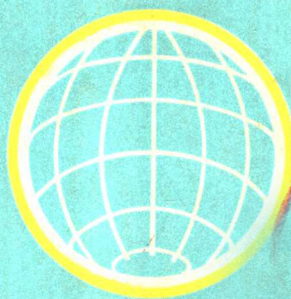


第10届

国际热喷涂会议

译文集



全国热喷涂协作组编译

北京 1984

前 言

第十届国际热喷涂会议于一九八三年五月二日——六日在西德埃森召开。与会代表四百余人，来自大约卅个国家。会议宣读论文六十六篇，张贴论文十一篇。我国首次参加会议，在会上宣读论文两篇，张贴论文一篇。

国际热喷涂会议每隔三年左右的时间召开一次，是热喷涂技术重要的国际性交流活动，大体上反映出这项技术的现状及其发展趋势。为了尽快向国内热喷涂界介绍本届会议内容，全国热喷涂协作组根据国家经委和科委的要求，及时组织翻译了本届会议的论文集（部分译文在付印前尚未收到，日后待机发表；因篇幅所限，文中参考文献一律从略）。

在组织翻译中，机械部哈尔滨焊接研究所、沈阳机电学院、科学院沈阳金属研究所、北京钢铁研究院、北京矿冶研究院、航天部七〇三所、航空部六二五所、装甲兵技术学院、机械部武汉材料保护研究所、湖南钢铁研究所等单位贡献了力量，及时翻译了文章。在田钟庸同志的组织下，胡云秀、方世京和贾永昌等同志对译文做了系统的审校、编辑及印刷前的准备工作；在编辑与出版过程中，得到了刘永惠、张文儒及田冀莎等同志的支持。中国戏剧印刷厂在百忙之中接受了本书的印刷工作，在此一并致谢。

由于时间仓促，加之编者水平有限，本书难免有错误之处，敬希读者指正。

全国热喷涂协作组《热喷涂技术》编辑组

一九八三年九月

目 录

综述

- 1、热喷涂技术的展望..... 1

基体、预处理、精加工工艺和喷涂材料

- 2、等离子喷涂Ni—Cr—B—Si涂层的某些性质..... 8
- 3、Ni和Cr系自熔合金的磨削研究.....12
- 4、在炉内致密化耐磨涂层中的Ni—Cr—B—Si基—碳化物的反应.....17
- 5、金属预处理对结合强度的影响.....21
- 6、等离子喷涂涂层的激光处理.....25

质量控制健康与安全方面

- 7、热喷涂层的热NDE方法.....29
- 8、采用光学全息照相术接收超声波的热喷涂层无损检验.....34
- 9、红外热成像法在涂层试验和等离子喷涂工艺选优中的应用.....38
- 10、火焰涂层的超声分析—时间域频谱分析.....44
- 11、热障涂层结构完整性的声发射研究.....50
- 12、热喷涂操作人员的培训—根据“德国焊接学会”的参考手册.....55
- 13、热喷涂车间人员培训.....58
- 14、等离子喷涂时产生的污染空气物质—对车间喷涂区和操作人员空气采样的测量.....66

涂层及工艺的基础和应用研究

- 15、等离子喷涂中钨和钢的冶金作用.....70
- 16、关于混合粉热喷涂技术的理论分析.....78
- 17、低压氮弧等离子喷涂铝和氮化铝涂层.....83
- 18、射频感应等离子喷涂层特性.....88
- 19、关于喷涂氧化铝涂层时粉末在直流等离子流中的轨迹和温度的研究.....90
- 20、先进的金属和陶瓷粉末的高速热喷涂工艺.....97

热喷涂领域中的机械化和自动化

- 21、热喷涂自动化的新趋向..... 101
- 22、自动化等离子喷涂及真空等离子喷涂所用的机械手及操纵装置..... 106

热喷涂材料和它们的性质

- 23、用熔融金属电弧喷涂法生产热喷涂材料..... 115
- 24、等离子喷涂用的陶瓷基复合材料..... 119
- 25、磷对等离子喷涂Ni—Al层性质的影响..... 126
- 26、保持热喷涂粉末质量的若干问题..... 131

热喷涂在核领域中应用

- 27、第一部分：对高辐射率区域的防护措施金属喷涂..... 138

28、管道破裂开口的动力学—裂缝扩张速度的测量·····	144
29、用金属粉末火焰喷涂及火焰熔化法生产经济的硬面层·····	150
30、耐磨零件的等离子喷涂·····	153
31、高炉风口和冷却衬板防护涂层的改进·····	156
32、电弧喷涂复合线材介绍·····	160
33、玻璃管内壁自动电弧喷涂装置·····	162
34、航空涡轮发动机气路封严热喷涂层的发展·····	165
35、应用高速摄影术使电弧和火焰喷涂条件最佳化·····	172
涂层应用的进展	
36、MCrAlY真空等离子喷涂层·····	179
37、低压等离子喷涂——一种制造电解水设备中的电极的方法·····	189
38、燃气涡轮零件的等离子喷涂MCrAlY及热障涂层·····	194
39、用于近海构件腐蚀保护的火焰喷涂表面层·····	199
涂层性能、涂层对基体的影响、热喷涂元件的设计	
40、等离子喷涂钇稳定氧化锆热障涂层特性和相的研究·····	205
41、关于等离子喷涂的 Y_2O_3 稳定的氧化锆性能的分析·····	211
42、保护铝结构的热障涂层·····	215
43、用于0~600℃温度范围的电弧喷涂复合涂层的发展·····	223
44、不同成份的锌铝合金及其涂层的腐蚀特性·····	229
45、等离子喷涂钛酸铝和铁铝涂层的腐蚀试验·····	234
46、不锈钢的等离子喷涂陶瓷涂层在高湿度环境中的腐蚀性能·····	237
47、喷涂金属人造骨骼与活组织的相互作用·····	242
48、低压等离子喷涂工艺规范对镍基起耐热合金性能的影响·····	249
49、等离子喷涂复合粉的涂层特性·····	255
50、等离子喷涂陶瓷涂层的热震性能·····	264
51、低压等离子喷涂的结合性能·····	269
52、关于Al及Al合金工件热喷涂的理论分析—打底层最佳喷涂工艺的选择·····	273
53、热喷涂材料的磨损·····	280
54、电弧喷涂线材成份及其他工艺参数对钢涂层内应力的影响·····	287
55、用等离子喷涂预置钎料·····	294

