# 热处理温度对大气等离子喷涂 316L 不锈钢涂层组织和性能的影响

刘黎明，张超

（扬州大学 机械工程学院，江苏 扬州 225127）

**摘 要：目的** 研究 316L 不锈钢涂层在不同热处理温度下组织结构和性能的变化规律，提高该涂层的摩擦学性能。**方法** 利用大气等离子喷涂（APS）技术制备 316L 不锈钢涂层，对喷涂态涂层进行 300~700 ℃热处理。通过光学显微镜（OM）和 X 射线衍射仪（XRD）观察分析涂层的显微组织和相组成，利用维氏硬度计测试涂层的显微硬度值。采用摩擦磨损试验机和三维光学显微镜测试涂层的摩擦系数和磨损率，利用场发射扫描电子显微镜（FE-SEM）观察磨痕表面并对磨损机制进行深入分析。**结果** 喷涂态 316L 不锈钢涂层的厚度约为 350 μm，显微硬度值为 335$HV_{0.1}$，涂层组织中含有未熔颗粒、孔隙和氧化物等。在干摩擦条件下，涂层的摩擦系数稳定在 0.75 左右，磨损率为$(1.329\pm0.14)\times10^{-5}$ $mm^3/(N\cdot m)$。随着热处理温度的升高，涂层扁平颗粒界面处的氧化行为明显，同时涂层内部的孔隙缩小，涂层结构更加致密，使得涂层显微硬度提高了 30%。涂层的耐磨性能在 700 ℃热处理条件下最佳，磨损率为$(1.149\pm0.26)\times10^{-5}$ $mm^3/(N\cdot m)$，较喷涂态涂层降低 14%，磨损机制以疲劳磨损和粘着磨损为主。**结论** 热处理有助于提高 316L 不锈钢涂层的显微硬度，700 ℃热处理可有效提高涂层的耐磨性。

**关键词：**大气等离子喷涂；316L 不锈钢涂层；热处理；显微结构；硬度；耐磨性

**中图分类号：**TG174. 442 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)08-0155-07

**DOI：**10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.022

# Effect of Heat Treatment Temperature on Structure and Properties of Atmospheric Plasma Sprayed 316L Stainless Steel Coatings

*LIU Li-ming, ZHANG Chao*

(School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve tribological performance of the 316L stainless steel coatings by investigating the evolutions of structures and properties of the coatings at different heat-treatment temperatures. 316L stainless steel coatings were fabricated by atmospheric plasma spray (APS) and then the as-sprayed coating was heat-treated at 300~700 ℃. Microstructure and phase compositions of the coatings were analyzed by optical microscopy (OM) and X-ray diffractometer (XRD). Micro-

**收稿日期：**2018-04-14；**修订日期：**2018-05-17

**Received：**2018-04-14；**Revised：**2018-05-17

**基金项目：**江苏省海洋科技创新专项（HY2017-10）；扬州大学江都高端装备工程技术研究院开放课题（2017-01）；扬州市杰出青年基金（YZ2017096）

**Fund：**Supported by Marine Science and Technology Project of Jiangsu Province (HY2017-10), Jiangdu Advanced Equipment Engineering Institute of Yangzhou University (2017-01) and Yangzhou Science Fund for Distinguished Young Scholar (YZ2017096)

**作者简介：**刘黎明（1992—），男，硕士研究生，主要研究方向为热喷涂耐磨涂层技术。

**Biography：**LIU Li-ming (1992—), Male, Master graduate student, Research focus: thermal sprayed wear-resistant coatings.

**通讯作者：**张超（1981—），男，博士，教授，博导，主要研究方向为热喷涂与再制造技术。

**Corresponding author：**ZHANG Chao (1981—), Male, Ph. D., Professor, Doctoral tutor, Research focus: thermal spray and remanufacturing technology.

hardness of the coatings was measured by Vickers hardness tester. Friction coefficients and wear volume were tested by the tribometer and three-dimensional optical profilometer. The worn surface was inspected by field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and the wear mechanisms were discussed deeply. The as-sprayed 316L stainless steel coating had a thickness of approximately 350 μm and a microhardness of 335$HV_{0.1}$. There existed unmelted particles, pores and oxides in the coating. The friction coefficient of the coating stabilized around 0.75 and the wear rate was (1.329±0.14)×$10^{-5}$ $mm^3$/(N·m). With the increase of heat treatment temperature, oxidation behavior between the splats was clear whereas the pores became narrowed and the microstructure of the coatings was more compacted, resulting in an increase of the hardness of the coating by 30%. The wear resistance of the coating reached the best at 700 ℃ and the wear rate was (1.149±0.26)×$10^{-5}$ $mm^3$/(N·m) which reduced by 14% compared with that of the as-sprayed coating. Wear mechanisms were dominated by fatigue and adhesion wear. Heat treatment is beneficial to increase the microhardness of 316L stainless steel coatings and heat treatment at 700 ℃ can effectively improve the wear resistance of the coatings.

