

METCO公司火焰喷镀手册

第 三 册

等离子火焰喷镀工艺

作者：H.S英格赫姆

A.P谢伯德

翻译：李海泉、张伟东等

校对：乔宝通、沈肖镇

翻 译 说 明

等离子火焰喷镀工艺在我国的研究、发展和应用已近廿年，但至今尚无一本中文等离子喷镀技术的书籍或手册供学习和使用中参考。以华主席为首的党中央，现正领导全党和全国人民进行新的长征，全国出现了万马奔腾的跃进形势。国防工业、机械工业、石化工业、冶金工业、矿山、纺织、建筑、农机等行业都正准备广泛推广使用等离子喷镀工艺，提高我国的机械制造水平，为实现四个现代化作出贡献，为此，不少单位迫切希望出版这一专业的中文书籍和手册，供工作中学习参考。于是，我们在中国人民解放军装甲兵后勤部和三机部六二五所的支持和帮助下，翻译了从国外带回的麦特寇公司的火焰喷镀手册第三册“等离子喷镀工艺”。

麦特寇公司的火焰喷镀手册共分三册，第一册是燃烧火焰喷丝工艺，第二册是燃烧火焰喷粉工艺。为解决目前的急需，我们先翻译了第三册。第一、二两册以后将陆续翻译和出版。第三册“等离子火焰喷镀工艺”，共分七章。主要叙述了等离子喷镀的原理、喷枪和涂层的一般情况，详细地讲了喷镀前的零件表面制备，喷镀参数的选择与控制，涂层的精加工技术，各种不同用途的涂层材料选择和涂层系统设计，涂层的鉴定技术及有关通风和安全技术。此手册内容简炼，结论和数据多来源于现场使用经验和实验室实验结果，特别适合工厂和实验室专业人员使用，也可作研究单位和高等工科院校和中等专业学校教学中的参考。

翻译过程中，张素芳，严理，刘会刚等同志对译稿作了大量整理工作，在此译者表示衷心的感谢。由于我们水平有限，译文中错误不当之处，望读者批评指正。

译 者

1978.8.1

目 录

前 言

第一章 火焰喷镀工艺

1-1 金属喷镀工艺	(3)
1-2 等离子火焰喷镀	(5)
1-2.1 高温	(5)
1-2.2 等离子体	(5)
1-2.3 等离子火焰喷枪	(14)
1-3 火焰喷镀涂层	(16)
1-3.1 喷镀工艺	(16)
1-3.2 涂层结构	(21)
1-3.3 结合机理	(23)

第二章 表面制备

2-1 概述	(25)
2-1.1 结合方法的选择	(27)
2-2 清理	(29)
2-2.1 下切表面	(30)
2-2.2 制备后的清洁度	(31)
2-3 自粘结材料	(32)
2-3.1 钎	(33)
钎应用的限制	(33)
钎的使用方法	(35)
结合强度	(35)

2-3.2	铈和 钼.....	(35)
2-3.3	增效镍包铝	(36)
	镍包铝应用的限制	(36)
	镍包铝的使用方法	(37)
	镍包铝的结合强度	(37)
2-3.4	其他粘结底层	(38)
2-4	吹砂	(39)
2-4.1	吹砂设备	(40)
	吸气式吹砂机	(40)
	压力吹砂机	(40)
	离心式吹砂机	(43)
	安全设备	(43)
2-4.2	砂粒	(43)
	砂子	(43)
	冷淬铁砂	(44)
	氧化铝砂	(44)
	碳化硅	(45)
2-4.3	吹砂操作	(45)
	清理	(45)
	供气	(46)
	吹砂费用	(46)
2-5	开沟槽方法	(47)
2-6	结合强度检验	(50)

第三章 喷镀技术

3-1	喷镀参数	(53)
3-1.1	等离子气体的选择	(54)
3-1.2	输入功率	(60)
3-1.3	粉末供给	(60)
3-1.4	喷镀粉末	(60)

