



粟 枯 主编

等离子喷涂 和燃烧火焰喷涂技术

杨耀华 编著



国防工业出版社

机械制造实用新技术丛书之十九

等离子喷涂和燃烧 火焰喷涂技术

栗 枯 主编

杨耀华 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了热喷涂工艺基本特点和一般原理,较详细地介绍了燃烧火焰喷涂和等离子喷涂的工艺方法。对于在各种不同使用条件下如何选择和设计涂层,以及评定涂层质量的试验方法作了说明。此外还简要地介绍了喷涂厂房工艺设计的要求。

本书适于从事表面处理工作的技术人员和工人阅读参考,也可作为大专院校材料、表面处理专业的师生参考用书。

等离子喷涂和燃烧火焰喷涂技术

机械制造实用新技术丛书之十九

栗 括 主编 杨耀华 编著

责任编辑 宋桂珍

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $4\frac{1}{8}$ 插页1 107千字

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷 印数: 0,001—7,500册

统一书号: 15034·2841 定价: 0.84元

作 者 的 话

现代航空发动机制造是机械制造工业的一个重要方面，具有机械制造的基本特点。它又是技术集约性的工业，集中应用了很多新的技术和新的工艺，其中多数对于机械制造行业具有普遍推广的价值。七十年代末，我国从英国引进了斯贝 MK202 发动机及其制造技术，同时又有选择地引进了一些先进的机床设备。这项技术在一定程度上比较完整地反映了近代航空发动机制造的先进水平，通过生产实践也证明了这一点。

为了交流的方便，也为了能有更多的人有机会了解这些制造技术，我们整理编写了这套资料，命名为《机械制造实用新技术丛书》。所以这样命名，是因为我们在编写中遵照了下述原则：

1. 实用性。尽量避免一般性的理论叙述，力求使读者能较快的在实践中运用；

2. 先进性。我们只选择了那些更新颖更有意义的资料；

3. 揉合了我们在斯贝发动机试制工作中的实践经验，还综合了不少有价值的参考资料。

作者期望本套丛书对机械工业，特别是航空发动机制造行业的人们有所帮助，这将是对我们最大的鼓舞。

由于我们视界较窄，水平有限，错误缺点难免存在，欢迎读者批评指正。

本丛书由栗枯同志主编。参加审校工作的主要有：唐宏霞、钟礼治、胡贤惠、谭杰巍、王克强、姜仁忠等同志。

在本丛书编写和出版的过程中，王德荣、黄家豪、郑宝湖、郭治国、姚静梅等高级工程师提供了许多宝贵意见，并参加了审校。还得到了国防科工委、航空工业部有关领导和同志们的大力支持及热情帮助，他们是魏祖治、陈少中、任家耕和贾克琴、张

汉生等同志。

本书在介绍热喷涂工艺的基本特点和一般原理的基础上，较详尽地阐述了喷涂的表面准备处理和燃烧火焰喷涂、等离子喷涂的工艺方法，在各种不同使用条件下选择涂层的方法，喷涂设备的选择和喷涂厂房的工艺设计以及对新涂层的质量进行评定的试验方法。力求通过本书对国内的热喷涂工艺有所帮助。

本书由杨耀华（第一到五部分）杜慧娟（第六部分）和马春恩（第七部分）编写，杨耀华汇总整理。刘凯金和钟礼治同志审校。栗枯同志终审定稿。在编写过程中黄家豪、王克强、姜仁忠和郑济宏同志提了许多宝贵意见。第四设计院李清秀同志对本书编写给予了帮助。在此一一致谢。

作者于西安

国营红旗机械厂

目 录

一、热喷涂工艺	1
(一) 概述	1
(二) 燃烧火焰喷涂	2
(三) 等离子喷涂	5
(四) 各种热喷涂工艺比较	8
(五) 热喷涂工艺的特点	11
二、喷涂表面的预备处理	12
(一) 概述	12
1. 热喷涂层的粘结机理	12
2. 涂层应力	12
3. 粘结方法的选择	13
(二) 凹切	15
(三) 清理	19
(四) 表面粗化	21
(五) 喷涂自粘结涂层	26
(六) 非金属基体材料的预处理	29
三、喷涂技术	30
(一) 喷涂参数	30
(二) 温度控制	42
(三) 非喷涂部位的保护	43
(四) 涂层的熔融处理	44
(五) 保护气氛和低压等离子喷涂	48
(六) 涂层的去除	51
四、涂层的选择和涂层系统的设计	57
(一) 涂层的选择	57
(二) 涂层性能	58
五、涂层的质量和评定方法	71