**KEY WORDS:** atmospheric plasma spray; 316L stainless steel coating; heat treatment; microstructure; hardness; wear resistance

随着现代工业向高速化和自动化方向发展，要求各种机械部件能够长时间稳定运行。另一方面，降低材料和能源消耗已经成为世界各国关注的现实问题，热喷涂作为表面强化技术，相比于整体提高材料性能无疑节约了大量成本。热喷涂涂层被广泛应用于汽车、能源、航空和航海等重要工程领域[1-4]。相比于其他热喷涂方式，大气等离子喷涂（APS）具有诸多优势，该工艺具有极高的能量密度，其焰流中心温度可达 10 000 K 以上，几乎可以熔化所有喷涂材料[5]。另外，APS 工艺对基体的热影响小并可进行控制，在基体表面提供功能性涂层的同时不会对其组织和机械性能造成很大影响，因而被广泛应用于制备耐磨耐蚀涂层领域[6-7]。

316L 不锈钢具有较好的力学性能、耐磨耐蚀性和经济性，被大量应用于工业生产[8-9]。同时，316L 不锈钢材料的机械加工性能较好，是作为防护或修复涂层材料的最佳选择之一。然而，喷涂态涂层组织结构中不可避免会存在孔隙、裂纹及氧化物等缺陷，这在一定程度上限制了此类涂层的应用[10-12]。大量研究表明，适当的后处理可以改善涂层组织结构和耐磨耐蚀性。杨德明等[13]对等离子喷涂的 316L 不锈钢涂层进行 1000 ℃和 1200 ℃热处理，结果表明喷涂态涂层经过热处理后硬度明显降低，涂层的切削加工性能得以提高。朱传琳等[14]发现 1100 ℃真空热处理使冷喷涂 304 不锈钢涂层发生再结晶现象，涂层组织畸变程度和硬度降低，耐腐蚀性能得到提高。该课题组[15]同时研究退火热处理对该涂层显微结构和机械性能的影响，实验证实了 950 ℃热处理可以使涂层界面由机械结合转变为冶金结合，涂层抗拉强度从 67 MPa 提高到 357 MPa，机械性能大幅提升。Adachi 等[16-17]研究低温等离子渗氮渗碳对 316L 不锈钢涂层表面硬度和耐磨耐蚀性的影响，实验表明渗氮渗碳处理能够扩大奥氏体区，增加涂层的硬度，使涂层耐磨性提高两个数量级。目前，对于不锈钢涂层后处理工艺的研究大多局限于高温热处理或者表面二次强化，关于较低温度热处理条件下的研究，尤其是对涂层摩擦学性能的研究极少。

鉴于此，本文采用大气等离子喷涂技术制备 316L 不锈钢涂层，随后对喷涂态涂层进行 300~700 ℃的炉内热处理，重点考察热处理温度对涂层显微组织、相组成、硬度和摩擦学性能的影响，分析涂层磨损机理，旨在寻找最佳热处理温度，对推广高性能 316L 不锈钢涂层在工程中的应用提供可靠的理论基础。

## 1 实验方法

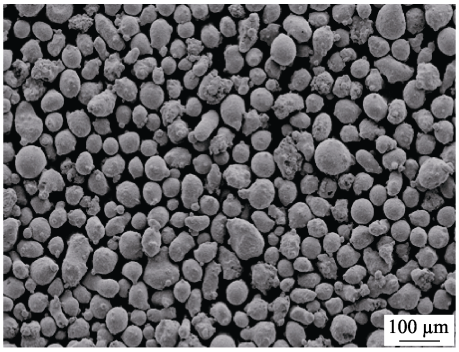
### 1.1 涂层制备

实验选用湖南先导益阳等离子粉末有限公司生产的 316L 不锈钢粉末，粉末形貌如图 1 所示。从扫描电镜图中可以看到，粉末呈现较好的球形度，粒径分布范围为 30~70 μm，其主要成分（质量分数）为：Ni 11.92%，Cr 17.05%，Mo 2.37%，Si 0.51%，Fe 余量。将喷涂粉末置于 100 ℃干燥箱中烘干，以增加其流动性。基体材料为 304 不锈钢，尺寸为 60 mm × 40 mm × 3 mm，在喷涂前对基体采用 20#棕刚玉喷砂处理，以去除基体表面的油脂和氧化物等杂质。

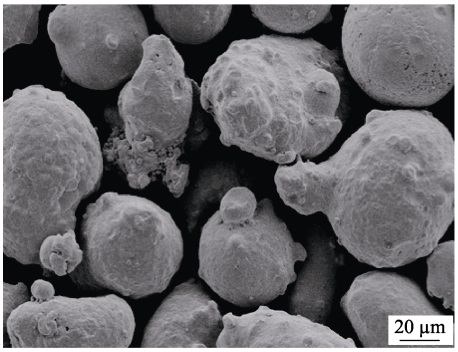
实验选用 Oerlikon Metco 公司生产的 F4MB-XL 等离子喷枪对 316L 不锈钢粉末进行喷涂，喷涂气体分别是氩气和氢气，具体喷涂参数见表 1。送粉设备同样是 Oerlikon Metco 生产的 5MPE 送粉器，送粉方式为径向送粉，送粉速率为 60 g/min。在喷涂过程中对基体背面通压缩空气进行冷却，以防止过热，空气压力为 0.3 MPa。制备出的 316L 不锈钢涂层的厚度约为 350 μm。