综 述

热喷涂技术的展望

H—D • Steffens [西德]

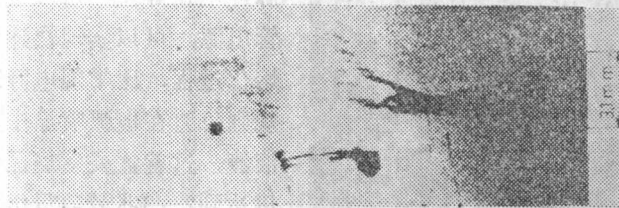
1 绪言

热喷涂已发展成一种非常综合性的方法，几乎对所有工业部门都具有重大意义。目前在原材料和能源短缺的情况下，它与市场的实际状况十分吻合。以往所举办的九届国际热喷涂会议表明，基于某些研究和发展工作，对于那些应力大及功能关键的另部件，采用热喷涂技术是十分适宜的。这项技术的最新发展，其特点是对喷涂设备和材料的质量，以及对应用与功能的创新等方面提出更高的要求。同时需要改善涂层状况，提高喷涂生产率、寻求质量控制及喷涂过程的机械化与自动化的有效方法。

2 火焰喷涂

事实上，线材的火焰喷涂是所有喷涂方法中最早的一种，但至今并未过时，并且在未来的喷涂方法中仍将发挥重要的作用。由于填充线材的采用，使金属陶瓷的喷涂成为现实，从而更增大了这种方法的应用。采用高速摄影技术[1]，可看到在喷涂时熔融的线材末端，同时会出现细小与粗大的颗粒。对涂层质量来说，这是不容忽视的缺点，如图1所示。

图1 火焰喷涂时熔化的线材末端



(颗粒大小杂间，曝光频率18000/秒)

从而，在线材的火焰喷涂中，致力于选择正确的使用颗粒的尺寸范围。另外，对线材熔化的末端进行机械振动和喷雾介质高频脉冲的叠加，对于形成一定的初始扰动，似乎是非常适宜的方法。该法可改善线材熔化末端的成粒状况。可以认为，对线材末端的流动条件施加一定的影响，可改善颗粒的形成过程。[1]

对粉末的火焰喷涂，出现了一种采用特殊加速喷嘴喷涂细粉末的趋势。[2]

然而火焰喷涂的最新成就，是“超音速火焰喷涂”(hypersonic flame spraying)的出现。这种喷涂设备近期在美国获得了进展。该喷枪称之为“喷涂寇特”(Jes—kote)。其内部设有燃烧室和水冷喷嘴，所产生的火焰可达超音速。粒度适宜的粉末进入这种高速火焰，可得到很高的颗粒速度；从而可使涂层致密，结合强度也高。

图2 用超音速火焰喷枪喷涂的碳钨颗粒，穿深到基体表面内。

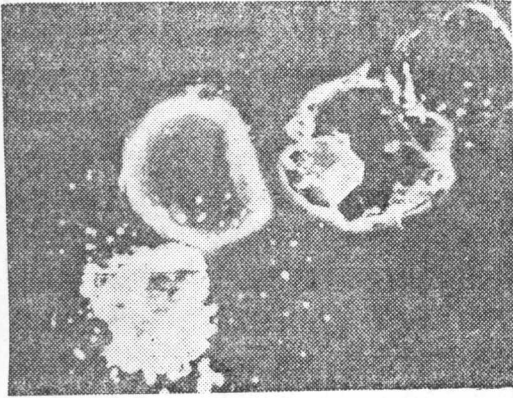


图 2

图3 wc—co涂层（超音速火焰喷涂）

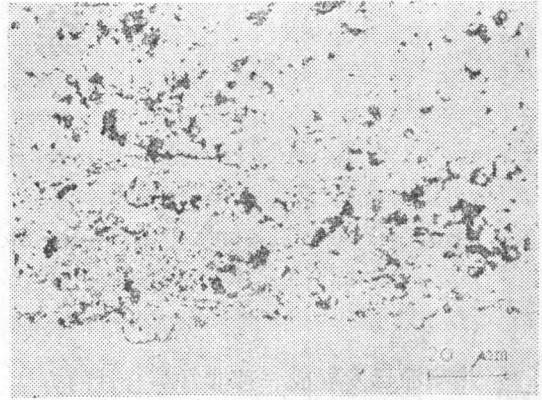


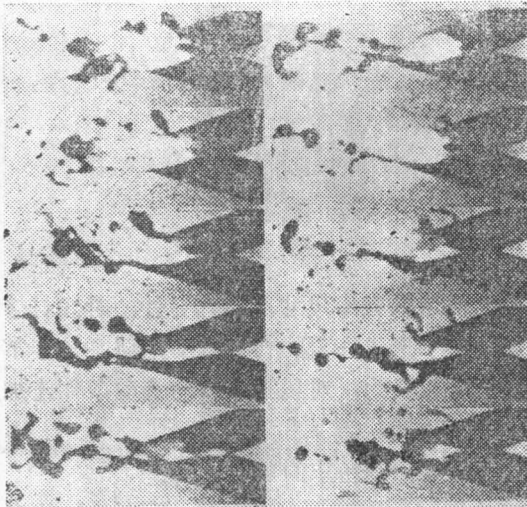
图 3

图2 是碳化钨颗粒喷射到基体表面内的电子扫描摄影照片；图3是用超音速火焰喷枪喷涂13%Co—wc粉所形成的涂层。这项超音速喷枪的试验工作正在几处开展，目前尚未取得最后结果。

3 电弧喷涂

由于电弧喷涂具有很大的经济意义，使人们对它的继续发展产生浓厚的兴趣。高速摄影技术表明，材料经熔融，随之被喷射成多寡不等的微细颗粒，并通常在线材末端不定期地产生累积。进而由此造成颗粒的大小不均，如图4所示。这就使喷射颗粒分布在一个很大的粒度范围之内。因此，如何使之也能象等离子喷涂那样，有一个窄小的颗粒分布范围，乃是人们的希求[1]。

图4电弧喷涂的线材熔化末端



(曝光频率18000/秒，再现频率9000/秒)

