

热喷涂原理与应用技术

美国焊接学会 编

麻毓璜 贾永昌 刘维祥 译

陈一心 审校

肖汤圣

四川科学技术出版社

1987年·成都

前 言

由美国焊接学会出版的这本热喷涂手册，为评价热喷涂技术的各种应用提供了依据，介绍了热喷涂技术使用的基本方法、设备及喷涂材料。

尽管热喷涂早在二十世纪初就得到应用，但最初主要用于旧件的修复，进入六十年代以来，热喷涂技术应用的规模、范围及多样性方面都有了奇迹般的发展。工艺的进步与材料的发展，促使热喷涂技术获得了大量新的潜在的应用。本手册只能指出热喷涂技术及其应用的现状与前景。

美国焊接学会热喷涂委员会首次出版本书，旨在为某些特殊应用选择适当工艺、设备及可获得的喷涂材料方面提供指导和参考。读者可从中获得热喷涂方法和工艺方面的知识，以便发掘新的应用领域。本书重点放在生产车间和现场的操作程序，包括经过验证的确切数据。

欢迎对本书的初版进行评论和建议，来函请寄美国焊接学会热喷涂委员会秘书处——AWS Committee on Thermal Spraying, American Welding Society, 550 N. W. Lejeune Road, P.O. Box 351040, Miami, Florida 33135.

C2c 分会主席

Merle L. Thorpe

目 录

第一章 工艺基础

1.1 概述	1
1.2 定义	1
1.3 工艺变量	1
1.3.1 喷涂材料	1
1.3.2 工艺	1
1.4 涂层特性	2
1.4.1 基体	2
1.4.2 结合层	2
1.4.3 涂层结构	2
1.5 应用	3
1.5.1 生产制造	3
1.5.2 维修	3

第二章 喷涂方法

2.1 基本方法	4
2.2 燃烧法	4
2.2.1 线材和棒材	4
2.2.2 粉末	5
2.2.3 氧气爆炸喷枪	6
2.3 电加热法	7
2.3.1 线材电弧喷涂	7
2.3.2 等离子非转移弧	8
2.3.3 等离子转移弧	9
2.4 气氛控制	9

第三章 表面制备

3.1 概述	11
3.2 清洗及处置	11
3.2.1 蒸汽除油	11
3.2.2 蒸汽喷洗	11
3.2.3 酸浸	12
3.2.4 烘烤	21
3.2.5 超声波清洗	12
3.2.6 磨蚀喷砂	12
3.2.7 擦刷	12

3.3 粗化	12
3.3.1 粗化目的	13
3.3.2 粗化程度	13
3.3.3 测量方法	13
3.4 磨粒喷砂 :	13
3.4.1 喷砂砂粒选择的影响因素	13
3.4.2 砂粒的类型及尺寸	14
3.4.3 喷砂后的表面粗糙度	15
3.4.4 喷砂程序	15
3.4.5 喷砂速度及成本	19
3.4.6 砂粒的循环使用	19
3.4.7 压缩空气的供应	20
3.5 宏观粗化	20
3.5.1 下切	20
3.5.2 开槽	21
3.5.3 平面布钉或切缝	21
3.5.4 粗粒喷砂	22
3.6 粗化的应用	22
3.6.1 抗腐蚀涂层	22
3.6.2 重熔涂层	22
3.6.3 不锈钢涂层	23
3.6.4 塑料基体	23
3.7 粗化后的清理	23
3.7.1 覆盖	23
3.7.2 搬动	23
3.8 粘结底层	23
3.8.1 一般考虑	23
3.8.2 粘结底层的厚度	23
3.8.3 粘结底层材料	24
3.8.4 陶瓷工作层	24
3.8.5 电弧焰、燃烧火焰和等离子焰	24

第四章 涂层特性

4.1 引言	25
4.2 涂层的形成和结构	26
4.2.1 喷涂形式	26
4.2.2 颗粒的沉积	27
4.2.3 基体表面对熔滴的影响	30
4.3 涂层性能	31
4.3.1 外观	31
4.3.2 抗拉强度	36
4.3.3 残余应力	37
4.3.4 硬度	37
4.3.5 抗压性	38
4.3.6 抗磨损性	38
4.3.7 疲劳	38
4.3.8 延展性	39
4.3.9 耐腐蚀性	39
4.4 在控制气氛中所生产的涂层	39

第五章 涂层的选择和应用

5.1 引言	41
5.2 粘结底层	41
5.3 在电器上的应用	42
5.3.1 电容、电阻和电刷	42
5.3.2 电路、电加热板和电开关	42
5.3.3 屏蔽	42
5.3.4 电子	42
5.4 抗微振磨损与抗磨损	43
5.5 恢复尺寸	43
5.5.1 应用	43
5.5.2 磨损	43
5.6 间隙控制涂层	44
5.6.1 可磨损涂层	44
5.6.2 耐磨涂层	44
5.7 环境	44
5.7.1 热障涂层	44
5.7.2 抗高温和抗氧化涂层	45
5.7.3 防腐蚀涂层	45

5.8 装饰涂层	47
5.9 材料的分类	47
5.9.1 氧化物陶瓷	48
5.9.2 铁基合金	49
5.9.3 镍基和钴基材料	49
5.9.4 有色金属材料	50
5.9.5 其它碳化物	50
5.9.6 耐熔金属和合金	51
5.9.7 自熔性合金	51
5.9.8 碳化物 ^h	51
5.9.9 可磨损涂层	52
5.10 应用	52
5.10.1 机械零件	52
5.10.2 抗微振磨损和磨损	53
5.10.3 间隙控制	53
5.10.4 石油化工及造纸	54
5.10.5 大气及海水腐蚀	54
5.10.6 电器	54

第六章 培训、考核和质量控制

6.1 引言	55
6.2 操作人员	55
6.2.1 合格证	55
6.2.2 培训	56
6.2.3 考核	57
6.3 消耗材料	58
6.3.1 喷涂材料	58
6.3.2 气体	61
6.3.3 其它消耗品	64
6.4 仪器	64
6.5 涂层的质量控制	64
6.5.1 破坏性试验方法	64
6.5.2 非破坏性鉴定	71

第七章 涂层加工

7.1 引言	73
7.2 精加工方法	73
7.2.1 油石手工打磨、布抛光、磨粒抛光	73
7.2.2 振动光蚀和擦亮	74
7.2.3 砂带磨和抛光	74

7.2.4 车削	74	9.3 空气	92
7.2.5 研磨	74	9.3.1 气源供给	93
7.3 砂轮的选择	77	9.3.2 空气压缩机	93
7.4 磨削变量	81	9.4 加热炉和操作	94
7.4.1 研磨轮速度	81	9.4.1 加热炉	94
7.4.2 工件速度	81	9.4.2 操作	94
7.4.3 接触面	81	9.5 喷涂箱和喷涂室	98
7.4.4 湿式研磨	81	9.5.1 一般规则	98
7.4.5 砂轮修整	81	9.5.2 排风装置	98
7.5 超精加工	82	第十章 经济性	
7.6 珩磨	82	10.1 引言	101
7.7 抛光	82	10.2 一般考虑	101
7.8 综合指南	82	10.3 设备	102
第八章 后处理		10.4 政府规定	102
8.1 封孔剂	84	10.5 投资和操作成本	103
8.1.1 引言	84	10.5.1 设备成本	103
8.1.2 封孔剂种类	84	10.5.2 气体和能源成本	103
8.1.3 防腐蚀	85	10.5.3 工作或预计成本	105
8.1.4 机械零件	85	10.5.4 材料	105
8.2 自熔涂层的重熔	86	10.5.5 喷涂时间或生产率	105
8.2.1 引言	86	10.6 工作或预算成本的计算公	
8.2.2 重熔方法	86	式	106
8.2.3 火焰重熔	87	10.6.1 怎样计算喷涂面积	106
8.2.4 炉内重熔	87	10.6.2 成本的计算	107
8.2.5 感应重熔	88	10.6.3 设备操作成本的计算	107
8.2.6 不同基体金属的保护	88	10.6.4 确定涂层成本的六个	
8.2.7 重熔中的问题	88	步骤	109
8.3 其它后处理	89	10.7 典型例子*1——小弹簧的	
8.3.1 扩散	89	喷涂	109
8.3.2 浸渗	89	10.7.1 基本情况和问题	109
8.3.3 机械处理	89	10.7.2 加工过程	110
8.3.4 热等静压	89	10.7.3 成本	110
8.3.5 激光加热	89	10.8 典型例子*2——芯轴的修	
第九章 辅助设备		复	110
9.1 引言	90	10.8.1 基本情况和问题	110
9.2 喷砂	90	10.8.2 修理方法	110
9.2.1 设备	90	10.8.3 成本	111
9.2.2 机器	91	10.9 典型例子*3——电磁干扰塑料盒的	
9.2.3 喷嘴	91	屏蔽	111