(一) 涂层的金相评定·····	71
(二) 涂层的粘结拉力强度·····	81
(三) 涂层的拉力强度·····	82
(四) 涂层的硬度试验·····	84
(五) 涂层的磨损试验·····	85
(六) 吹砂浸蚀试验·····	87
(七) 划痕试验·····	89
(八) 喷涂材料(粉末)密度的测定·····	89
(九) 涂层孔隙度的测定·····	90
(十) 耐空气氧化试验·····	91
(十一) 液体渗透试验·····	92
(十二) 恶劣的热环境试验·····	93
六、喷涂厂房工艺设计·····	96
(一) 热喷涂设备·····	96
(二) 等离子弧产生的有害因素及其对人体的危害·····	103
(三) 等离子喷涂厂房(工作间)工艺区划·····	108
(四) 专业设计工艺技术条件·····	112
七、涂层的应用·····	119
(一) 在航空工业中的应用·····	119
(二) 零件修复应用的涂层·····	122
(三) 利用热喷涂工艺喷铸成型·····	127

一、热喷涂工艺

(一) 概述

热喷涂技术是把丝(棒)状或粉末状材料加热到熔化或软化状态,并进一步雾化、加速,然后沉积到要喷涂的零部件或基体材料上。许多金属、合金、氧化物、难熔化合物甚至有机塑料都可以使用热喷涂技术,喷涂到各种各样的金属和非金属基体上。

热喷涂技术除了作为表面处理的一种工艺方法在零部件的表面获得不同性能的防护层外,还可以在预成形的临时基体材料上喷涂到一定厚度,然后用化学的或机械的方法把临时基体材料除去而制成产品。

热喷涂工艺中熔化喷涂材料使用的基本能量形式有两种:气体燃烧和电弧。常用的热喷涂工艺有下述几种类型。

以气体燃烧为热源的:

(1) (燃烧)火焰喷涂;

① 丝(棒)火焰喷涂;

② 粉末火焰喷涂。

(2) 爆炸喷涂。

以电弧为热源的:

(1) 电弧喷涂;

(2) 等离子喷涂;

(3) 等离子喷焊。

由于电弧喷涂的材料仅限于导电性丝材,而且涂层孔隙度高、致密性差;爆炸喷涂价格昂贵,沉积速度低;所以,应用上受到了一定的限制。作为各种防护涂层和修复尺寸应用的主要是等离子喷涂和燃烧火焰喷涂。

(二) 燃烧火焰喷涂

火焰喷涂是以氧气-燃气火焰作为热源，喷涂材料则以一定的传送方式送入火焰，加热到熔融或软化状态，然后，依靠气体或火焰加速喷射到基体上。

火焰喷涂根据喷涂材料的不同，又可分为丝火焰喷涂和粉末火焰喷涂两种。

图 19-1 表示丝火焰喷涂的装置。图 19-2 所示是喷涂的原理。喷涂源为喷嘴，金属丝穿过喷嘴中心，通到围绕喷嘴和气帽形成的环形火焰中，金属丝的尖端连续地被加热到其熔点。然后，由通过气帽的压缩空气将其雾化成为喷射粒子，依靠空气流加速喷射到基体上，从而熔融的粒子冷却到塑性或半熔化状态，也发生一定程度的氧化。粒子与基体撞击时变平并粘结到基体表面上，随后而来的与基体撞击的粒子也变平并粘结到先前已粘结到基体的粒子上，从而堆积成涂层。

丝材的传送靠喷枪中的空气涡轮或电动马达旋转，其转速可以调节，以控制送丝速度。采用空气涡轮的喷枪，送丝速度的微调比较困难，而且其速度受压缩空气的影响难以保持恒定。但喷枪的重量轻，适于手工操作。采用电动马达传送丝材的喷涂设备，虽然送丝速度容易调节，也能保持恒定，喷涂自动化程度高，但喷枪笨重，只适于机械喷涂。

适于喷涂的金属丝直径一般为 1.8~4.8 毫米。

图 19-4 表示粉末火焰喷涂的原理，图 19-3 所示为喷涂装置。粉末火焰喷涂的喷射源也就是喷嘴，粉末材料悬浮于载气中，通过喷嘴进行传送，粉末进入氧气-燃气火焰，即迅速熔化，此时已熔化的粒子依靠火焰加速并喷射到基体上。熔融的粒子在飞行过程中即冷却至塑性或半熔化状态（粒子表面会发生某种程度的氧化），而后，相继而来的粒子与基体连续撞击从而形成涂层。有时，也使用压缩空气以进一步使粉末粒子加速。

