

77.821
108

中国农业机械学会农机维修专业委员会主编

机械维修实用新技术丛书

金属电弧喷涂

于丕涛 编著

中国农业机械学会农机维修专业委员会主编
机械维修实用新技术丛书
金属电弧喷涂
于丕涛 编著

• • •
责任编辑 施文达 李耀辉

农业出版社出版（北京朝阳区枣营路）
新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092mm 32开本 3.125印张 60千字
1989年5月第1版 1989年5月北京第1次印刷

印数 1—2,280册 定价 1.30元

ISBN 7-109-00783-9/TH·28

目 录

序言

前言

第一章 金属电弧喷涂的原理	1
第一节 金属电弧喷涂过程	1
第二节 喷涂层的金相结构	5
第三节 喷涂金属的氧化	7
第二章 金属电弧喷涂层的物理机械性能	10
第一节 涂层硬度	10
第二节 涂层的结合强度	13
第三节 涂层的疲劳强度	17
第四节 涂层的抗拉强度	18
第五节 涂层的孔隙度与密度	20
第三章 金属电弧喷涂的主要设备	22
第一节 喷涂电源	22
第二节 金属电弧喷枪	32
第三节 喷涂机床	34
第四节 供气设备	36
第五节 喷前处理设备	40
第四章 喷涂材料	42
第一节 有色金属	42
第二节 碳钢	44

第三节	合金钢	45
第五章	金属电弧喷涂工艺	47
第一节	喷前机械加工	47
第二节	喷前预处理	51
第三节	金属电弧喷涂的主要参数	59
第四节	喷涂层的处理及加工	64
第六章	氮气喷涂	67
第一节	氮气喷涂的意义	67
第二节	氮气喷涂设备	69
第三节	氮气喷涂工艺参数	71
第四节	喷涂	71
第七章	典型零件的喷涂修复	73
第一节	发动机曲轴的喷涂修复	73
第二节	气缸套的喷涂修复	84
第三节	铸铁壳体裂纹的喷涂修复	87
主要参考文献	90

第一章 金属电弧喷涂的原理

第一节 金属电弧喷涂过程

金属电弧喷涂是将钢丝（喷涂材料）用电弧热能熔化，再用压缩空气吹击到预先准备好的工件表面上形成喷涂层。

一、金属的雾化及涂层的形成

金属喷涂过程如图1—1，导管4通过导线2连接喷涂电源的正、负极。钢丝1在送丝轮3的驱动下穿过导管4交叉在一起产生电弧，钢丝被电弧熔化后，金属熔滴被从空气导管5吹来的压缩空气所雾化，并喷在工件7上形成涂层6。

电弧的温度约为6000K；在这样的温度下金属丝被熔化成熔滴，在电弧中心甚至被气化。喷涂所用空气压力为4.5—6巴，熔滴在这样的压力下，被雾化成直径约在0.01—0.04毫米的金属颗粒。被压缩空气雾化的金属颗

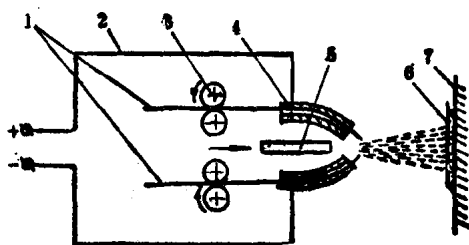


图1—1 金属电弧喷涂过程

- 1.金属丝 2.导线 3.送丝轮 4.导管 5.空气导管 6.喷涂层 7.工件

粒，在压缩空气的作用下，获得了一定的动能，随空气流动。金属颗粒由于具有不同的尺寸与占据不同的位置，因而在垂直于金属空气流的同一截面上的颗粒速度是不相等的，截面中心的金属颗粒速度最大，自中心至边缘逐渐降低。同时，在金属空气流的轴线方向，金属颗粒的速度也不相等，金属颗粒的速度自出口处迅速增加，达到最大后，随着离出口距离的增加而逐渐降低。金属颗粒的最高速度可达 250 米/秒，在到达工件表面时（飞行 100—200 毫米）速度约为 100 米/秒。

金属颗粒在运动过程中，由于与空气接触遭到氧化，还由于颗粒接触空气条件不同，在垂直金属空气流的同一截面上的金属颗粒又以截面边缘处的氧化最为严重。

熔化的液态金属颗粒在飞行中向周围空气散发热量，颗粒的温度随离出口距离的增加而逐渐降低。但由于颗粒运动速度高，在喷涂距离为 2.00 毫米时，它到达表面的时间仅是 0.003 秒。在这样短的时间内，颗粒的温度变化不大，在到达工件表面后，有些颗粒的内部仍是液态的。