将喷涂涂层的材料切割成 10 mm × 10 mm× 3 mm 若干个小块样品，包埋在装有氧化铝粉末的坩埚中进行炉内热处理。当马弗炉温度分别升高到 300、400、500、600、700 ℃时，将样品放入其中，保温

1 h 后取出，并放在空气中冷却。




a 低倍




b 高倍

图 1　316L 不锈钢粉末形貌

Fig.1 Morphology of the 316L stainless steel powders: a) low magnification, b) high magnification

**表 1　等离子喷涂工艺参数**

**Tab.1 Plasma spraying parameters**

| Parameters | Values |
|---|---|
| Current of the plasma arc/A | 516 |
| Voltage of the plasma arc/V | 65 |
| Ar flow rate/(L·min$^{-1}$) | 55 |
| $H_2$ flow rate/(L·min$^{-1}$) | 7.5 |
| Spraying distance/mm | 140 |
| Gun translation velocity/(mm·s$^{-1}$) | 200 |
| Repeat spraying times | 4 |

## 1.2　组织观察及性能表征

首先进行金相试样制作，采用 DMi8 莱卡光学显微镜观察喷涂态和热处理态涂层的截面显微形貌，利用 D8 Advance 多晶 X 射线衍射仪分析涂层的物相组成，扫描速度为 5 (°)/min。采用华银 HV-1000 型维氏显微硬度计测试涂层的硬度，加载载荷为 100 g，保荷时间为 10 s，每个涂层随机测量至少 10 个点，取其平均值。

球盘往复式干摩擦实验在 UMT-2 摩擦磨损试验机上进行，对磨副为 $Si_3N_4$ 球（$\phi$4 mm，1700HV）。在摩擦实验进行前，将所有试样表面抛光，要求抛光后涂层表面粗糙度低于 0.3 μm，摩擦实验参数如表 2 所列，每个样品至少重复 3 次实验。采用 Contour GT-K 三维光学轮廓仪测量涂层磨损体积，利用 Zeiss_Supra 55 场发射扫描电子显微镜观察磨痕表面并对磨损机制进行分析。

**表 2　摩擦试验参数**

**Tab.2 Test parameters during friction test**

| Test parameters | Values |
|---|---|
| Load/N | 10 |
| Reciprocating frequency/Hz | 2 |
| Stroke length/mm | 8 |
| Sliding time/h | 4 |
| Temperature/℃ | 20±5 |