况最佳化。

可以预期。采用脉冲技术，即类似于MIG脉冲电弧焊接，可以改善上述状况；应用晶体管电源，可以实现快速脉冲程序，它所进行的熔化过程，比常规电源理想，熔融颗粒均匀而规则[1]。在电弧喷涂中，每秒钟要喷射出大量液滴，这就需要发展晶体管电源，这种电源可以达到2—3兆赫数量级的脉冲频率[4]。

通过改变流动状况，也会对颗粒的形成过程产生影响。在这方面的首次尝试是所谓“封闭式喷嘴装置”[5,6]。在该喷嘴中，借助于额外辐射作用的喷气，使颗粒与压缩空气之间的相对速度增大。其结果，使喷涂材料分散化，射流集中，明显地减少涂层的孔隙度。

然而，改进喷嘴设备的问世，还不足以就此止步。相反，要采用现代试验方法，使流动状

在要求纯表面涂层时，电弧喷涂会出现困难。也就是说，如果要求涂层必须杜绝氧化物

的出现,那么,采用这种方法喷涂纯金属是办不到的。进一步来说,这种非腐蚀性的合金化金属材料,由它担负防腐蚀提供保护的职能。将遭受相当大的损失。因为这些金属化的喷涂颗粒或多或少地要氧化,加之各种电化学反应,使之进一步腐蚀。况且在喷涂中不可避免地要产生严重的非均质性,促使涂层发生局部性的元素集结。尤其是对空气成份(特别是氧和氮)具有亲合力的一些材料,更不宜采用这种方法,因为要求反应产物不容许带入涂层。

在这种情况下,就要将喷涂过程进行在严格密闭的惰性气室中,借助于惰性气体做载带气体[7]。这种方法适用于活性相当强的金属材料,钛的喷涂就是一例,涂层几乎不受污染,其纯度得到很大改善。

然而,也有它的弱点,对气体的吸附在所难免,造成不希望的孔隙。因而,喷涂颗粒对基体的结合以及涂层颗粒之间的结合性,要比用压缩空气做载带气的结果差一些。

在此期间,一种悬而未决的方法是低压电弧喷涂(LPAS)设备,它从另一方面做出努力,以减少反应及电弧喷涂层中气体含量的可能性。在低压电弧喷涂中,常规电弧线材喷涂的熔化过程,首先被转移到具有过剩压的前燃烧室中,以保证有效的熔化,形成很多的液滴,负压对由喷嘴射出的颗粒产生有益的影响,使之达到深度的脱气过程。如此,所产生的涂层具有很高的密度,对基体的结合性能也好。

目前,电弧可以在两条或几条带电线材之间发生,也可在一条中心线材与安置在喷嘴或基体表面的环形反相电极之间起弧燃烧。由于燃烧部位底侧的环形金属镶边和各种基体之间形成了一个张力,即可得到一种极性可加选择又能恒定的电弧。

4. 等离子喷涂

六十年代初,等离子喷涂技术作为航空研究的辅助作业而进入工业领域,现在已经扩展到多方面,并因此推动了各类喷涂材料的发展。除金属材料外,到目前,氧化物陶瓷混合物、碳化物、硼化物、氮化物、硅化物、金属陶瓷及某些塑料均用于等离子喷涂。同时等离子喷涂设备也得到发展。最近出现了几何结构长度约为25毫米的微型喷燃器;与此同时,200kw功率的水力巨型等离子喷嘴以及计算机控制的等离子喷涂装置与机械手也开始出现[8]。

根据热力学第二定律,很多热过程在较高的温度下会产生有利的方向变化。这就意味着高温材料越来越重要,能够喷涂高温材料的等离子喷涂方法也因此而提高了身价[8]。在对等离子,重熔过程、热离子和磁流体热力学发射器等方面所预期的发展中,遇到了新问题,而其中等离子喷涂工艺则得到很好的应用。

未来,用等离子喷涂陶瓷来制取绝热涂层将起重要的作用。为此,有人正试图对涂层结构进行系统的研究,以改善此涂层的热振性。采用这种方法喷涂粗粒级粉末时,会增大涂层的空隙,造成微观裂纹与断层[9];同时非稳定型的氧化锆颗粒集合体进入涂层基质中[10]。

采用陶瓷化合物基粉末时,希望得到良好的密度和结合强度。为此,可用NiO—Ni包覆 Al_2O_3 和 ZrO_2 ,制成包覆型复合粉。

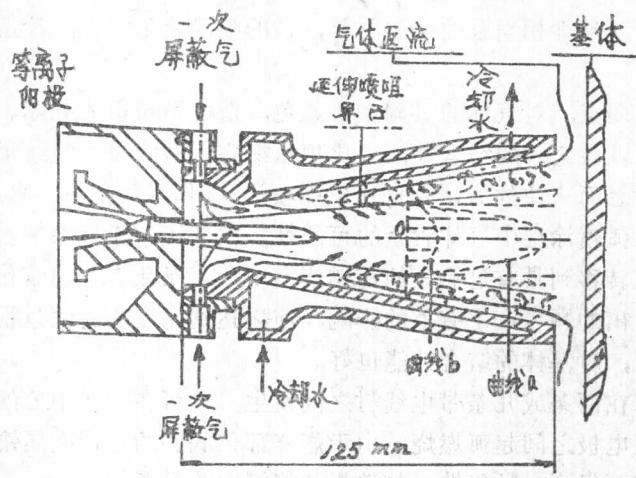
在钛和锆的喷涂过程中,采用氩—氮或氩—氢混合气,由于金属—气之间的反应,会使涂层吸附氢和氮,同时又会降低铜、钨和锌中的氧含量。在不同的时间间隔内对喷嘴前所收集的粉末进行的分析表明,金属—气之间的反应,在喷涂颗粒飞行过程中发生的程度较小,只有在喷涂层堆积时才强烈进行[12]。

等离子喷涂方法的一种变型是“导管等离子喷涂”(tubus—Plasma—Spraying),它正处于发展研究之中。正如图5所示,在导管与基体表面之间的15毫米的喷距中,具有局部性保

