等离子熔覆技术的研究现状及展望

时运[1]，杜晓东[1]，庄鹏程[1]，王长剑[1]，高万东[2]

（1.合肥工业大学 材料科学与工程学院，合肥 230009，2.安徽省特种设备检测院，合肥 230009）

摘 要：等离子熔覆技术是一种高效且应用广泛的表面处理技术，具有与基体结合良好、设备成本低、工作环境无污染及操作简单等优点。从等离子熔覆工艺参数研究、等离子熔覆合金涂层、等离子熔覆颗粒增强金属基复合涂层、等离子熔覆层质量调控方法、等离子熔覆技术应用等五个方面，介绍了等离子熔覆技术当前的发展概况。其中，关于等离子熔覆工艺参数研究方面，阐述了熔覆电流、离子气体流量、送粉气体流量、粉末送粉量、焊枪摆动幅度、焊接速度、喷嘴与工件之间的高度及多道搭接时搭接率等参数对涂层组织性能的影响；在等离子熔覆合金涂层方面，介绍了等离子熔覆用合金粉末及其引入方式的研究进展；在等离子熔覆颗粒增强金属基复合涂层方面，叙述了增强颗粒及其添加方式的最新研究成果；在等离子熔覆层质量调控方法部分，阐述了预热缓冷、热处理、外加磁场、机械振动、超声波辅助、加入变质剂及添加稀土元素等手段对熔覆层的质量调控作用；在等离子熔覆技术应用方面，介绍了等离子熔覆技术在矿山机械、汽车零部件再制造以及阀门修复等领域的应用。最后对等离子熔覆技术的应用前景及发展趋势做出了展望。

关键词：表面处理技术；等离子熔覆；工艺参数；合金涂层；颗粒增强金属基复合涂层；再制造；阀门修复

中图分类号：TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)12-0023-11

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.003

Research and Development Trend of Plasma Cladding Technology

***SHI Yun*[1], *DU Xiao-dong*[1], *ZHUANG Peng-cheng*[1], *WANG Chang-jian*[1], *GAO Wan-dong*[2]**

(1.School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2.Anhui Special Equipment Inspection Institute, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: Plasma cladding technology is an efficient and widely used surface treatment technology, which has the advantages of good bonding with the substrate, low equipment cost, no pollution in the working environment and simple operation. The current development of plasma cladding technology was introduced from five aspects: plasma cladding process parameters, plasma cladding alloy coating, particle reinforced metal matrix composite coating by plasma cladding, plasma cladding coating quality control measures of coating, plasma cladding technology application, etc. In terms of the plasma cladding process parameters, the influence of the parameters such as cladding current, ion gas flow rate, powder gas flow rate,

收稿日期：2019-06-21；**修订日期：**2019-11-08

Received：2019-06-21；**Revised：**2019-11-08

基金项目：安徽省重点研发计划项目（201904Aa05020084）；长丰-合肥工业大学产业引导资金（JZ2019QTXM0281）；安徽万安资助项目（W2019JSKF0210）

Fund：Anhui Key Research and Development Plan Project (201904Aa05020084), Changfeng-Hefei University of Technology Industry Guidance Fund (JZ2019QTXM0281), Anhui Wanan Funding Project (W2019JSKF0210)

作者简介：时运（1994—），男，硕士研究生，主要研究方向为金属材料强韧化。

Biography：SHI Yun (1994—), Male, Master, Research focus: strengthening and toughening of metal materials.

通讯作者：杜晓东（1966—），男，博士，教授，主要研究方向为材料强韧化及材料表面工程。邮箱：hfutdxd@126.com

Corresponding author：DU Xiao-dong (1966—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: material toughening and material surface engineering. E-mail: hfutdxd@126.com

powder feeding amount, welding gun swing amplitude, welding speed, height between nozzle and workpiece, and overlap ratio for multiple lapping on the coating microstructure was described. In the aspect of plasma cladding alloy coating, the types of alloy powders for plasma cladding and their introduction methods (pre-coating method and simultaneous powder feeding method) were introduced. In plasma cladding particle reinforced metal matrix composite coatings, the latest research results of reinforcing particles and their addition methods were summarized. In quality control method of plasma cladding coating, the quality control effect of preheating slow cooling, heat treatment, external magnetic field, mechanical vibration, ultrasonic assist, addition of modifier and addition of rare earth elements on the cladding layer was described. In the application of plasma cladding technology, the application of plasma cladding technology in mining machinery, automotive parts remanufacturing and valve repair was introduced. At last, the application prospect and development trend of plasma cladding technology are prospected.

KEY WORDS: surface treatment technology; plasma cladding; process parameters; alloy coating; particle reinforced metal matrix composite coating; remanufacturing; valve repair

等离子熔覆技术是表面工程领域的核心技术之一，它能够在零部件的表面熔覆性能优异的涂层，针对零部件进行表面强化、预保护及修复，以达到延长其服役时间或重新恢复使用的目的，与近年来我国提出的建立“资源节约型，环境友好型”社会的理念相合，引起了广泛的关注。等离子熔覆的工作原理如图 1 所示，当通入工作气体（通常为氩气）后，利用高频火花点燃非转移弧（也称小弧，形成于钨极和喷嘴之间），随后非转移弧点燃转移弧（也称大弧，形成于钨极和工件之间），转移弧在经过喷嘴时会受到其尺寸限制，在由机械压缩作用、冷却水经过喷嘴时引起的热压缩作用及电弧内部的带电粒子对电弧的电磁压缩效应三者综合作用下，产生能量更加集中且稳定的等离子弧[1-3]。等离子熔覆以钨极和工件之间产生的等离子弧为热源，将填充材料（通常为粉末）和工件表面共同熔化形成熔池，随后喷枪继续向前推进，等离子弧移开后，合金熔池逐渐冷却，从而形成与基体结合紧密的熔覆层[4]。

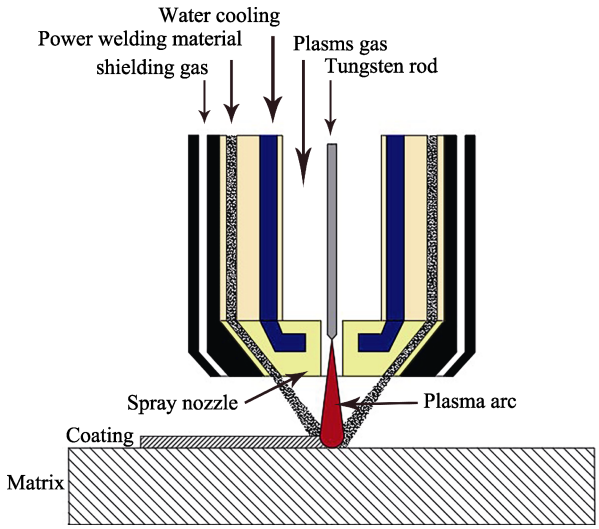


图 1 等离子熔覆原理图

Fig.1 Schematic diagram of plasma cladding

等离子熔覆技术相较于其他表面强化技术，具有熔覆率高、粉末利用率高、稀释率低、可熔覆材料广及工艺可控性好等特点[5]。传统的氩弧堆焊技术，温度过高，焊接应力大，相变难以控制，制得的涂层内部存在气孔、颗粒等，无法保证原零件的精度和强度。采用等离子熔覆技术，熔覆过程中工件的变形较小，再制造后的工件性能甚至超过原零件[6]。与等离子喷涂技术相比，等离子熔覆技术也有明显优势，两者虽然热源相同，但是喷涂工作环境差，粉末飞溅严重，浪费率高，严重污染环境，且涂层与基体的结合属于机械结合，容易脱落[7]。与激光熔覆技术相比，等离子熔覆技术的工作环境要求低，在大气氛围中即可工作，设备的成本较低且操作简单[8]。

本文从等离子熔覆工艺对熔覆层质量的影响、等离子熔覆合金涂层、等离子熔覆颗粒增强金属基复合涂层、等离子熔覆层质量调控方法、等离子熔覆技术应用等方面，对等离子熔覆技术当前的研究动态进行了介绍，并对其发展趋势做出展望。

