

# 低压等离子喷涂技术在功能性涂层的应用进展

朱军亮<sup>1</sup>, 赵子鹏<sup>2</sup>, 易同斌<sup>2</sup>, 何庆兵<sup>2</sup>, 王征辉<sup>2</sup>

(1. 重庆南开中学, 重庆 400030; 2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** 与常规等离子喷涂相比, 低压等离子喷涂技术在真空或低压下进行等离子喷涂, 可制备更低杂质、更高致密度、更高结合强度的涂层。介绍了常规等离子喷涂焰流速度高、工艺稳定性好、沉积效率高、可控性好的特点, 详细阐述了低压等离子喷涂技术清洁、高速、长焰流、预热、电清理的工艺优势, 说明了低压等离子喷涂技术在热障涂层、抗气蚀涂层、面向等离子体材料等功能性涂层制备上的应用, 最后从完善相关理论、与其他技术联用、工艺在线可控、气氛压力更低等方面, 以及在航空、航天、电子等领域的运用, 对低压等离子喷涂技术的发展进行了展望。

**关键词:** 低压等离子喷涂技术; 热障涂层; 抗气蚀涂层; 面向等离子体材料

**中图分类号:** TG174.442      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3660(2016)01-0111-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.01.018

## Progresses in Application of Low Pressure Plasma Spraying Technology in Functional Coatings

ZHU Jun-liang<sup>1</sup>, ZHAO Zi-peng<sup>2</sup>, YI Tong-bin<sup>2</sup>, HE Qing-bing<sup>2</sup>, WANG Zheng-hui<sup>2</sup>

(1. Chongqing Nankai Middle School, Chongqing 400030, China;

2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** Low pressure plasma spraying (LPPS) is a plasma spraying process under vacuum or very low pressure, which prepares coatings with lower impurity content, higher density and higher bending strength compared to the coatings prepared by Air plasma spraying (APS). This paper reviewed the characteristics of APS such as high flame speed, high stability, high deposition efficiency and good controllability, introduced the many technological advantages of LPPS, including clean spraying environment, high speed and long flame flow, auto-preheat and electric cleaning. This paper also reviewed the application of LPPS in some functional coatings, such as thermal barrier coating, anti-cavitation erosion coating and plasma facing materials. Furthermore, this paper forecasted the development trend of LPPS, including enriching related theory, combining with other technologies, on-line process control and a much lower atmosphere pressure, and its further application in aviation, aerospace, electronic and many other fields.

**KEY WORDS:** low pressure plasma spraying technology; thermal barrier coating; anti-cavitation coating; plasma facing material

收稿日期: 2015-09-18; 修订日期: 2015-10-23

Received: 2015-09-18; Revised: 2015-10-23

作者简介: 朱军亮(1986—), 男, 重庆人, 主要从事物理学教学与研究。

**Biography:** ZHU Jun-liang (1986—), Male, from Chongqing, Research focus: Physics.

通讯作者: 赵子鹏(1987—), 男, 河北人, 助理工程师, 主要从事功能涂层制备。

**Corresponding author:** ZHAO Zi-peng (1987—), Male, from Hebei, Assistant engineer, Research focus: preparation of functional coatings.

热喷涂技术采用高能热源将粉末状(或丝状、棒状)材料加热至熔融或半熔融状态,并加速(或雾化后加速)形成高速熔滴,撞击基体,经过扁平化、快速冷却,凝固沉积在基体表面形成覆盖层<sup>[1]</sup>。常见的热喷涂技术按其热源形式主要分为火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂。研究表明,喷涂粒子速度和温度越高,则涂层越致密,涂层与基体的结合强度越大。火焰喷涂热源是气体(或液体)燃料燃烧释放的能量,温度一般在3000℃左右,制备的涂层结合强度较低,孔隙率较高(90%~95%)。电弧喷涂的热源为形成涂层材料的消耗性电极之间产生的电弧,热源温度为5000~6000℃。与火焰喷涂相比,涂层结合强度高,生产效率高且成本低,但喷涂材料必须导电,且只适合喷涂熔点较低的材料<sup>[2-3]</sup>。