# 2　结果及分析

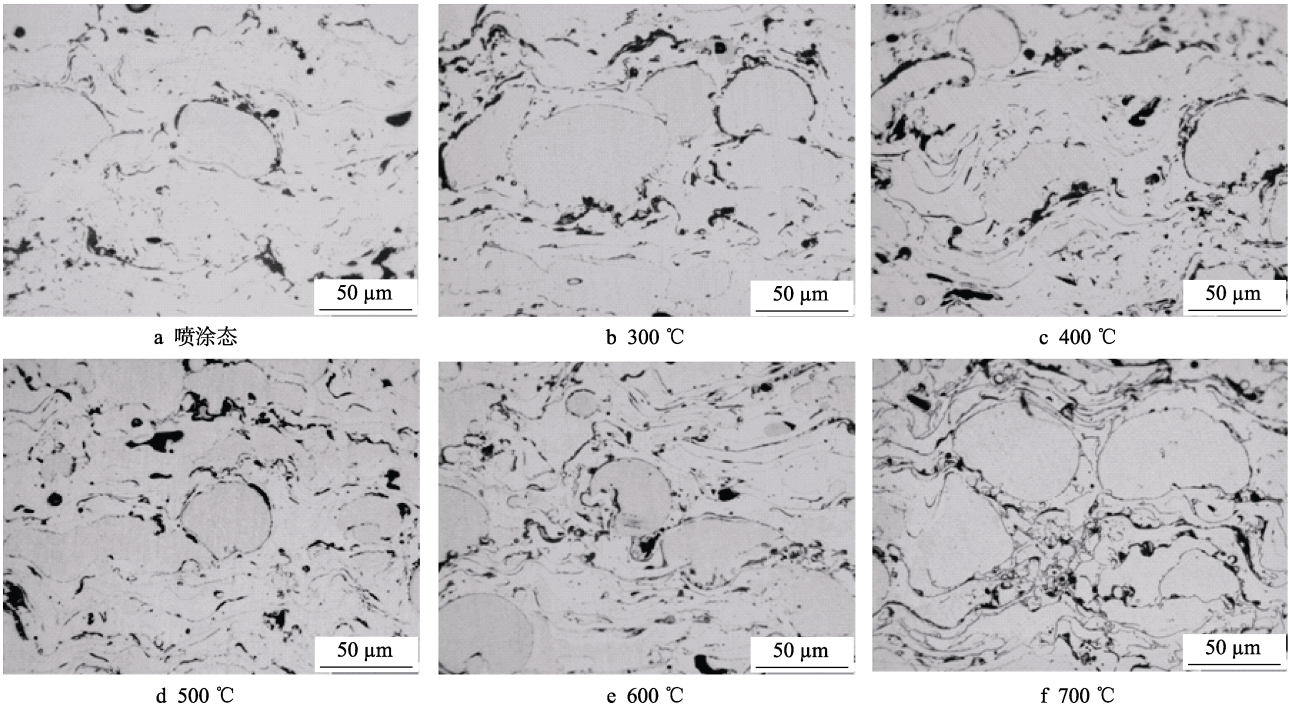
## 2.1　热处理对涂层组织的影响

不锈钢粉末在等离子焰流中被加热熔化后，撞击到基体表面发生塑性变形而形成涂层，涂层中不同区域的熔融情况、致密程度、塑性变形量和氧化程度等存在一定差异。图 2 是喷涂态和热处理态 316L 不锈钢涂层的截面金相形貌。从图 2 可以看到，涂层中包含孔隙和未熔颗粒，其中未熔颗粒周围以及扁平颗粒界面处存在明显的黑色层状物，且随着热处理温度的升高，涂层界面间的黑色层状物更加明显。图 3 是 700 ℃热处理后涂层截面组织的 SEM 图和氧元素的分布图，可以发现氧元素在黑色层状物处发生富集，出现连续的亮带，证明热处理后涂层扁平粒子界面存在氧化现象。

分析认为，产生这种现象的原因主要有两个：其一，在喷涂涂层过程中，熔融颗粒表面的氧化膜受剪切作用，以金属射流形式被挤出[18]，引起涂层中氧的非平衡聚集。在热处理过程中，聚集的氧元素可能成为氧化物团聚的核心，因此形成可见的黑色氧化带。其二，涂层中扁平颗粒的结合方式主要为机械铆接[19]，因此界面间不可避免存在裂纹、孔隙和位错等缺陷，成为氧元素快速扩散的通道，在高温作用下发生团聚。在较高热处理温度下，由于扩散作用导致扁平颗粒间的孔隙缩小，微裂纹发生融合，涂层结构更加致密。孔隙通常是裂纹产生源和应力集中区，外力作用是导致材料断裂的直接原因。热处理使得涂层中的孔隙缩小以及微裂纹融合，可以有效提高扁平颗粒间的结合强度。

## 2.2　热处理对涂层相组成的影响

图 4 为 316L 不锈钢涂层的 XRD 衍射图谱，涂层主要由 γ-Fe、(Fe,Ni) 和 Cr 等物相组成。在喷涂态涂层中并没有检测到氧化物峰，说明等离子喷涂可

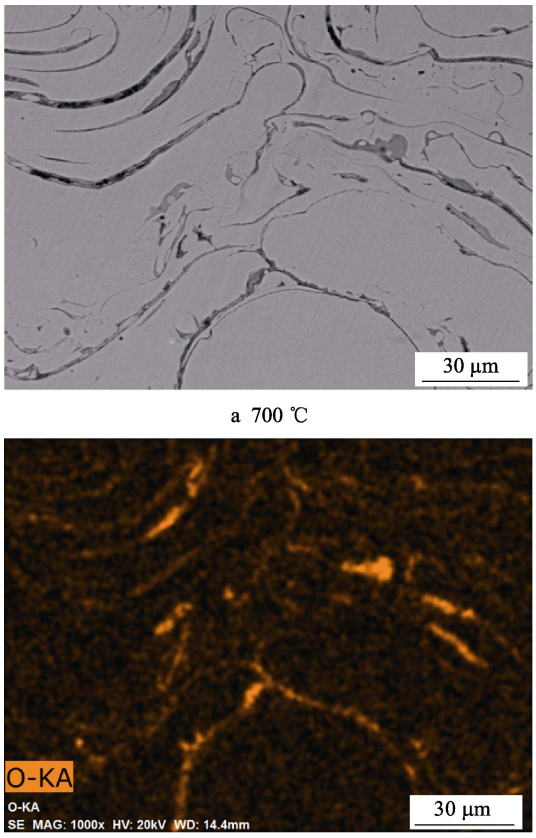



a 喷涂态　b 300 ℃　c 400 ℃

d 500 ℃　e 600 ℃　f 700 ℃

图 2　316L 不锈钢涂层截面金相显微图

Fig.2 OM images of cross-sectional surface of the 316L stainless steel coatings: a) as-sprayed coating and the coatings treated at b) 300 ℃, c) 400 ℃, d) 500 ℃, e) 600 ℃, f) 700 ℃




a 700 ℃

b 氧元素分布

图 3　700 ℃热处理后 316L 不锈钢涂层截面组织和氧元素面扫分布

Fig.3 SEM images of cross-sectional microstructure of the 316L stainless steel coating heat-treated at 700 ℃ (a) and the surface distribution of oxygen (b)

