

# 高能束表面涂层技术-给船机材料穿上“金丝甲”

赵冬冬

上海海事大学

地球 71%面积被海洋覆盖，90%贸易通过海洋进行。“欲国家富强，不可置海洋于不顾。财富取之海洋，危险亦来自海上”。明代伟大航海家郑和这句话提示着我们海洋资源占有着重要的地位。我国自从在 2013 年首次提出建设“21 世纪海上丝绸之路”的合作倡议，经过近 9 年的扎实推进，为世界提供了一项充满中国智慧的共同繁荣发展的方案，对于中国与世界更深层次的互动，提供了良好的平台。据报道，航运已承担了全球 80%以上的国际货物贸易运输，是国家强盛的先行引领和战略支撑，保证航运顺利高效运转，才能让我国对外贸易事业驶入可持续发展的航道。船舶作为航运的主要运输工具，长时间在海上穿梭于世界各国之间，这就使得船机部件长期处于高温、高盐度、高腐蚀性水环境当中。恶劣的工作环境给腐蚀提供了有利条件，腐蚀就犹如手握刀枪的敌人一般，无时无刻不在觊觎着船机部件，妄图给其造成破坏，这些破坏往往是由材料表面开始的(图 1)。如果对于零部件整体采用耐腐蚀材料制造无疑会造成资源的巨大浪费，有悖于可持续发展的战略。基于此，我们选择高能束表面涂层技术给零部件材料表面穿上“金丝甲”——制备耐腐蚀涂层，来改善船机性能，延长船机使用寿命。



图 1 船机部件的腐蚀

高能束表面涂层技术作为表面工程的一种，可以采用离子束、激光束、电子束、高密度太阳能等高密度能量源，照射或注入材料表面，使材料熔覆在基体表面形成防护涂层，从而使船机部件获得高硬度、耐磨损、防腐蚀等性能。高能

束表面涂层技术具有能量密度高、非接触式加热、热影响区小、对工件的整体性能及尺寸影响小、工艺可控性强、便于实现自动化、智能化控制、对环境影响小等优点,拥有极大的潜力和应用前景<sup>[1-3]</sup>。本文基于作者所在实验室的研究背景,结合两种离子束表面涂层技术—等离子堆焊和等离子喷涂,一种激光束表面涂层技术—激光熔覆,主要叙述了高能束表面涂层技术的基本原理、参数和工艺特点。

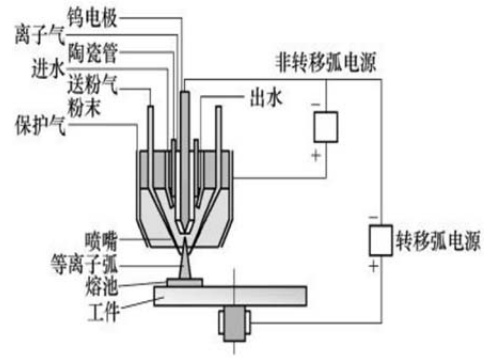
### 等离子堆焊 (Plasma Transferred Arc Welding, PTAW)

等离子堆焊<sup>[4]</sup>技术始于 20 世纪 60 年代,其原理图如图 2 (b) 所示。钨电极位于特制的焊枪内部,焊枪的喷嘴采用水冷却方式,在堆焊过程中钨电极和工件之间的气体电离形成高能量等离子弧,当等离子弧通过喷嘴时,受到冷气流和水冷喷嘴孔壁的冷却作用,将产生压缩效应。等离子堆焊使用粉末作为原料,粉末通过焊枪内部的通道被送到等离子弧区域,经过等离子弧熔化后喷射到工件的熔池内。随着焊枪和工件之间的相对移动,熔池逐渐凝固在工件表面形成堆焊层。在堆焊过程中,还要在熔池周围注入保护气以防止熔池受到外部污染物的影响(本实验室的等离子堆焊设备工作气体为氩气)。在堆焊时可以根据实际情况调节堆焊电流、堆焊电压、送粉速率、振荡速度、喷嘴到工件的距离、堆焊速度、等离子体气体流量、保护气流量等参数,这些参数在堆焊中各有其重要性。与其它堆焊工艺相比,等离子堆焊有着很多优点。比如:

1. 等离子堆焊使涂层和基体之间形成冶金结合,稀释率低。
2. 堆焊层成形较好,可通过调节堆焊参数达到涂层平整光滑的目的。
3. 整个等离子堆焊过程是自动化控制进行的,生产率高。
4. 可控性好,能通过改变工艺规范参数,可精确控制成形尺寸、搭接率、堆焊道数等。
5. 热影响区小,工件一般不易变形。



(a)



(b)



(c)