3-1.5 喷枪的移动速度和喷镀距离	(62)
3-2 温度控制	(63)
3-2.1 予热	(64)
3-2.2 控制热膨胀	(64)
3-2.3 冷却	(65)
3-3 控制气氛下喷镀	(69)
3-3.1 真空室	(73)
3-3.2 气氛压力室	(73)
3-3.3 包覆装置	(74)
3-3.4 化学性活泼的等离子气体	(75)
3-4 内径表面和平面的喷镀	(77)
3-4.1 平面喷镀	(77)
3-4.2 内径表面喷镀	(77)
3-5 遮盖技术	(80)
3-5.1 吹砂时的遮盖	(80)
3-5.2 喷镀时的遮盖	(81)
3-6 喷镀后的熔融处理	(82)

第四章 精加工技术

4-1 一般考虑	(83)
4-2 机械加工	(87)
4-3 磨削加工	(89)
4-3.1 磨削前的密封	(89)
4-3.2 干磨削	(89)
4-3.3 湿磨削	(92)
4-3.4 砂轮的选择	(93)

第五章 涂层系统设计

5-1 涂层系统	(127)
5-2 喷镀材料的选择	(129)

5-2.1	耐热涂层材料	(129)
5-2.2	具有各种特性的材料	(129)
5-2.3	硬化表面用的材料	(137)
5-2.4	抗腐蚀和抗氧化涂层材料	(137)
	阳极涂层材料	(148)
	阴极涂层材料	(148)
	中性涂层材料	(149)
	抗气体腐蚀涂层材料	(150)
5-2.5	导电和绝缘涂层	(151)
5-2.6	涂层的物理性能	(151)
5-3	粘结和保护用的底层	(170)
5-4	增效材料	(171)
5-4.1	镍包铝	(173)
	物理性能	(173)
	应用	(175)
5-4.2	镍包铝金属陶瓷	(176)
	氧化铝和氧化锆合金陶瓷	(176)
5-5	重要的等离子喷镀材料	(177)
5-5.1	氧化锆	(177)
5-5.2	氧化铝	(178)
5-5.3	钨	(179)
5-5.4	钼	(181)
5-5.5	钽	(182)
5-5.6	铜	(183)
5-5.7	铝	(184)
5-5.8	碳化物和镍基合金	(185)
5-6	阶梯涂层	(188)
5-7	涂层的密封	(190)
5-7.1	塑料密封材料	(191)
	METCOSEAL-AP	(191)

5-7.2 石蜡密封材料	(192)
METCO185 密封剂	(192)
Acrawax-C	(192)
5-7.3 无机密封材料	(193)

第六章 鉴定技术

6-1 试件制备	(194)
6-2 物理试验	(196)
6-2.1 粘结强度拉伸试验	(197)
6-2.2 粘结强度剪切试验	(197)
6-2.3 硬度试验 (宏观硬度)	(199)
6-2.4 涂层拉伸试验	(199)
6-2.5 孔隙度试验	(199)
6-2.6 抗磨试验	(200)
6-2.7 吹砂磨蚀试验	(200)
6-2.8 划痕试验	(200)
6-2.9 电炉空气氧化试验	(200)
6-2.10 隔热试验	(201)
6-2.11 热寿命试验	(201)
6-2.12 热循环试验	(202)
6-2.13 气体扩散孔隙度试验	(202)
6-2.14 液体浸透试验	(202)
6-2.15 显微硬度试验	(202)
6-2.16 粉末材料的密度试验	(203)
6-3 环境试验	(203)

第七章 通风与安全措施

7-1 吹砂通风	(205)
7-2 火焰喷镀通风	(208)
7-3 良好的室内管理	(211)

7-4 设备与供应品	(211)
7-4.1 燃料气体以外的气体储气瓶	(211)
7-4.2 软管	(212)
7-4.3 等离子喷枪	(212)
7-4.4 砂轮	(212)
7-4.5 等离子喷镀	(212)
7-4.6 吹砂	(213)
7-4.7 减少呼吸道危害	(213)
铅、铅合金、镉、铬、铍和碲	(213)
锌、锌合金 (锌青铜和黄铜)	(213)
其他材料	(213)
有害金属的安全极限	(214)
实验材料	(214)
臭氧和氧化氮	(214)
7-4.8 辐射危害	(215)
7-4.9 材料危害性程度一览表	(215)