以在一定程度上减少对喷涂材料的氧化。随着热处理的进行，涂层衍射峰中可以观察到 $Fe_2O_3$ 峰，证明涂层在加热过程中发生氧化反应，并且氧化物峰强随着热处理温度的升高而增强。结合图 2 可以看到，涂层中黑色氧化层随着热处理温度的升高而增多。有研究表明[20]，对电弧喷涂 Al 涂层进行热处理，在涂层中扁平颗粒周围也存在一层氧化物组织，热处理并没有消除该氧化层，本研究获得了与其类似的结果。

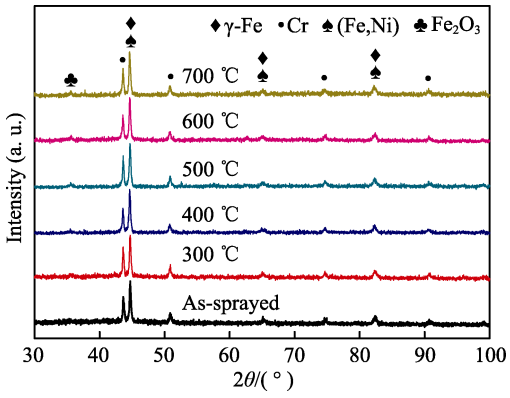



图 4　不同热处理温度下 316L 不锈钢涂层的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of the 316L stainless steel coatings heat-treated at various temperatures

## 2.3　热处理对涂层硬度的影响

涂层硬度可以衡量涂层抵抗塑性变形的能力，是评价涂层使用性能的重要指标之一，硬度与涂层的耐磨性和强度等多项性能有密切关系。涂层本身硬度受

喷涂工艺参数、涂层微观结构、氧化物含量以及孔隙率等因素的影响。

图 5 为 316L 不锈钢涂层经过热处理后的硬度变化。由图 5 可见，涂层的硬度值在一定范围内波动，这是因为涂层中存在未熔颗粒、氧化物及孔隙等缺陷，引起涂层不同微区硬度分布不均匀。喷涂态 316L 不锈钢涂层的硬度约为 $336HV_{0.1}$，当热处理温度为 300 ℃时，涂层的硬度值与喷涂态相当。继续升高热处理温度到 400、500、600、700 ℃时，涂层硬度值分别增加到 355、376、383、$435HV_{0.1}$，这说明热处理能有效提高 316L 不锈钢涂层的硬度值。随着热处理温度的升高，原子的热扩散激活能增大，元素在涂层组织间扩散更加活跃，更容易发生颗粒界面间的互相融合，有助于增强涂层颗粒间的结合强度。与此同时，氧元素团聚并与金属元素发生反应生成氧化物相，有效提高了涂层的硬度值[21]。

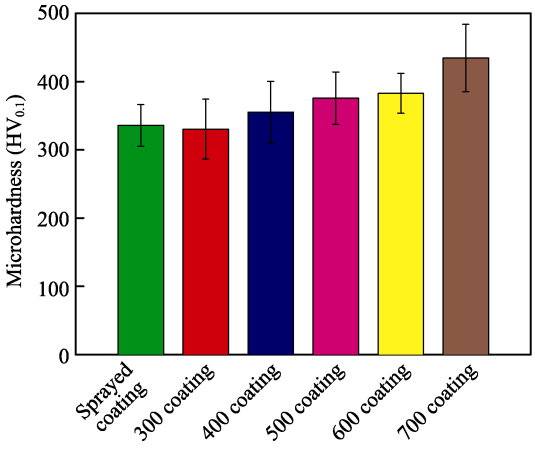



图 5　不同热处理温度下 316L 不锈钢涂层的显微硬度值
Fig.5 Microhardness of the 316L stainless steel coatings heat-treated at various temperatures

## 2.4　热处理对涂层摩擦性能的影响

喷涂态和经过热处理后的 316L 不锈钢涂层的摩擦系数如图 6 所示。在起初的摩擦阶段，涂层的光滑表面被迅速磨平，导致对磨副接触面积增大，从而引起摩擦系数急剧上升，通常将这个阶段称之为粘着磨损的跑和阶段。经过大约 5~15 min 的跑和期以后，对磨球与涂层表面接触面积基本恒定，磨损达到相对动态平衡状态，摩擦系数稳定在 0.7~0.8 之间。对比发现，300~600 ℃热处理的 316L 不锈钢涂层的摩擦系数较喷涂态涂层有所上升，700 ℃热处理的涂层摩擦系数则与喷涂态涂层的摩擦系数相当，这表明较高温度可以改善涂层的组织结构，有利于提高涂层抗粘着磨损的能力。

热处理温度对 316L 不锈钢涂层磨损率的影响如图 7 所示。在干摩擦条件下，涂层的磨损率随着热处理温度的升高而先升高后降低，700 ℃热处理的涂层的磨损率最低。硬度和扁平颗粒间的结合强度是影响