等离子喷涂的热源为高熔点的钨极与水冷铜电极之间产生的非转移型压缩电弧,压缩电弧产生的等离子体温度可达10000℃以上,喷嘴出口处可达到亚音速甚至超音速(1000~2000 m/s)。该工艺将金属(或非金属)粉末送入高能等离子弧焰流中加热到熔融状态,并随同等离子焰流高速喷射并沉积到预先处理过的工件表面形成涂层<sup>[4]</sup>,具有工艺稳定性高、可控性好、用材广泛、孔隙率低(95%~98%)、沉积效率高的特点,可制备耐磨、耐蚀、耐热等功能性涂层,尤其适合制备高熔点的金属及陶瓷涂层<sup>[5-7]</sup>。传统等离子喷涂技术在大气中进行,易导致环境介质要求高的金属(如Ti、W等)氧化严重,且空气中杂质粒子“卷入”高温、高速焰流中,导致涂层氧化物含量高,严重影响涂层综合性能<sup>[8]</sup>。

随着工业生产的不断发展和技术的不断进步,人们对涂层结构和功能的综合性能要求不断提高,对高熔点、高纯度、高强度涂层的迫切需求,促使人们对高热源、高喷速、高纯气氛进行了不懈的探索<sup>[9-10]</sup>。1961年,Steson和Hauk首次发现将等离子喷涂技术置于可控气氛中可显著改善涂层的性能,被视为低压等离子喷涂技术的萌芽;该技术是在含有特定气体气氛的密闭室中完成的等离子喷涂,当密闭室内可控气氛气体压力降至大气压以下时,为低压等离子喷涂。低压等离子喷涂技术不断发展,1973年,美国EPI公司的Eric Muehlberger将喷枪和低压室部分处理设备分开,发明了近乎“铸态”的高致密度涂层喷涂技术,标志着低压等离子喷涂技术的诞生。20世纪80年代,EPI公司在等离子喷涂技术、真空技术和自动控制技术基础上研制成功现代意义上的低压等离子喷

涂技术(Low Pressure Plasma Spraying, LPPS),并商业出售。该技术在低压保护性气氛中进行等离子喷涂,在高纯环境下通过调节气氛压力,使可控制气氛与熔融粒子相互作用,粒子以合适的熔融状态高速撞击基体并迅速平铺于基体表面,最终获得低杂质、低孔隙率( $\geq 99\%$ )、高结合强度的涂层<sup>[11]</sup>。

## 1 工艺特点

低压等离子喷涂技术工作环境为低于大气压可控气氛的密闭室,工作气体(氮气、氩气、氢气等)经等离子化后,在低压气氛中迅速膨胀喷出,射流达到超音速,低压可确保等离子焰流在轴向上温度缓慢降低,能量衰减率极低,焰流速度远高于大气环境下的等离子焰流速度<sup>[12]</sup>。低压等离子喷涂有以下工艺特点。

1) 清洁。低保护性气氛保证了涂层成分与原始材料成分的一致性,防止粉末在喷涂过程中因高速焰流卷入其他杂质粒子,并确保喷涂过程中涂层材料不被空气污染。相关研究显示:Ti-Ni粉末通过大气等离子喷涂、低压等离子喷涂制备的涂层中的O、N含量与原始粉末对比,可知低压等离子喷涂制备的涂层中O、N元素的质量分数远低于大气等离子喷涂涂层中对应的元素,见表1。

表1 Ti-Ni粉末在不同状态喷涂气体中元素的质量分数<sup>[13]</sup>  
Tab.1 Mass fractions of elements in the Ti-Ni powder under different spraying conditions

状态	气体		
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Ti-Ni 喷涂粉末	0.33	0.0058	0.024
大气等离子喷涂	4.00	0.40	
低压等离子喷涂	0.76	0.016	0.017

2) 高速。Vardelle等<sup>[14]</sup>研究了焰流速度与气氛压力的关系,焰流速度随气氛压力升高而显著降低,等离子焰流随着压力变化如图1所示。焰流速度的提高使粉末粒子在焰流中的停留时间缩短,并相应提高了粒子撞击基体的速度,改善了涂层致密度和结合强度。分别采用APS和LPPS工艺制备的MoSi<sub>2</sub>涂层截面形貌如图2所示,APS-MoSi<sub>2</sub>涂层中含有大量的界面和未熔颗粒,且含有大量气孔,而VPS-MoSi<sub>2</sub>涂层结构较为致密,这是由于低压气氛下喷涂粉末熔滴飞行速度更高,导致熔滴对基体的动态冲击压力更大,单

个熔滴沉积物中心部位与基体的机械结合比大气压下的结合更为紧密,有助于结合强度提高,且低压下能有效防止热喷涂熔滴撞击基体后的溅射(图 3),提高了熔滴的平铺性能,从而改善了涂层的致密度<sup>[16]</sup>。