前 言

1943年首次出版了金属喷镀手册，此次已是第七版。第七版前言指出，由于陶瓷和金属陶瓷喷镀的大力发展，对于火焰喷镀工艺来说，金属喷镀这一术语，已不再是一个含义广泛的术语了。具有更概括含意的“火焰喷镀”术语，现在实际上已代替了“金属镀喷”这一老术语，因此，本版将把这种工艺的名称改为火焰喷镀。

火焰喷镀手册的第一、二两册，包括丝和粉末的火焰喷镀。用等离子火焰喷镀做标题的第三册，这是第一版。

最近几年内，随着等离子喷镀工艺技术的迅速发展，其应用的范围也就有了很大扩展，因此使等离子喷镀手册的作者处于进退维谷的状态。要么推迟出版，暂不去满足目前对这方面资料的要求，要么就在这种技术变动极快的情况下出版。我们选择了后一途径。这样做以上两种弊病较少。同时也充分地考虑了，如果此手册第一版出版后一段时间内，在某些方面问题实际上还不能解决的话，此第一版也就不会是很完善的。为了尽可能地减少不完善的地方，此第一版将以分册形式出版，并在今后的版本中对此版内容进行频繁的合理的修改。然而，还应提醒读者经常注意其他技术情报消息，如应用数据通报，特别是产品通报，这些通报中刊有等离子喷镀材料以及有关它们的物理特性。

本手册的目的，是将设计生产等离子喷镀涂层所需要的最重要资料，以简炼的形式综合在一起并表示出来。这就要求把过去卅年间其它火焰喷镀工艺中的资料收集整理在一起，以便把其中最好的应用在新型的等离子喷镀工艺中。现代工业中的工厂和研究发展部门，主要兴趣在于研究和发展新用途的最好的涂层。因此新用户如若能从老式的火焰喷镀工艺中，找到他所需要的资料，他就肯定不想再去进行一些不必要的试验了。所以本手册的主要目的是将收集到的火焰喷镀基本资料应用

于新型的等离子喷镀工艺。尽管本手册中所包括的很多资料并非新颖，但因为是专门针对等离子喷镀工艺的，因此全部资料都经过了仔细挑选。然而，有关较老的燃烧火焰喷镀的许多知识，无论如何也不能直接用于等离子喷镀。对于专门从事等离子喷镀和初次使用等离子涂层的用户，不要求他们去精通较老的燃烧火焰喷镀工艺，只需要他们从中选取有用资料，推广到新型等离子喷镀工艺中去。这项工作要求具有这两种喷镀技术的丰富经验。我们认为，这正是本手册此时要达到的目的。

最后，还应指出，正在研究新的涂层和新的应用等离子喷镀用户，不应过快地超越“较老”的燃烧火焰喷镀工艺阶段。在等离子喷镀工艺已一跃而前的几年中，燃烧火焰喷镀工艺也获得重要的技术发展。例如，为了用于等离子喷镀所研究的新型增效材料的发展，对粉末火焰喷镀具有同样重要意义。然而，等离子喷镀代表了过去十年期间，涂层工艺中最先进的一种，我们相信并能预言，等离子喷镀工艺的先进性能保持下去扎下根来。