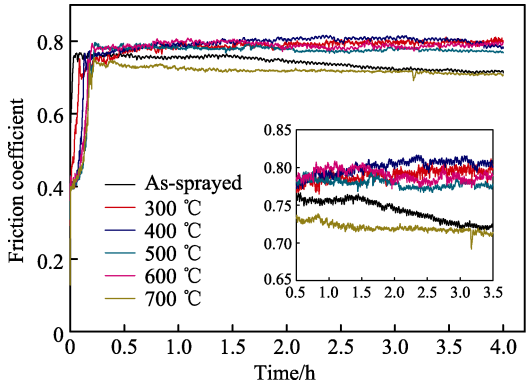



图 6 316L 不锈钢涂层在不同热处理温度下的摩擦系数曲线
Fig.6 Friction coefficient curve of the 316L stainless steel coatings heat-treated at various temperatures

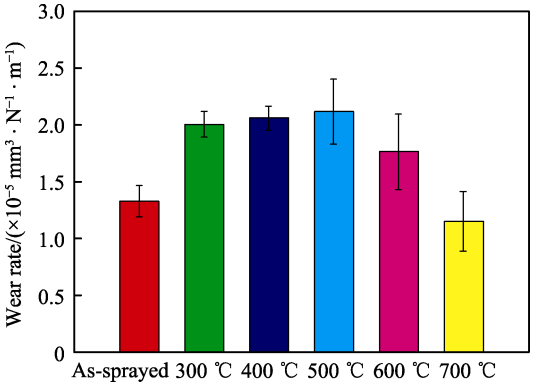



图 7　不同热处理温度下 316L 不锈钢涂层的磨损率
Fig.7 Wear rates of the 316L stainless steel coatings heat-treated at various temperatures

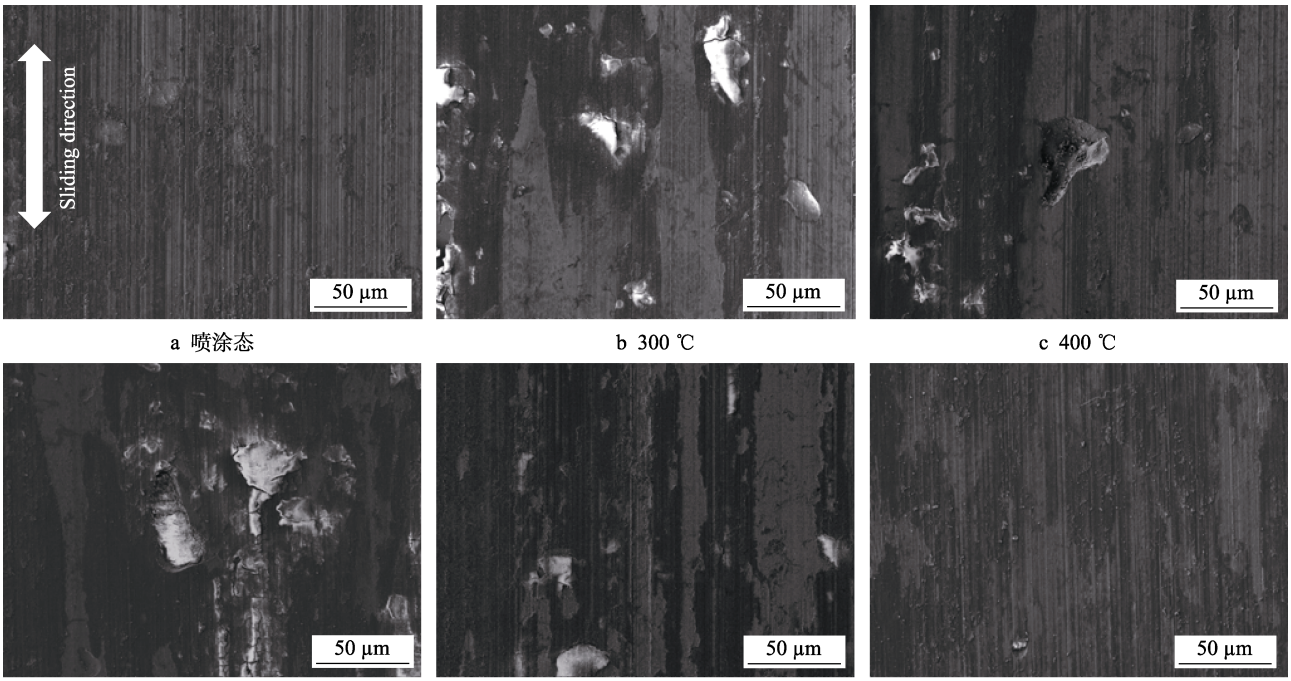
涂层耐磨性能的重要因素[22]，300 ℃热处理的涂层的硬度相较于喷涂态涂层没有太大变化，但通过 XRD 分析可知，涂层内部产生少量的氧化物，结合图 2 可以看到，氧化物分布在扁平颗粒的边缘处，导致颗粒间的结合强度下降，从而使涂层的磨损率增加。当温度继续升高到 700 ℃时，原子扩散加速，涂层组织间的孔隙和微裂纹缩小，涂层结构更加致密，此外，700 ℃热处理后涂层的硬度值最高，这两种因素共同促使涂层的磨损率降低。在 400~600 ℃热处理条件下，原子扩散效果介于 300~700 ℃之间，涂层内部原子开始发生扩散，使部分层状组织界面处发生融合，对增强涂层耐磨性起到积极作用。与此同时，氧元素在局部区域发生团聚并和金属元素反应生成氧化膜，导致涂层的断裂韧性降低，内聚结合强度下降，造成涂层耐磨性能下降。这两者在摩擦过程中相互竞争，分别对涂层的耐磨性能起到强化和弱化作用，具体反映在涂层的磨损率上。