图2 (a) 等离子堆焊设备 (b) 等离子堆焊原理图 (c) 等离子堆焊涂层

### 等离子喷涂 (Atmospheric Plasma Spray, APS)

等离子喷涂<sup>[6]</sup>作为离子束涂层制备工艺的一种,已经成为成熟的涂层制备工艺之一,其可以满足修复受损旧零件和新零件防护、改性等多种工业生产需要。已被广泛应用于热障,耐磨,耐蚀,导电,绝缘等多种性能需要的涂层制备中。其工作原理图如图3(b)所示。等离子喷涂设备以惰性气体氩气作为保护气体(主气),氦气作为工作气体(辅气),在喷枪阴极和喷嘴之间,气体被电离成为具有高能量的等离子弧。与等离子堆焊相同的是等离子喷涂喷嘴周围也采用水冷却,等离子弧作为压缩电弧由喷嘴喷出形成等离子焰流。粉末经过喷枪两侧的送粉通道送入焰流中并被加热融化成为熔融或半熔融粒子,并在气流的作用下高速飞行到基体上。无数熔融粒子经过快速撞击,铺开,冷却,凝固的过程后形成具有层状结构的涂层。等离子喷涂工艺同样有多个可调参数,主要有气流量(其中包括离子气流量、载气流量、保护气流量)、功率、电流、电压、喷涂距离、送粉速率、喷涂角度、喷枪移动速度。另外整个喷涂环境中,粉尘是不可避免的,要做

好整个环境的通风除尘工作，最大程度上避免其它杂物对涂层造成影响。相比较其它热喷涂工艺，等离子喷涂有着以下优点：

1. 等离子焰流温度高，能量束集中，可以熔化高硬度、高熔点的粉末，对可喷涂的材料几乎没有限制，可以用来制备多种涂层。
2. 喷涂粒子飞行速度高，所得到的涂层平整光滑，致密性高。
3. 工作气体为惰性或还原性气体，能有效改善喷涂过程中材料的氧化问题。
4. 等离子喷涂设备实现自动化控制，操作简单，工艺成熟且沉积效率高。