第一章 火焰喷镀工艺

1-1 金属喷镀工艺

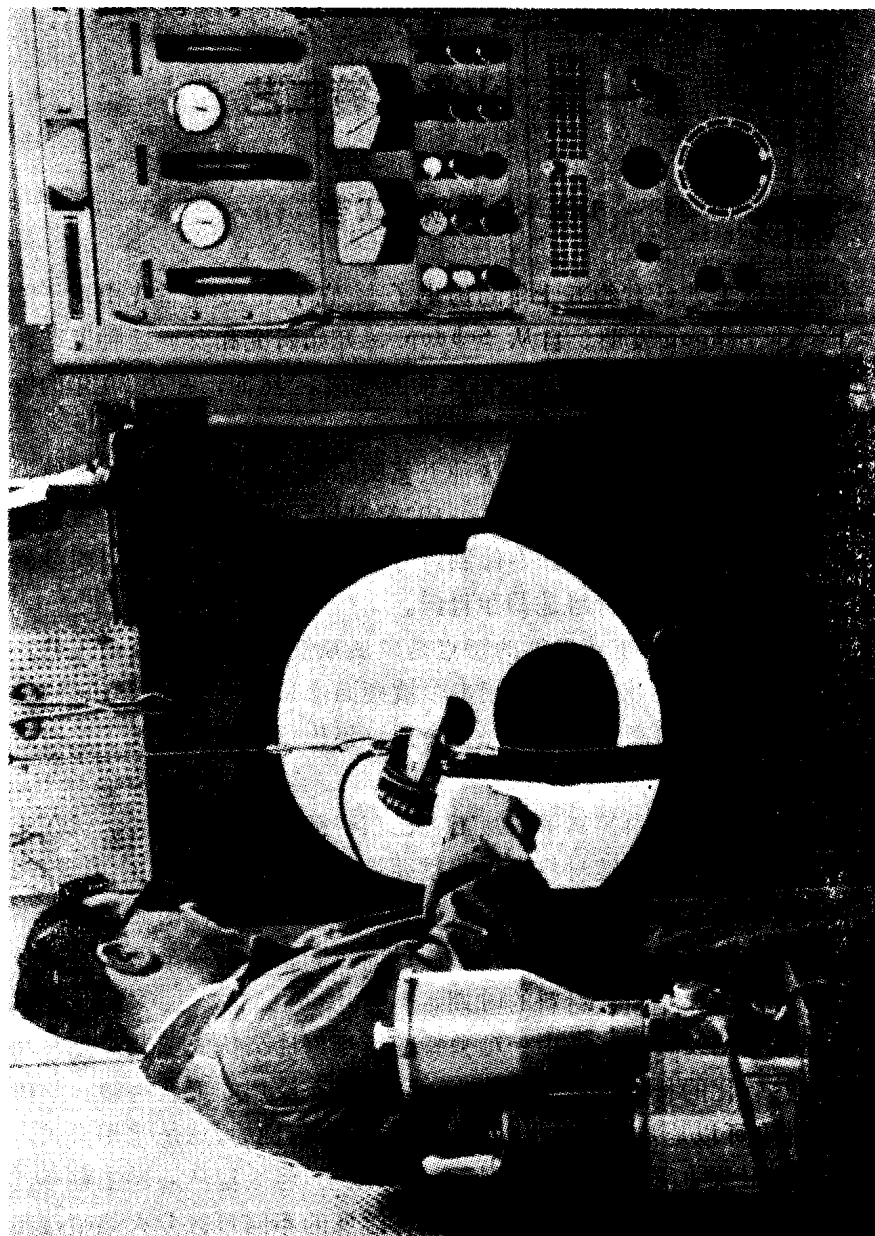
金属喷镀工艺已有约五十年的历史了。它于1910年首先由瑞士的Max Ulrich Schoop发明。自从Schoop一开始研究和发展这种工艺，它就已包括了陶瓷、金属及金属氧化物的喷镀。然而，在头20年的发展过程中，生产上大量使用的是喷镀锌。

早在1930年，美国就开始将这种工艺实际应用于机器零件的喷镀，即新制的机器部件上喷镀硬面金属。1930年以后的廿年中，这种工艺已很好地用于抗腐蚀涂层及机器零件制造方面。当时抗腐蚀涂层材料是锌和铝，机器零件的涂层材料是钢和青铜。

1950年以后，这种工艺发展的特点是发展喷镀材料，改进喷镀工艺。发展了许多新型金属合金，专门用来喷镀硬面涂层。喷镀陶瓷既可制造硬面涂层，也可制造高温环境的保护涂层。氧化铝和氧化锆成了这一时期重要的保护材料。

虽然，最近几年内等离子喷镀工艺已获得极其显著的发展，但在这一时间内，也没有忽视喷镀材料发展的重要性。和其它材料加工工艺相似，火焰喷镀工艺实际上也促使了新型结构材料的发展，因此，当然不去使用那些具有陈旧性能的已知材料。目前我们正处于一个发展等离子喷镀材料和燃烧火焰喷镀材料的时期。

火焰喷镀已发展成工业中一项独特的受到好评公认的工艺。把在高温熔化或热软化的材料喷镀到基体上，以形成一涂层的工艺叫做火焰喷镀。喷镀对象可以是基体，在此基体上涂层是永久性的。这是常用形式。然而，喷镀对象也可以是一个心轴，涂层形成后，将涂层从心轴上移开，结果便形成一个喷镀材料工件。根据基体温度的不同可区分火焰喷镀与焊接。在喷镀过程中，热喷射微粒打到基体后，立即冷却或淬硬，然而