为了进一步分析涂层的磨损机制，采用场发射扫描电子显微镜观察涂层磨痕表面，其磨损后的形貌如图 8 所示。从图 8 可以观察到，喷涂态 316L 不锈钢涂层磨损后的磨痕表面存在平行于摩擦滑动方向的凹槽，涂层表面因受到摩擦剪切力作用发生塑性变形，产生大量的犁沟。由于对磨球硬度较高（约为 1700HV），

在压力作用下会对涂层表面产生微切削作用。

经过 300~500 ℃热处理的涂层磨损表面存在片状剥落物和部分犁沟。热处理温度较低时，对应的热扩散激活能很弱，不足以使涂层内部金属原子越过势垒，层状组织界面间难以发生融合现象，此温度下热处理后的 316L 不锈钢涂层的弹性模量和断裂韧性与喷涂态涂层相差不大。磨痕表面扁平颗粒的剥落表明涂层的内聚结合强度下降，在往复的摩擦力作用下，摩擦表面发生疲劳失效，导致涂层组织片状剥落。同时沿着滑动方向存在交替的裂口和凹穴，这是典型的粘着磨损。

热处理温度达到 600 ℃以上时，其热扩散激活能可以使涂层中的元素发生扩散，并且局部扁平粒子界面处发生融合，导致涂层的硬度和内聚结合强度提高，涂层中的残余应力降低，甚至消失。与此同时，涂层中的氧元素加速扩散形成氧化层，均匀分布在颗粒周围，氧化物团聚体属于硬脆相，提高了涂层的硬度，在摩擦过程中可以形成细小磨粒，起到润滑的作用。从图 8e、f 来看，600 ℃和 700 ℃热处理条件下，涂层磨痕表面较光滑，和喷涂态涂层磨损表面相似，涂层组织的剥落也得到了缓解，与磨损率测试结果相一致。磨损机制为粘着磨损和磨粒磨损。




a 喷涂态　b 300 ℃　c 400 ℃

d 500 ℃　e 600 ℃　f 700 ℃

图 8　316L 不锈钢涂层磨痕扫描电镜图

Fig.8 SEM of wear on the 316L stainless steel coatings: a) as-sprayed coatings and the coatings heat-treated at b) 300 ℃, c) 400 ℃, d) 500 ℃, e) 600 ℃, f) 700 ℃

## 3　结论

1）大气等离子喷涂制备的 316L 不锈钢涂层组织中含有未熔颗粒、孔隙和氧化物等，随着热处理温度的升高，涂层扁平化粒子界面处的氧化行为明显。

2）涂层的基体组织为奥氏体，涂层主要由 γ-Fe、(Fe,Ni)金属间化合物和 Cr 等物相组成。300 ℃热处理对涂层维氏硬度几乎没有影响，均为 335$HV_{0.1}$。热处理后，涂层中产生氧化物相，且氧化物含量随热处理温度的升高而增加，导致涂层硬度升高。

3）涂层的磨损率随着热处理温度的升高而先升高后降低。热处理温度低于 600 ℃的涂层磨损表面存在片状剥落物和部分犁沟，磨损机制主要是疲劳剥落磨损和粘着磨损。当热处理温度升高到 700 ℃时，涂层的耐磨性能最佳，磨痕表面较光滑，磨损率为 $(1.149\pm0.26)\times10^{-5}$ $mm^3/(N\cdot m)$，较喷涂态涂层降低了 14%，磨损机制为磨粒磨损和粘着磨损。

**参考文献：**

[1] 刘黎明, 肖金坤, 徐海峰, 等. 热喷涂汽车发动机气缸内壁涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 68-75.
LIU Li-ming, XIAO Jin-kun, XU Hai-feng, et al. Study progress in thermal sprayed inner wall coating of automotive engine cylinder[J]. Surface technology, 2017, 46(2): 68-75.

[2] CETINEL H, UYULGAN B, TEKMEN C, et al. Wear properties of functionally gradient layers on stainless steel substrates for high temperature applications[J]. Surface and coatings technology, 2003, 174-175: 1089-1094.

[3] 陈礼顺, 张斌, 蔡元钢. 热喷涂涂层在航空发动机上的

应用及发展[J]. 航空制造技术, 2011(11): 34-37.
CHEN Li-shun, ZHANG Bin, CAI Yuan-gang. Application and development of thermal spray coating in aeroengine[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2011(11): 34-37.