在进行粉末火焰喷涂时，根据要求可以使用或不使用辅助空气。例如，使用麦特寇 (METCO) 5P 型喷涂设备时，辅助空气

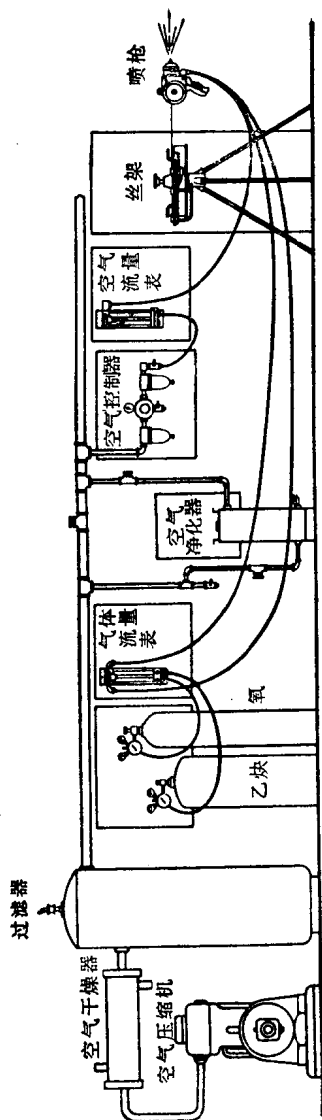


图19-1 丝火焰喷涂装置连接示意图

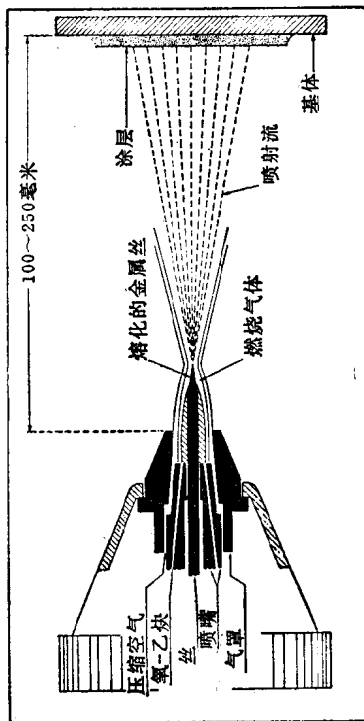


图19-2 丝火焰喷涂原理示意图

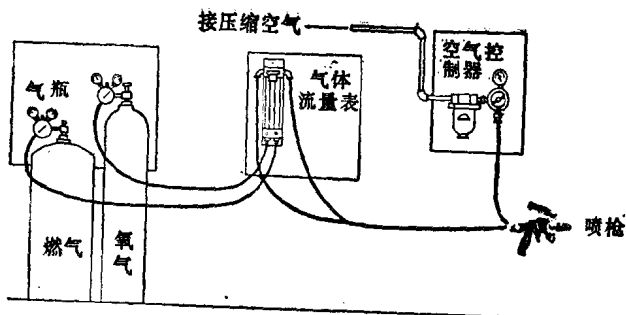


图19-3 粉末火焰喷涂装置连接示意图

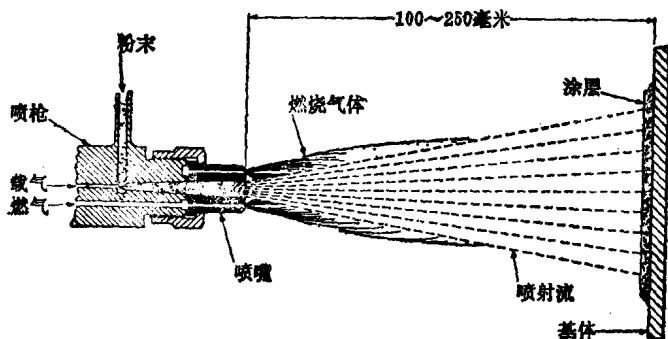


图19-4 粉末火焰喷涂原理图

喷射流有三种方式：

(1) 冷却 (cooling) 空气—空气流平行于喷涂火焰，并与喷涂火焰同心。其作用是冷却要喷涂的零件，并加速粉末粒子。

(2) 收敛 (pinch) 空气—集中收敛空气流，以大大地加速粉末粒子，空气通过火焰并与火焰相互作用，形成较强的氧化环境。

(3) 射流 (jet) 空气—两股空气喷射流，其收敛角度可以调节。其作用与收敛空气大致相同。

加热喷涂材料的燃气最常用的是乙炔。有时也用氢气、丙烷或稳定的 MAPP (methylacetylene propadiene stabilized) 等。

不同的燃气与氧气混合燃烧时，其火焰温度各不相同，见表19-1。通常使用贮气瓶贮装的压缩状态气体。气体的纯度对燃烧火焰的温度和涂层质量都有一定的影响。最常用的氧气和乙炔的纯度要求如表19-2所示。氧气用于辅助燃烧。在使用等压式火焰喷涂设备时，所需氧气一般约60%来源于贮气瓶，其余部分来自周围的空气。在喷涂时，调节氧气和燃气的比例可以控制火焰的温度和气氛。

表19-1 不同燃烧气体的火焰温度

燃烧气体	火焰温度(℃)	燃烧气体	火焰温度(℃)
氧-乙炔	3100	氧-氢	2700
氧-丁烷	3100	氧-煤气	2000
氧-丙烷	2760	氧-氨	4950

表19-2 喷涂用的氧气和乙炔的纯度要求

(1) 氧气

氧气最低含量 (%)	杂质最高含量 (以体积计, ppm)						
	水分	氢气	氮气	碳氢化合物	CO ₂	CO	氩气
99.5	200	500	1000	50	5	2	1

(2) 乙炔