护气氛，涂层就在这种保护条件下形成。这种方法存在的问题是，在导管中会出现烟尘和蒸发的颗粒，它们的粘着性差，给涂层的结合带来不良影响[11]。

关于如何使涂层性能得到改善，特别是涂层孔隙的减少，已经出现了一些新方法。其中有等离子喷涂层表面的激光处理[13,14]，或利用超声波使涂层凝缩致密化[15]。

图 5 隔绝空气的屏蔽等离子喷涂

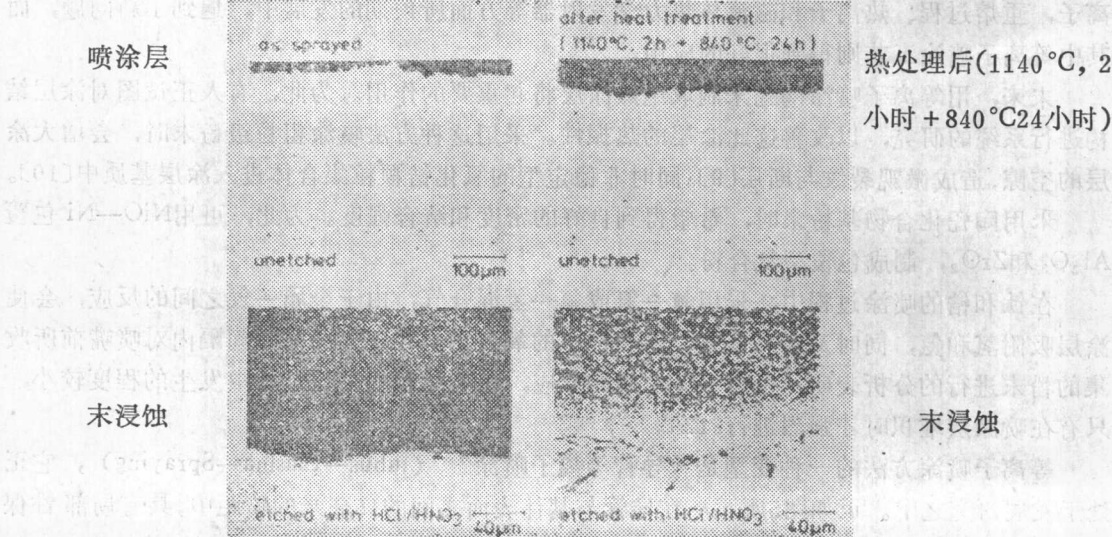


4.1 低压等离子喷涂

通常，采用低压等离子方法主要喷涂MCrAlY合金，而基体则是超合金。这些保护性涂层可在预定的耐用周期内保护基体材料免遭燃气腐蚀[16]。

除扩散保护层外，人们继续扩大MCrAlY基涂层的应用，尤其是对透平机叶片提供保护。在这方面，低压等离子喷涂层比电束蒸发要经济[17,18,19]，同时在工业上已获得成功的应用。这种涂层经辉热扩散之后，具有致密、无氧、结构规整等特点，且具有广阔的扩散带，如图6所示。但在喷涂过程中，转移弧对孔隙的生成有明显的影

图6 IN738LC基体的CoCrAlY涂层 (低压等离子喷涂)

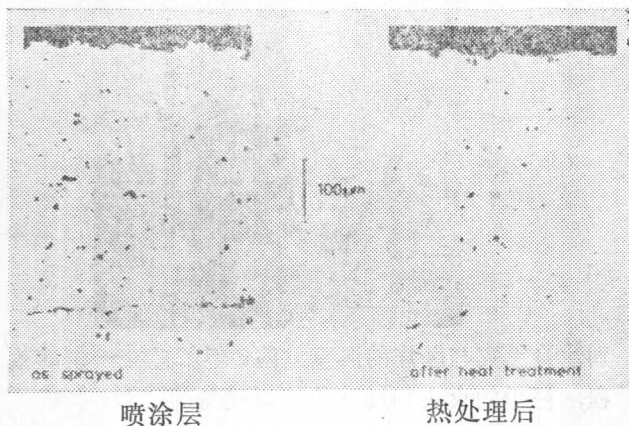


热处理后(1140℃, 2
小时 + 840℃24小时)

未浸蚀

用HCl/HNO3浸蚀 用HCl/HNO3浸蚀

图7 CoCrAlY涂层(低压等离子喷涂, 非转移弧)。



喷涂层

热处理后

这些材料在高温中反应性很强,大量吸附气体。直到现在,这些材料只能在氩气弧焰中喷涂,象无气孔和高纯度这样重要问题依然不能彻底解决。

图9是用50毫巴低压等离子喷涂钛材的涂层断面。对涂层所进行的机械检验、电位时间及电流密度电位曲线等表明,钛涂层无连续气孔,但有污染,这对涂层的腐蚀行为产生不利影响。就钽作为材料而言,即使是极端低的污染,也具有

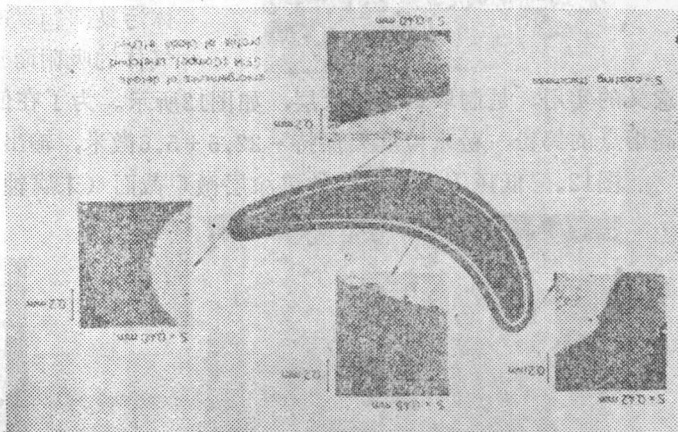


图9 低压等离子喷涂的钛涂层断面微观图。

用转移弧喷涂,涂层的孔隙度很低,叶片的涂层断面均匀而整齐,如图8所示。这种涂层是借助于倾斜装置而实现的。倘若在冷却管的出口处进行喷涂,因为不能密封而难以实现。

到目前为止,尽管只有MCoCrAlY合金采用低压等离子喷涂工艺,但最近做了很大努力,为这种喷涂方法开拓更多的应用领域。人们不仅注意到易于烧损材料的喷涂[20],而且尤其重视在过程中产生反应的那些材料的喷涂[21]。象钛和钽这些可反应性材料,不可能采用常规喷涂工艺来制取非腐蚀涂层,因为