10.9.1	基本情况和问题	111
10.9.2	喷涂过程	112
10.9.3	成本	112
10.10	典型例子*4——柴油发动 机的连杆轴承	113
10.10.1	基本情况和问题	113
10.10.2	喷涂过程	114
10.10.3	成本	114
10.11	典型例子*5——农用机械 刀片	114
10.11.1	基本情况和问题	114
10.11.2	加工过程	115
10.11.3	成本	115
10.12	典型例子*6——纸袋制造 机的夹卡、钩爪	116
10.12.1	基本情况和问题	116
10.12.2	加工过程	116
10.12.3	成本	116
10.13	典型例子*7——磨床主轴	117
10.13.1	基本情况和问题	117
10.13.2	加工过程	117
10.13.3	成本	117
10.14	典型例子*8——汽车的阀 座	118
10.14.1	基本情况和问题	118
10.14.2	加工过程	119
10.14.3	成本	119
10.15	典型例子*9——喷气发动 机静子叶片上 的抗微动磨蚀涂层	120
10.15.1	基本情况和问题	120
10.15.2	加工过程	120
10.15.3	成本	120
10.16	典型例子*10——燃气涡 轮压缩机可磨耗的控隙涂 层	121
10.16.1	基本情况和问题	121
10.16.2	加工过程	121
10.16.3	成本	122

10.17	典型例子*11——防腐涂 层	122
-------	-------------------	-----

第十一章 安全

11.1	范围	124
11.1.1	安全指南	124
11.1.2	有毒废料的处理	124
11.1.3	易燃溶剂和封孔剂的基 本组分	125
11.2	火灾的预防和防护	125
11.3	安全操作注意事项	125
11.3.1	高压气瓶的存放、搬运 和使用	125
11.3.2	流量计	126
11.3.3	压缩空气	126
11.4	火焰喷涂设备	127
11.5	等离子和电弧喷涂设备	127
11.6	吹砂机	128
11.7	人身的保护	128
11.7.1	眼睛的防护	129
11.7.2	呼吸防护	129
11.7.3	噪声的防护	130
11.7.4	防护服	134
11.7.5	受限制的空间	134
11.8	通风	135
11.9	毒性物质	137
11.9.1	铍	137
11.9.2	镉	137
11.9.3	铅、铅合金, 钴、铬 和碲	137
11.9.4	溶剂	137
11.9.5	门槛极限值 (TLV)	138
11.9.6	锡和锌	138
11.10	安全标准	138

附录:	140
-----	-----

术语汇编	142
------	-----

原著编著人员名单	
----------	--

第一章 工艺基础

1·1 概 述

热喷涂是一种特殊的技术，在产品制造和旧件维修方面都有广泛的应用。这门技术的特点是它具有真正的叠加效果。也就是说，多种成份及变量，在同时作用和正当应用时所产生的效果，远远比这些成份或变量在单独状况下所产生的效果要大。必须明了每一种成份和变量，以便对特殊工艺进行正确的选择和操作。具备这些基本知识后，使用者才可能对某些特殊应用做出恰当的判断。

1·2 定 义

热喷涂是一系列过程，在这些过程中，细微而分散的金属或非金属的涂层材料，以一种熔化或半熔化状态，沉积到一种经过制备的基体表面，形成某种喷涂沉积层（见术语汇编中的电弧喷涂、火焰喷涂和等离子喷涂等条目）。涂层材料可以是粉状、带状、线（丝）状或棒状。热喷枪由燃料气或电弧提供必须的热量，将热喷涂材料加热到塑态或熔融态，再经受压缩空气的加速，使受约束的颗粒束流冲击到基体表面上。冲击到表面的颗粒，因受冲压而变形，形成叠层薄片，粘附在经过制备的基体表面上，随之冷却并不断堆积，最终形成一种层状结构的涂层。

1·3 工艺变量

热喷涂过程的基本变量是所喷涂的材料、加热方法及推进这些材料到基体的方法。

1·3·1 喷涂材料 喷涂材料的形态通常有线材、棒材、带材（一种连续延伸的塑料管材）和粉材。带材的喷涂起源于欧洲。采用一种或多种的喷涂方法，可喷涂各种材料，包括很多金属、氧化物、陶瓷、金属化合物、某些有机塑料及玻璃等。

1·3·2 工艺 依据产生热源的不同方法，热喷涂工艺可分为两种基本类型：

I 类

Ⅰ类

燃烧法

电热法

火焰喷涂

等离子喷涂（非转移弧）

爆炸喷涂

等离子喷涂（转移弧）

线材电弧喷涂

感应等离子喷涂

第一类用可燃气体为热源，属于第二类的则采用电力作为热源，如等离子（转移弧与非转移弧）、电弧及感应等离子等，这类喷涂采用粉末及线材两种材料形态。

1·4 涂层特性

热喷涂层在实际应用中能否成功，取决于是否认真遵守特定的工艺程序。热喷涂的一项基本要求规则是，任何偏离特定应用的标准，或对细微末节处稍有疏忽，都会产生不良后果。以后的章节将详尽地讨论操作程序。喷涂层有三个基本方面，介绍如下：

1·4·1 基体 经喷涂后所形成的涂层沉积在基体的表面上。基体材料包括金属、氧化物、陶瓷、玻璃、大多数塑料及木制品。并不是所有的喷涂材料都能被喷涂到这些基体上，其中有一些要求特殊的工艺方法。

对每一种工艺来说，喷涂之前都需要进行表面制备。这道工序实际上对每种工艺都是相同的。表面制备有下列两个重要的步骤：

（1）净化表面 去除妨碍与基体结合的污染物。

（2）对表面进行粗化处理，提供微小的凹凸起伏或表面不平度，以增强涂层的粘着力并提供较大的有效表面积。

喷涂粘结层之前，正确的表面处理是一项非常关键的操作步骤，它将影响结合强度及涂层对基体的粘结力。

1·4·2 粘结层 涂层与基体之间的结合，可能是机械结合，也可能是冶金结合。结合力受许多因素的影响，如喷涂材料、基体状态、表面粗糙度、净化程度、喷涂前后或喷涂期间基体表面的温度、颗粒的冲击速度等。

1·4·3 涂层结构 在空气介质中进行喷涂所形成的涂层，其结构及化学成分，与相同材料的锻造或预喷形态是不同的（图1·4·3A）。

这种结构与化学成分上的差异，是由于熔融状态的喷涂材料与喷涂工作气体及其周围空气进行化学反应，使涂层特性增加，例如，当工作气为氧或空气时，喷涂材料经喷涂后会出现它的氧化物，并成为涂层的一个组成部分。金属喷涂层往往多孔而质脆，其硬度也与原始材料有差异。涂层的喷涂态结构，类似于层状结构，其性能取决于所用喷涂方法、工艺参数、采用的技术及喷涂材料的类别。

喷涂层的密度取决于喷涂颗粒的飞行速度及喷涂过程的热源温度（表1·4·3和图1·4·3B）。

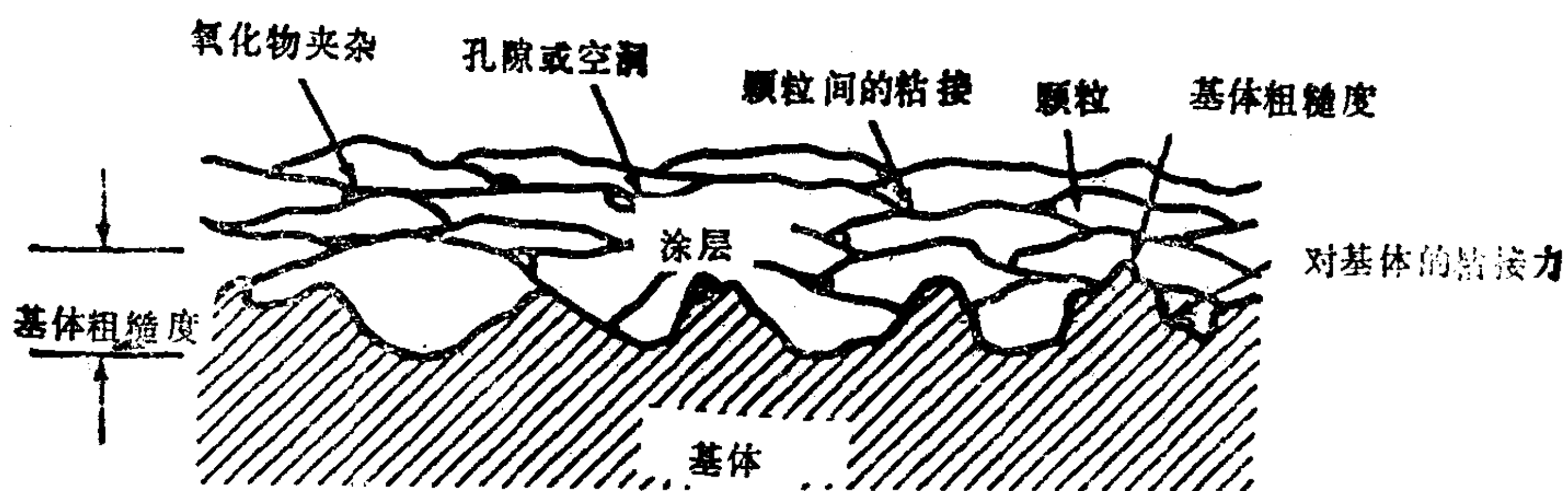


图1.4.3A——典型的涂层剖面，表明含有氧化物夹杂的层状结构

表1.4.3 热源温度

热 源	温 度 °F	温 度 °C
丙烷，氧气	4785	2640
天然气，氧气	4955	2735
氢气，氧气	4875	2690
乙炔，氧气	5625	3100
电弧和等离子	4000-15000	2200-8300

