

利用传统淬火设备制备 高技术抗磨耐蚀涂层

——高速快速感应熔涂技术

中国矿业大学(北京)生态功能材料研究所 (100083) 张增志 曾锁廷

一、概述

我国是一个加工业大国,机械制造业在基础性工业中占有举足轻重的地位。传统制造业中的感应淬火设备是耐磨金属零件热处理的主体设备。利用这些传统的设备在金属表面制备高技术“抗磨耐蚀”涂层,可以提升传统工业结构,可将传统感应设备拓展到制备高档化、高技术的防腐、耐磨关键零配件生产与制造。

高效快速熔涂技术是通过感应淬火设备,利用感应快速趋肤致热原理,将各种自熔性合金及金属陶瓷原料熔涂于零件表面,形成优质涂层。与以往技术相比,该技术的基体受热小、涂层充分熔制、生产效率高。其主要特点如下:

- (1) 涂层与基体是熔融态化学结合,结合力强,不脱落。
- (2) 预涂层经充分融化再结晶,形成优质的抗蚀、耐磨显微组织。
- (3) 利用感应快速趋肤加热,工件热影响深度极浅,制作效率高,可进行批量化生产,生产工艺可自动控制。
- (4) 涂层材料可以变换。根据不同环境工况,设计不同防腐耐磨材料涂层,且涂层寿命可以设计。
- (5) 熔涂涂层厚度均匀,加工余量小,材料浪费少,且涂层厚度可根据需要调整。
- (6) 成本低。
- (7) 适合于规则零件的表面处理。

在石油、冶金、矿山、石化、电力、化工、汽车、航空、造船、军工、工业锅炉和制药等工业领域中,机械装备中关键零配件由于腐蚀或磨损破坏,需要经常进行维修、更换。除了汽车、航空、造船和军工等工业外,其他基础工业还存在着标准

关键零配件的供应不足、制造和维修很不完善、现场浪费严重、市场空缺较大等问题。而关键零配件的造价往往很高,如油田抽油泵关键配件——抽油柱塞的造价要占整个抽油泵造价的50%左右。

产业化实践证明,采用高效快速感应熔涂技术在性能价格比上具有一定的竞争优势,在我国基础性工业中的关键零配件的防腐耐磨处理领域应该有所作为。

二、主要设备及原料

主要设备为高频感应加热设备和改造式卧式淬火机床。感应加热设备主要技术参数如下:

震荡频率	200 ~ 250kHz
震荡功率	100kW
输出加热功率	85kW
电源	3相交流、380V、50Hz
电源容量	80kV·A

所采用的原料为国产市售原料——自熔性合金粉。自熔性合金粉末是指在镍、钴、铁、铜及合金中加入能形成低熔点晶体的合金元素而形成的一系列粉末材料,其基本特性表现在三个方面:

- (1) 熔点低 镍基自熔合金的熔点为950 ~ 1100℃,含WC型自熔合金的熔点为960 ~ 1250℃。
- (2) 自脱氧造渣 自熔性合金粉末的熔化过程是一个特殊的冶金过程,熔化时来自空气中的氧会不断地侵入熔化的金属,使之生成各种氧化物。这些氧化物应及时从熔化金属中排出。自熔性合金粉末中含有一定量的硅和硼,由于硼与氧的亲合力高于镍、钴、铁与氧的亲合力,因此硼能还原镍、钴、铁的氧化物而生成氧化硼。氧化硼的熔点很低(约450℃),可是粘度很大,它不容易浮出熔化金属表面,而硅又是另一种较好的自熔性元素,硅不

但能还原镍、钴、铁的氧化物而生成氧化硅，而且氧化硅又可以与氧化硼一起生成粘度小的硅硼溶剂，并与其他金属氧化物一起组成硼硅酸盐玻璃渣，浮出熔化金属表面，完成脱氧造渣过程。

(3) 多种强化相组织结构 与通常的单金属组织结构比较，自熔合金的组织结构比较复杂，它具有多种强化相组织结构。主要的强化相如下：

① 固溶体强化相：镍基自熔合金主要就是硅在镍中的固溶体。

② 化合物强化相：自熔合金的组分较多，各种组分间发生化学反应就组成了各种化合物。

③ 各种自熔合金中主要形成的化合物强化相如下：

硼化物： Cr_2B ， Cr_2B_5 ， CrB ， Cr_5B_3 ， Cr_3B_4 ， CrB_2 ， Ni_3B ， Ni_3B_2 ；碳化物： Cr_7C_3 ， Cr_3C_2 ， Cr_3C_6 ， WC ， W_2C ， $(\text{FeCr})_{23}\text{C}_6$ 。