图8 B1900叶片NiCoCrAlY涂层厚度的分布。



严重的脆裂性与应力断裂腐蚀的敏感性。这些污染往往由于粉末颗粒表面吸附的气体造成的,致使低压等离子喷涂过程完全失败。图10表示了一层很薄的钽涂层,是由低压等离子喷涂的。从中可看到污染情况,在表面上还有断裂。对这些涂层所做的电化学检查表明,不能把它们当作一种很抗腐蚀的材料。在严重腐蚀的介质中,由于脆裂而造成应力腐蚀断裂,在一段相当短的时间之后,就导致成断裂传播。同时在基体表面出现明显的电解质通路,如图11所示。

在喷涂易反应的材料时,特别要注意粉末的纯度、气体及周围气氛。在真空或保护性气氛下生产无氧粉末,预先将喷涂燃烧室抽成良好的负压,并将其进行特殊的密封,则可获取上述特殊金属的优良涂层。同时,在密闭燃烧室中喷涂这些金属时,由于低的热量和着火温度,要特

图10 低压等离子喷涂的钽涂层断面微观图

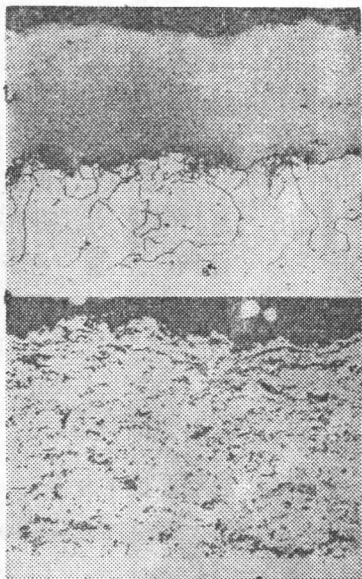
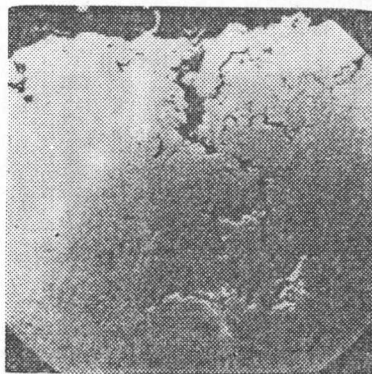


图11 钽涂层渐进腐蚀的电子扫描显微影

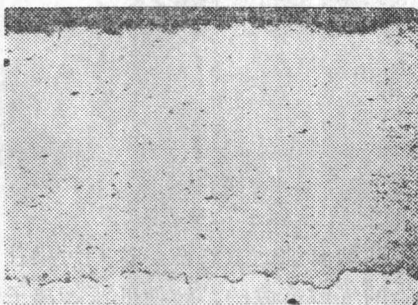


别注意火灾与爆炸的严重危险；但若遵守一定的规程，粉尘的火灾和爆炸是可以避免的[1]。

采用低压电弧喷涂（LPAS）法，可以喷涂线材。这种方法绝不会出现在喷涂粉末时所出现的气体污染问题。这种问题是由粉末的高度的比表面对气体的吸附而造成的。低压等离子喷涂的另一项有

意义的实用，是制取致密钨涂层，如图12所示。为了在低压等离子焰中用极短的时间内熔化高熔点的钨粉，粉末粒度要保持 $-22.5+5.6$ 微米，输出功率为80KW。

图12. 低压等离子喷涂的钨涂层微观截面（未腐蚀）



5.其它方法。

5.1 火焰冲击喷涂

这种方法是美国于五十年代发展的。主要用于硬质材料(碳化物、氧化物)的喷涂[22]。在喷涂过程中，经电发火引燃，使气体爆炸。喷涂粉末以高速冲击到基体表面。这项由美国联合碳化物公司（Union Carbide）首创的喷涂方法，尽管申请专利已经期满，但目前仍受专利保护。在此期间，又出现了类似方法，即所谓“燃料空气重复爆炸法”（Fuel air repetitive explosion）简称为“Fare”喷枪。由美国空间工业西南研究所首创。粉末在喷涂时以一种包裹的形式供入，由一条输送带送料。其给料量恰为一次爆炸的需要量。包裹外壳是聚乙烯，内部装有粉末。这种被密封的粉末可以受到良好的保护，不致遭受枪内或其它容器中各种杂质可能带来的污染或危害，也会杜绝空气湿度的影响。点火前，高压氮气击破聚乙烯包裹，从中漏出的粉末被输送到燃烧室，燃爆频率为每秒两次，每次可喷涂 $5/8 \sim 7/8$ 吋直径的圆面积。图13是Fare 喷枪喷涂的碳化钨—钴涂层断面。

图13 Fare枪喷涂的碳化钨—钴涂层断面电子扫描图

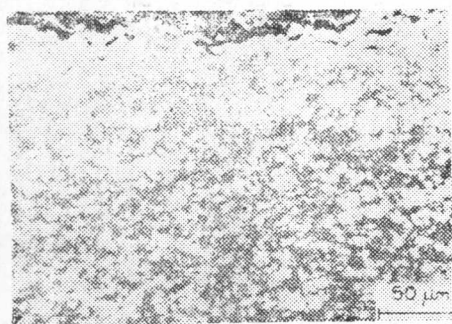
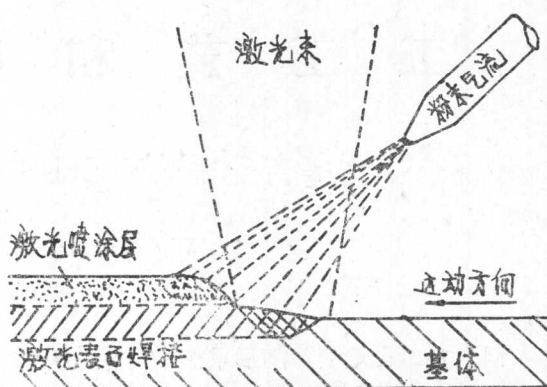


图14 激光喷涂原理



5.2 激光喷涂

激光喷涂时，粉末以倾斜的陡角吹送到激光束中，并且在到达工作表面之前，部分粉末被熔化，如图14所示。同时，喷涂表面被激光熔成一层极薄的表面，这样，在涂层与基体之间就造成了良好的结合，这就是激光熔融过程[23]。