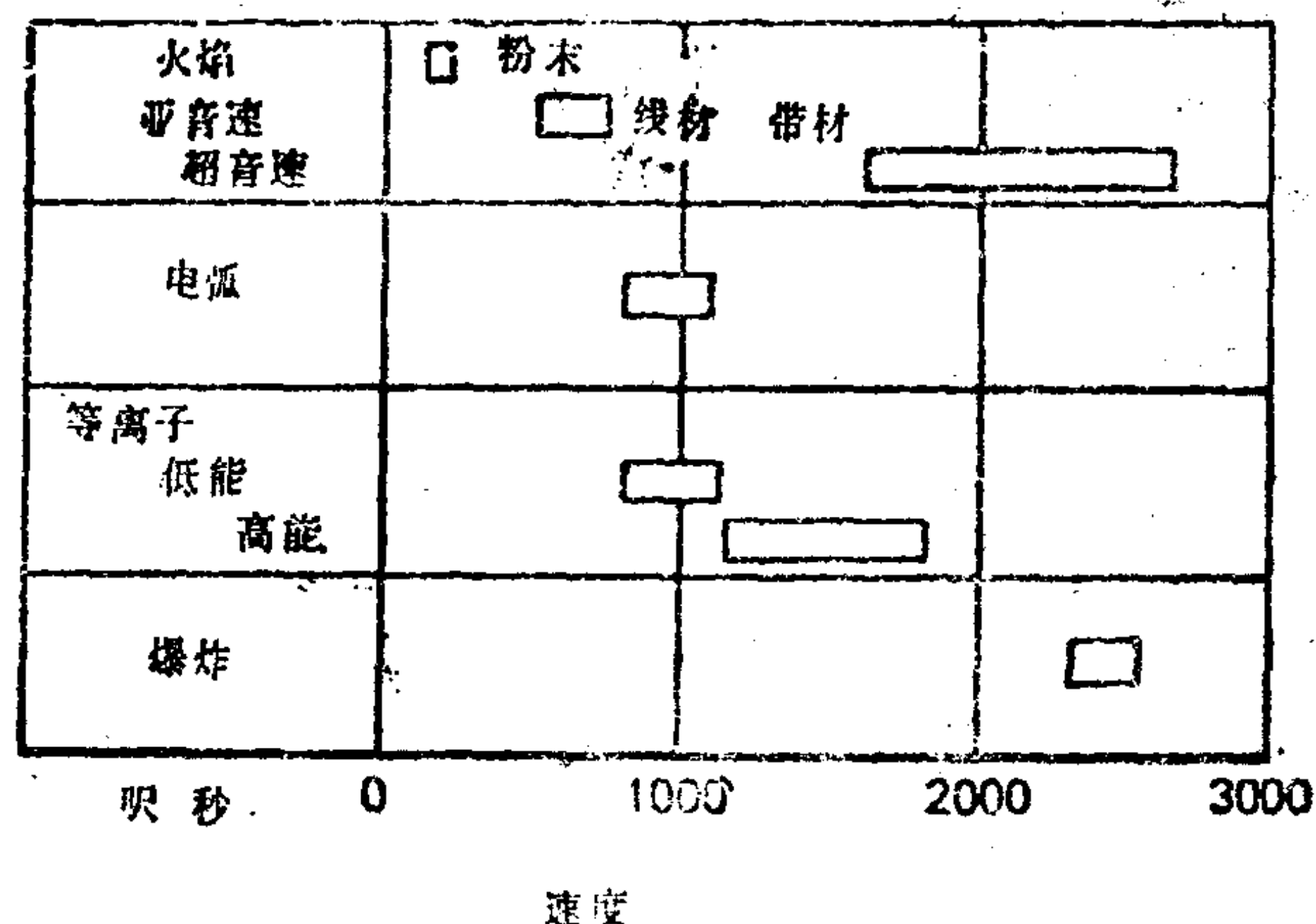


图1.4.3B 颗粒冲击的平均速度

1.5 应用

由最终的用途决定涂层所需要的性能、喷涂材料的类型及所需设备的形式。

1.5.1 生产制造 热喷涂在原始设备部件的制造中获得广泛的应用。宇航工业中已有数百种用途。另外，在船舶、汽车、石油、电器、发电及电子工业部门中也有广泛应用。

1.5.2 维修 在维修工作中，通过热喷涂技术的采用，每年节约数亿美元。这不仅局限于车间内，而且在现场就地也采用这项技术。在那些可以进行热喷涂施工的地方，用热喷涂修复设备构件，通常既经济又节约时间。

在一些存在腐蚀或磨损，或二者兼有的场合，是热喷涂应研究的问题。在这种情况下，对涂层常常施加封孔剂，这项技术已在世界工业范围内得到采用。

第二章 喷涂方法

2.1 基本方法

在生产应用中，热喷涂方法及有关设备可分为两种基本类型：燃烧法及电加热法。

2.2 燃烧法

利用化学反应热的热喷涂叫燃烧法，或称为火焰喷涂。只要是在低于 2760°C 的温度下不会升华但能熔化的任何物质，都可用火焰喷涂形成涂层。这些材料可以是金属、合金或陶瓷，其形态为粉材、线材或带材（陶瓷材料还可为棒材，但无线材）。

2.2.1 线材和棒材 火焰喷涂线材和棒材所用的设备是类似的，如图2.2.1A所示。图2.2.1B则表示典型线材火焰喷枪的剖面。

喷枪装有驱动轮，用以将喷涂材料送入枪体后部。驱动轮由电机、空气风轮或空气透平

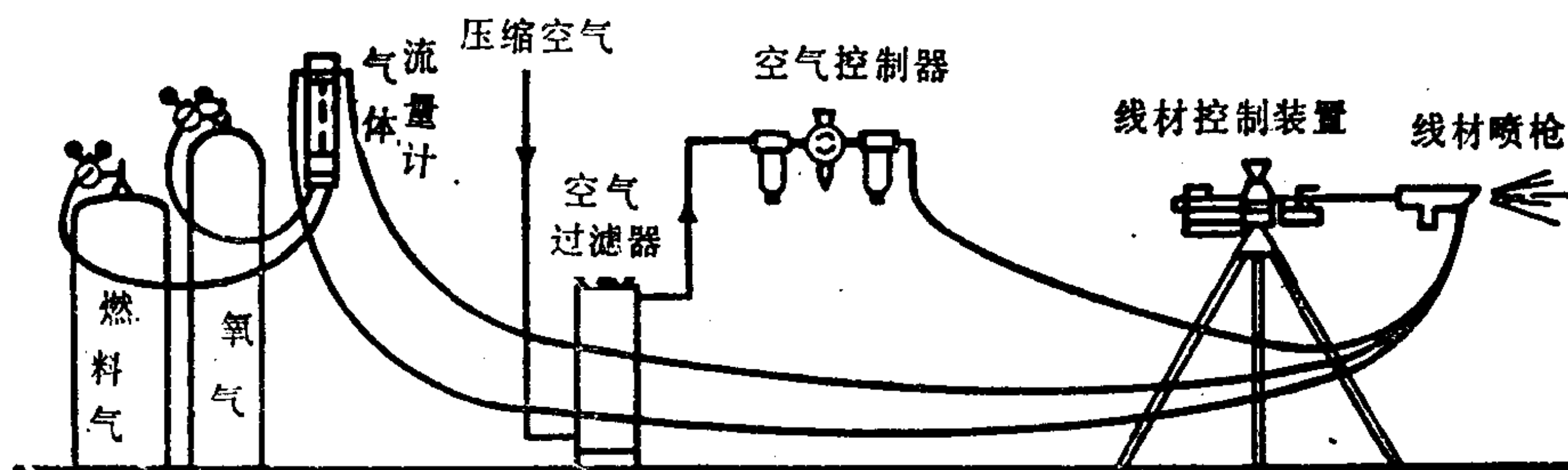


图2.2.1A 线材火焰喷枪的典型装置，
也适用于棒材和带材

来驱动。喷涂材料连续向前，通过喷嘴，并在喷嘴处被同轴燃烧气的火焰加热而熔化。

在火焰喷涂中，可采用下列任何一种燃料气体与氧组合进行燃烧而提供热量：乙炔、稳定的甲基乙炔-丙二烯（MPS）、丙烷、氢气或天然气。由于乙炔可获得较高的燃烧温度（表1.4.3），所以其应用更为普遍。然而，在很多情况下，采用低温火焰会收到更好的经济效果。燃料气体的火焰仅仅用于材料的熔化，而不是为了推进或运送喷涂材料。为了实现喷涂，在火焰周围还包围着通常用空气形成的压缩气流，使熔融材料雾化，并推送到基体