1 等离子熔覆工艺参数研究

等离子熔覆是一个复杂的工艺过程，熔覆的工艺参数是影响熔覆层质量好坏最直接的因素。熔覆工艺参数主要包含熔覆电流、离子气流量、送粉气流量、送粉量、焊接速度、喷嘴与工件的高度以及搭接率等[9-10]。

毕晓勤等[11]研究了工艺参数对等离子熔覆 Ni-Cr 涂层的组织及成形质量的影响，研究发现，熔覆电流越大，对熔池的热输入越大，单位时间内熔池获得的能量密度越大，会形成较高的温度梯度，从而产成较大的过冷度，使熔覆层的组织得到细化。薛海涛等[12]在 310S 奥氏体不锈钢表面堆焊 T800 合金，研究了焊接电流对涂层组织及硬度的影响，研究发现，涂层主要是由 α-Co 和 Laves(Co_3Mo_2Si)相组成，随着电流的增大，涂层稀释率增大，导致硬度较高的 Laves 相含量降低，而硬度较低的 α-Co 相含量逐渐增加，使得

涂层的硬度降低。可见，适当增加熔覆电流能够使涂层的组织得到细化，但是过高的熔覆电流会导致工件的熔深增加，造成涂层的稀释率增大；而当熔覆电流过小时，粉末熔化不充分，飞溅严重，易造成未焊透、气孔及夹杂等缺陷。离子气是经过电离产生等离子体从而得到等离子弧的介质。李明等[13]对阀门密封面等离子堆焊钴基合金技术进行了研究，发现过高或过低的离子气流量均会对涂层造成不利影响，离子气流量控制在 350~400 L/h 为宜。可见，过大的离子气流量会使等离子弧过“刚”，导致熔覆层稀释率增加，过小的离子气流量会造成等离子弧不稳定，不利于涂层与基体的结合。送粉气的作用主要是把合金粉末均匀的吹入到等离子弧中，进而落到基体表面形成熔池。其流量的大小需要和送粉量配合，流量过大，粉末飞溅，造成浪费，且会干扰到等离子弧的稳定；流量过小，易造成粉末堵管[14]。

刘金生等[15]在 Q235 钢表面制备了 Fe90 合金涂层，利用正交试验探究了焊接电流、送粉速度及送粉气流量对涂层组织和性能的影响，得出最佳工艺参数为：焊接电流 180 A，送粉速度 30 g/min，送粉气体流量 2.5 L/min。此时熔覆层硬度最大，耐磨性最佳。夏丹等[16]在低碳钢板表面使用等离子技术熔覆了 Ni 基合金，研究了不同熔覆枪扫描速度对熔覆层组织形貌及性能的影响。研究发现，随着扫描速度的增大，粉末利用率降低，涂层中柱状晶增多，组织得到细化。速度增大到 140 mm/min 时，熔池无法连续形成，涂层的硬度呈现先增加后减小的趋势，出现峰值。可见，送粉量、焊枪摆动幅度及焊接速度三者综合影响涂层的宏观及微观质量，其中宏观上影响涂层的薄厚及表面平整度，微观上影响涂层组织的粗细程度，只有三者协调才能制得成形质量好的涂层。

在许多实际的生产应用中，工件的表面较大，单道熔覆无法满足要求，这就需要进行多道熔覆。在多道熔覆中，搭接率是影响熔覆层质量的一个重要因素。搭接率偏大，会使熔覆层厚度增加，而熔覆层被重复加热容易产生较大的热应力，导致出现裂纹、变形等；搭接率偏小，则会使熔覆层之间形成凹槽，熔渣在此处堆积，容易引起应力集中而发生断裂[17]。

等离子熔覆的主要工艺参数（熔覆电流、离子气流量、送粉气流量、送粉量、熔覆速度、喷嘴与工件的高度以及搭接率）对熔覆过程和覆层质量的影响可归为四个方面，如表 1 所示。

表 1　等离子熔覆工艺参数对涂层的影响

Tab.1 Influence of plasma cladding process parameters on coating

Cladding process parameters	Effect on the coating quality
Factors affecting the plasma arc heat source (cladding current, ion gas flow and powder gas flow)	If the cladding current is too large, the coating dilution rate is high, the cladding current is too small, and the powder is not sufficiently melted, which may cause defects such as incomplete penetration, pores and inclusions. If the ion gas flow rate is too large, the plasma arc will be “over-rigid”, which will increase the dilution rate of the coating. If the ion gas flow rate is too small, the plasma arc will be unstable. The powder flow rate is too large, causing severe powder splashing, reducing powder utilization, and disturbing the stability of the plasma arc. If the flow rate of the powder feeding gas is too small, the powder may not be effectively sent out of the pipeline into the plasma arc, which may cause the powder to be blocked, and is not conducive to the formation of the molten pool
Factors affecting the rate of powder feeding (feeding amount, welding gun swing amplitude and welding speed)	The larger the powder feeding amount is, the smaller the welding gun swing amplitude is, and the slower the welding speed is, the larger the powder feeding rate is, and the thicker the coating is. On the contrary, the thinner the coating is. Appropriately reduce the powder feeding rate, the coating is thinner, and the cooling rate of the molten pool is faster, so that the microstructure of the coating is finer, but when the powder feeding rate is too small, a continuous coating cannot be formed. The powder feeding amount, the welding gun swing amplitude and the welding speed affect the macroscopic and microscopic quality of the coating, which affects the thickness of the coating, the flatness of the surface, and the thickness of the coating structure. Only three of them can coordinate to produce a good quality coating
Distance between torch and workpiece	The distance between the nozzle and the workpiece is too small, the gas has a large interference effect on the alloy powder, the powder is easy to splash, and the powder utilization rate is lowered, and if the distance is too large, the non-transfer arc cannot ignite the transfer arc
Lap rate	In the multi-pass lap technique, if the lap joint ratio is too large, cracks may occur in the cladding layer, and if the lap ratio is too small, slag may accumulate in the groove, which affects the quality and performance of the cladding layer

熔覆工艺参数的研究是等离子熔覆技术的基本出发点之一。等离子熔覆合金粉末不同，服役条件和性能要求不同，其熔覆工艺参数就不同。要想获得优良的熔覆层，就需要对前述参数做深入的研究和优化，每一个参数都不能或缺，但其中最应关注的是熔覆电流、送粉率及搭接率。

2　等离子熔覆合金涂层

等离子熔覆技术通常使用合金粉末作为熔覆材料。粉末在经过高温等离子弧后熔化，从而在基体表面形成熔池，熔池冷却后即制得合金涂层。根据工作环境要求，可灵活选用不同种类的合金粉末，以制得

满足使用条件的合金涂层。

2.1　等离子熔覆用合金粉末

2.1.1　Fe 基合金

等离子熔覆用 Fe 基合金润湿性较好，能够与大多数成形工件良好结合，应用较普遍，但仍有问题需要研究[18]。Hu 等[19]在高锰钢表面熔覆 Fe-Cr-Ni-C 合金涂层，探究了基体高锰钢的预热对涂层组织及硬度的影响。当高锰钢未预热时，得到的熔覆层中存在横向及垂直于熔合线的裂纹，其组织由奥氏体固溶体及鱼骨状共晶碳化物$(Cr,Fe)_7C_3$组成；而对基体进行 350 ℃预热后，熔覆层中未出现裂纹，组织中的碳化物为$(Cr,Fe)_7C_3$ 和$(Cr,Fe)_{23}C_6$，且这些碳化物变得更为细小，直径大约 1 μm 左右。由于预热时析出的稳定的碳化物$(Cr,Fe)_{23}C_6$可有效抑制裂纹的产生以及提升涂层的显微硬度，合理设计预热工艺对熔覆层性能提升有十分积极的作用。马虎等[20]采用等离子熔覆技术制备了高硼 Fe-Cr 基合金涂层，探究了 B 元素对涂层组织性能的影响。其中，熔覆层组织由初晶硼化物与硼化物和 γ-Fe(Ni)形成的共晶体组成，硼化物呈条状、L 形及不规则形，共晶组织呈层片状，涂层的硬度是基体硬度的 4 倍，表面强化效果明显。Yuan 等[21]利用不同质量比的 Cr_3C_2/Fe-CrNiBSi，等离子熔覆原位生成不同尺寸的$(Cr,Fe)_7C_3$增强铁基涂层，结果显示，原位生成的碳化物含量和尺寸以及涂层的硬度和耐磨性随着 Cr_3C_2 比重的增加而增加。