三、工艺过程和方法

1. 零件表面预处理

熔涂件表面预处理要达到以下三个目的：①粗化表面：使被熔涂表面具有一定的粗糙度，以利用粉料与基材表面的镶嵌、填塞作用。②净化表面：去除被熔涂表面的各种杂物，特别是油污，以利于熔融粉粒与基材表面的湿润和冶金结合。③活化表面：使被熔涂表面形成活化能力，如晶格缺陷、塑性变形，产生一定的应力状态，以利于粉粒与基材表面快速融合。

预处理使表面熔涂的第一步，也是非常重要的一步。一个纯净粗糙的金属表面能大大提高与涂层的结合力，还能提高涂层的质量。预处理工艺步骤如下：

(1) 清洗处理 清洗处理方法包括：溶剂法和碱液法两种。对批量化生产，一般采用廉价的碱液法。溶剂法造价高，有安全隐患，但不产生碱脆。

① 溶剂法：有机溶剂可以有效的溶解有机油脂，对基材表面除去油污效果上佳。常用的溶剂有：工业汽油、三氯乙烯和四氯化碳等。清洗方法有浸渍法、喷淋脱脂法和蒸汽脱脂法 3 种。

② 碱液法：是将基体金属浸泡与由氢氧化钠、磷酸三钠、碳酸钠和表面活性剂构成的碱液中进行清洗。碱液法对除去基体表面油脂和污物很有效。

操作时要防止碱液伤害皮肤和眼睛，工件清洗后应立即用软水漂洗并烘干。碱液法的参考配方如下：

工业氢氧化钠	12g/L
工业碳酸钠	8g/L
工业磷酸三钠	7g/L
十二烷基磺酸钠	微量
温度	50 ~ 60℃
浸泡时间	10 ~ 30min

(2) 表面预加工 表面预加工保证了被涂工件表面有足够的涂层厚度空间，还除去待涂表面的氧化层、疲劳层和镀层等有害表面层，并粗化、净化和活化表面。通常预加工深度应为 0.30mm，也就是比标准尺寸深 0.30mm。这主要考虑工件在熔涂前后进行多次装夹来进行机加工，如果加工深度不够，往往由于多次装夹的偏差，致使零件在完成最后一道加工工序后将涂层磨掉，露出基体，造成涂层在整个圆周上不连续，破坏了涂层的完整性。

(3) 表面喷砂 喷砂不仅可以净化、粗化工件表面，对喷涂工件表面的活化效果也很重要。喷砂会使工件表面在经过砂粒的反复打击后形成一定的残余压应力（尽管该应力数值很小），这对减缓工件熔涂过程中的热应力，并提高涂层的结合强度是有利的，同时还可以提高工件的疲劳强度。喷砂去除了工件表面上的有机污染层和氧化层，并增大金属表面晶粒的塑性变形，造成晶格缺陷，使基体表面处于容易发生化学反应的状态，有助于预涂层与基体表面间的快速熔融结合。

喷砂工艺举例：喷砂用磨料棕刚玉或硅砂；磨料粒度 18 ~ 40 目；喷砂方法为射吸式喷砂；压缩空气压力 0.50 ~ 0.70MPa；喷砂距离 100 ~ 300mm；喷砂角度 60° ~ 70°；喷砂嘴口径 8 ~ 15mm；压缩空气中的油、水去除油水分离器；喷砂后表面粗糙度 $R_a = 4.5 \sim 12.5\mu\text{m}$ ；喷砂后表面外观灰暗色，无光反射亮斑、亮线；喷砂后、预涂前工序间时间 < 1h。

2. 预涂层制备

涂层预制备之前要先保证基体已干净、彻底地除油。涂层预制备共有两种方法。一种是用氧乙炔焰将涂层预喷在基体上，喷涂时使用轻微碳化焰以避免成分氧化。火焰功率可低于一般涂层要求，送粉量可以较高，但要避免过多粉末喷射在外面造成