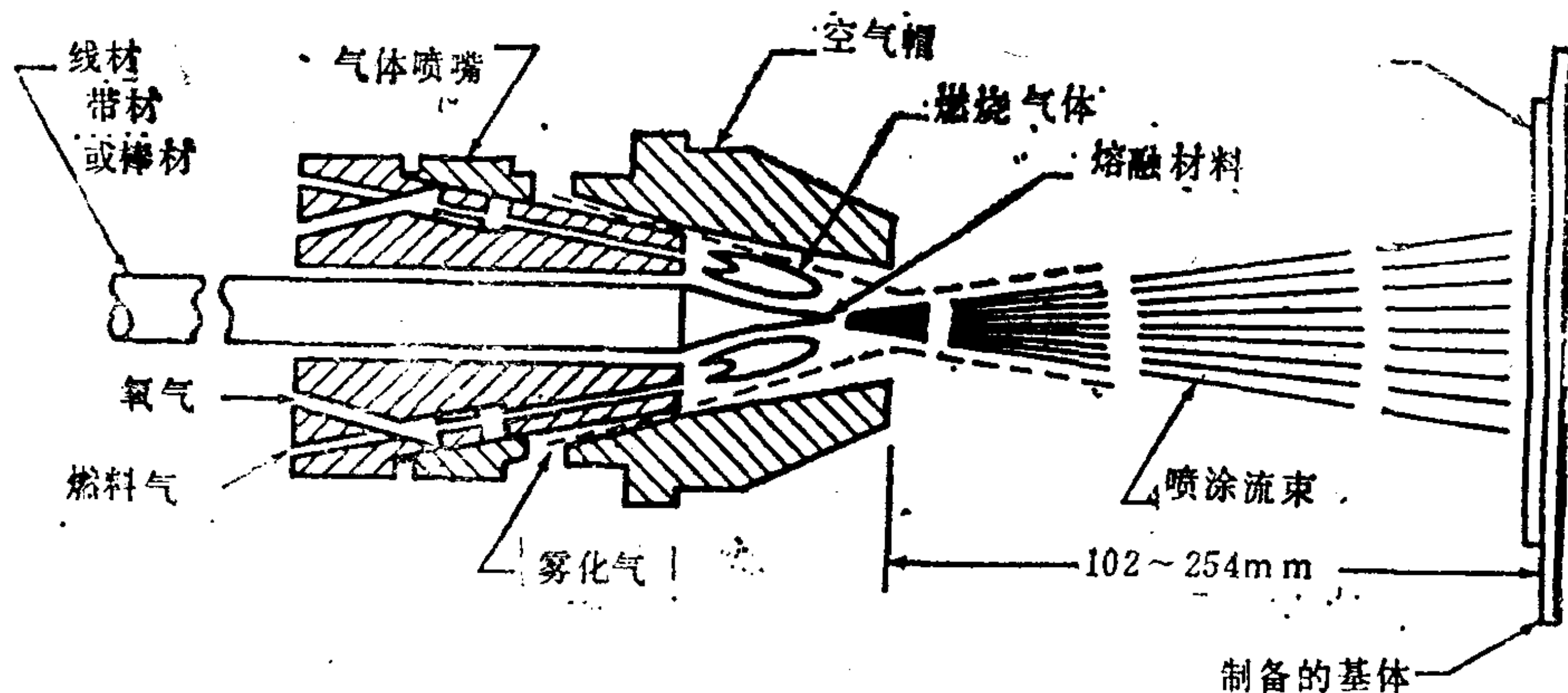


图2·2·1B 火焰喷涂线材、棒材及带材的典型喷枪剖面

上，在特殊场合下，采用惰性气作压缩气流。

不同的喷枪送料部件用来驱动不同形态的材料。其中有线材（连续的金属线）、棒（24吋长的脆性陶瓷）和带（很长的柔性塑料管中装有金属粉末）。

2·2·2 粉末 与其它热喷涂设备相比，粉末火焰喷枪轻便而紧凑。由于喷出的颗粒速度较小，火焰温度较低，因而涂层的粘合强度及涂层本身的综合强度都较低，且比其它喷涂过程得到的涂层气孔率高。粉末材料可以是纯金属粉、合金粉、复合粉、碳化物粉、陶瓷粉、金属陶瓷粉或者是它们的任何组合粉。粉末喷涂通常采用“自熔”合金喷涂层。自熔合金粉含有B和Si，这些元素起熔剂的作用，同时减少氧化。将这种涂层加热到熔化温度，即完成涂层的熔化或基体金属的冶金结合。重熔温度通常高于 1040°C ，可采用任何一种加热方式进行重熔，包括火焰、电感应或加热炉。

粉末装在料斗内，料斗可以与喷枪构成一体，也可联结贯通。用少量气体，运载粉末进入氧—燃料气流中，火焰使粉末熔化并喷射到基体表面。粉末火焰喷涂系统的一般装置示于图2·2·2A，典型的喷枪剖面示于图2·2·2B。