可见，Fe 基合金配方及工艺方面还有很多潜力可挖。铁基合金粉末是为了降低成本而开发研制的，具有价格低廉及耐磨性好的优点，其良好的耐磨性主要来源于涂层中生成的高硬度的硼化物、M_7C_3 型及 $M_{23}C_6$ 型碳化物，其常规配方适用于再制造受到剧烈磨损的零部件（如轧辊、采煤机截齿、挖掘机铲齿及中温中压阀门密封面等），但是耐蚀性及抗氧化性较差，韧性、抗开裂能力等还有待提升。在现有 Fe 基合金基础上，通过合金化和熔覆工艺，以及前处理、后处理工艺的合理设计，是进一步促进其应用的关键。

2.1.2　Ni 基合金

等离子熔覆用 Ni 基合金是以 Ni 为主要元素，然后在其中添加一定的 Cr、B、Si 和 C 等元素，其高温自润滑性及耐蚀性能优良[22-23]。

除了在普通钢件表面熔覆以提高其耐磨性、耐蚀性外，在铸铁、不锈钢、耐热钢等特殊性能钢表面也可以有很好的应用。Zhou 等[24]在灰铸铁表面等离子熔覆 NiCrSiB 合金。研究发现，从熔合线至顶部，涂层组织依次为平面晶、胞状晶及树枝晶，树枝晶为 γ-(Fe,Ni)固溶体，枝晶间富集$(Fe,Si)_3$、$Cr_{15.58}Fe_{7.4}C_6$ 和 Cr_7C_3 等物相。由于 C 的不均匀扩散及导热性的差异，熔合区的组织较为复杂，包含石墨、马氏体、残余奥氏体、少量珠光体及渗碳体，Ni 基涂层的硬度、弹性模量和抗拉强度均优于灰铸铁，在拉伸实验中，总是灰铸铁基体先出现断裂，表明基体与涂层结合良好。涂层在磨损实验中的质量损失是基体的 44%，涂层磨痕深度也小于基体磨痕深度，涂层耐磨性明显优于基体。在 TP304H 奥氏体不锈钢表面熔覆 Ni-Cr 涂层[25]，其涂层组织呈枝晶生长，与基体结合良好，主要由 Ni 和 Cr_2Ni_3 相组成，腐蚀实验显示，涂层在 650 ℃时腐蚀产物连续完整，主要为富 Fe、Cr 氧化物，有极少量的内硫化腐蚀产物，未出现腐蚀产物大量破裂脱落导致的晶间腐蚀。

比较而言，Ni 基合金尽管成本较高，但在一些对耐蚀性、耐磨性、耐热性要求更高的场合应用前景更好。Ni 基合金在熔点以下温度范围内，均具有面心立方结构，其塑韧性优于 Fe 基合金。此外，Ni 基合金能够固溶更多提升材料耐蚀性的元素（如 Cr、Mo 等），使得其耐蚀性相比于 Fe 基合金耐蚀性好。Ni 基合金适用于修复排气阀密封面、刮板及泵柱塞等耐磨耐蚀零部件。

2.1.3　Co 基合金

等离子熔覆用 Co 基合金是以 Co 为基本成分，并加入 Mo、Cr、W 及 Ni 等元素组成的合金[26]。相较于 Fe 基合金和 Ni 基合金，其具有独特的优点。其熔覆层的组织由三个部分组成：表层细晶区、中部树枝晶及熔合线处板条状树枝晶和粗短的等轴晶。热处理后，晶体变得更为粗大，但是涂层组织及成分都比较均匀，并且由于强化相的析出，使得涂层的硬度明显提高[27]。尽管在熔合区有一定的稀释，但其熔覆层仍主要由 α-Co 和$(Cr,Fe)_7C_3$ 相组成。在室温摩擦磨损时，主要为磨粒磨损，在 300 ℃左右的较高温度磨损时，磨损机制为轻微的粘着磨损，在 300 ℃下，涂层滑动磨损后被氧化，产生的氧化膜具有润滑的效果，使得涂层在 300 ℃下的摩擦系数低于在室温时的摩擦系数[28]。

事实上，Co 基合金相较于 Ni 基合金，具有更佳的热硬性、耐热性及抗氧化性，但是其价格昂贵。Co 基合金由于其出色的综合性能，尤其是良好的高温性能，使得其适用于高温下耐磨、耐蚀和抗热疲劳的零部件，如高温高压安全阀、热剪切刀具、汽轮机叶片及轧钢机导轨等。

2.1.4　合金粉末常用三大体系的特点

综上所述，目前国内外等离子熔覆用合金粉末主要是以上三大体系，可归纳为表 2 所示，它们各有其特点。其中，Fe 基合金粉末来源广泛，相较于 Ni 基和 Co 基粉末，其价格低廉，制得的熔覆层耐磨性较好，应用最为广泛，但是其高温机械性能和熔覆工艺性能较差。Ni 基合金熔覆层具有良好耐热、耐腐蚀性能，但是其熔点较低，高温易于熔化，性能会有所降低。Co 基合金粉末综合性能最佳，但是价格昂贵。

表 2　等离子熔覆合金粉末常用三大体系
Tab.2 Three common systems of plasma cladding alloy powder

Alloy powder	Characteristics	Commonly used plasma cladding alloy powder grade
Fe-based alloy	It has good wettability and can be laminated on the surface of most workpieces with low cost. The disadvantages are poor corrosion resistance and oxidation resistance	Fe1, Fe2, Fe304, Fe313, Fe316, Fe45, Fe5, Fe6, Fe90
Ni-based alloy	Ni-based alloys can dissolve more corrosion-resistant elements such as Cr, etc., making them more resistant to corrosion than Fe-based alloys. In addition, the Ni-based alloy has a planar cubic structure below the melting point, which makes the plastic toughness better	Ni25, Ni35, Ni55, Ni60
Co-based alloy	Co-based alloys have excellent overall properties, but at a higher price	Stellite Co-based powder series

2.2　合金粉末的引入方式

合金粉末的引入方式分为预涂覆法和同步送粉法两种，目前同步送粉法应用较多。

预涂覆法是利用粘结剂将合金调成糊状后，均匀地涂覆在基体上，经过后续处理进行熔覆的一种方法。已有研究发现，通过预涂覆法在 Q235 表面制备的铁基涂层[29]，以及用 Na 水玻璃作为粘结剂在热锻模表面预涂覆制备的 SiC 增强 Ni 基涂层[30]，均具有较好的性能，但存在着粘结剂挥发的问题，从而造成粉末飞溅及涂层中形成气孔等缺点。

为避免预涂覆法的不足，可采用同步送粉的方式在合金表面等离子熔覆 Fe、Ni 基合金等涂层，涂层配方和工艺控制合理可以获得优良的熔覆层性能[31]。同步送粉法是通过通入气体（通常为高纯度的氩气），将合金粉末带入到等离子弧中熔化，从而在基体表面形成合金涂层。同步送粉法相较于预涂覆法，不存在由于粘结剂挥发造成的缺陷，但是当采用这种方法时，基体吸收热量较多，熔深较大，会造成涂层的稀释率较大。

因此，选择合适的合金粉末引入方式对于等离子熔覆高质量的合金涂层是较为重要的。由于同步送粉法相对于预涂覆法，制得的涂层不易产生气孔等缺陷，成形质量好，而且工艺实施较容易、参数易控制，便于实现自动化，其应用更为广泛，也更有前景。

