, 等. 电火花沉积碳化铬基金属陶瓷涂层的微观组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(2): 601-607.  
ZHANG Yi, CHEN Zhi-guo, WEI Xiang, et al. Microstructure and properties of chromium carbide based metal-ceramic coatings prepared by electro-spark deposition[J]. Rare metal materials and engineering, 2019, 48(2): 601-607.
- [20] LIU Jun, WANG Rui-jun, QIAN Yi-yu. The formation of a single-pulse electrospark deposition spot[J]. Surface and coatings technology, 2005, 200(7): 2433-2437.
- [21] 何鹏, 吴承东, 钱乙余, 等. 钛合金表面电火花沉积WC电极的粘连行为分析[J]. 焊接学报, 2006(4): 25-28.  
HE Peng, WU Cheng-dong, QIAN Yi-yu, et al. Adhesion behavior of WC coating deposited on titanium alloy by electrospark deposition[J]. Transactions of the china welding institution, 2006(4): 25-28.
- [22] XIE Y, WANG M. A feasibility study of preparing MC<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>/BN composite coatings by electrospark deposition process [J]. Journal of alloys and compounds, 2009, 484(1-2): 21-24.
- [23] MA G, WANG L, GAO H, et al. The friction coefficient evolution of a TiN coated contact during sliding wear[J]. Applied surface science, 2015, 345: 109-115.
- [24] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2017: 283-284.  
WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of tribology[M]. Second edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 283-284.
- [25] MA K J, CHAO C L, LIU D S, et al. Friction and wear behaviour of TiN/Au, TiN/MoS<sub>2</sub> and TiN/TiCN/a-C:H coatings[J]. Journal of materials processing technology, 2002, 127(2): 182-186.
- [26] JACOBS L, HYLAND M M, DE B M. Study of the influence of microstructural properties on the sliding-wear behavior of HVOF and HVAF sprayed WC-cermet coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 1999, 8(1): 125-132.

(上接第212页)

- [18] 翟长生. 一种感应预热熔涂集成装置的人机交互系统: 中国, CN201510995527.7[P]. 2016-05-25.  
Zhai Chang-sheng. A human-computer interactive system for the integrated device of induction preheating fusion coating: China, CN201510995527.7[P]. 2016-05-25.
- [19] 翟长生. 一种感应预热熔涂集成装置的智能运控系统: 中国, CN201510995497.X[P]. 2016-05-25.  
Zhai Chang-sheng. An intelligent operation and control system for integrated induction preheating fusion coating device: China, CN201510995497.X[P]. 2016-05-25.
- [20] XU M K, ZHU S G, DING H. Electrical contact strengthening of induction-clad Ni-40%WC composite coatings on 40Cr substrates[J]. Surface and coatings technology, 2015, 279: 32-38.
- [21] 杨效田, 王鹏春, 李霞, 等. 复合制备Ni基合金涂层的组织结构及性能演变特征[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 46(3): 693-698.  
Yang Xiao-tian, Wang Peng-chun, Li Xia, et al. Evolution characteristics of microstructure of Ni-based alloy coatings and their properties under complex process[J]. Rare metal materials and engineering, 2015, 46(3): 693-698.
- [22] 郭建亭. 一种性能优异的低成本定向凝固镍基高温合金DZ417G[J]. 金属学报, 2002, 38(11): 1163-1174.  
Guo Jian-ting. A directionally solidified nickel-base superalloy DZ417G with excellent properties and low cost [J]. Acta metallurgica sinica, 2002, 38(11): 1163-1174.
- [23] 杨效田, 王智平, 李文生, 等. 感应熔覆制备表面涂层工艺及涂层组织特征[J]. 材料保护, 2010, 43(8): 46-50.  
Yang Xiao-tian, Wang Zhi-ping, Li Wen-sheng, et al. Surface coating prepared by inducing cladding technology and its organization[J]. Materials protection, 2010, 43(8): 46-50.
- [24] 赵文明, 王俊, 翟长生, 等. 纳米复合涂层ZrO<sub>2</sub>/0.05w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)力学性能的Weibull分布特性[J]. 中国表面工程, 2005, 18(4): 13-17.  
Zhao Wen-ming, Wang Jun, Zhai Chang-sheng, et al. The Weibull distribution of microhardness and microstructure of ZrO<sub>2</sub>/0.05w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) plasma sprayed coatings[J]. China surface engineering, 2005, 18(4): 13-17.
- [25] 张维铭. 统计质量控制理论与应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.  
Zhang Wei-ming. Theory and application of statistical quality control[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992.
- [26] CHEN J, DONG Y, WAN L, et al. Effect of induction remelting on the microstructure and properties of in situ TiN-reinforced NiCrBSi composite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2018, 340: 159-166.