粉末火焰喷涂工艺的变量包括：（1）压缩空气将粉末送入火焰，（2）附加空气射流以加速熔融的颗粒，（3）单独的远离枪体的送粉器，用惰性气体将粉末通过密封管送入喷枪，

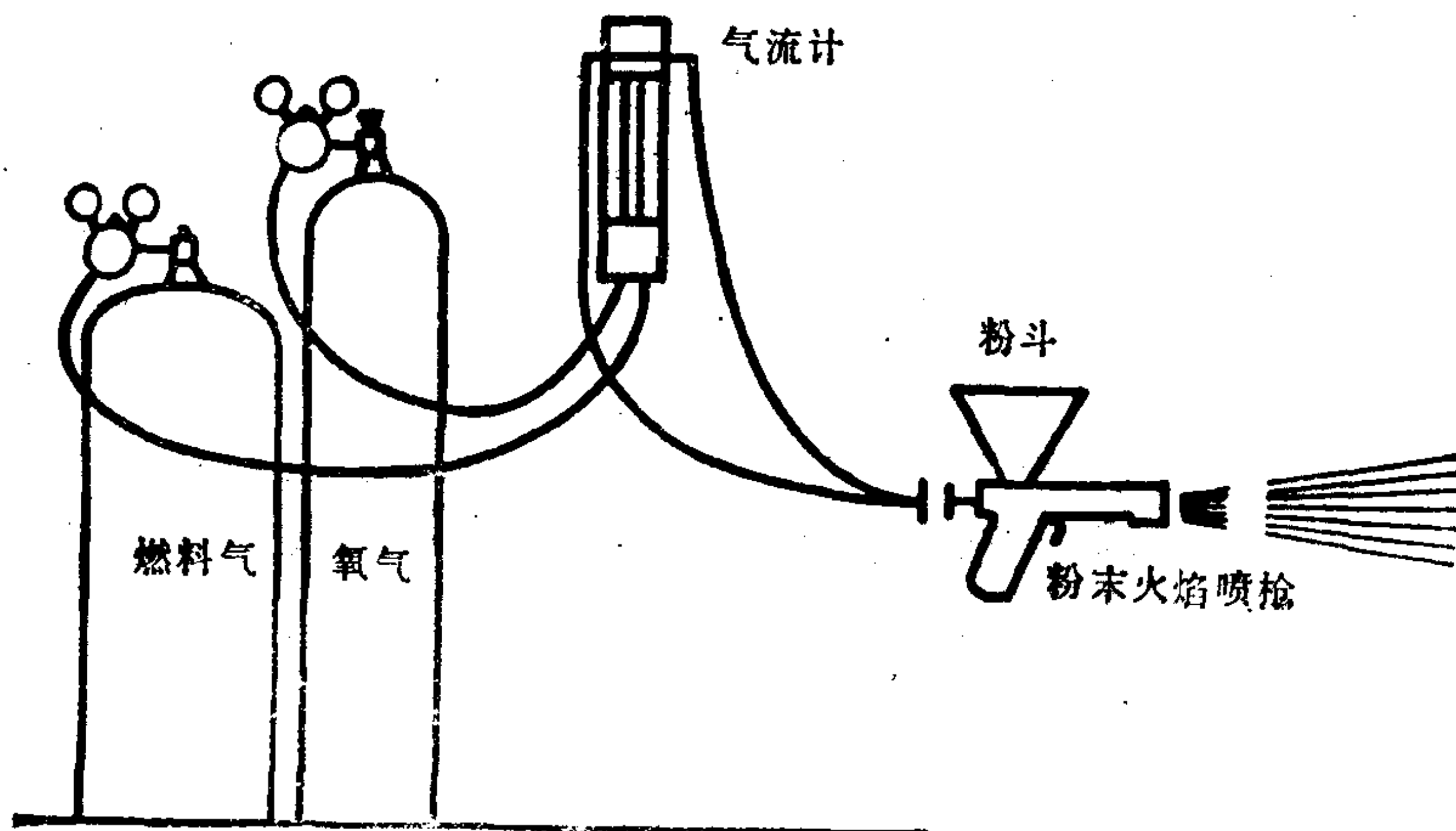


图2·2·2A 粉末火焰喷涂的典型装置

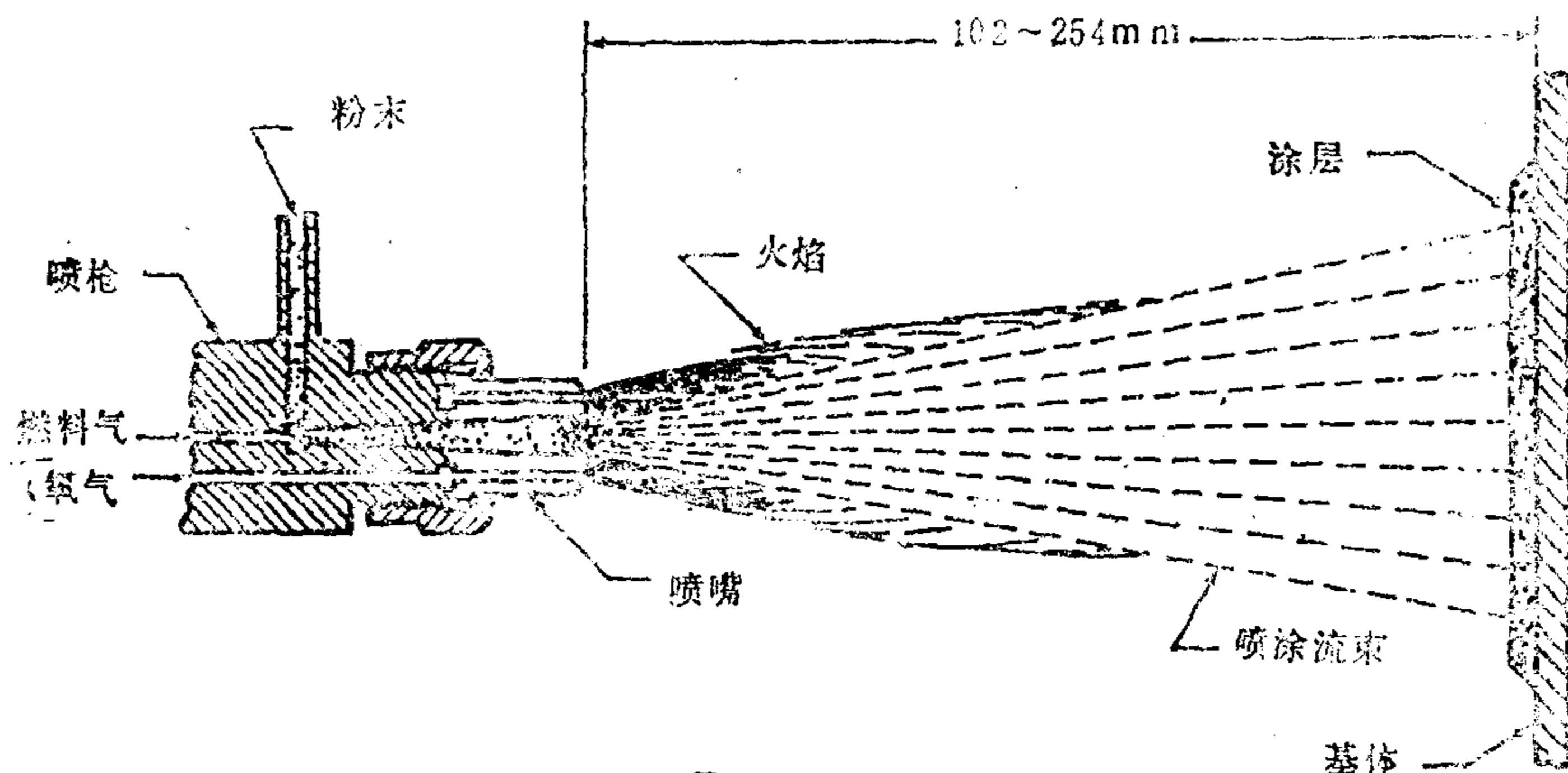


图2·2·2B 粉末火焰喷枪的剖面

(4) 在大气压力下提高速度的加速装置。这些改进装置有利于改善粉末的流动性，有时还能加大颗粒的速度。这样就可改善结合强度及涂层密度。

经过重熔的涂层相当致密，几乎没有孔隙。这种合金成份能得到洛氏硬度高于 HRc—50的喷涂层。涂层的厚度限制在将其加热到熔化温度而不会剥落的范围内。自熔合金涂层通常用于那些可经受重熔温度的影响及允许发生变形的场合。涂层的不同厚度的要求可通过多次喷涂来完成。每次重熔之后，应清除所有的氧化物残渣。

对所有的喷涂工艺来说，粉末的送料速度会影响涂层的结构及沉积效率。如果对原料加热不足，则沉积效率迅速下降，同时涂层中夹有未熔化的颗粒。如果供粉速度太低，一些粉末可能挥发，致使涂层恶化并加大操作费用。典型的送粉机构装有料斗和一个计量装置，以调节粉末进入载流气体中的供粉速度。

2·2·3 氧气爆炸喷枪 爆炸喷枪与其它燃烧火焰喷涂装置不同，它利用氧—乙炔混合气的爆炸能量，而不是靠平稳的燃烧火焰，将粉末材料冲击到基体表面上，所得涂层十分坚硬、致密，而且结合牢固。

如图2·2·3所示，爆炸喷枪由一只长枪管构成，将氧、乙炔和粉末涂层材料的混合物引入到枪体中，当混合气体被点燃时，产生一种可控的爆炸波或火焰脉冲，加速并加热粉末颗粒。在粉末冲出枪体的过程中，它们得到加速并受热。在枪体出口处粉末颗粒的速度可达760米/秒。粉末每喷射一次之后，一股脉冲的氮气流就清洗枪管和膛室。当工件基体在喷枪

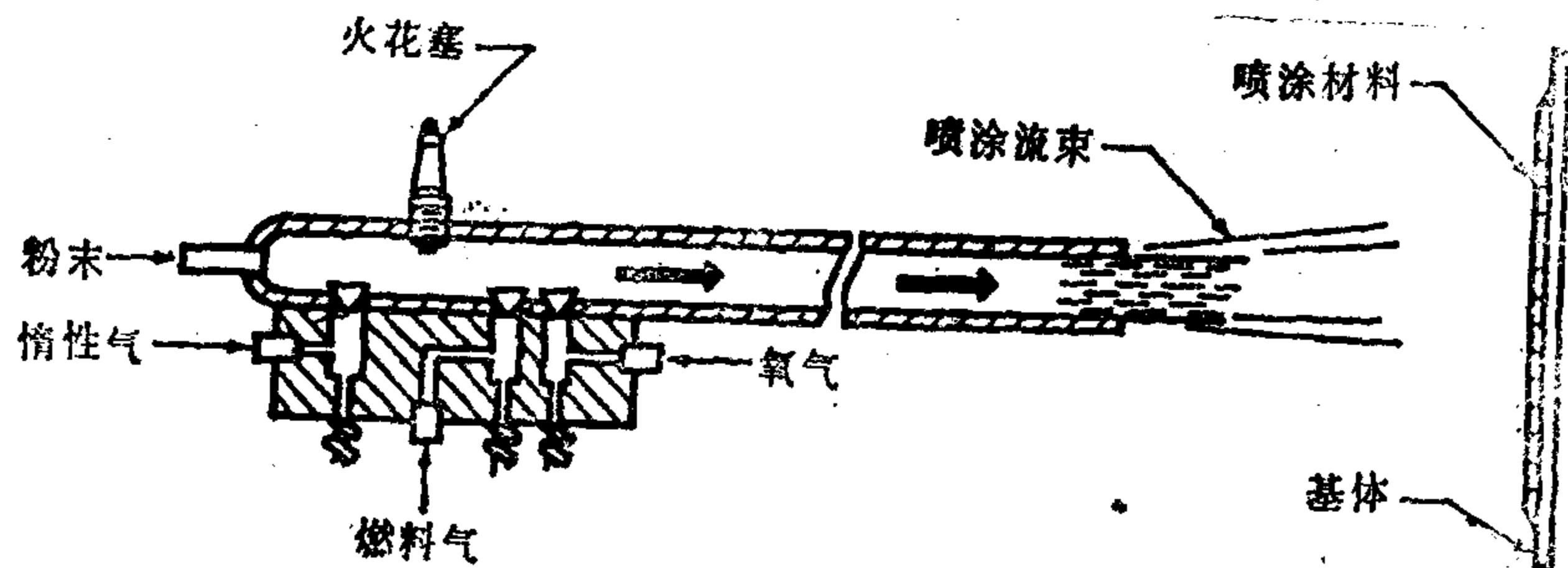


图2·2·3 氧—燃料气爆炸喷枪装置图

前通过或旋转时，每秒所进行的多次爆炸就会达到特定的涂层厚度。

爆炸喷枪内爆燃区温度可达 3315°C 以上，而由于 CO_2 的冷却系统，基体温度保持在 150°C 以下。

涂层厚度一般在 $0.05\text{--}0.5$ 毫米之间。该过程所产生的噪音级超过150分贝。因此，应将该装置放入隔音室内操作。实际的操作由遥控而全部自动化。由于粉末具有很高的冲击速度，促使涂层与基体之间获得很高的结合强度。因涂层的孔隙率很低，故可加工到很好的光洁度。