在对激光喷涂进行了初次尝试之后，发现要想取得生产结果，必须保证对过程中各参数进行准确的控制。

在美国进行了一种变型的激光喷涂过程。在大约10毫巴的压力下，将硬质材料以很高的速度喷射到由激光光束熔融的基体表面上。

6. 热喷涂层的无损探伤试验

热喷涂技术及其经济意义在不断增长，需要大规模的无损探伤试验，以保证涂层稳定的高质量。然而，由于现有的部分试验方法的困难性，这种要求至今不能全部得到满足。因此，迄今将涂层的无损探伤视为非试验性的。当采用较高试验频率，或表面与边界层反射波在低频范围内重叠时，由于在异质性很强的涂层中大声响的散射，致使超声波试验出现问题。从而，只有在不受实际另件构型的限制或不受过程参数及喷涂方法所影响的特定条件下，才有可能采用超声波检验法。最近出现的CS技术是超声波探伤试验的最新进展[24]。

为了克服现有的困难，可将超声波与全息摄影技术综合成一种方法，它兼有两者的优点。

用这种综合方法，在CS技术中的超声脉冲被送入试验体中，但这种声波在一条光路中被接收。与纯超声波法比较，它有不少明显的优越之点。对于试验体较大的表面积，可同时控制一个单独的全息摄影过程。尤其对范围大而频率低的表面波，可得到一个全部声学范围的完整影象。从中，可以识别出声学的振幅与相位，也能查明声域失效的形式，并即刻依其大小及位置做出决断。

一般来说，仅仅在相当低的试验频率时才有可能采用这种方法。因此，该项技术特别适用于散射性很强的材料，例如热喷涂层。当应用这项技术探找和确定表面附近的损伤，特别是判断电弧喷涂层的结合失效时，可采用声波长度的40%来进行发散[25]。

未来，无损探伤检验技术会继续发展，但是，质量控制也是热喷涂技术所必须的。

北京矿冶研究总院 贾永昌译
湖南省钢铁研究所 方世京校

基 体; 预 处 理; 精 加 工 工 艺 和 喷 涂 材 料

等离子喷涂NiCrBSi涂层的某些性质

W. Milewski等 [波兰]

1. 绪言

人们主要用火焰喷涂随后重熔的方法来从镍基材质中制取自熔性涂层。由于它们在许多腐蚀介质中具有优良的机械性质和耐腐蚀性, 所以是重要的结构材料。目前获得自熔性涂层的方法具有限制它们可能应用的一些缺点, 即在涂层重熔时, 必须把物体加热到比较高的温度, 通常这个温度将使基体材料产生不希望的结构变化和大的热应力, 这就可能引起小件物体的变形。

从文献中得知, 有许多不需要把基体材料加热到高温来获得自熔性材质涂层的试验, 有些方法很贵而且工艺复杂, 这就大大限制了推广它们的可能性。

我们研究所进行了研制一种从自熔性材料中获得涂层的试验, 该试验没有复杂的工艺, 同时产生许多有用的涂层性质。

2. 研究过程和结果

2.1 获得涂层的方法

根据热喷涂方法的资料分析, 进行了应用等离子喷涂工艺来获得自熔性材质涂层的试验, 理由如下:

1. 由于气体和等离子流速度之间的差别, 等离子喷枪喷涂的涂层粉粒应该比火焰喷涂的粉粒冲击基体的速度大。

2. 由于等离子体的温度比火焰的温度要高几倍, 与基体接触时等离子喷涂的粉粒比火焰喷涂的粉粒有较高的温度。

3. 等离子喷涂时基体结构变化的可能性很小, 因为基体本身通常加热到不高于200°C。

由此断定, 等离子喷涂时存在的热力学条件就有可能不需要把重熔作为单独的工艺操作来从自熔性材质中获得具有很有用的涂层。

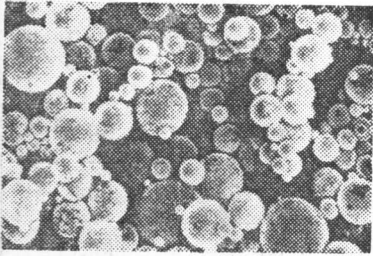
为了获得涂层, 应用80千瓦功率的等离子装置, 应用Ar—H₂混合气体作为等离子气源。涂层材料是NiCrBSi。由此粉末用传统的方法制成的涂层硬度在 Rc56范围。粉末颗粒为球形(图1)其尺寸为100—160μ。粉末的化学成分表示于表1。

表1 NiCrBSi粉末的化学成分

元素名称	Ni	Cr	B	Si	Fe	C	N	O
重量 %	余量	13.7	3.12	4.20	5.4	0.14	0.0065	0.0056

试件由低碳钢制成, 其尺寸为85×70×5mm, 涂层厚度为1mm

图1 NiCrBSi粉末颗粒。



2.2喷涂参数的选择

等离子喷涂过程适当参数的选择是整个工作中非常重要的因素,为了选择最佳工艺参数,用不同参数做了多种试样,同时等离子气源中的电流强度和氧含量也变化(表2),然后检测试样,以便能够选择保证获得涂层最佳结构和有利性质的最好参数、为此目的进行了全相观察和硬度与刮痕阻力的测定。

2.3涂层性质的检验

涂层结构的全相观察用全相显微镜进行,用不同参数制成的试件之显微结构照片示于图2。在研磨过的涂层上用120°尖角的各种负荷金刚石锥(圆锥冲击60次/分)刮痕的方法(按照普里希标准BN—75/1076—03)进行了刮痕阻力的试验。其结果列于表2和图3。表2也列有用VicKers方法所做的涂层硬度测量结果。



图2, 不同参数等离子喷涂层的结构
($\times 100$, 照片复制 $\times 0.6$)

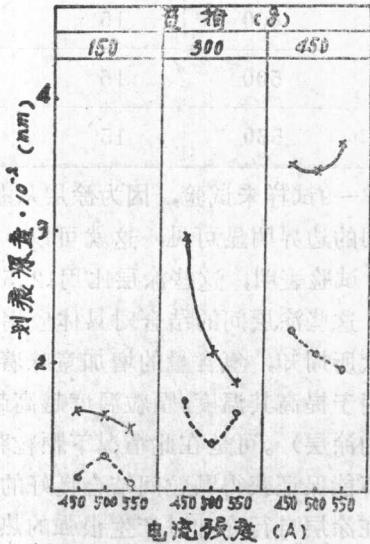


图3 涂层试验的划痕阻力(实线—10% H_2 , 虚线—12.5% H_2)