乙炔最低含量 (%)	杂质最高含量 (以体积计, ppm)				
	S	P	NH ₃	CO ₂	水分
99.5	10	10	无	100	700

火焰喷涂工艺受氧气-燃气火焰最高温度的限制，故熔点高于2900℃的材料不能采用这种工艺，而需采用等离子喷涂。

(三) 等离子喷涂

等离子喷涂是一种多用途的精密喷涂方法。由于以电弧等离子体为热源，故能量集中，喷涂温度可高达16600℃(通常使用温度约6000~11000℃)，但传递给基体材料的热量却不多。几乎任何

一种材料都能采用等离子喷涂。目前有多达150种以上的如金属、陶瓷、塑料、等等都可采用等离子喷涂技术。等离子喷涂的热源能量水平较高，热能传递到粉末粒子时周围气氛的温度降低很少，因而能使粉末粒子获得有效的加热。此外，由于粉末粒子在等离子“火焰”中的加热时间可以控制，不仅难熔材料能获得有效的加热，某些热稳定性差的材料也能免于氧化和烧损。等离子喷涂还具有喷射粒子速度高、涂层致密、孔隙率低、粘接强度高等优点。

1. 等离子体

等离子体属于物质的第四种状态，与普通气体相比发生了状态变化。由于存在大量的状态变化“潜能”，当温度很高的等离子体把热能传递给被加热的物体时，本身的温度并不降低。如利用普通热气体加热，当热气体把热能传递给被加热物体时，作为热源的气体温度必然下降。若要进一步加热这种物体，必须排走被加热物体周围温度已降低的气体而补充以高温气体。因此，必须使被加热物体周围具有高速热气体流，才能使物体有效地加热。在等离子喷涂中，由于粉末粒子随等离子火焰运动，所以它与热源之间不可能获得很高的相对速度，从而证明了利用状态变化加热要比通过降温加热优越。

2. 等离子电弧的基本形式

工业上常用的等离子发生设备有两种形式。一种是转移弧，这就是电弧离开喷枪转移到被加工零件上的等离子弧。喷枪结构如图19-5(a)所示。电弧飞越喷枪的阴极和阳极（被加工零件）之间，工作气体围绕着电弧送入，然后从喷嘴喷出。等离子弧切割、等离子弧焊接和等离子冶炼等多使用转移弧等离子设备。

另一种是非转移弧。所谓非转移弧是指在阴极和喷嘴（阳极）之间所产生的等离子弧。喷枪结构如图19-5(b)所示。在阴极和阳极（即喷嘴）的内壁之间产生电弧，工作气体通过阴极和喷嘴之间的电弧而被加热，造成全部或部分电离，而后由喷嘴喷出形成等离子火焰（或称等离子射流）。等离子喷涂、等离子烧蚀等多采