3　等离子熔覆颗粒增强金属基复合涂层

颗粒增强金属基复合涂层是以合金粉末为基体、硬质颗粒为增强相熔覆而成的复合涂层，常添加的硬质颗粒主要为碳化物、氮化物、硼化物及氧化物等陶瓷颗粒的一种或多种。

3.1　碳化物颗粒增强金属基复合涂层

碳化物增强颗粒既可以来源于碳化物硬质颗粒的同步加入或后送粉加入[32]，也可来源于原位生成[33-34]。潘成刚等人[32]通过硬质颗粒同步加入的方法，在 $W_6Mo_5Cr_4V_2$ 模具钢表面制备了 Ni60-SiC 复合熔覆层，其中粉末配比为 Ni60-15%SiC 和 Ni60-25%SiC，合金熔覆层与基体结合良好，组织致密，提高了热锻模具的使用寿命。但 SiC 含量超过上述值后，熔覆层中存在明显的组织缺陷。而原位生成法可利用前驱体技术制得 W-C 等复合粉末[33]，用以在熔覆层中原位生成 WC 等增强颗粒，资料显示[33]，所制得的复合涂层与基体为紧密的冶金结合，原位生成细小的 WC 颗粒分散在 α-Fe 基质中。其中钝角 WC 颗粒是由于 WC 颗粒的锐角部位熔点较低而熔解后产生的。而用钛粉、碳化硼粉及铁基合金粉末为反应源，利用等离子熔覆技术，可原位生成 TiC-TiN 颗粒增强 Fe 基复合涂层[34]，其熔覆层主要由 α-Fe、Cr、Fe_3C、TiC、TiN、$Fe_{23}B_6$ 以及 $Fe_{23}(C,B)_6$ 等物相组成，其中 TiC、TiN、$Fe_{23}B_6$ 和 $Fe_{23}(C,B)_6$ 相在熔覆层中的相对含量随着 Ti 和 B_4C 含量的增加而增加，涂层的硬度及耐磨性随着 Ti 和 B_4C 含量的增加而增加，当 Ti 和 B_4C 含量为 10%时，熔覆层的耐蚀性最佳。

3.2　氮化物颗粒增强金属基复合涂层

氮化物陶瓷颗粒具有优良的耐热性、抗氧化性及耐蚀性等，常常作为复合材料中的增强颗粒，也可通过原位生成和复合添加的方式加入到 Fe 基、Ni 基等等离子熔覆涂层中，以形成氮化物颗粒增强金属基复合涂层，涂层普遍具有较高的耐磨性、耐蚀性和较低的摩擦系数。唐明奇等[35]在 Q235 钢表面原位合成 AlN-Fe_3Al 增强铁基复合熔覆层，结果表明，在不添加 Al 的涂层中，涂层的物相主要由 α-Fe 和 Cr 组成，添加 Al 的涂层中出现 Fe_3Al、Cr_5Al_8 及弥散分布的粒径小于 4 μm 的 AlN 相，Al 加入产生的硬质相 Cr_5Al_8 及 AlN 使得涂层的硬度及耐磨性显著提高，而 Fe_3Al 相在含氯离子的溶液中可以形成钝化膜，使涂层耐蚀性得到提高。Guo 等[36]在 FV520B 钢表面原位合成 TiN 相增强 Ni/Ti 复合涂层，其熔覆层分为柱状晶粒区、柱状树枝晶区及细晶粒区三个区域，由 Ni_3Ti、TiN、(Fe,Ni)及 Ti 等物相组成，其中树枝状和柱状区主要是由 Ni_3Ti 和(Fe,Ni)相组成，制得的涂层硬度得到明显提升，并且由于粒状 TiN 相主要集中在中心部

位，导致原位增强涂层的硬度呈梯度分布，从涂层底部至顶部，硬度值初始时增加，随后降低，再略微增加。硬度值略微增加的原因是由于，顶部快速冷却产生了细小的晶粒。磨损实验表明，原位增强涂层的摩擦系数小于普通涂层和基体的摩擦系数，具有更好的耐磨性。

3.3　硼化物颗粒增强金属基复合涂层

硼化物陶瓷颗粒具有高硬度、耐磨损、耐腐蚀以及抗高温氧化等特点，是材料研究应用领域的研究热点[37]。Huang 等[38]在 H13 表面利用 NiCrBSi+Ti 粉原位生成 TiC、TiB_2 增强镍基复合涂层，研究了涂层的组织及性能。结果显示，涂层物相主要由 γ-Ni、β1-Ni_3Si 和 $FeNi_3$ 等基体相，以及 TiB_2、TiC、CrB、M_7C_3 和 $M_{23}C_6$ 等硬质相组成，硬质相分散在熔覆层基体中，有效改善了涂层的耐磨性，TiB_2 通过螺型位错呈现阶梯式生长，当 Ti 和 Si 的添加量为 15%时，NiCrBSi+Ti+Si 混合粉末制得的涂层具有最佳性能，显微硬度达到 $980HV_{0.5}$，耐磨性是 NiCrBSi 涂层的 5 倍，是 H13 基体的 50 倍，但是涂层的韧性降低，甚至会产生贯穿整个涂层的裂缝。Guan 等[39]原位生成 ZrC-ZrB_2/Ni 基复合涂层，研究了涂层的相组成、显微硬度及耐磨性，实验结果显示，涂层与基体结合良好，主要物相是 ZrC 和 ZrB_2，ZrC 相呈现颗粒状，而 ZrB_2 相呈现针状或棒状。随着 Ni 含量的增加，涂层的硬度及耐磨性先增加后降低。这是由于当 Ni 含量较低时，增强相 ZrC 及 ZrB_2 容易从涂层中脱落，涂层耐磨性降低；而 Ni 含量较高时，增强相含量较低，增强效果弱。当 Ni 含量为 30%时，涂层显示出最高的硬度及最佳的耐磨性。

3.4　氧化物颗粒增强金属基复合涂层

氧化物陶瓷颗粒目前应用最多的是 Al_2O_3 陶瓷颗粒。张天顺等[40]在材质为 R780 的钻杆上堆焊了添加 Al_2O_3-TiO_2 粉末的铁基熔覆层，通过金相实验、扫描电镜分析、XRD 分析、硬度测试及磨损实验发现，添加 Al_2O_3-TiO_2 的涂层中，可以形成弥散分布的 Al_2O_3 颗粒硬质相，有效提升了涂层的硬度及耐磨性。

其中，碳化物陶瓷颗粒特点是硬度大，尤其是 B_4C 颗粒，它在自然界中的硬度仅次于金刚石及立方氮化硼。加入碳化物颗粒制得的复合涂层其硬度及耐磨性较未添加碳化物增强颗粒的普通合金涂层均有较大提升，但是碳化物颗粒加入过多，会导致涂层的塑韧性降低，而且碳化物颗粒在涂层中熔解后会与基体反应生成 M_7C_3 型及 $M_{23}C_6$ 型碳化物，消耗大量的 Cr 元素，这会导致涂层的耐蚀性降低。因此碳化物增强颗粒适用于制造耐磨涂层。

氮化物陶瓷颗粒具有非常高的硬度，而且原位生成的氮化物增强颗粒尺寸小，弥散分布在涂层中，对涂层的增强效果显著，所以它适合作为耐磨增强颗粒，但是 BN、Si_3N_4 及 AlN 等常用氮化物增强颗粒在高温下会升华分解，限制了其在高温情况下的应用。硼化物陶瓷颗粒具有六方晶系点群结构，高熔点、高硬度及高抗氧化性等优点使得它广泛应用于制备刀具、磨具等表面涂层。而氧化物陶瓷颗粒具有高温稳定性好、抗氧化能力强、硬度高、耐磨损及耐腐蚀好等优点，适宜应用于高温条件下耐磨涂层的制备。

不同的增强颗粒有其不同的特点，适用于不同的工作场合。因此，在选择等离子熔覆复合涂层时，要根据各种颗粒增强复合涂层的特点加以选择。常见的增强颗粒种类可归纳为表 3 所示。

表 3　等离子熔覆金属基复合材料常用增强颗粒

Tab.3 Commonly used reinforced particles of plasma cladding metal matrix composite materials

The typies enhanced particle	Characteristics	Common reinforcing particles
Carbide particles	Good wear resistance, easy to obtain materials, widely used	WC, SiC, TiC, B_4C
Nitride particles	Excellent heat resistance, oxidation resistance and corrosion resistance	AlN, BN, Si_3N_4
Boride particles	High hardness, good wear resistance, corrosion resistance and high temperature oxidation resistance	TiB_2, CrB_2, ZrB_2
Oxide particles	High hardness, good oxidation resistance, high temperature stability, suitable for preparing wear resistant coating under high temperature conditions	Al_2O_3