在喷涂过程中，功能、温度、化学成分和氧化程度都不同的金属颗粒冲向喷涂表面，由于撞击而产生塑性变形，互相填塞、堆积而形成金属喷涂层。颗粒到达喷涂表面前动能越大，温度越高，颗粒尺寸越均匀，氧化越少，撞击时的塑性变形就越完善，就能更好地互相填塞，形成性能比较理想的喷涂层。

二、喷涂过程对电源特性的要求

喷涂过程中，喷涂电源特性对喷涂过程的稳定及喷涂金

属的氧化影响很大。由于我国没有专用的喷涂电源，多采用直流弧焊机代用。直流弧焊机具有陡降的外特性，动特性也满足不了电弧喷涂的要求，利用这种电源喷涂时，喷涂金属发生强烈的氧化，涂层中氧化夹杂物增加，涂层质量下降。

喷涂过程中，金属丝的熔化是断续的，而不是连续的。喷枪工作中，产生电弧的过程基本有两种形式，即：“短路—电弧—断路”和“电弧—断路”过程。

当喷涂工作电压低于 35 伏时，喷涂电弧过程基本上是“短路—电弧—断路”过程。喷枪工作时，两金属丝不断向前送进，在前导管的作用下，两金属丝接触短路；金属丝接触点在短路电流的作用下，产生很高的温度，并开始熔化，熔化的金属被压缩空气吹走，形成放电间隙，在电场的作用下，产生电弧；电弧的高温使金属丝迅速熔化，熔化的金属丝又被压缩空气吹走，由于熔化金属丝速度超过了金属丝的送进速度，金属丝间的间隙迅速增大，当间隙增大到电场的能量不足以维持电弧继续燃烧时，电弧熄灭，电极间断路。由于金属丝的不断送进，金属丝间距离迅速缩短，两金属丝再次接触短路重复上述的“短路—电弧—断路”的过程，并且以后不断重复。

当工作电压超过 35 伏时，由于工作电压高，喷涂的电弧过程将变为“电弧—断路”的过程。喷涂开始，两金属丝向前送进，在前导管的作用下，两金属丝间的距离不断缩短，由于电场电压较高，当距离小到一定程度时，在电场力的作用下，金属丝间产生火花放电，点燃电弧。电弧的高温将金属丝熔化，熔化的金属被压缩空气吹走，使金属丝间的

距离不断扩大，直到电场的能量不足以维持电弧燃烧，电弧熄灭，完成一个“电弧—断路”的循环过程，以后将不断地重复这一过程。每一个循环仅在电弧燃烧时和短路期间有热量放出，熔化金属丝。一个循环的周期是非常短的，只有千分之几秒，电弧和短路的延续期就更短。电弧过程熔化金属和短路过程熔化金属的温度不同，电弧过程熔化金属的温度远远高于短路过程的温度。

从减少喷涂金属氧化的角度出发，要求熔化金属的温度愈低愈好，希望短路熔化过程要长、电弧熔化过程要短。但从保证电弧能够稳定燃烧的角度出发，不同动特性的电源有不同的最低稳弧电压。直流弧焊机这类陡降特性电源的电弧稳定燃烧电压是35—40伏，在这样高的电压作用下，金属丝间容易起弧。利用这种电源喷涂时，喷涂金属的熔化过程将主要是电弧熔化过程，即“电弧—断路”、“电弧—断路”的循环过程。熔化金属的温度增高，喷涂金属的氧化强烈。

陡降特性的电源对送丝速度变化的适应能力差。在喷涂过程中当送丝速度增加时，工作电流增加，工作电压相应降低，当降低到某一值后，由于短路电流增长速度慢，不能使短路的金属丝熔化而使喷涂过程中断。为保证喷涂过程稳定，必须降低送丝速度，维持原来的工作电压不变。

金属电弧喷涂过程要求采用平硬外特性的电源，并要求电源有良好的动特性，即一定的短路电流增长速度。这种电源可以在较低电压（20—25伏）情况下工作。由于工作电压低，放电电弧短，熔化金属的过程变为主要是短路熔化过程，喷涂过程循环将变为“短路—电弧—断路”、“短路—电