3) 长焰流。焰流从喷嘴进入密闭室内,因喷嘴内部与密闭室内相对压力不同,焰流会呈现出不同程度的湍流,压力差越大,即密闭室内压力越低,等离子焰流越长,所以等离子喷涂的焰流随气氛压力的降低而变粗变长<sup>[17]</sup>,不同压力下的等离子焰流见图 4。低压等离子喷涂中的焰流使粉末受热区域变大,受热更加均匀,所以喷距变化对涂层质量影响变小<sup>[18]</sup>。所以

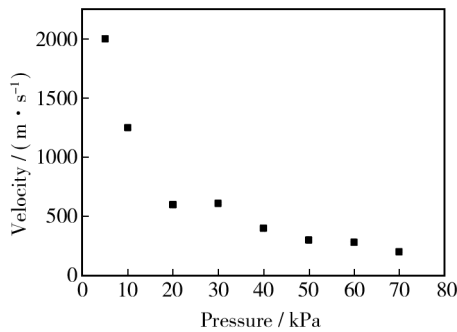
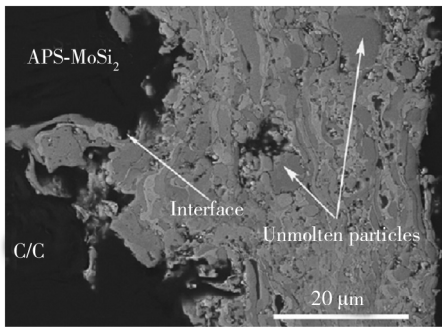
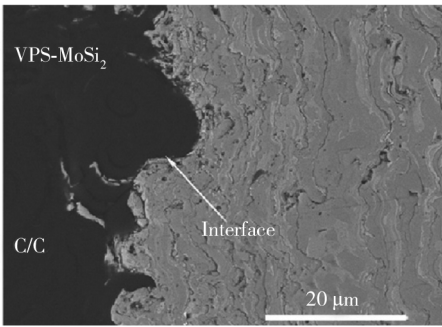


图 1 不同压力下的等离子焰流速度<sup>[14]</sup>

Fig. 1 Velocity of plasma jet under different pressures



a 大气等离子喷涂 MoS<sub>2</sub> 涂层



b 低压等离子喷涂 MoS<sub>2</sub> 涂层

图 2 大气等离子喷涂及低压等离子喷涂 MoS<sub>2</sub> 涂层截面形貌<sup>[15]</sup>

Fig. 2 SEM micrographs of the cross-section of W coatings prepared by APS and LPPS: a) MoS<sub>2</sub> coating prepared by APS, b) MoS<sub>2</sub> coating prepared by LPPS

低压等离子喷涂特别适合喷涂高长径比的管状零件。

4) 预热。低压及保护气氛下的等离子喷涂,采用转移弧可将基体预热达 600 ℃(某些高温合金可达 900 ℃),基体表面处于活化状态,减缓涂层冷却速度并降低热应力,避免裂纹产生<sup>[19]</sup>。粒子到达基体表面时充分变形和铺展,排除气体降低孔隙率,降低涂

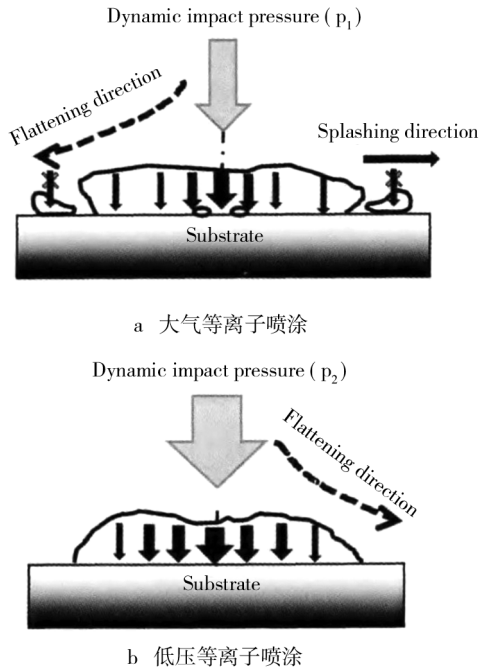


图 3 不同压强下的等离子喷涂熔滴沉积物与基体结合示意图<sup>[16]</sup>

Fig. 3 Schematic diagrams for bonding of plasma spraying droplet deposits with the substrate under various pressures: a) APS, b) LPPS