3.5　增强颗粒的添加方式

增强颗粒的添加方式主要有直接加入法和原位生成法两种。

直接加入的方法又包含两种方法：一种是将增强颗粒和合金粉末机械混合均匀进行熔覆的方法。例如何亚楠等[41]在 Q235 钢表面利用混合均匀的 Ni55 和 NiCr-Cr_3C_2 粉末制备了 5 种熔覆层（NiCr-Cr_3C_2 质量分数分别为 10%、20%、30%、40%、50%）。这种方法制得的涂层中，增强颗粒的熔解较为严重，其对涂层的强化效果被减弱，而且过多的增强颗粒熔解，可能会导致涂层中产生网状碳化物，这将会恶化涂层的塑韧性。另一种方法是额外添加一个送粉通道，将增强颗粒加入到金属熔池中，增强颗粒可以避开与等离子弧的接触，以减少其熔解量。如 Zhong 等[42]通过另置的送粉管道将 WC 颗粒加入到熔池中，有效地避

免了 WC 颗粒的大量熔解，相较于 WC 颗粒与粘结相粉末同时添加时，涂层的硬度及耐磨性均明显提高。但是这种方法制得的涂层中的 WC 颗粒大部分沉积在涂层的底部靠近熔合线的位置，使得 WC 颗粒分布不均匀，这是由于 WC 颗粒的密度大于熔池金属熔液的密度。

原位生成增强颗粒的方法具有增强颗粒在涂层中分布均匀、与粘结相材料结合良好及表面无污染等优点，其基本原理是利用不同元素或化合物之间进行的化学反应，从而生成一种或几种陶瓷颗粒增强相。如毕文彪等[43]在 Q235 钢表面原位生成 TiB_2-TiC 增强铁基涂层，TiB_2 呈多边形和矩形，TiC 呈不规则块状，增强颗粒分布均匀。可见，原位生成增强颗粒的方法得到的增强颗粒表面无污染、与基体结合良好及分布均匀，是制得性能优良的颗粒增强复合涂层的一种有效手段。

4　等离子熔覆层质量调控方法

等离子熔覆技术经过多年的研究，涂层的质量问题可通过一些手段进行有效调控。如等离子熔覆是一个快速熔化及快速凝固的过程，这种急冷急热的状况下会产生较大的热应力，这会使得工件发生变形以及在涂层中产生裂纹，目前常用的调控方法是通过在熔覆前对基体进行预热以及熔覆后对工件进行保温缓冷。此外，等离子熔覆是一个快速凝固的非平衡结晶过程，这使得制得的涂层成分不均匀，对涂层的耐腐蚀、耐磨损及塑韧性等性能影响较大，可以使用热处理的方法均匀化涂层的合金元素，改善涂层的性能。

除了以上常见的质量调控方法以外，等离子熔覆层改性技术是近些年来等离子熔覆层质量调控方法研究的热点之一，它是一种通过物理或化学的方法，改善等离子熔覆层的组织和性能的技术。除了添加增强颗粒外，还有如外加磁场、机械振动辅助、超声波辅助、添加变质剂以及添加稀土氧化物等改性手段。

外加磁场的目的是利用磁场对于熔覆层的电磁场搅拌效应，使涂层中正在结晶的枝晶破碎，形成更多的形核质点，从而达到细化晶粒的效果。外加的磁场按照电流属性可分为稳恒磁场和交变磁场，按照磁场方向与等离子弧方向的位置关系可分为横向磁场和纵向磁场，它们均对涂层具有良好的改性效果。刘政军[44]在低碳钢表面熔堆焊 Ni 基合金，熔覆过程中外加直流横向磁场辅助，发现堆焊电流需要与磁场电流相匹配才能获得最佳的堆焊层，磁场辅助制造的堆焊层性能优于未加磁场时堆焊层的性能。苏允海等[45]研究了横纵磁场对铁基合金堆焊层性能的影响，结果发现，无论是直流横向磁场，还是纵向磁场，都对熔覆层的性能有所改善，其中横向磁场对提升堆焊层硬度效果明显，而纵向磁场对提升堆焊层耐磨性效果较为明显。

机械振动辅助等离子熔覆技术是通过在熔覆过程中施加一个垂直于或平行于基板方向的机械振动来实现的。刘洪喜等[46]利用机械振动技术辅助熔覆铁基合金发现，涂层与基体结合面处结晶形态由平面晶转变为柱状晶，涂层中气孔、裂纹减少，晶粒得到细化，机械振动的振幅和频率对涂层的组织及性能有着显著的影响。振幅在 0.13~0.18 mm 时，晶粒细化效果最佳。振动频率越高，增强相分布越密集。机械振动辅助下的涂层的显微硬度明显高于未添加机械振动时的涂层的显微硬度。Wang 等[47]利用振动基板的方式引入机械振动辅助熔覆 Fe 基涂层，研究发现最佳的机械振动频率为 100 Hz，在频率处于一定的范围内时，Cr、Ni 和 Si 在奥氏体(Fe, Ni)中可以增加，涂层的显微硬度及耐磨性得到显著提升。

利用超声波辅助技术对熔覆层进行改性研究是新兴起的技术手段。高国富等[48]利用超声振动辅助技术在 TC4 钛合金表面熔覆 Ni60WC25 粉末。研究显示：超声波的加入一方面降低了原子的激活能，使液态原子更容易转变为固态原子；另一方面，超声波的加入降低了熔覆层的过冷度。这两方面的作用增大了形核率，此外，超声振动带来的冲击力、搅拌对流及热起伏，使得熔覆层中的大块晶粒破碎，并且可以均匀化熔覆层中的合金元素分布。徐家乐[49]用超声振动辅助熔覆钴基合金涂层，研究了涂层的抗高温氧化性能，结果显示，相较于未添加超声辅助的涂层，超声辅助的涂层的晶粒度更为细小，稀释率降低了 53.78%，表现出更为优异的抗高温氧化性能。

添加变质剂的目的是为了在金属溶液中形成大量的非自发晶核，从而获得细小的晶粒，改善熔覆层的性能。蒋建敏等[50]研究了 Na 变质剂对铁铬碳堆焊合金组织性能的影响，研究发现，Na 的加入使得涂层由过共晶组织转变为亚共晶组织，碳化物的尺寸减小，添加的 Na 在一定范围内时，堆焊层的冲击韧性及低应力磨粒磨损性能均获得提高。Erich 等[51]探究了添加 B 元素的不锈钢涂层的组织及磨损性能，得出结论：添加 B 元素的不锈钢涂层的耐磨性得到显著提高，B 改性不锈钢涂层耐磨性的关键因素是硼化物的含量，由于添加 3%B 的双相不锈钢熔覆层中生成的硼化物含量最高，这使得它的耐磨性最佳。

添加稀土元素是材料改性常用的手段之一，等离子熔覆过程中通常通过添加稀土氧化物进行改性研究。Zhang 等[52]研究了稀土氧化物 Y_2O_3 对熔覆铁基合金组织及性能的影响，研究发现，稀土氧化物 Y_2O_3 可以细化晶粒，使涂层的组织更为致密，并且具有净化晶界的效果，当 Y_2O_3 的添加量为 0.9%时，涂层的硬度及耐磨性达到最佳。陈顺高等[53]探讨了 CeO_2 对熔覆 Ni 基合金涂层组织及性能的影响，得出结论，添加适量的稀土氧化物 CeO_2 可以抑制涂层中裂纹的产生，当 CeO_2 的含量为 0.004%时，涂层的晶粒最为

细小，平均显微硬度最高，是基体硬度的 3.6 倍。

除此之外，等离子熔覆中还有一些其他熔覆层改性方法，但以上述几种方法较为常见，这几种方法对涂层组织及性能的影响可归纳为表 4 所示。其中，外加磁场能够有效地细化涂层的晶粒，改善涂层的摩擦磨损及耐蚀性能。外加磁场中通入交流电产生的交变磁场的改性效果强于通入直流电产生的稳恒磁场的改性效果，横向磁场的改性效果强于纵向磁场的改性效果。超声波对熔覆层的改性作用表现在降低原子激活能和过冷度以及破碎正在长大的树枝晶等方面，超声波辅助制造的涂层相对于未外加超声波的普通涂层，其晶粒明显细化，涂层改性效果明显。