2.3 电加热法

2.3.1 线材电弧喷涂 在线材电弧喷涂中，有两根自耗的线型电极。它们彼此绝缘，能自动前进，并在雾化气流中的某点相遇，两线之间有 $18\text{--}40$ 伏的电压差，因而产生引燃电弧，就使线型电极的顶端熔化。通常采用压缩空气作为雾化气，直接通过电弧区，将熔融的液滴喷射出去，形成雾化喷涂流束。电弧喷涂系统的组成如图2.3.1A所示。

电弧喷枪 电弧喷枪示于图2.3.1B。线型电极(1)通过导线轮(2)进入接触尖端(3)。压缩空气(5)由雾化喷嘴(4)导入，并直接通向电弧区。绝缘动力电缆将喷枪联结到直流

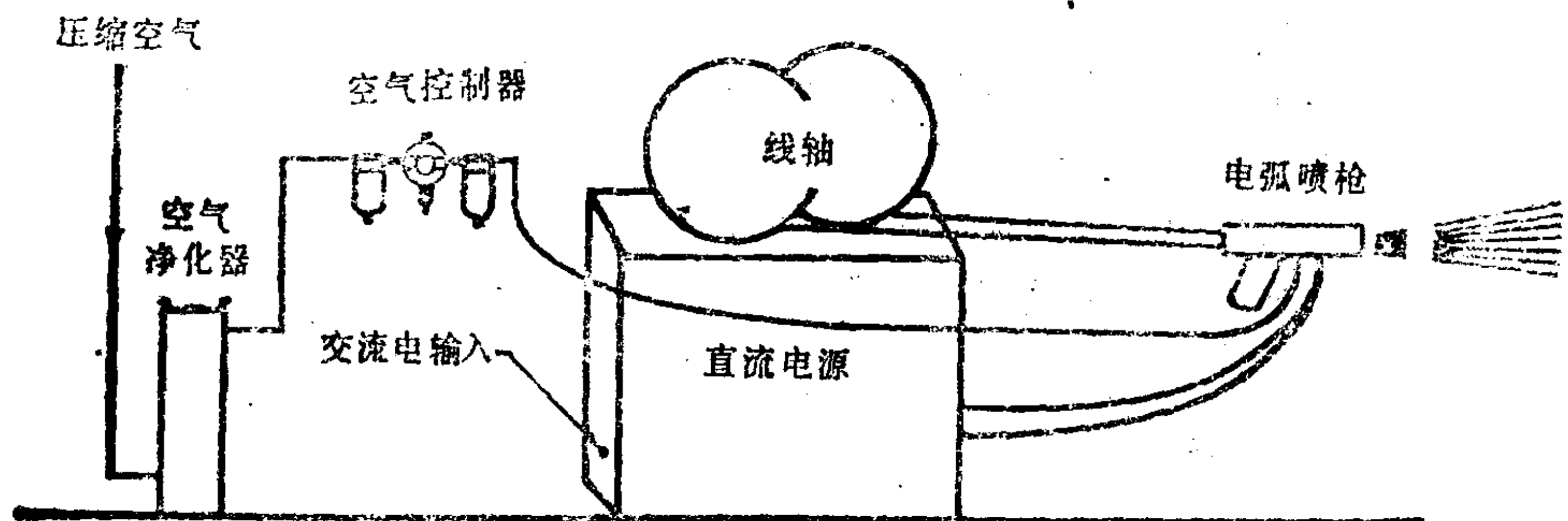


图2.3.1A 由各部件组成的全套电弧喷涂装置

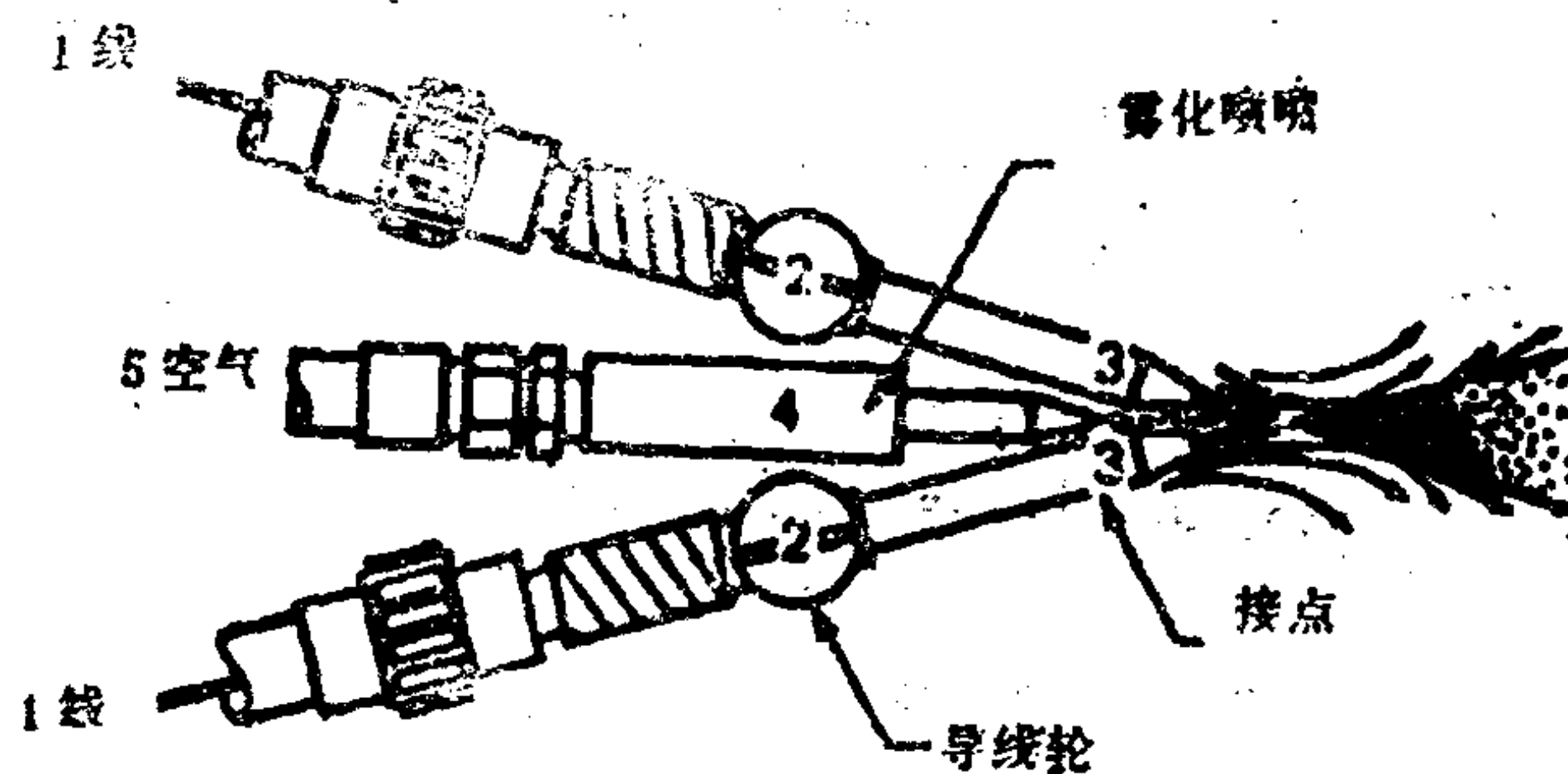


图2.3.1B 电弧喷枪剖面示意图

电源。电弧喷枪还有速度可控的供线机构，根据特定的线材直径来选择喷嘴尺寸。在枪体上设有开关按钮，以控制线材的供给速度以及压缩空气和电能的供应。

电弧温度大大超过喷涂线材的熔点。在熔化过程中，喷涂温度过热到可能出现挥发的程度，特别是铝和锌。很高温度的颗粒冲击到基体之后，会发生冶金反应或出现扩散区，或两者兼有。这些局部化的反应形成微焊点，使涂层自身粘合及结合强度提高，得到高强度的涂层。