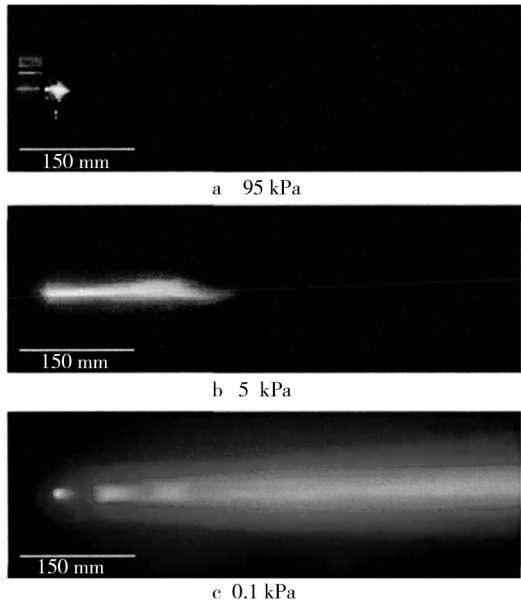


图 4 不同气压条件下等离子焰流<sup>[17]</sup>

Fig. 4 Plasma jet under different pressures

层应力。

5) 电清理。采用反向转移弧对工件表面溅射清理,去除表面氧化膜及其他污垢,将表面净化,提高基体表面活性,加之低压喷涂粒子速度高、动能大,基体不需粗化处理即可与涂层实现真正的冶金结合,省去了喷砂等前处理等环节,并获得高结合强度的涂层。

## 2 技术应用

### 2.1 热障涂层

低压等离子喷涂技术最早在航空航天领域制备热障涂层获得应用。热障涂层应用于航空涡轮发动机涡轮叶片,可有效降低热端部件温度,延长叶片寿命,提高飞行发动机推力和效率。在先进的航空发动机中,热障涂层技术被列为与高温结构材料、高效冷气并重的先进航空发动机涡轮叶片的三大关键技术之一。美国国家航空航天局(NASA)将热障涂层技术应用于航空航天领域,最早是在X-15型火箭飞机的喷火管上喷涂 $\text{ZrO}_2\text{-CaO/NiCr}$ 热障涂层,而在J-75型发动机叶片上使用 $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3/\text{NiCrAlY}$ 热障涂层进行隔热防护<sup>[20-22]</sup>。热障涂层一般由陶瓷隔热面层和金属粘接底层组成,陶瓷隔热面层可有效降低基体表面温度,金属粘接底层可改善陶瓷面层和基体合金的物理相容性及基体的抗氧化能力<sup>[23]</sup>。

低压等离子喷涂制备的热障涂层含氧量低、致密度高。NASA采用LPPS技术制备8% $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 涂层,应用于航天飞机发动机部件,使用寿命是大气等离子喷涂涂层部件的5倍左右<sup>[24]</sup>。采用LPPS技术在普通钢上制备YSZ热障涂层,随压力增加,粉末熔化越充分,致密度越高;与APS技术相比,LPPS技术制备的YSZ涂层表面粗糙度更低<sup>[25]</sup>。采用LPPS技术制备YSZ涂层中柱状晶和等轴晶比例随气氛压力改变而改变,超低压下可获得完全柱状组织<sup>[26]</sup>。

热障涂层的抗氧化性和抗热震性能很大程度上取决于粘接层的结构和组成,粘接层成分一般为Ni-CrAlY或NiCoCrAlY,粘接层的微观结构直接影响热障涂层的效能<sup>[27-28]</sup>。研究者为防止金属粘接层的氧化或混入其他杂质,一般采用低压等离子喷涂制备金属粘接层。周宏明等<sup>[29]</sup>在高温镍基合金采用LPPS技术制备NiCoCrAlTaY底层,采用大气等离子喷涂8% $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 陶瓷层,高温热处理后,涂层的晶粒明显长大;随氧化物厚度的增加,应力增大,涂层剥落失

效。当陶瓷层致密度要求极高时(如要求高耐磨、耐腐蚀性涂层),可采用真空等离子喷涂技术制备。如制备具有一定的孔隙率的陶瓷层(如热障涂层)时,一般采用大气等离子喷涂制备。但目前采用LPPS技术制备热障涂层设备昂贵、成本高,并难以喷涂尺寸大和形状不规则的工件<sup>[30]</sup>。