表 4 常见熔覆层质量调控方法及其效果

Tab.4 Common quality control method and effect of cladding coating

Common cladding layer quality control method	Effect on the microstructure and properties of the cladding layer
Preheating and slow cooling after cladding	Reduce thermal stress and suppress crack formation in the cladding layer
Heat treatment	Homogenize cladding alloy elements
Applied magnetic field	It can effectively break up the growing dendrites and refine the microstructure of the coating.
Mechanical vibration	It can effectively refine the grain of the coating and reduce the defects such as pores and cracks of the coating
Ultrasound assist	Refine the coating structure, homogenize the distribution of alloying elements in the coating and reduce the dilution rate of the coating
Adding modifier	Increase the non-spontaneous nucleation rate, refine the grains, and some of the modifiers can also form a strengthening phase with the matrix
Adding rare earth oxide	It can suppress the generation of pores and cracks in the coating, and refine the grain structure of the coating

在熔覆合金中加入变质剂能有效细化涂层的晶粒尺寸，使得涂层的强度、硬度、塑韧性及磨损性能等均获得提升，某些变质剂（如 B 元素）的加入还能在涂层中生成强化相，对涂层的磨损性能提升明显；加入稀土氧化物也可以有效细化涂层晶粒，抑制组织中裂纹与气孔等缺陷的产生，有效地改善涂层的组织性能，但是稀土元素价格较为昂贵，涂层中添加过多的稀土元素使得其实际的应用价值较低。

5 等离子熔覆技术应用

等离子熔覆技术作为表面工程领域重要的技术之一，该技术可以在损伤的零部件表面熔覆一层性能优良的涂层，使得零部件能够重新服役，大大延长了零部件的使用寿命，因此应用十分广泛。本文主要介绍了等离子熔覆技术在矿山机械、汽车零部件再制造和阀门密封面修复等领域的应用。

等离子熔覆技术在矿山机械领域主要应用于采煤机截齿和刮板运输机中部节槽的修复方面。采煤机截齿是用来割煤和凿岩的工具，截齿的机械性能直接影响采煤的工作效率，由于它在工作过程中受到煤层的周期性冲压以及剧烈摩擦，使得其失效现象比较严重，必须进行修复和更换，而等离子熔覆技术是截齿修复最常用的方法之一[54]。此外，刮板运输机作为采煤行业的关键枢纽设备，常常由于恶劣的工作环境，发生磨损失效，采用等离子熔覆技术在失效的采煤机中部节槽部分熔覆一层耐磨涂层，完全可以满足刮板运输机的使用工况要求[55]。采煤机截齿和刮板运输机是煤矿产业失效频率最高的设备，等离子熔覆技术对它们的修复作用能够显著提高采煤效率，市场应用前景广阔。

随着我国汽车行业的蓬勃发展，等离子熔覆技术汽车领域的应用也越来越广泛。如作为汽车重要零部件的发动机缸盖在发动机工作过程中要承受高爆发压力、高温燃烧和冷热交替循环，容易损伤失效，而通过等离子熔覆技术再制造缸盖可以有效延长其使用寿命，节约资源[56]。向永华等[57]在损坏的汽车发动机排气门上熔覆一层 Co 基合金涂层，经过加工成形后的排气门性能完全满足要求，无损检测也表明涂层中无任何缺陷。由此可知，等离子熔覆技术在汽车领域的零部件再制造产业具有很高的应用价值。

阀门密封面的修复再制造是等离子熔覆技术应用最广泛的行业之一。阀门通常是在较高的温度以及较高的流体压力下工作，因此在流体的不断冲刷腐蚀以及阀门开合过程中的磨损下容易使阀门密封性不好，造成阀门失效[58]。目前，由于 Co 基合金本身优良的耐高温、耐磨及耐腐蚀性能，使得它成为再制造阀门的一种重要材料。邢安军等[59]在 Co 基合金的基础上加入适量的 SiC 颗粒来增强涂层的耐磨性，并取得了较好的效果。

总的来说，等离子熔覆技术在矿山设备、工程机械、机械制造以及阀门等行业应用最为广泛。利用等离子熔覆技术对相关设备零部件再制造后，可大大降低企业由于更换零部件产生的成本。更为重要的是，

零部件的更换会带来设备的停产，这会大大降低企业的生产效率，而通过等离子熔覆技术的再制造，可以使零部件反复使用，快速服役，极大地提高了企业的经济效益。

6　展望

与其他表面改性技术相比，等离子熔覆是一种使用简单、成本较低以及制得的涂层质量优良的表面处理技术，近些年来在煤矿、机械等领域应用广泛。未来等离子熔覆技术在以下方面具有广泛的应用前景及发展潜力：

1）等离子熔覆技术在再制造领域的应用。目前国外的再制造技术已经形成了完整的产业链，2005 年时全球再制造产业的市值就已超过 1000 亿美元，国内的再制造领域市场同样广阔。因此研究应用于再制造领域的等离子熔覆技术是未来的发展趋势之一。

2）等离子熔覆在增材制造领域的发展。随着 3D 打印技术在国内外的大热，增材制造技术得到了广泛的关注，等离子熔覆中应用于此领域的等离子体增材制造技术具有能够研制复杂结构的零部件、绿色制造、产品成形速度快等优点，而国内外关于等离子体增材制造技术的研究较晚，关于此技术的研究还有待深入。

3）研制新型的熔覆用材料。熔覆所使用的材料是决定涂层性能的关键因素，开发新型熔覆用材料是等离子熔覆技术发展的最基本趋势之一。

参考文献：

[1] 杨宏欢. 高锰钢表面等离子熔覆 Fe-Cr-Ni 合金涂层的组织与性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
YANG Hong-huan. Effect of microstructure and properties of plasma cladding Fe-Cr-Ni coatings on high manganese steel substrate[D]. Gugangzhou: Guangdong University of Techenology, 2016.

[2] 李洋. 热力作用下钴基熔覆层表面/界面失效行为及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
LI Yang. Study on failure behavior and mechanism of surface/interface of cobalt-base cladding coating with thermal and mechanical effects[D]. Harbin Engineering University, 2018.

[3] 狄鹏. 铜表面等离子熔覆 Ni/Ni-Al 金属间化合物涂层制备及性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
DI Peng. Formation and performance of Ni/Ni-Al intermetallic coatings prepared by plasma cladding on pure copper[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[4] 姜闪闪. 颗粒增强等离子铁基过共晶复合涂层的组织与磨损性能[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.
JIANG Shan-shan. Microstructure and wear properties of plasma surfacing particle reinforced iron-based hypereutectic composite coatings[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018.

[5] 王成杰. 铁基碳化钨等离子熔覆层的制备及其性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
WANG Cheng-jie. Study on preparation and performance of fe-based WC plasma cladding layer[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[6] 崔玉平. 再制造让废旧重型机械零部件再度“复活”[J]. 表面工程资讯, 2015, 15(1): 18-19.
CUI Yu-ping. Remanufacturing allows old heavy machinery parts to be "revived" again[J]. Information of surface engineering, 2015, 15(1): 18-19.

[7] 严大考, 张洁溪, 唐明奇, 等. 等离子熔覆技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 20-24.
YAN Da-kao, ZHANG Jie-xi, TANG Ming-qi, et al. Research development of plasma cladding technology[J]. Hot working technology, 2015, 44(4): 20-24.

[8] 齐秀丽, 王广先, 付珍, 等. 等离子熔覆技术在中部槽的应用及效果分析[J]. 煤矿机械, 2010, 31(11): 111-113.
QI Xiu-li, WANG Guang-xian, FU Zhen, et al. Application of plasma cladding technology on central trough and effect analysis[J]. Coal mine machinery, 2010, 31(11): 111-113.