弧一断路”的循环过程。熔化金属的温度将显著降低，喷涂金属的氧化气氛显著减弱。

这种电源对送丝速度有较强的适应能力。当送丝速度增加时，工作电流增加，但工作电压降低很少（平硬外特性）。当金属丝短路时，由于有较高的短路电流增长速度，钢丝很快被熔化，喷涂过程不至于中断。所以，在相同电功率的情况下，这种电源可熔化较多的金属。

第二节 喷涂层的金相结构

喷涂层是由不同的金属颗粒互相填塞堆积成的。组成喷涂层的金属颗粒又被氧化膜隔成非金属接触。因此，喷涂层具有某种金相结构的说法是不严格的，一般说的喷涂层结构都是指金属颗粒的结构。

金属颗粒在飞向喷涂表面的路程中，受到空气流的冷却作用，温度约降低 $100-150^{\circ}\text{C}$ ，相当于从每秒 $10000-100000^{\circ}\text{C}$ 的速度进行冷却，在撞击到喷涂表面之前，部分颗粒已由液相冷却为固相金属。撞击到喷涂表面后将受到剧烈地冷却，因为喷涂表面对于金属颗粒来说是具有很大热容量的物体。先喷上的金属颗粒又受到随后喷上的金属颗粒的高温作用，在这种传递交换过程中，金属颗粒便产生金相结构的转变，从而具有不同的结构。若极大的冷却速度与散热均匀相结合，就能形成数量很大、分布均匀的晶粒，获得细晶粒结构。

喷涂金属颗粒的冷却速度是在奥氏体稳定性最低的范围

内。因此，钢喷涂层的金相结构，是由奥氏体和残余奥氏体转变的各种产物混合的（马氏体、托氏体、索氏体和铁素体等）细晶粒结构组成。在喷涂层中哪一种金相结构占优势，不仅取决于金属微粒的冷却条件，还取决于金属微粒的化学成分。显然，尽可能降低金属丝在喷涂过程中的烧损，是提高喷涂层的物理机械性能的有效途径之一。

图 1—2 是用 T12A 钢丝喷涂的涂层金相组织。喷前镍拉毛打底。喷涂电源是用上海劳动电焊机厂生产的 AT-320 型直流弧焊机，电流粗调手柄置于“Ⅲ”档位置。在此档工作时，焊机具有缓降特性，空载电压 63.5 伏，工作电压 25 伏，电流 140 安，空气压力 6 巴，送丝速度 3.16 米/分，工件转速 30 转/分。

图 1—2 是喷涂层的纵截面，下端为基体，上端为喷涂

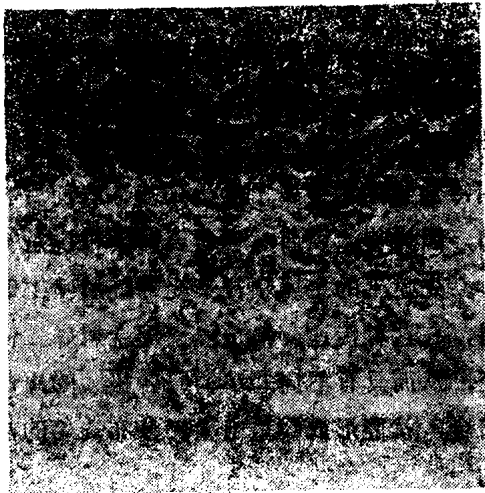


图 1—2 电弧喷涂 T12A 钢丝的涂层金相组织 120X

层。喷涂层与基体的结合处为不连续的打底镍（白色）。波浪形的组织为喷涂层，其中白色波纹为铁素体，白色粒状为渗碳体，灰色波纹为托氏体，黑色条纹为氧化物，黑色点状为孔洞。

组织组成物为 α -固溶体（铁素体），托氏体、渗碳体。

基体与打底镍接触处为索氏体（灰色）与沿晶界铁素体，其余部分为平衡组织。

铁素体（白色）约占 20—30%，其余为托氏体和渗碳体。

氧化物一般为 5—25%，主要与喷涂工艺有关。黑色点状为孔隙，约占 1—10%（图片面积比）。如按比重法测定，孔隙度将高得多（在 15% 以上）。孔隙的尺寸在很大的范围内变动，最大直径可达 0.30 毫米，最小的为 0.015 毫米。孔隙有吸贮润滑油的作用，在特定条件下，能够提高涂层的耐磨性；另一方面，由于孔隙的存在，降低了喷涂金属颗粒之间的结合，颗粒之间的联结减弱了，在使用中可能整粒地脱落。