[4] ZHANG Ji-fu, LIU Min, SONG Jin-bing, et al. Microstructure and corrosion behavior of Fe-based amorphous coating prepared by HVOF[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 721: 506-511.

[5] 徐滨士, 李长久, 刘世参, 等. 表面工程与热喷涂技术及其发展[J]. 中国表面工程, 1998, 11(1): 3-9.
XU Bin-shi, LI Chang-jiu, LIU Shi-can, et al. Development of surface engineering and thermal spray technology[J]. China surface engineering, 1998, 11(1): 3-9.

[6] BOBZIN K, ZHAO L D, ÖTE M, et al. Novel Fe-based wear and corrosion resistant coatings by three-cathode plasma technology[J]. Surface and coatings technology, 2017, 318: 288-292.

[7] LI Shuang-jian, XI Xing, HOU Guo-liang, et al. Preparation of plasma sprayed mullite coating on stainless steel substrate and investigation of its environmental dependence of friction and wear behavior[J]. Tribology international, 2015, 91: 32-39.

[8] YANG De-ming, TIAN Bo-han, GAO Yang. The lamellar-equiaxed microstructural transition of 316L coatings by low pressure plasma spraying[J]. Surface and coatings technology, 2013, 228: s72-s76.

[9] ZENG Z, SAKODA N, TAJIRI T. Corrosion behavior of wire-arc-sprayed stainless steel coating on mild steel[J]. Journal of thermal spray technology, 2006, 15(3): 431-437.

[10] 杨德明, 田博涵, 高阳. 低压等离子喷涂 316L 等轴晶涂层及其性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(4): 24-27.
YANG De-ming, TIAN Bo-han, GAO Yang. Microstructure and mechanical properties of the equiaxed 316L coating deposited by low pressure plasma spraying[J]. Materials science and technology, 2011, 19(4): 24-27.

[11] ZHOU Sheng-feng, ZENG Xiao-yan, HU Qian-wu, et al. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization[J]. Applied surface science, 2008, 255(5): 1646-1653.

[12] KADOLKAR P B, WATKINS T R, DE HOSSON J T M, et al. State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys[J]. Acta materialia, 2007, 55(4): 1203-1214.

[13] 杨德明, 高阳, 孙成琪, 等. 热处理对等离子喷涂 316L 不锈钢涂层组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36: 187-191.
YANG De-ming, GAO Yang, SUN Cheng-qi, et al. Effect of annealing treatment on microstructure and properties of 316L stainless steel coating deposited by plasma spray[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2015, 36: 187-191.

[14] 朱传琳, 孟宪明, 程从前, 等. 真空热处理对冷喷涂 304 不锈钢涂层组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2012, 36(10): 23-26.
ZHU Chuan-lin, MENG Xian-ming, CHENG Cong-qian, et al. Effect of vacuum heat treatment on microstructure and properties of cold sprayed 304 stainless steel coating[J]. Materials for mechanical engineering, 2012, 36(10): 23-26.

[15] MENG Xian-ming, ZHANG Jun-bao, HAN Wei, et al. Influence of annealing treatment on the microstructure and mechanical performance of cold sprayed 304 stainless steel coating[J]. Applied surface science, 2011, 258(2): 700-704.

[16] ADACHI S, UEDA N. Formation of S-phase layer on plasma sprayed AISI 316L stainless steel coating by plasma nitriding at low temperature[J]. Thin solid films, 2012, 523: 11-14.

[17] ADACHI S, UEDA N. Surface hardness improvement of plasma-sprayed AISI 316L stainless steel coating by low-temperature plasma carburizing[J]. Advanced powder technology, 2013, 24(5): 818-823.

[18] MENG Guo-hui, ZHANG Bang-yang, LIU Hong, et al. Vacuum heat treatment mechanisms promoting the adhesion strength of thermally sprayed metallic coatings[J]. Surface and coatings technology, 2018, 344: 102-110.

[19] GARTNER F, STOLTENHOFF T, VOYER J, et al. Mechanical properties of cold-sprayed and thermally sprayed copper coatings[J]. Surface and coatings technology, 2006, 200(24): 6770-6782.

[20] 李德元, 宋丹, 张忠礼, 等. 低压电弧喷涂涂层组织及其后处理工艺[J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 1-4.
LI De-yuan, SONG Dan, ZHANG Zhong-li, et al. Study on microstructure of the coatings sprayed in low pressure condition and its post-treatment technology[J]. Transactions of the china welding institution, 2009, 30(4): 1-4.

[21] LIMPICHAIPANIT A, WIROJANUPATUMP S, JIANSIRISOMBOON S. Fabrication and properties of thermal sprayed stainless steel-based nanocomposite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2015, 272: 96-101.

[22] TREVISIOL C, JOURANI A, BOUVIER S. Effect of hardness, microstructure, normal load and abrasive size on friction and on wear behaviour of 35NCD16 steel[J]. Wear, 2017, 388-389: 101-111.