[9] 丁莹, 周泽华, 王泽华, 等. 等离子熔覆技术的研究现状及展望[J]. 陶瓷学报, 2012, 32(3): 405-410.
DIN Ying, ZHOU Ze-hua, WANG Ze-hua, et al. Research status and prospect of plasma cladding technology[J]. Journal of ceramics, 2012, 32(3): 405-410.

[10] 刘海英. Fe90/WC_P 复合涂层组织与性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
LIU Hai-ying. Study on microstructure and properties of Fe90/WC_P composite coatings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

[11] 毕晓勤, 胡小丽, 王洁. 工艺参数对等离子熔覆 Ni-Cr 合金涂层组织及成形质量的影响[J]. 航空材料学报, 2009, 29(3): 45-49.
BI Xiao-qin, HU Xiao-li, WANG Jie. Influence of processing parameter on microstructure and forming characterizations of Ni-Cr cladding formed by plasma surfacing processes[J]. Journal of aeronautical materials, 2009, 29(3): 45-49.

[12] 薛海涛, 王汉清, 靳伟, 等. 等离子弧粉末堆焊工艺参数对 T800 堆焊层组织及硬度的影响[J]. 焊接技术, 2017, 46(03): 6-8.
XUE Hai-tao, WANG Hai-qing, JIN Wei, et al. Effect of plasma powder surfacing parameters on microstructure and hardness of T800 surfacing layer[J]. Welding technology, 2017, 46(3): 6-8.

[13] 李明, 高捷, 李辉. 阀门密封面粉末等离子堆焊钴基合金技术研究[J]. 阀门, 2010(6): 8-12.
LI Ming, GAO Jie, LI Hui. PPW with cobalt-base alloy technology research on valves sealing surfaces[J]. Valve, 2010(6): 8-12.

[14] 王彦贞, 甄力. 采煤机截齿等离子弧粉末堆焊工艺[J]. 焊接技术, 2018, 47(3): 60-62.
WANG Yan-zhen, ZHEN Li. Plasma arc powder building technology of shearer picks of coal winning machine[J]. Welding technology, 2018, 47(3): 60-62.

[15] 刘金生, 马跃进, 杨杰, 等. 工艺参数对钻杆接头 Fe90 等离子堆焊层组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(9): 115-118.
LIU Jin-sheng, MA Yue-jin, YANG Jie, et al. Effect of processing parameters on microstructure and properties of Fe90 plasma surfacing layer for drill pipe joint[J]. Heat treatment of metals, 2016, 41(9): 115-118.

[16] 夏丹, 徐滨士, 吕耀辉, 等. 熔覆枪扫描速度对镍基微束等离子熔覆层性能的影响[J]. 金属热处理, 2008(9): 9-11.
XIA Dan, XU Bin-shi, LV Yao-hui, et al. Influence of sweeping speed of deposition gun on Ni-based micro-plasma arc cladding coatings[J]. Heat treatment of metals, 2008(9): 9-11.

[17] 杨西东. 矿用截齿微弧等离子熔覆与二次注入 B_4C 颗粒的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
YANG Xi-dong. Research on micro-arc plasma surface cladding of mine-used pick and secondary injection B_4C composite[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.

[18] ZHANG Li-min, SUN Dong-bai, YU Hong-ying, et al. Characteristics of Fe-based alloy coating produced by plasma cladding process[J]. Materials science & engineering A, 2006, 457(1): 319-324.

[19] HU Yong-jun, WANG Jun, YUAN Lei, et al. Influence of the phase composition and microstructure of plasma cladding Fe-Cr-Ni-C alloy coating on residual stress and crack formation[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 96(5/8): 1607-1613.

[20] 马虎, 吴玉萍, 王国桐. 等离子熔覆高硼 Fe-Cr 基涂层的组织与性能[J]. 焊接学报, 2009, 30(7): 65-68.
MA Hu, WU Yu-ping, WANG Guo-tong. Properties and microstructures of Fe-Cr coating with high boron by plasma cladding process[J]. Transactions of the China welding institution, 2009, 30(7): 65-68.

[21] YUAN You-lu, LI Zhu-guo. Effects of rod carbide size, content, loading and sliding distance on the friction and wear behaviors of $(Cr,Fe)_7C_3$-reinforced α-Fe based composite coating produced via PTA welding process[J]. Surface & coatings technology, 2014, 248: 1607-1613.

[22] 刘岗. 高锰钢上等离子熔覆镍基合金数值模拟与组织性能分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
LIU Gang. Numerical simulation of plasma cladded nickel-based powder process on high manganese steel and the structure properties analysis[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.

[23] 罗大卫. 42CrMoA 钢表面等离子熔覆 TiC/Ni 复合涂层的制备和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
LUO Da-wei. Study on preparation and properties of TiC/Ni composite coatings by plasma cladding on 42CrMoA steel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

[24] ZHOU Yong-xin, ZHANG Jie, XING Zhi-guo, et al. Micraostructure and properties of NiCrBSi coating by plasma cladding on gray cast iron[J]. Surface & coatings technology, 2019, 361: 270-279.

[25] 黄锦阳, 鲁金涛, 周永莉, 等. Ni-Cr 涂层等离子熔覆制备与高温腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2018, 47(4): 42-50.
HUANG Jin-yang, LU Jin-tao, ZHOU Yong-li, et al. The preparation of Ni-Cr coating and the high temperature corrosion behavior with plasma powder cladding technology[J]. Surface technology, 2018, 47(4): 42-50.

[26] 曹钰莹. 钴基复合粉末等离子堆焊层组织与性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
CAO Yu-ying. Study on microstructure and properties of cobalt-based composite powder plasma-arc surfacing layers[D]. Jianan: Shandong University, 2017.

[27] 戴军, 宋玮琦, 张杰, 等. 热处理对等离子熔覆钴基涂层组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(22): 194-196.
DAI Jun, SONG Wei-qi, ZHANG Jie, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of Co-based coating by plasma cladding[J]. Hot working technology, 2015, 44(22): 194-196.

[28] ZHU Zhi-yuan, OUYANG Chun, QIAO Yan-xin, et al. Wear characteristic of stellite 6 alloy hardfacing layer by plasma arc surfacing processes[J]. Scanning, 2017, 2017: 1-7.

[29] 张德库, 王克鸿, 张晶, 等. Fe-Al 金属间化合物对钢表面增强工艺参数的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(12): 85-88.
ZHANG De-ku, WANG Ke-hong, ZHANG Jing, et al. Effect of process parameters on strengthening of steel surface with Fe-Al intermetallic compounds[J]. Transactions of the China welding institution, 2010, 31(12): 85-88.

[30] 金昊, 王华昌, 付劲松. 热锻模表面等离子熔覆 Ni-SiC 覆层的研究[J]. 热加工工艺, 2008(17): 26-28.
JIN Hao, WANG Hua-chang, FU Jing-song. Study on plasma cladding cermet on surface of hot forging die[J]. Hot working technology, 2008(17): 26-28.

[31] 郝金龙, 张梦月, 李洋, 等. 等离子熔覆多元镍基涂层-基体的力学性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 55-60.
HAO Jin-long, ZHANG Meng-yue, LI Yang, et al. Mechanical property of plasma cladded multivariate nickel-based coating and substrate[J]. Surface technology, 2017, 46(8): 55-60.

[32] 潘成刚, 王华昌, 王洪福, 等. 不同 Ni60-SiC 比例及厚度等离子熔覆层的组织及性能[J]. 材料保护, 2010, 43(11): 53-55.
PAN Cheng-gang, WANG Hua-chang, WANG Hong-fu, et al. Microstructure and properties of plasma cladding Ni60-SiC composite coatings with different ratios and thickness[J]. Materials protection, 2010, 43(11): 53-55.

[33] WANG Mi-qi, ZHOU Ze-hua, WU Lin-tao, et al. Characterization and in-situ formation mechanism of tungsten carbide reinforced Fe-based alloy coating by plasma cladding[J]. International journal of minerals, metallurgy and materials, 2018, 25(4): 439-443.

[34] FENG Zai-qiang, TANG Ming-qi, LIU Yu-qiang, et al. Insitu synthesis of TiC-TiN-reinforced Fe-base plasma cladding coatings[J]. Surface engineering, 2018, 34(4): 309-315.