### 2.2 抗气蚀涂层

气蚀又称空蚀,是影响海洋装备的世界性难题。流体在高速流动和压力变化条件下,与流体接触的金属表面发生洞穴状腐蚀破坏的现象,在水轮机叶片和船舶螺旋桨等普遍存在<sup>[31-32]</sup>。研究者通过优选特殊材料改善抗气蚀能力,NiTi合金是一种优异的抗气蚀材料,此外还具有形状记忆、超弹性、耐磨、耐蚀等优良性能<sup>[33-36]</sup>。但NiTi合金制备较困难且成本较高,采用焊接方法将NiTi合金与易气蚀合金连接,提高常规材料抗气蚀能力,工艺难以控制,且易生成有害相<sup>[37]</sup>。采用低压等离子喷涂技术在易气蚀材料表面制备抗气蚀合金涂层,逐渐引起了研究者的兴趣。

Stella等<sup>[37]</sup>采用LPPS技术在不锈钢表面制备厚度为1000  $\mu\text{m}$ 的NiTi涂层,原料为经过合金化的Ni-Ti粉及Ni、Ti混合粉,研究表明:合金化后的粉末制备的涂层耐气蚀性能优于混合粉制备的涂层,涂层抗气蚀能力与涂层表面粗糙度、孔隙率、第二相含量等关系极大。Martin Bitzer<sup>[38]</sup>采用LPPS技术在42CrMo4钢表面制备了不同厚度的NiTi涂层,增加涂层厚度、提高喷涂功率和降低孔隙率可显著改善NiTi涂层抗空蚀性能,但当涂层达到一定厚度(>800  $\mu\text{m}$ )后,表面粗糙度对涂层抗空蚀性能影响变大。广州有色金属研究院采用低压等离子喷涂技术在铝青铜螺旋桨表面经低压等离子喷涂NiTi合金涂层,经海水运行试验,其抗空蚀能力为无涂层铝青铜螺旋桨的5倍<sup>[39]</sup>。目前LPPS技术对于改善材料的抗蚀性仅限于在易气蚀的基体表面制备涂层,但针对可移动式的现场修复则较难实现。

### 2.3 面向等离子体材料

面向等离子体材料(Plasma Facing Materials, PFMs),是核聚变反应装置中直接面对等离子体的第一壁和偏滤器及限制器的装甲材料,该材料需承受高能粒子和高热量冲击,是成功构建聚变装置的关键<sup>[40]</sup>。PFMs的主要功能<sup>[41]</sup>是:1)有效控制进入等离子体的杂质;2)有效移走辐射到材料表面的热量;

3)保护其他部件在非正常停堆时免受等离子体轰击而损坏;4)与反应堆运行寿命、可靠性和维护性相一致。随着高热流等离子体的强烈辐射和各种粒子的高密度轰击,以石墨瓦与铜热沉材料相结合的传统面向等离子体材料越来越不能满足使用要求<sup>[42]</sup>。以上功能特点要求制备高熔点、高纯度、高可靠性的功能性涂层,钨材料具有熔点高(3410℃)、导热性能好、物理溅射阈值高和无化学溅射等特性,是最有希望的等离子体材料之一。目前采用喷涂技术将PFMs直接连接到热沉材料上,达到涂层与基底材料的良好结合是制造PFMs的热点<sup>[43]</sup>。制备PFMs涂层的主要方法有化学气相沉积、物理气相沉积和等离子喷涂等方法。化学气相沉积和物理气相沉积效率低、成本较高且操作过程中存在较大的环境污染,不易制备厚涂层。LPPS技术具有高沉积率、低成本等优势,且涂层制备过程在低压可控气氛进行,涂层无污染,众多研究者对此开展研究。

T. G. Wang等<sup>[44]</sup>采用LPPS技术在CuCrZr合金表面制备了W/Ti合金涂层,涂层组织致密,W涂层含氧量极低。当热通量从0升至8 MW/m<sup>2</sup>,涂层表面无剥落,粘接层无裂纹产生。季珩等<sup>[45]</sup>分别采用APS和LPPS技术在铜基体制备W涂层,APS-W涂层显微结构疏松,VPS-W涂层结构致密,APS-W中氧的质量分数为0.21%,而VPS-W涂层中氧的质量分数为0.07%,热冲击试验表明VPS-W涂层具有较好的抗高能电子束热冲击性能。Deng Chunming等<sup>[46]</sup>采用低压等离子喷涂技术在CuCrZr合金表面制备W/Cu功能梯度涂层,厚度约为2 mm,氧的质量分数为0.89%,孔隙率为8.5%,涂层结合强度为(13±1) MPa,涂层在能量密度为9 MW/m<sup>2</sup>条件下可承受1000次的热冲击,但高孔隙率和较厚过渡层导致涂层结合强度偏低。采用LPPS技术制备高热导率、高抗热冲击、高可靠性的面向等离子体材料是未来的发展方向<sup>[47]</sup>。