第三节 喷涂金属的氧化

在电弧喷涂过程中，当金属熔化时，在电弧高温的作用下，金属丝中某些元素被烧损。电弧喷涂法比其它喷涂法烧损更为严重，主要因为电弧燃烧时空气中的氧、氮分解成为氧原子、氮原子，提高了氧、氮的活性。国外文献所载电弧喷涂时合金元素的烧损情况如表 1—1。

表 1—1 电弧喷涂时合金元素的烧损情况

合金元素 测定材料	碳	锰	硅	硫	磷
金属丝	0.72	0.23	0.22	0.02	0.016
电喷涂层	0.43	0.12	0.12	0.019	0.014
损失 (%)	33.3	47.8	45.5	5.0	12.5

1984年,我们曾汇集国内三个喷涂厂的试件,对钢及涂层的含碳量进行了测定,其结果如表1—2。

表 1—2 电弧喷涂过程中碳的烧损情况

试件号	钢丝牌号	钢丝含碳量 (%)	涂层含碳量 (%)	烧损 (%)
1	T 12A	1.21	0.69	43
2	T 12A	1.23	0.66	46
3	T 12A	1.20	0.47	61
4	T 12A	1.22	0.36	70
5	T 9 A	0.93	0.26	72
6	T 9 A	0.90	0.18	80

我国当前金属电弧喷涂合金元素的烧损量远远超过国外的数值(见表1—1和表1—2)。国外碳的烧损为33.3%,我国最低为43%,高达80%。我们采用喷涂材料与国外相同,主要参数也基本一致。试验研究证明,我国喷涂工艺主要存在以下问题:首先,电源——直流弧焊机特性满足不了电弧喷涂的要求;其次,是电参数(工作电压与工作电流)与送丝速度缺乏合理的匹配,同样的电弧功率熔化的金属量少,喷涂金属熔化温度高,致使合金元素过多地烧损。

合金元素过多烧损的后果是在喷钢时涂层硬度下降。多数喷涂厂涂层硬度为HRC20—25。涂层中氧化物夹杂增多，约为18—27%；氧化物夹杂增多，致使涂层颗粒间联结强度降低，表现在涂层抗拉强度下降，普遍为1500—2000巴。

多年来，我国广大喷涂工作者为了减少喷涂时合金成分的烧损、提高涂层硬度，做了大量的研究工作，但没有从工艺上去解决合金元素的烧损问题，主要是从喷涂材料的选择上，去补偿喷涂时合金元素的损失。如60年代喷涂用的是70* 钢丝（含碳0.70%），70年代改为80* 和T 8 A（含碳0.80%）到80年代又改为T 9 A和T 12A（含碳0.90—1.20%）。用增加钢丝含碳量去补偿喷涂中烧损的碳，提高涂层硬度，增强涂层耐磨性。这种方法只能提高涂层中某些元素的含量，但解决不了氧化物夹杂问题。

第二章 金属电弧喷涂层的 物理机械性能

喷涂层的物理机械性能对零件的使用寿命有重要的影响。物理机械性能主要包括涂层硬度、涂层的结合强度、疲劳强度和孔隙度等。

第一节 涂层硬度

硬度是涂层综合性能的反映，是喷涂金属颗粒的金相结构、颗粒硬度、涂层密度、涂层孔隙度、氧化夹杂等的综合反映。喷涂层组织是不均匀的，金属颗粒的大小、金相结构及硬度也不相同，涂层中又含有不同数量的气孔和氧化物，这些因素都对涂层的硬度有影响。试验证明，涂层中金属颗粒的金相结构对涂层硬度的影响最明显。金相结构为渗碳体或马氏体的金属颗粒占多数时，涂层硬度相对增高；相反，如果铁素体颗粒占优势，涂层硬度相对的变低。同样，密度高的涂层比密度低的涂层硬度高，氧化物夹杂和气孔少的涂层比多的涂层硬度高。因此，在特定条件下，涂层的硬度能够大致地反映组成涂层的金属颗粒哪一种金相结构占优势、金属颗粒硬度高低、涂层密度的大小、孔隙度的多少、氧化