[35] 唐明奇, 李刚, 冯在强, 等. 原位合成 AlN-Fe_3Al 增强铁基等离子熔覆层结构及性能[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 218-224.
TANG Ming-qi, LI Gang, FENG Zai-qiang, et al. Structure and properties of in situ synthesized AlN-Fe_3Al reinforced Fe-base plasma cladding coating[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 218-224.

[36] JIN Guo, LI Yang, CUI Hua-wei, et al. Microstructure and tribological properties of in situ synthesized TiN reinforced Ni/Ti alloy clad layer prepared by plasma cladding technique[J]. Journal of materials engineering and performance, 2016, 25(6): 2412-2419.

[37] 任晓剑, 樊自拴. 硼化物金属陶瓷涂层的研究进展[J]. 材料保护, 2018, 51(1): 90-95.
REN Xiao-jian, FAN Zi-shuan. Research progress of boride cermet coatings[J]. Materials protection, 2018, 51(1): 90-95.

[38] HUANG Fei, XU Hong, LIU Wu-mu, et al. Microscopic

characteristics and properties of titaniferous compound reinforced nickel-based wear-resisting layer via in situ precipitation of plasma spray welding[J]. Ceramics international, 2018, 44(6): 7088-7097.

[39] GUAN Tian-guo, CAO Mei-qing, XIE Kun, et al. Microstructure and wear resistance of ZrC-ZrB_2/Ni composite coatings prepared by plasma transferred arc cladding[J]. Materials research, 2019, 22(3): e20180781.

[40] 张天顺, 王腾飞, 马宗彬, 等. 螺旋钻杆等离子熔覆层的组织与性能分析[J]. 煤矿机械, 2014, 35(1): 41-43.
ZHANG Tian-shun, WANG Teng-fei, MA Zong-bin, et al. Study on microstructure and properties of cladding layers prepared by plasma cladding on helix drill pipe[J]. Coal mine machinery, 2014, 35(1): 41-43.

[41] 何亚楠, 宋强, 孙康, 等. 等离子熔覆 NiCr-Cr_3C_2 复合涂层摩擦磨损性能的研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 126-133.
HE Ya-nan, SONG Qiang, SUN Kang, et al. Wear resistance of plasma cladding deposited Ni-based Cr_3C_2 composite coating[J]. Surface technology, 2019, 48(3): 126-133.

[42] ZHONG Yi-ming, DU Xiao-dong, WU Gang. Effect of powder-feeding modes during plasma spray on the properties of tungsten carbide composite coatings[J]. Journal of materials engineering and performance, 2017, 26(5): 2285-2292.

[43] 毕文彪, 崔洪芝, 张新杰, 等. Q235 低碳钢表面等离子熔覆 TiB_2-TiC/Fe 复合涂层及耐磨性[J]. 复合材料学报, 2018, 35(11): 3097-3105.
BI Wen-biao, CUI Hong-zhi, ZHANG Xin-jie, et al. Microstructure and wear resistance of TiB_2-TiC/Fe composite coatings on Q235 steel prepared by plasma cladding[J]. Acta materiae compositae sinica, 2018, 35(11): 3097-3105.

[44] 刘政军, 李乐成, 宗琳, 等. 磁场作用下镍基等离子弧堆焊层的组织及耐磨性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(2): 53-56.
LIU Zheng-jun, LI Le-cheng, ZONG Lin, et al. Microstructures and wear resistance of Ni-based PLA surfacing layer with introducing magnetic field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(2): 53-56.

[45] 苏允海, 李乐成, 刘政军. 横纵磁场下铁基合金堆焊层组织性能的对比分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 33-36.
SU Yun-hai, LI Le-cheng, LIU Zheng-jun. Comparison of microstructure and properties of deposited metal under DC longitudinal/transverse magnetic field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(4): 33-36.

[46] 刘洪喜, 陶喜德, 张晓伟, 等. 机械振动辅助激光熔覆 Fe-Cr-Si-B-C 涂层的显微组织及界面分布形态[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2192-2202.
LIU Hong-xi, TAO Xi-de, ZHANG Xiao-wei, et al. Microstructure and interface distribution of Fe-Cr-Si-B-C laser cladding alloy coatings assisted by mechanical vibration[J]. Optics and precision engineering, 2015, 23(8): 2192-2202.

[47] WANG Shu-feng, LI Hui-qi, CHEN Xiang, et al. Improving microstructure and wear resistance of plasma clad Fe-based alloy coating by a mechanical vibration technique during cladding[J]. Materials science & engineering A, 2010, 528(1): 397-401.

[48] 高国富, 郭子龙, 李康, 等. 超声振动辅助 Ni60WC25 粉末激光熔覆技术[J]. 金属热处理, 2019, 44(1): 172-175.
GAO Guo-fu, GUO Zi-long, LI Kang, et al. Ultrasonic vibration assisted Ni60WC25 powder laser cladding technology[J]. Heat treatment of metals, 2019, 44(1): 172-175.

[49] 徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 超声振动辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗高温氧化性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 122-130.
XU Jia-le, ZHOU Jian-zhong, TAN Wen-sheng, et al. High-temperature oxidation resistance of Co-based alloy coatings by ultrasonic vibration assisted laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2019, 46(1): 122-130.

[50] 蒋建敏, 翟东训, 贺定勇, 等. Na 变质剂对铁铬碳堆焊合金组织性能影响[J]. 中国表面工程, 2011, 24(1): 16-19.
JIANG Jian-min, ZHAI Dong-xun, HE Ding-yong, et al. The influence of Na modifier on the structure and performance of Fe-Cr-C hardfacing alloys[J]. China surface engineering, 2011, 24(1): 16-19.

[51] SIGOLO Erich, SOYAMA Juliano, ZEPON Guilherme, et al. Wear resistant coatings of boron-modified stainless steels deposited by plasma transferred arc[J]. Surface & coatings technology, 2016, 302: 255-264.

[52] ZHANG De-ku, XUE Hao-bao, WANG Ke-hong, et al. Effect of Y_2O_3 on microstructure and properties of Fe-Al-Si-B cladding by plasma transferred arc[J]. Rare metal materials & engineering, 2018, 47(2): 469-473.

[53] 陈顺高, 张晓明, 郑启池, 等. CeO_2 对激光熔覆 Ni60 合金涂层组织及性能的影响[J]. 激光技术, 2017, 41(6): 904-908.
CHEN Shun-gao, ZHANG Xiao-ming, ZHENG Qi-chi, et al. Effect of CeO_2 on microstructure and properties of Ni60 alloy coating by laser cladding[J]. Laser technology, 2017, 41(6): 904-908.

[54] 张岩. 矿用截齿等离子堆焊层耐磨性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
ZHANG Yan. Study on wear-resistance performance of mining pick spray-welding coating by plasma-transferred arc weld-surfacing[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.

[55] 秦文光. 刮板输送机等离子熔覆再制造强化技术的应用[J]. 中州煤炭, 2016(10): 82-84.
QIN Wen-guang. Application of plasma cladding remanufacturing technology on scraper conveyor[J]. Zhongzhou Coal, 2016(10): 82-84.

[56] 张洁. 等离子熔覆再制造发动机缸盖的组织及性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
ZHANG Jie. Study on microstructure and properties of engine cylinder head remanufactured by plasma cladding[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

[57] 向永华, 徐滨士, 吕耀辉, 等. 发动机排气门等离子熔覆再制造[J]. 金属热处理, 2010, 35(7): 66-69.
XIANG Yong-hua, XU Bin-shi, LV Yao-hui, et al. Plasma arc overlaying remanufacturing for engine exhaust valve[J]. Heat treatment of metals, 2010, 35(7): 66-69.

[58] 田平. 电站高温高压阀门密封面的修复[J]. 冶金动力, 2012(6): 50-52.
TIAN Ping. Sealing surface repairing of high temperature and high pressure valve of power station[J]. Metallurgical power, 2012(6): 50-52.

[59] 邢安军. SiC 增强钴基合金等离子堆焊层组织与性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
XING An-jun. Study on microstructure and properties of cobalt-based composite power plasma-arc surfacing layers reinforcement by SiC[D]. Jinan: Shandong University, 2018.