### 3 工艺局限性

低压等离子喷涂技术虽然喷涂效率高、涂层致密、结合强度高,但该工艺成本较高,仅在航空航天等高端领域应用,目前仍有以下工艺局限。

1)加热时间较短。低压等离子喷涂粉末在焰流中停留时间较短,须采用比表面积大的超细粉末,使粉末颗粒充分熔融,但涂层仍存在极少孔隙。

2)残余应力难以避免。涂层中存在未熔粒子、孔隙、显微裂纹等,使得涂层显微结构对基体表面具有各向异性,涂层的残余应力难以避免<sup>[48]</sup>。

3)工件尺寸受限。喷涂过程是在密闭的空间由机械手完成,故工件尺寸受喷涂空间及喷涂机械手运动范围影响较大,目前仅限于喷涂尺寸较小的工件。

## 4 结语

低压等离子喷涂技术已广泛应用于航空航天、海洋装备、核电等领域,欧美等发达国家投入大量人力、物力利用该技术开发新型功能性涂层。需要在以下方面进行重点关注。

1)完善相关理论。等离子喷涂焰流形成机制、焰流与喷涂材料的作用机理、压力对喷涂粉末影响机制、粒子气化对焰流影响规律等需进一步研究。

2)与其他技术联用。采用LPPS技术和激光重熔,改善陶瓷与金属的结合形式,实现涂层与基体的冶金结合,可制备无裂纹、组织细化、结合强度提高的功能性涂层<sup>[49]</sup>。

3)实现工艺在线可控。采用涂层在焰探针及光谱仪等线检测技术实时监测喷涂粒子温度与速度,建立喷涂粒子物理参数与涂层组织性能的对应关系,自动通过在线参数控制提高涂层性能。

4)气氛压力更低。近年来,超低压等离子喷涂技术发展起来,动态工作压力可降至100 Pa以下,焰流温度及速度分布更加均匀<sup>[50]</sup>,可大面积制备均匀致密、低应力的薄涂层,在导电、绝缘、电磁等领域有广泛的应用。

## 参考文献

- [1] 徐滨士,朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,1999.  
XU Bin-shi, ZHU Shao-hua. Theory and Technology of Surface Engineering [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
- [2] 王娟. 表面堆焊与热喷涂技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.  
WANG Juan. Surface Overlaying and Thermal Spraying [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [3] 吴子建. 热喷涂技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.  
WU Zi-jian. Development and Application of Thermal Spraying [M]. Beijing: Machine Industry Press, 2005.