物夹杂的多少等，因此说涂层硬度是涂层综合性能的反映。

由试验得知，在喷钢时，涂层硬度主要取决于涂层的含碳量。涂层含碳量愈高则硬度愈高。涂层硬度与含碳量的关系见图 2—1。

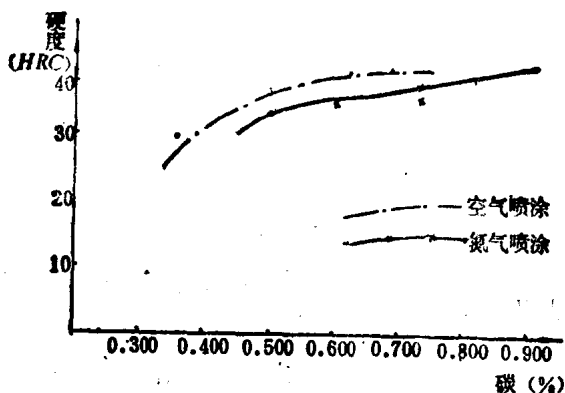


图 2—1 涂层硬度与含碳量的关系

图 2—1，画出两条曲线，上面一条为用空气喷涂，下面一条为用氮气喷涂。在相同含碳量情况下，氮气喷涂的试件硬度偏低，原因是氮气流量不足，对涂层冷却不充分。

过去曾有过这样的经验：用钢丝做喷涂材料时，涂层硬度随金属丝的含碳量的增加而升高，并且较金属丝的原来硬度有所升高（表 2—1）。可以这样理解：在用同一规范喷涂时，碳的烧损基本相同（实际是不相同的），随着钢丝含碳量的提高，涂层中含碳量增加了，涂层硬度升高了。

涂层硬度高于原钢丝的原因：一是到达零件表面的液态金属迅速冷却，金属颗粒受到淬火作用，产生了马氏体和托

表 2—1 线材含碳量、硬度与涂层硬度的关系

钢丝含碳量 (%)	钢丝硬度 (HB)	涂层硬度 (HB)	硬度增加 (%)
0.10	104	192	84
0.45	158	230	45
0.62	194	267	57
0.80	230	318	38

氏体的金相组织；二是先到喷涂表面的颗粒受后到颗粒的冲击，产生了冷作硬化。

涂层硬度与涂层含碳量和喷涂规范的关系很大。试验证明，在同样电规范下，增加送丝速度并适当提高空气压力，可得到较高的硬度。送丝速度的增加，可理解为单位电功率熔化金属量增多了，因而能有效地降低熔化金属的温度，可以有效地防止涂层中碳的烧损。提高空气压力，可以理解为增加喷涂金属的冷却速度，促进奥氏体向马氏体和托氏体的转变。

各种喷涂材料喷涂层的硬度值如表 2—2 所示。高碳钢丝的喷涂层硬度为HRC39—40，但我国多数喷涂厂没有达到

表 2—2 几种涂层的硬度

喷涂材料	硬 度	喷涂材料	硬 度
铝	HRH 72	低碳钢	HRB 90
铝(硅 5%)	HRB 64	中碳钢	HRB 95
铝青铜	HRB 92	高碳钢	HRC 39
海军铜	HRB 64	420 不锈钢	HRC 35
铜	HRF 79	304 不锈钢	HRB 64
蒙乃尔合金	HRF 79	锌	HRH 46

这个数值，普遍为HRC 20—25。

第二节 涂层的结合强度

喷涂层的结合强度是判断涂层能否应用的基本指标之一。

在比较判断各种涂层结合强度的各种资料时，必须对试验方法和喷前处理工艺了解清楚，不然没有可比性。

喷涂层结合强度的试验方法尚无统一规定，资料上常见的方法基本是两种，即拉伸法（法向结合强度）和剪切法（剪切结合强度）。

一、法向结合强度

图 2—2 所示方法适于测定平面喷涂层的结合强度。在平板 A 的中心部位开圆孔，滑杆 B 与孔滑动配合，使滑杆 B 的端面与 A 的上平面处于同一平面后进行喷涂。在平板 A 的下面加以支撑，垂直拉出杆 B。用滑杆的截面积去除负荷，即可得出结合强度。

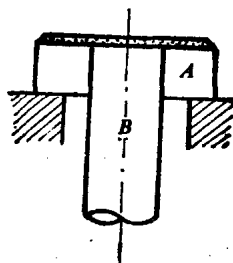


图 2—3 所示的方法适于测试圆柱形表面涂层的结合强度。

在圆柱 A 上钻孔，滑杆 B 与孔滑动配合，使滑杆上端面与圆柱外表面形成同一曲率的曲面后进行喷涂。用滑杆上端面的表面积去除拉出滑杆 B 所需的力，

图 2—2 平面涂层法向结合强度的测试

A. 平板 B. 滑杆