通常，电弧喷枪的喷涂速度比其它方法的喷涂速度高。控制生产速度的因素是电源供给的电流、以及有效电源利用中所能允许的送线速度。

电源 对不同金属和合金来说，允许直流电源提供18—40伏的电压。通常采用稳压电源。电弧间隙与喷涂颗粒的大小随电压升高而加大。应使电压保持在最低水平，与电弧的稳定性一致，这样能得到光滑而致密的涂层。

线材控制机构 线材控制机构由两个卷轴或线圈架组成。它们彼此相互绝缘。较大直径的线材通常绕成盘状，而小径线材则一层层地盘绕在卷轴或圆筒上。线材控制机构由柔性绝缘的缆索与枪体联结。

控制盘 控制盘装有开关和调节装置，以便控制和监视操作系统的供电情况。

2.3.2 等离子非转移弧 随着燃气涡轮发动机与火箭发动机的发展，其工作环境对工程材料提出了更严格的要求。在很多情况下，趋向于采用氧化物和碳化物来对付这种工作环境。为此，需要热喷涂设备来提供现有技术所不能提供的高温。新发展的等离子方法，就满足这些要求。这种工艺可提供一系列新的涂层材料，在千变万化的工业条件下都能得到成功的应用。

这种工艺采用粉末材料，以等离子（热离子化的气体）为热源。等离子设备提供可控的温度，这种温度大大超过很多物质的熔化范围。

在等离子喷涂装置中，钨阴极与喷嘴铜阳极的小孔同轴对中，二者之间有一定空隙。一种气体或混合气体通过空隙之间产生电弧（图2.3.2A）。

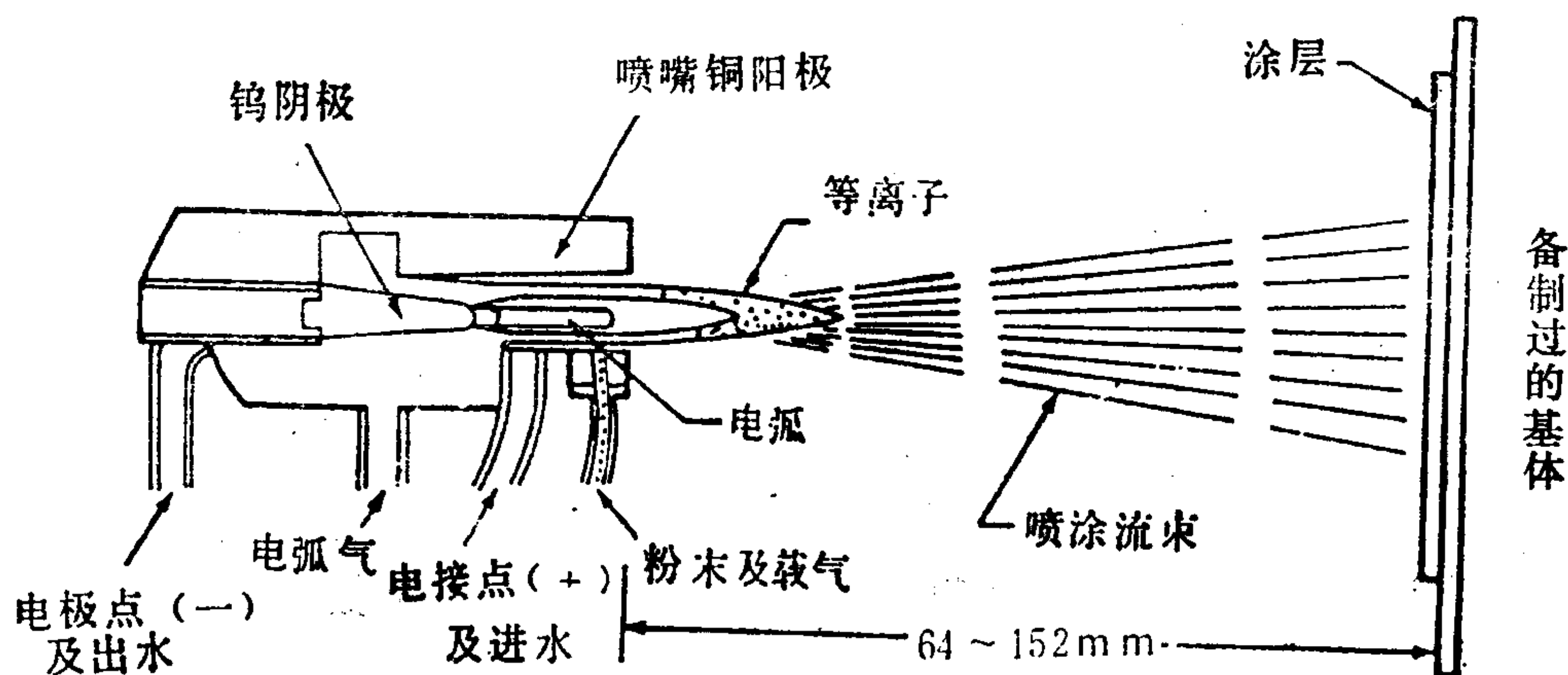


图2.3.2A 等离子喷枪剖视图

通过喷嘴的气体被加热到远远超过燃烧火焰所能得到的温度（表1.4.3）。

在加热过程中，部份气体产生电离，形成等离子体。当等离子体离开枪体时，被电离的双原子气的分子重新结合并释放出热能。引入的粉末通过等离子体，受热而被熔化，并以高速喷射到工件表面上。等离子喷射流的热容量、温度和速度，可由喷嘴型式、电弧电流、混

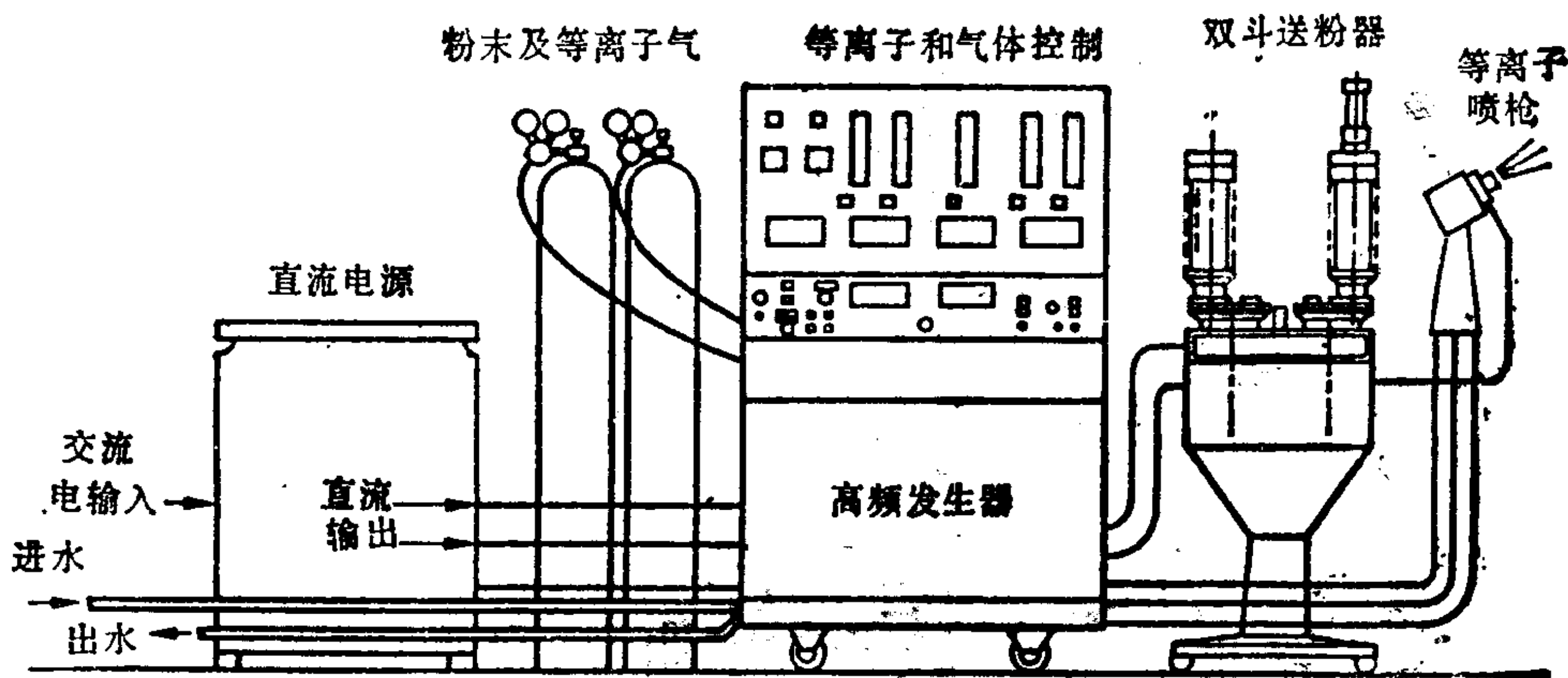


图2.3.2B 等离子喷涂系统全部装置

合气的组成及气流速度来控制。

由一台整流电源提供直流电起动电弧。中央控制台控制电弧功率，同时也调节等离子气和冷却水流的大小，能使这些操作要素得到精确而可靠的控制（图2.3.2B）。形成等离子气的主气采用氮气或氩气，二次气则用氢气或氦气，二次气的加入是为了增大等离子体的热容量及速度。