- [4] 徐滨士,刘世参. 中国材料工程大典[M]. 北京:化学工业出版社,2006.  
XU Bin-shi, LIU Shi-can. Chinese Material Engineering [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2006.
- [5] 王少鹏,李争显,杜继红. 钛合金表面等离子喷涂涂层材料的研究进展[J]. 表面技术,2013,42(5):93—97  
WANG Shao-peng, LI Zheng-xian, DU Ji-hong. Research Progress in Plasma Spray Coating Materials on the Titanium Alloy Substrates [J]. Surface Technology, 2013, 42 (5): 93—97.
- [6] 黄传兵,杜令忠,刘伟,等. 等离子喷涂 CoCrAl-B<sub>4</sub>C 涂层的微观结构与性能[J]. 表面技术,2012,41(3):1—4.  
HUANG Chuan-bing, DU Ling-zhong, LIU Wei, et al. Microstructure and Properties of Plasma Sprayed CoCrAl-B<sub>4</sub>C Coating[J]. Surface Technology, 2012, 41 (3): 1—4.
- [7] 毛杰,宋进兵,邓畅光,等. 氧化铝涂层的超音速等离子喷涂参数影响及硬度分析[J]. 表面技术,2014,43(4):110—114.  
MAO Jie, SONG Jin-bing, DENG Chang-guang, et al. Parameter Effect and Microhardness Analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings Prepared by the Supersonic Plasma Spraying Technique [J]. Surface Technology, 2014, 43 (4): 110—114.
- [8] PAWLOWSKI L. Finely Grained Nanometric and Submicrometric Coatings by Thermal Spraying: a Review[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202:4318—4328.
- [9] PAGNOTTA L, GIROLAMO G. Thermally Sprayed Coatings for High Temperature Applications [J]. Recent Patents on Materials Science, 2011, 4(3):1—10.
- [10] LAMUTA C, DIGIROLAMO G, PAGNOTTA L. Microstructural, Mechanical and Tribological Properties of Nanostructured YSZ Coatings Produced with Different APS Process Parameters [J]. Ceramics International, 2015 (41): 8904—8914.
- [11] 邓新建,张东辉. 真空等离子喷涂及其在表面技术中的应用[J]. 表面技术,1996,25(4):33—38.  
DENG Xin-jian, ZHANG Dong-hui. Application of Vacuum Plasma Spraying on Surface Technology[J]. Surface Technology, 1996, 25 (4): 33—38.
- [12] REFKE A, BARBEZAT G. Characterization of LPPS Processes under Various Spray Conditions for Potential Applications [C]. International Thermal Spray Conference, 2003.
- [13] 戴达煌,周克崧,袁镇海. 现代材料表面技术科学[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.  
DAI Da-huang, ZHOU Ke-song, YUAN Zhen-hai. Modern Material Surface Technology Science[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press, 2004.
- [14] VARDELLE M, VARDELLE A, FAUCHAIS P. Spray Parameters and Particle Behavior, Relationships During Plasma Spraying[J]. Thermal Spray Technology, 1993, 2:79—91.
- [15] FEI X A, NIU Y R, JI H, et al. A Comparative Study of Mo-Si<sub>2</sub> Coatings Manufactured by Atmospheric and Vacuum Plasma Spray Processes [J]. Ceramics International, 2011 (37):813—817.
- [16] 杨焜,刘敏,邓畅光,等. 环境压强对低压等离子喷涂熔滴沉积行为及涂层性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014(3):709—717.  
YANG Kun, LIU Min, DENG Chang-guang, et al. Effect of Ambient Pressure on Splat Formation Process and Coating Properties in Low Pressure Plasma Spraying[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014(3):709—717.
- [17] LOCH M, BARBEZAT G, MEYER P. Progress in the Area of Low Pressure Plasma Spraying[C]. International Thermal Spray Conference, 2002.
- [18] 戴达煌,刘敏,余志明,等. 薄膜与涂层现代表面技术[M]. 长沙:中南大学出版社,2008.  
DAI Da-huang, LIU Min, YU Zhi-ming, et al. Modern Surface Technology of Thin Film and Coating[M]. Changsha: Central South University Press, 2008.
- [19] STAIA M H, SUÁREZ M, CHICOT D, et al. Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr VPS Thermal Spray Coatings as Candidate for Chromium Replacement [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 220:225—231.
- [20] TILMANN B, OLENA T, ROLAND H, et al. TBCs for Gas Turbines under Thermomechanical Loadings: Failure Behavior and Life Prediction [J]. Journal of Energy and Power Engineering, 2013(7):647—653.
- [21] PEREPEZKO J H. The Hotter the Engine, the Better[J]. Science, 2009, 326:1068—1069.
- [22] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal Barrier Coating for Gas-turbine Engine Application [J]. Science, 2002, 296:280—284.
- [23] 徐惠彬,宫声凯,刘福顺. 航空发动机热障涂层材料体系的研究[J]. 航空学报, 2001, 21:7—12.  
XU Hui-bin, GONG Sheng-kai, LIU Fu-shun. Recent Development in Material Design of Thermal Barrier Coating for Aeroengine [J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2001, 21:7—12.
- [24] MILLER R A. Thermal Barrier Coating for Aircraft Engines: History and Directions[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1997, 6(1):35—42.
- [25] 杨德明,高阳. 大气和低压等离子喷涂 ZrO<sub>2</sub>-8% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层及性能研究[J]. 热喷涂技术, 2012, 4(3):13—18  
YANG De-ming, GAO Yang. Effect of Plasma Spraying Methods and the Morphology of Powder on the Microstructure of ZrO<sub>2</sub>-8% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating [J]. Thermal Spray Technology, 2012, 4 (3): 13—18.
- [26] ZAHIR S, DIDIER K, PATRICK G, et al. Development of Coating by Thermal Plasma Spraying under very Low-pres-