浪费。第二种方法是用粘结剂将粉末粘结在基体上,经烘干后直接熔涂。

第一种方法实现起来较为简单,但是由于氧乙炔喷涂的使用造成了能源和材料的消耗,同时增加了涂层中成分的氧化,使涂层的性能下降。

在第二种方法中,粘结剂的使用需要恰当选择粘结剂的种类,使之不会造成对涂层性能的影响,同时在涂层融化前涂层不应产生裂纹。我们参照焊接焊条的药皮粘结剂配制了一种无机粘结剂。该种粘结剂抗高温、弹性好,对涂层性能无损害作用。熔涂工艺工件被夹装在工作台上的可移动的夹装装置上,该装置由步进电机控制其行进。感应器固定不动。

控制柜可以指示的并且通过调节可以控制的因素主要是阳极电流、栅极电流和槽路电压。阳极电压、阳极电流较大时输入的功率也较大。但就工作上所得到的比功率而言,还受耦合变压器及许多其他因素的影响,而且目前还不能在设备上得到准确定量的表征。工件上所得到的比功率和下列因素有关:

(1) 控制柜的耦合调节。

(2) 感应器和工件之间的间隙,表征其耦合程度。耦合越紧,则工件上得到的功率越大。

(3) 感应器下端形状,其能覆盖工件的面积表征受热面积。受热面积小,比功率大。

(4) 感应器和工件共同构成的阻抗与设备中其他元件阻抗的比例。

在熔涂试验中,虽然得不到精确的定量,但能判断比功率上升和下降的趋势,因而可以据此调节升降。然后再采取如下措施:针对不同的基体材料、不同的合金粉末、不同的直径和不同的涂层厚度,用试件确定相应合适的工艺参数。具体表现为选择相应的感应器,选择相应的设备参数,然后用于被熔涂的工件上,这种方法在实践中是成功的。

在用试件确定工艺参数时,要按照要求做好预处理和涂层粘结工艺,按照有关原理调整感应器的形状和间隙等参数,调节阳极电流、阳极电压和槽路电压等参数,以便对于特定的条件得到合适的加热速度和功率参数。在选择参数时,按照对基体影响小的原则,优先选择大功率和快走速,尤其对于细长的试件。然后根据熔涂效果再调节参数。

工件行进速度的调节方法如下:熔涂开始时感应器先在涂层上方停留,观察涂层表面的变化,当涂层表面初步出现镜面效应时,调节步进电机的行进速度,使镜面效应刚好能够维持。如果工件涂层不是很长,则步进电机的速度可以基本维持不变。所谓的镜面效应是指自熔性合金粉末在熔化后所呈现的一种现象,其特征是涂层表面出现一层可以定向反射的镜面,标志着涂层熔化及熔渣浮出。但是镜面效应不可太明显,否则会造成熔融涂层流动。

对于熔涂效果的检查如下:涂层熔涂后,首先是检查其外观,表面应该有熔渣浮出。第二步是将工件切开检查其涂层截面,看底部是否熔化良好。可先用肉眼及数十倍的放大镜检查气孔及熔渣等的情况,若效果不佳则需变化参数重新试验。这些检查结束后,可以在显微镜下做进一步的检查。

四、涂层性能、机加工

根据硬度测试、磨损试验和腐蚀试验以及涂层的表面形貌等情况,可以对感应熔涂涂层做出如下综合评价:

(1) 采用同种镍基合金粉末,感应熔涂涂层的表层硬度高于同种材料的氧乙炔喷焊涂层和激光熔涂涂层的硬度。

(2) 就表面形貌而言,感应熔涂涂层表面平整,明显优于激光熔涂涂层,也优于氧乙炔喷焊涂层。感应熔涂涂层的后续加工量很少。

(3) 试验表明,感应熔涂涂层的耐磨性优于激光熔涂涂层和氧乙炔喷焊涂层。

(4) 试验表明,同种镍基合金粉末,感应熔涂涂层的腐蚀速度明显低于氧乙炔喷焊涂层和激光熔涂涂层。

用硬度低、组织疏松的绿色碳化硅砂轮磨削自熔性合金,其磨削效果好,使用方便。由于绿色碳化硅自砺性好,粗磨过程不需要反复修整砂轮,减轻了工人的劳动强度。与超硬磨具比,磨具费用消耗低。绿色碳化硅磨轮的不足之处是砂轮磨耗大,磨削效率仅是金刚石砂轮的1/4。如果选用新牌号硬质合金首先对自熔性合金涂层进行粗加工,切除大部分余量,再用此种砂轮精磨,则是比较经济实用的加工方法。热

(20040806)