2.3.3 等离子转移弧 等离子转移弧（PTA）工艺是焊接与热喷涂两种过程的结合。粉末或线材被引入由喷嘴喷射出的等离子流束中，喷射到基体表面，形成一个熔池，在母体金属被稀释的同时，熔池冷却并凝固（焊接过程）。该工艺所用的电源、控制系统及供料装置，大体与前述的等离子非转移弧工艺类似。

在转移弧（PTA）工艺过程中，来自非耗电极的电弧，通过火焰喷嘴，由等离子弧携带到导体工件。供入的粉末或线材，通常是镍基、钴基或铁基合金材料。与火焰喷涂一样，这些材料在喷嘴出口处进入等离子弧流中。在此熔化、形成熔池并沉积到基体表面。这种沉积层通常比热喷涂层要厚，与基体材料形成冶金结合。等离子转移弧沉积层，借助其本身可重复涂于导体材料，一般要经过机加工。由于在惰性气氛屏蔽中进行熔解与建立熔池，无杂质来源及除渣问题，所得涂层光滑而均匀。与热喷涂层比较，PTA这种工艺的沉积层一般更有局部性，涂层更致密，并与基体形成冶金结合，但涂层材料及相应的基体的选择，受到较多的限制。

2.4 气氛控制

控制气氛下所进行的喷涂，为改善涂层质量及结合强度提供了可能，直接的益处是：

（1）基体和气氛的温度都能调节。

（2）喷涂材料所发生的化学变化极微，从而可精确控制喷涂层的成分及形态。组织结构具有较大的均质性、无氧化物，硬度和沉积效率得到改善，涂层厚度也能控制。

采用惰性气室进行喷涂，只有在明显地加大成本的情况下才会收到可观的效果。为了提高涂层性能，必须增添昂贵的设备。可控气氛热喷涂的典型装置示于图2.4。

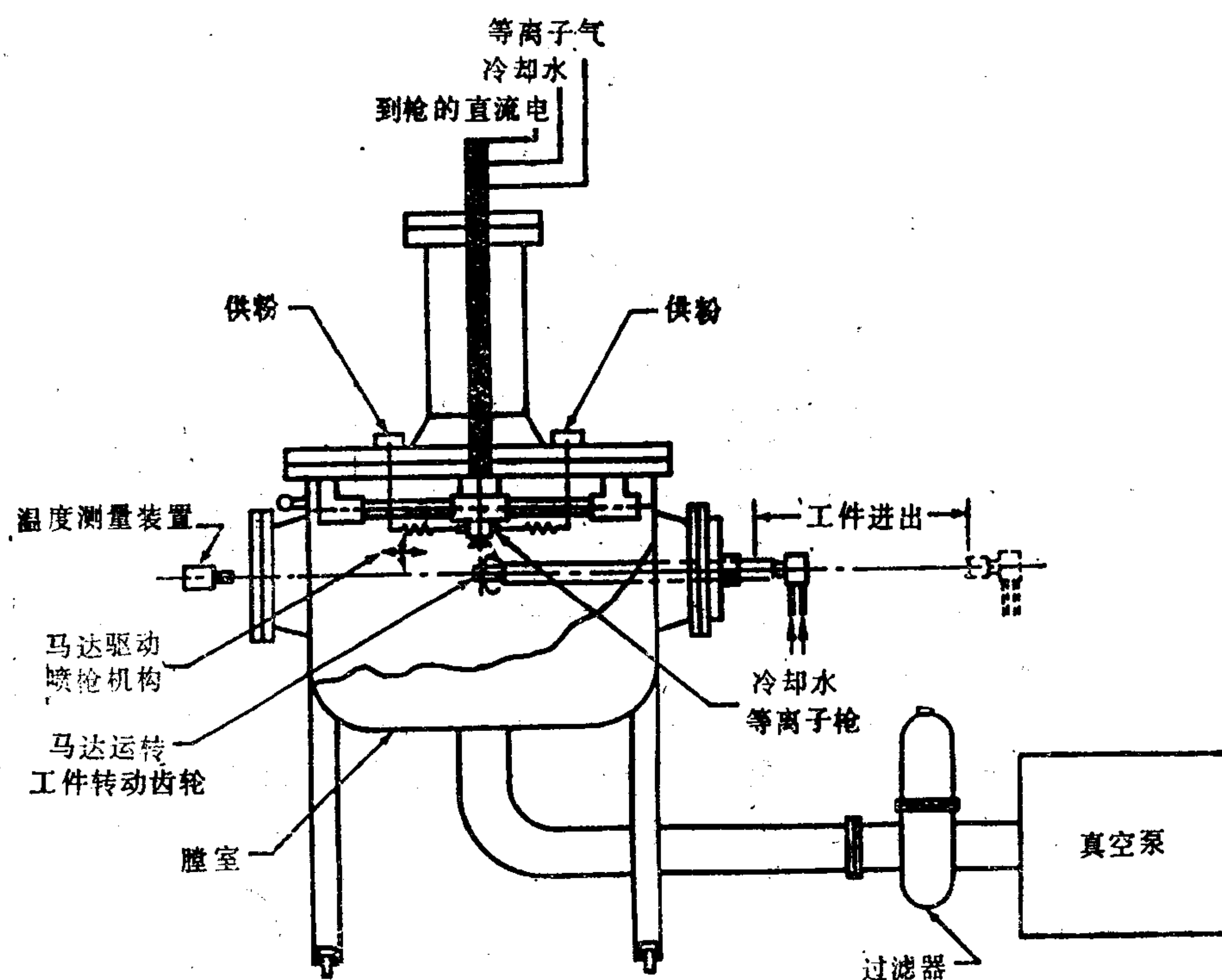


图2·4 控制气氛热喷涂系统

有一种经过改进的喷涂室，看来是一种较为经济的途径。该室能提供一种惰性气氛，在熔融状态的金属颗粒周围提供保护，以减少它们的氧化。

其它装置是增大在大气压力下的速度，以提高颗粒的飞行速度，从而改善涂层的结合力及其密度。

第三章 表面制备

3.1 概 述

表面制备是热喷涂作业中非常重要的一步。涂层的结合质量直接与基体表面的清洁度和粗糙度有关。遵守表面制备中所采取的工艺规程,是确保热喷涂获得成功的应用所必须的。为了获取良好的涂层质量,必须采用正确的表面制备。不同的喷涂材料和基体的类型,是决定表面制备的重要考虑因素。

对于高应力的机器零件,喷涂前必须进行检查,以确保基体金属内是否存在有缺陷。采用无损探伤法进行检查。零件中结构缺陷在涂层中将产生类似的缺陷。不能用热喷涂来修复基体中存在着的裂纹,也不能指望热喷涂来提高基体的强度。

3.2 清洗和处置

热喷涂前基体表面制备的第一步,是除去所有的表面污垢,如氧化皮、油渍、油脂和油漆。喷涂过程的热不能除去这些污垢,它们会影响涂层的粘结。将这些污垢去除之后,清洁度应一直保持到喷涂完成为止。所有的工件都应小心保护,不要沾染灰尘和手印,搬动过程中要用清洁的工具。

3.2.1 蒸汽除油 通常采用蒸汽清除有机污垢,这是一种经济而有效的方法。工件应烘烤15—30分钟,以除去缝隙以及表面孔隙中的油物。象砂型铸件或灰口铸铁这样一些多孔材料,烘烤时间应长一些。在蒸汽除油或清洗过程中,如果处理的物件太大,可将物件浸泡于热洗涤剂或无油溶剂中由专人进行清洗。工件表面的残余物要用机械方法除净。

从安全性及清洗的温度方面来考虑,通常采用的除油剂是1:1:1的全氯乙烯、三氯乙烯和三氯乙烷。很多的烃类溶剂是危险品,有关用途、场所及处理都应遵照厂家的使用说明。

生产厂家应考虑溶剂的再循环使用问题。氯化物溶剂会留有轻微的残渣,这可通过浸没洗涤法或用异丙醇及丁酯擦拭。

因氯气对钛及钛合金材料有诱发裂纹作用,因此,禁止用氯化物溶剂清洗这类材料。这类零件可选用碱洗、蒸汽吹、酸浸或挥发性溶剂洗涤等任何一种方法。或者,如有必要,可联合采用这些方法。

3.2.2 蒸汽吹洗 蒸汽吹洗、湿式喷砂和液体珩磨等过程,是将稀砂浆介质用空气喷枪喷射到基体表面。清洗过程在密闭室中进行,与喷砂间相似。所采用的磨削介质是氧化铝、致