- sure Condition[J]. Vacuum, 2005 (77): 145—150.
- [27] 王皓, 王全胜. MCrAlY 材料成分改性研究进展[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 152—156.
- WANG Hao, WANG Quan-sheng. Research Progress on Modification in Compositions of MCrAlY Coatings[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 152—156.
- [28] 杨忠须, 刘贵民, 闫涛, 等. 热喷涂 Mo 及 Mo 基复合涂层研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(5): 20—30.
- YANG Zhong-xu, LIU Gui-min, YAN Tao, et al. Research Progress of Mo and Mo based Coating Prepared by Thermal Spraying[J]. Surface Technology, 2015, 44(5): 20—30.
- [29] 周宏明, 易丹青. 低压等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 涂层的组织结构及抗氧化性能[J]. 中南大学学报, 2008, 39(4): 741—747.
- ZHOU Hong-ming, YI Dan-qing. Phase Structure and Oxidation Resistance of NiCoCrAlYTa Coating Prepared by LPPS[J]. Journal of Central South University, 2008, 39(4): 741—747.
- [30] SCHULZ U, LEYENSA C, FRITSCHER K. Some Recent Trends in Research and Technology of Advanced Thermal Barrier Coatings[J]. Aerospace Science and Technology, 2003, 7: 73—80.
- [31] 刘成龙. 金属材料表面抗空蚀涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 127—131.
- LIU Cheng-long. Progress in Coatings on the Surface of Metals for Anti-cavitation Corrosion[J]. Materials Review, 2011, 25(1): 127—131.
- [32] 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- HUANG Ji-tang. Theory and Application of Cavitation Erosion[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991.
- [33] WU Y P. Cavitation Erosion Characteristics of a Fe-Cr-Si-B-Mn Coating Fabricated by HVOF Thermal Spray[J]. Mater Lett., 2007 (61): 1867—1872.
- [34] LIU W, ZHENG Y G, YAO Z M. Cavitation Erosion Characteristics of a NiTi Alloy[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2004(35): 356—362.
- [35] YANG L M. Cavitation Erosion Resistance of NiTi Thin Films Produced by Filtered Arc Deposition[J]. Wear, 2009, 267: 233—243.
- [36] KHALIL A J.  $\text{Ni}_4\text{Ti}_3$ -precipitation during Aging of NiTi Shape Memory Alloys and Its Influence on Martensitic Phase Transformations[J]. Acta Mater, 2002(50): 4255—4274.
- [37] STELLA J, SCHULLER E, HEING C. Cavitation Erosion of Plasma-sprayed NiTi Coatings[J]. Wear, 2006, 260: 1020—1027.
- [38] MARTIN B, NADINE R. Cavitation-resistant NiTi Coatings Produced by Low-pressure Plasma Spraying (LPPS)[J]. Wear, 2015, 328/329: 369—377.
- [39] 高荣杰, 杜敏. 海洋腐蚀与防护技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- GAO Rong-jie, Du Min. Marine Corrosion and Protection Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [40] VARDELLE M, VARDELLE A. Influence of Particle Parameters at Impact on Splat Formation and Solidification in Plasma Spraying Process[J]. Thermal Spray Technology, 1994, 4(1): 50—58.
- [41] LUO G N. Directly-cooled VPS-W/Cu Limiter and Its Preliminary Results in HT-7[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 363/365: 1241—1245.
- [42] CHONG F L. Evaluation of Tungsten Coatings on CuCrZr and W/Cu High Heat Flux and HT-7 Limiter Plasma Irradiation[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 363/365: 1201—1205.
- [43] HU D Y. Effect of Oxidation Behavior on the Mechanical and Thermal Properties of Plasma Sprayed Tungsten Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2008, 17(3): 377—384.
- [44] WANG T G. Thermal Properties of VPS-W Coatings on Cu-CrZr Alloy with Ti Bonding Layer[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 363/365: 1294—1298.
- [45] 季珩, 黄利平, 胡德扬, 等. 大气和真空等离子喷涂钨涂层比较研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2008, S1: 57—60.
- JI Heng, HUANG Li-ping, HU De-yang, et al. Comparative Study on Atmospheric and Vacuum Plasma Sprayed Tungsten Coatings[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2008, S1: 57—60.
- [46] DENG C M, LIU M, YANG Z X, et al. Manufacture of Thick VPS-W Coatings on Relatively Large CuZrCr Substrate and Its Steady High Heat Load Performance[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 455: 145—150.
- [47] CHANG C. Development of Functionally Graded Plasma Facing Materials[J]. Nucl Mater, 2000, 283/287: 1116—1123.
- [48] 高阳. 超低压等离子喷涂与沉积技术的发展动态[J]. 热喷涂技术, 2010(3): 13—17.
- GAO Yang. Development Tendencies of the very Low Pressure Plasma Spraying and Deposition Technology[J]. Thermal Spraying Technology, 2010(3): 13—17.
- [49] 刘其斌. 激光加工技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- LIU Qi-bin. Laser Processing Technology and Its Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [50] GEORG M, ROBERT V, DETLEV S. Thin and Dense Ceramic Coatings by Plasma Spraying at Very Low Pressure[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(1/2): 495—501.