用 METCO 等离子喷镀系统进行喷镀

在焊接和钎焊时，基体温度要保证所加的填料在足够长时间内，保持或高于其熔点。

1-2 等离子火焰喷镀

1-2.1 高 温

从燃烧火焰喷镀一开始，它就受到了氧——乙炔焰最高温度的限制，实际上熔点高于 5000°F 的材料，就不能使用燃烧火焰喷镀。发展等离子喷镀的主要目的，就是提高熔化温度的极限。已经考虑到的提高氧——乙炔焰最高温度极限的其它方法，如使用奇异燃油，特别是使用氧——氟焰燃烧，可使温度极限高至 9000°F 。但由于这种燃料价格昂贵，并产生许多有毒物质，以及其他限制，因此，实际上在这种工艺中就不使用氧——氟焰。采用等离子火焰最明显的理由，是提高了熔化温度极限，同时提供了气氛可控的火焰。等离子火焰，允许选用惰性或化学反应迟纯的气体作为火焰介质，因此，在喷镀材料加热喷镀过程中可以控制其化学反应，如氧化。采用市售等离子设备，可获得的温度已远远高于任何已知材料的熔化温度（甚至高于蒸发温度）。可获得 $30,000^{\circ}\text{F}$ 和更高的温度。对于大多数火焰喷镀工艺，最合适的温度范围为 $12,000—20,000^{\circ}\text{F}$ 。

1-2.2 等离子体

要了解等离子喷镀，我们需要知道等离子火焰是什么，而且首先要知道什么是等离子体？等离子体是一个描述那些受热后具有高于普通气态物质能级的气态物质的科学名词。普通气体由单个的分子组成，而等离子体则由同种气体的单原子体和带电粒子组成。普通气体受热时，遵循古典物理学和热力学定律，而等离子体不遵循这些较老的古典定律，被认为是物质的第四态。因此，我们现在可以认为物质有四态——固态、液态、气态和等离子体。

为了说明等离子体，我们必须叙述组成气体的原子和分子发生了什么变化。

图 1.1 是一个中性原子的示意图。这种原子由一个带二个正电荷的核，和两个围绕核外轨道上运行的电子组成。每个电子带一个负电荷，在正常电子运行状态下，它显中性。

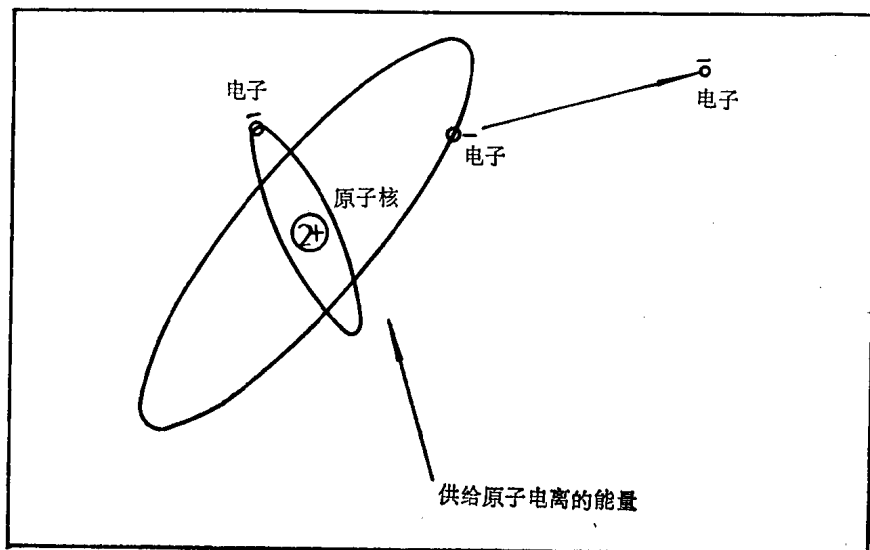


图1.1

原子核外围轨道上有两个电子运转的中性原子示意图

如果对这种原子供给足够的能量，最少能激励起一个电子脱离其轨道。如图 1.2 所示电子从原子中脱离出来了。使电子脱离原子所需要的能，称为那个原子的电离能。

因此，现在有两种粒子。一种粒子是被电离的原子（失去一个电子的原子），电子则是另一种粒子。被电离的原子叫做离子，由于失去一个电子，所以带正电荷 +1。自由电子带负电荷 -1。