3. 结果的讨论:

分析上面提供的研究结果、可以发现,用电流强度450—550安培和等离子气源中 H_2 含量为12.5%所获得的涂层具有最好的划痕阻力(最小的划痕深度),该涂层几乎没有孔隙,各个粉末颗粒彼此间连接得很好(颗粒间没有明显的边界)。基体与涂层间的边界没有夹杂,这就可以认为,这些涂层的粘结是适宜的。可是 H_2 含量为10%所获得的涂层是多孔的,粉末

表2 等离子喷涂参数及其某些涂层性质

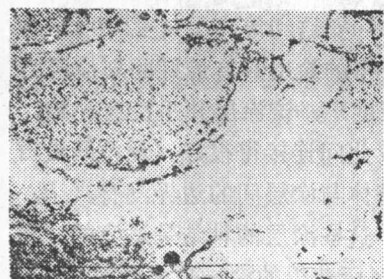
试件 符号	弧电流强 度(安培)	氢含量%	各负荷下的划痕厚度mm			HV
			150 克	300 克	450 克	
1	450	10	0.0159	0.0295	0.035	596
2	500	10	0.0156	0.0206	0.0345	604
3	550	10	0.0148	0.0183	0.0425	805
4	450	12.5	0.011	0.0165	0.0223	575
5	500	12.5	0.0125	0.0136	0.0206	653
6	550	12.5	0.0104	0.0159	0.0194	600
7	450	15	—	—	—	—
8	500	15	—	—	—	—
9	550	15	—	—	—	—

*7—9试样未试验，因为涂层从基体脱离。

颗粒间的边界明显可见，这就可以认为，这些涂层间的结合不足以保证足够的机械性质，划痕阻力试验表明，这些涂层比用12.5% H_2 含量所获得的那些涂层显得差些，这就证明了上述结论。这些涂层间的结合对具体应用显得太小，因为存在与基体很大差异并混有杂质。

众所周知，氢含量的增加意味着等离子热焓值的增加、同时增加的热量可以传递粉末颗粒并用于提高其温度。颗粒温度越高越能产生更好的致密涂层(比较用10%和12.5%氢含量所得到的涂层)。可是在此情况下颗粒获得太大的热量是不适当的。因此在氢含量增加到15%之后，不能保证获得颗粒间结合良好的涂层，因为喷涂时，由于颗粒剧烈受热，而出现了飞散。

在涂层自行冷却时产生很强的热应力，这应力大于基体与涂层的粘接力。尽管用所有参数作了反复试验以图获得完全不脱离的涂层，但都未成功。在空气中缓慢冷却时，基体与涂层间脱离，随之出现试样特征“条痕”。由于上述原因，用15% H_2 制成的试样(7、8、9号)没有再作试验。硬度测量结果并不能单独说明喷涂过程参数与涂层硬度之间关系，其理由可能是得到的涂层结构(图4)非常不均匀。在几乎不变形的一些颗粒旁边可以发现另一些受冲击发生严重变形的颗粒。这两类颗粒在结构上是彼此不同的。显微硬度测量结果表明，未变形颗粒之值(HV0.005=545)比“破裂”颗粒之值大2倍。结构的这种不均匀性必然影响到



硬度的测量结果，可以认为涂层中颗粒之间结构上的差别之原因在于原始粉末颗粒的化学组成的差别。

图4 等离子喷涂层的结构：550A、12.5% H_2 ($\times 250$ 照片复制 $\times 0.6$)

必须再次指出，具有最好性质的涂层是用电流强度500—550安培和 H_2 含量12.5%得到的。

4.用火焰和等离子方法所得涂层性质之比较。

不同方法所得涂层之划痕阻力和硬度（表3，显微硬度）测量结果列于表3。

表3 不同方法所得涂层的划痕阻力，硬度和显微硬度

涂层获得方法	不同负荷下的划痕深度m/m			HV ₁	HV0.04
	150克	300克	450克		
火 焰	0.0175	0.0230	0.0286	645	495
等离子(550A)	0.0104	0.0159	0.0194	600	1080

(图从略)

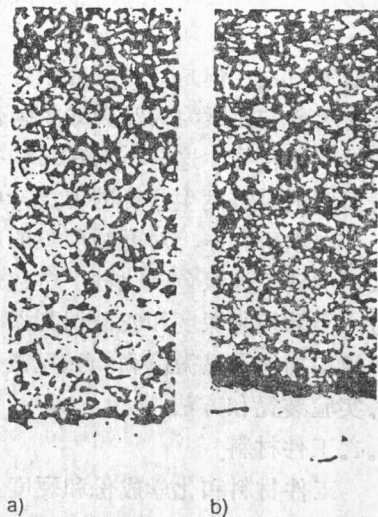


图5 等离子法 (a) 和火焰法 (b) 所得涂层之结构，腐蚀过 ($\times 100$ ，照片复制 $\times 0.7$)

图5表示了不同方法所得涂层结构之差别，图6表示了等离子和火焰喷涂之基体结构之变化。分析提供的研究结果，可以说明：

图6 火焰法(a)和等离子法(b)所得涂层之基体结构的变化，腐蚀过 ($\times 100$ ，复制照片 $\times 0.7$)

1. 等离子喷涂层比火焰喷涂层具有较高的划痕阻力。
2. 等离子喷涂层具有比用2种方法得到的熔化涂层高得多的显微硬度。
3. 等离子和火焰所得涂层之宏观硬度是相近的。
4. 两种方法所得涂层的显微结构明显不同；火焰喷涂的是呈整体金属状，等离子喷涂的是呈受应力而严重变形的颗粒状。