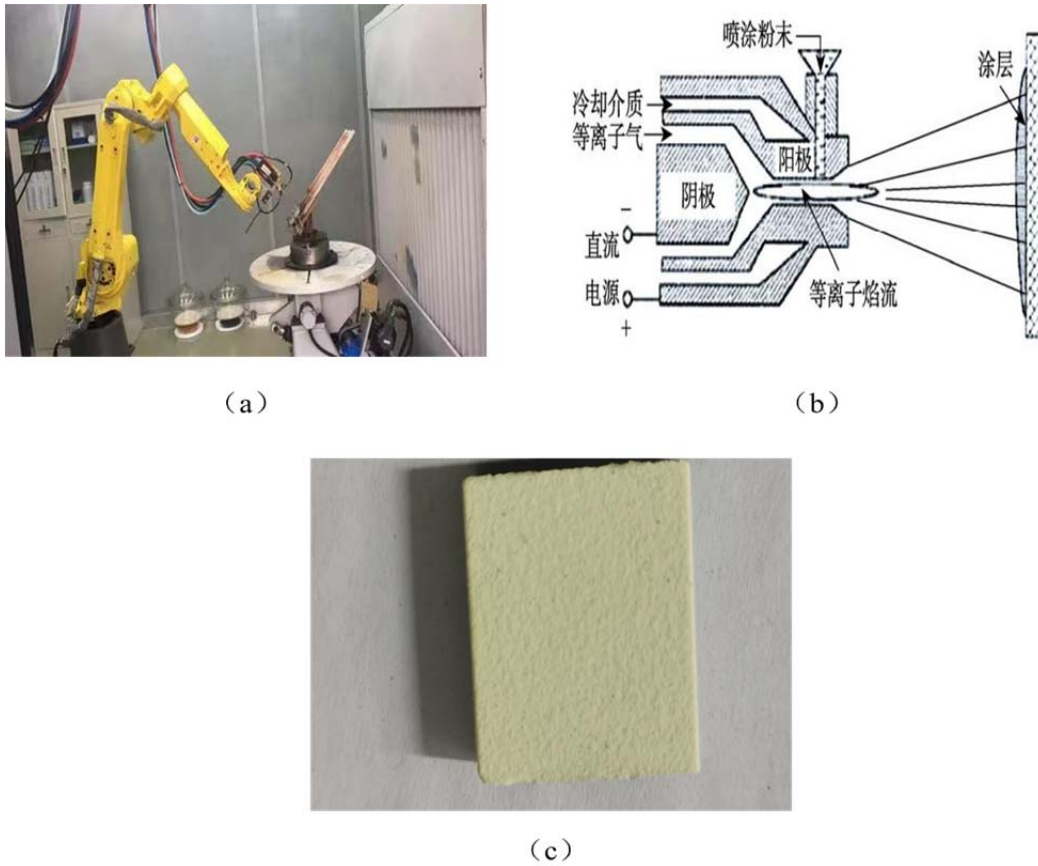


图3 (a) 等离子喷涂设备 (b) 等离子喷涂原理图 (c) 等离子喷涂涂层

### 激光熔覆 (Laser Cladding)

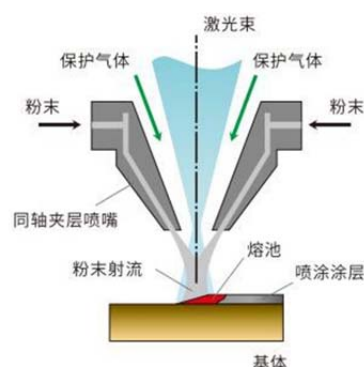
激光熔覆<sup>[6, 7]</sup>技术起源于1974年，首先在国外发展，经过对激光器制造工艺的不断优化，其功率和稳定性都有了长足的进步，现在也被广泛应用于各个领域当中。激光熔覆技术是指由激光器提供稳定激光热源，激光对粉末和基材表面同时辐射热量使之快速熔化形成熔池，随着激光热源的移动，熔池快速凝固从而在基体表面形成熔覆层（图4）。激光器作为激光熔覆设备的核心部件，将直

接影响覆层的形成质量，所以要按照不同场合选择合适的激光器类型。激光器从传统的气体激光器和固体激光器，发展到现在的半导体和光纤激光器，无论是光电效率还是光电质量都较老式激光器有了很大提升。激光熔覆按照熔覆材料供给方式不同可分为预置式和同步式两种。预置式是将熔覆材料事先置于基材表面的熔覆部位；同步式则是将粉末或丝材类熔覆材料经过喷嘴在熔覆过程中同步送入熔池中。熔覆材料以粉末的形式最为常用。

激光熔覆的工艺参数主要有激光功率、光斑直径、熔覆速度、离焦量、送粉速度、扫描速度、预热温度等。这些参数对熔覆层的稀释率、裂纹、孔隙率等有很大影响。各参数之间也相互影响，是一个非常复杂的过程，须采用合理的控制方法将这些参数控制在激光熔覆工艺允许的范围内。经过参数优化所制得的熔覆层有着较低稀释率、热影响区小、与基体成冶金结合、基体零部件变形小等优点。



(a)



(b)



(c)

图4 (a) 激光熔覆设备 (b) 激光熔覆原理图 (c) 激光熔覆涂层

我们使用等离子堆焊、等离子喷涂和激光熔覆三种高能束表面涂层工艺成功在 Q235 钢上制备了多种新型材料的涂层，如三元硼化物基陶瓷涂层、高熵合金涂层等，并对涂层做了电化学腐蚀试验。通过对涂层动电位极化曲线和电化学阻

抗谱的研究分析,结果表明通过这三种高能束涂层制备工艺所制得的涂层使基体表面的抗腐蚀性能得到了显著提高。

## 结语

腐蚀无处不在,而船机部件所处的工作环境更是使得腐蚀如鱼得水,它就像一把无形的镰刀一样随时准备收割零部件的服役寿命。防腐蚀涂层这件“金丝甲”是人们与腐蚀相斗争的有力武器。高能束涂层制备技术就是这件“金丝甲”的制作工艺,诸如三元硼化物、高熵合金等新型材料则是制作“金丝甲”的原料。研究者们对于这些制备工艺和新型材料的成功开发将会对防腐蚀工作添砖加瓦,力求更长时间的将腐蚀拒之门外。

## 参考文献:

- [1] POATE J M, FOTI G, JACOBSON D C. Surface modification and alloying by laser, ion, and electron beams [M]. Surface modification and alloying by laser, ion, and electron beams, 1983.
- [2] 安永畅男, 陈赛克. 最近的表面改性技术 [J]. 国外金属加工, 1990, 000(001): 52-7.
- [3] FLKE. I, 顾延慰. 激光表面改性和涂层技术的发展 [J]. 国外金属加工, 1995, 000(006): 46-9.
- [4] FAUCHAIS P L, HEBERLEIN J V R, BOULOS M I. Plasma-Transferred Arc [M]. Thermal Spray Fundamentals. 2014: 631-73.
- [5] 杨洪伟, 栾伟玲, 涂善东. 等离子喷涂技术的新进展 [J]. 表面技术, 2005, 34(6): 4.
- [6] 巩水利, 李怀学, 锁红波, et al. 高能束流加工技术的应用与发展 [J]. 航空制造技术, 2009, (14): 6.
- [7] 李文戈, 胡肇炜, 吴钱林, et al. 海洋工程材料激光熔覆表面改性研究现状及应用; proceedings of the 上海市激光学会 2015 年学术年会论文集, F, 2015 [C].