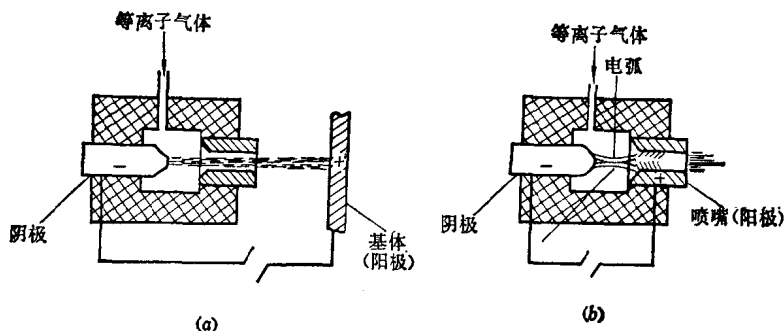


图19-5 等离子弧的形式

(a) 转移等离子弧；(b) 非转移等离子弧。

用非转移弧等离子设备。由于非转移弧等离子喷枪用于加热工作气体的电弧在喷嘴内壁的阳极点终止，在不向气体供给能量的情况下将等离子气体喷射出去。所以，这种喷枪对基体材料的加热效果很低。因此，等离子喷涂虽然温度高，对喷涂粉末的热传导性能好，但是传递到基体（或工件）的热量却很少，这就避免了基体材料的热变形。

在某些情况下，需要联合使用转移弧和非转移弧。等离子喷焊就是采用这种联合形式的等离子弧。非转移弧引燃转移弧并加热金属粉末，转移弧加热工件使其表面产生熔池。联合等离子弧示意图见图19-6。

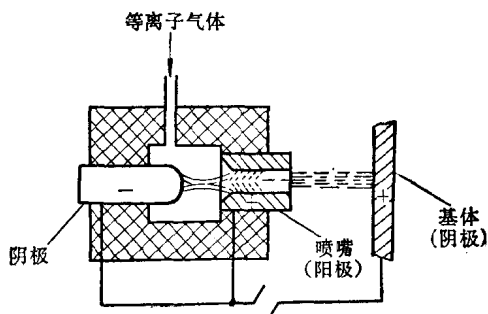


图19-6 联合等离子弧

3. 等离子喷涂

工业上使用的等离子喷涂设备由电源、控制装置、送粉器、热交换器和喷枪等组成。其作用是产生高温、高速等离子射流，把喷涂粉末熔融并喷射到基体上。图19-7是等离子喷涂设备各部分连接的示意图。详细情况将在第六章中介绍。

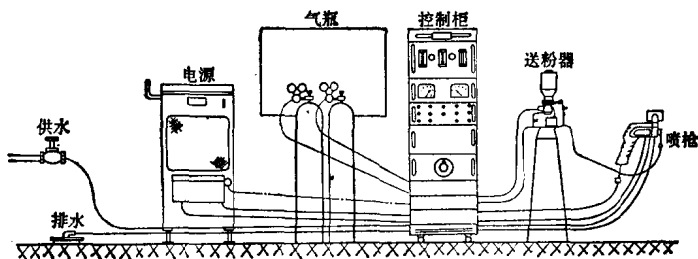


图19-7 等离子喷涂设备示意图

等离子喷涂的热源由一个含二氧化钍 (ThO_2) 或铈的钨阴极和产生电弧的中空铜阳极组成。阴极与阳极在喷枪室内设置于同一轴向上，并用连续流过的水进行冷却，冷却水由直流电缆供给。等离子气体和粉未经由软管与喷枪连接。图19-7和19-8为等离子喷枪喷涂过程示意图。由图中可以看出，在喷嘴（阳极）与阴极之间产生直流电弧，工作气体从喷嘴和电极间的缝隙中通过，造成气体的分解和离子化，从喷嘴产生高温等离子射流。粉末悬浮在载气流内，由粉末口进入等离子火焰，并迅速达到熔化温度。等离子火焰喷向基体，加速熔融的粉末粒子，粒子与基体撞击变平并粘结到基体上，粒子逐渐堆积从而形成涂层。

(四) 各种热喷涂工艺比较

热喷涂工艺中，决定涂层质量的基本因素是：

- (1) 喷涂材料的加热温度；
 - (2) 喷涂材料撞击到基体材料上的速度；
 - (3) 在加热、喷涂和冷却时，喷涂材料和基体的氧化程度。
- 不同的热喷涂方法所获得的最高温度和粒子速度是不相同