5. 结论

为从自熔性材料获得涂层而建议的等离子方法应该在工业条件下进行考验。

从提供的研究结果得知：用等离子方法获得涂层比用传统的方法有更好的机械性质。

还有一点应该强调，当有更高结合要求的情况下用等离子法代替火焰法是不可能的，因为两种情况下基体与涂层的粘结性质是不同的。

在等离子喷涂NiCrBSi涂层广泛应用之前，应该对该涂层进行腐蚀试验和抗压试验。

北京矿冶研究总院 刘维祥译

北京矿冶研究总院 凌智英校

Ni和Cr系自熔合金的磨削研究

R. McDonald 等 [日本]

1. 引言

本文叙述了在镍—铬系中某些自熔合金表面磨削特性的实验结果。这些材料能够用作精密部件, 因为自熔合金的喷涂沉积与基体金属紧密的结合有较高的平均硬度。但是喷涂沉积存在某些杂质, 所以结构呈非均匀相, 硬度显著变化。因此, 自熔合金的精整工艺是很重要的研究对象, 但是此种研究报告很少。试验中工件所用的材料为五种型号的自熔合金, 其中含有大量的元素为30%到80%碳化钨或16%钨和42%钴。加入工件材料中的元素为不同粒度的粒状化合物, 这些材料在结构中有显著不同的硬度。因此, 在用氧化铝和碳化硅砂轮进行表面磨削时常发生这样的现象: 磨轮磨损和表面粗糙度增加, 磨削比率降低。

在本研究中, 对磨削现象的观察和适宜的磨削条件的测定进行了评论。表面磨削试验所采用的砂轮为绿色碳化硅, 白色熔融氧化铝和金属涂层金刚石, 表面磨削试验包括测量磨削力, 实际切割深度和安装切割深度之间的相互关系, 砂轮磨损量和表面粗糙度等。磨削表面状态用扫描电子显微镜和x-光显微分析仪进行观察。

2. 实验装置和方法

2.1. 工件材料

工件材料和化学成份和硬度见表1(1)工件材料为用自熔合金进行喷涂和在低碳钢(S35C, JIS)表面上形成2到3毫米厚的涂层, 这些自熔合金喷涂后在约1100°C进行重熔。喷涂采用热喷涂型的粉末喷涂枪, 气体采用氧气和乙炔。工件的形状为一小矩形板, 尺寸为6毫米宽, 50毫米长和30毫米高。

工件材料的扫描电子显微结构见表1(2)。在显微照片中, 白色部份为碳化钨(WC)或钨(W)的晶粒, 黑色背景为镍—铬合金基体。WC或W元素有不同大小的晶粒并包含在Ni—Cr合金基体内。WC晶粒当中有两种形态, WC—Co聚集体(80WC, 50WC和35WC—I)和WC—8%Ni复合物(35WC—II), 它们在结构中有不同的弥散状态。在这些材料中, 50WC的WC弥散在结构中, 呈相当细的和均匀的晶粒。42Co被称为司太立合金, 在Ni—Cr合金中含有42%Co和15%W。因此, 50WC和42Co与雾化的Co或W晶粒与其它材料进行比较时有较高的韧性。

2.2 磨削试验

磨削试验采用盘形磨轮慢磨削方法进行干式精整的平面磨削。工件固定在磨床台上的磨削测力计上, 磨削工具采用横轴磨床和往复式的烧结碳化物刀头刀具磨床、法线和切线分力用八边形测力计、动力应变计和笔写记录器进行测量。

安装切割深度(H)和实际切割深度(ΔH)用安装在轴头上的标度计(最小刻度1/1000毫米)进行测量, H为磨床横进刀。 ΔH 在磨削前、后进行测量, 在标度计上有不同的读数。

磨削试验按照下列条件进行:

磨轮: PA80J7V40, PA100J7V40, PA120J7V40, GC80H7V40,

GC100H7V40, GC120H7V40, SDC140P75B7。

磨轮速度: 1750米/分

台面速度: 从2.2到6.8米/分。

安装切割深度(H): 从3到40微米/冲程。

表1. 工件材料

(1) 化学成份和硬度												
材 料		化 学 成 份%										硬 度 HRc(B)
		Ni	Cr	WC	Co	W	B	Si	Mo	C	Fe	
自 熔 合 金	80WC	14	3.5	80*			2.5	0.8		0.1	2.5	基体62WC—10 聚集体75
	50WC	33	9	50*			2.0	2.0		0.5	3.5	
	35WC—I	46	11	35*			2.5	2.5		0.5	2.5	
	35WC—II	46	11	35**			2.5	2.5		0.5	2.5	基体: 50 WC—8%Ni: 75
	42Co	13	19		42	15	3.0	3.0		1.2		62
SKH4(JIS)			44		1.2	20			0.3	0.8	余量	60
S35C(JIS)		Mn 0.75	P: 0.02	S: 0.032						0.34	余量	HRb95

* Wc—Co聚集体, **Wc—8%Ni复合物

不同砂轮的整修工作按照下列条件进行:

PA和GC系砂轮: 单点金刚石, 切割深度: 20微米。

横进刀速度: 0.1毫米/转。

SDC系砂轮: 切削—低碳棒, 整修—GC120H棒, 精整表面用扫描电子显微镜 (SEM) 和X—光显微分析仪 (XMA) 进行观察, 表面粗糙度用滑动针型表面粗糙度试验机 (SE—3C) 进行测量。砂轮的磨损 (砂轮表面平均磨损深度) 用接触在标度计上面的刀尖进行测量。标度计在砂轮边缘的宽度方向上进行移动。SDC砂轮磨损很小, 用显微镜进行观察。

3. 实验结果和讨论

3.1 安装切割深度和实际切割深度

△工件、磨轮和很多其它机械装置的变形, 是在磨削时产生的磨削阻力造成的。结果引起磨削切割深度减少和磨削精度降低。一般的平面磨床的最大H值在40微米以下, 因此, 在磨削时机械装置的变形比H是大的, 所以在大多数情况下实际切割深度与安装切割深度的比率 ($\Delta H/H$) 小于1.0。特别是对一些特殊工作件的磨削, $\Delta H/H$ 值倾向于降低。

△图1表示H和 $\Delta H/H$ 之间的相互关系、所用的砂轮为Gc, PA和SDC型, 以50WC、80WC和35WC—△代表工件材料, 试验结果发现工件与磨轮的匹配对 $\Delta H/H$ 值有显著的影响。用PA和GC砂轮磨削这些自熔合金时, 磨削35WC—I (WC晶粒在WC—8%Ni复合结构中) 的 $\Delta H/H$ 值比其它的自熔合金低, 当H值为40微米时, $\Delta H/H$ 值也在0.15以下。表示工件几乎没有磨削。除了35WC—I外, 在磨削自熔合金中, $\Delta H/H$ 值较高, 按80WC和50WC顺序排列, 在自熔