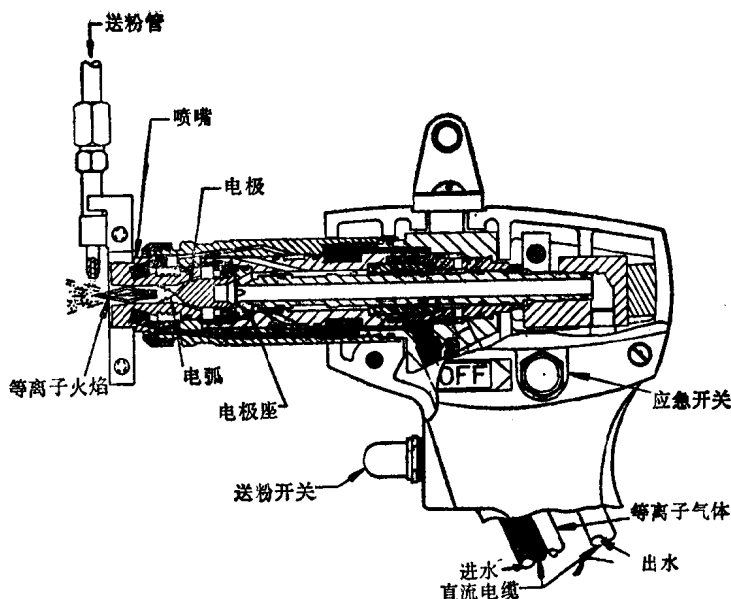


图19-8 麦特寇 7 MB型高能等离子喷枪喷涂过程示意图

表19-3 各种热喷涂工艺的典型粒子速度和最高加热温度

热 喷 涂 工 艺	粒子速度(米/秒)	最高温度(℃)
粉末火焰喷涂	24~36	2537~2649
丝(棒)火焰喷涂	240	276~2871
爆炸喷涂	730	>3315
电弧喷涂	240	5538~6649
等离子喷涂	488	>11093
等离子喷焊	488	>11093

的。表19-3中列出了各种热喷涂工艺的典型粒子速度和最高加热温度。

对于许多材料来说，喷涂粒子的氧化是不符合要求的，因此，必须快速加热和提高粒子速度。而等离子喷涂和爆炸喷涂能够较好地满足这两点要求。

火焰喷涂的优点是操作简便、成本低廉,喷涂设备移动方便,适于外场作业。但是,这种喷涂工艺受到氧气-燃气火焰最高温度(见表19-1)的限制,所以,对于高熔点的难熔材料不适于使用这种方法。这是由于火焰喷涂的温度和喷射粒子的速度都比较低,以致粒子在与基体撞击时变形较小,故所形成的涂层孔隙率高,涂层强度低,涂层与基体的粘结力也差。特别是粉末火焰喷涂,由于火焰冲刷基体,会导致较多的热量传递到基体金属,从而引起基体和涂层的氧化。但是,这种工艺方法对于喷涂除聚苯酯树脂、铝-硅以外的其他可磨耗封严层却具有无可比拟的优越性。使用这种方法喷涂镍基自熔合金(喷涂后再进行熔融处理)也比较经济。

表19-4 几种热喷工艺特点的比较

	火焰喷涂	电弧喷涂	等离子喷涂	爆炸喷涂
典型涂层孔隙率(%)	10~15	10~15	1~10	1~2
典型粘结强度(公斤/厘米 ²)	71	102	306	612
优点	成本低,沉积效率高,操作简单	成本低,沉积速度高	孔隙率低,粘结强度高	孔隙率很低,粘结强度极高
缺点	孔隙率高,粘结强度差	孔隙率高,喷涂材料仅限导电丝材	成本高	成本非常高,沉积速度慢

在丝火焰喷涂工艺中,由于氧气-燃气火焰的直径可以压缩得比粉末火焰喷涂时小。故能更有效地利用氧气-燃气火焰的热量。大多数情况下,丝火焰喷涂工艺的喷涂速度比粉末火焰喷涂高得多,所以涂层密度、与基体材料的粘结强度都较高。

等离子喷涂的喷射粒子速度和加热温度都比较高,因此涂层密度高,与基体材料的粘性好。由于等离子火焰的温度高于目前已知任何材料的熔化温度,所以喷涂材料范围广泛,一些使用燃烧火焰加热易于氧化变质的材料(如碳化钨)和易于烧损的材料(如聚苯酯树脂)都能很好地应用这种方法喷涂。等离子喷涂