由两个或两个以上中性原子所组成的单元体叫做分子，也可以看作是一种简单粒子。

图 1.3 表示了不同种类粒子的简化标记。图左边，是两个原子结合在一起而形成一个分子。如氮、氢等气体，是由这种分子组成的，它们属于双原子气体。

此分子的右边是一个单原子分子，如氩或氦是属此种气体，被称作单原子气体。也可以把它看作氢或氮气被分解后的原子。

离子与电子的标志示于图的右边。

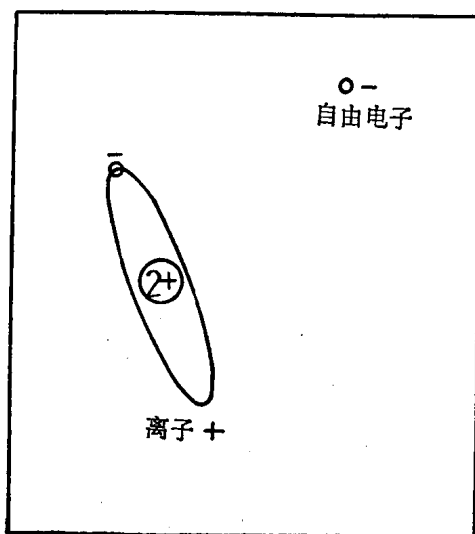


图1.2

失去一个电子的原子示意图

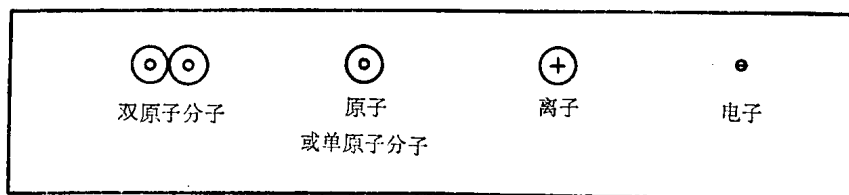


图1.3

不同种类粒子的简化标志图

图 1.4 表示的四个分子（以粗线画的），代表气态双原子气体如氮。如果给这种分子足够的能量，则它们就分解成单个的原子。外加能量使分子分解成单个原子，原子按箭头指向运动。

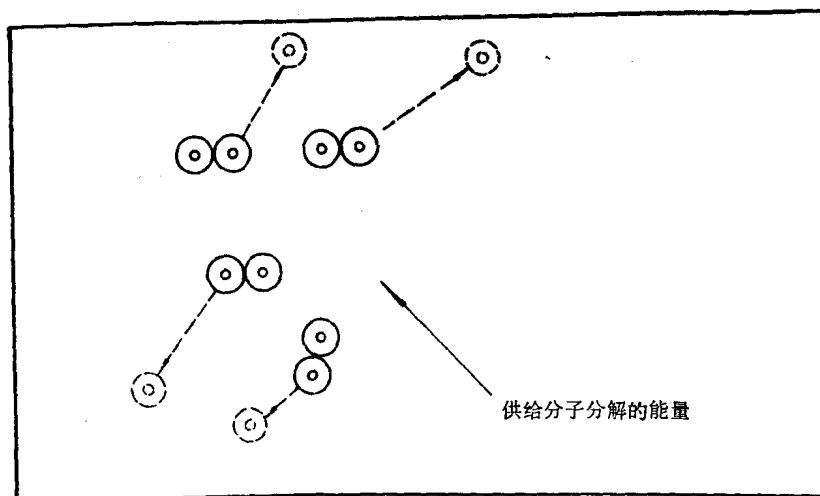


图1.4

双原子气体分子及其在外能作用后分子运动的示意图

先不看箭头的含意，图1.5 所示的分开几个原子，既可以代表单原子气体，如氢，也可以代表上面所谈的被分解为单原子状态的气体。

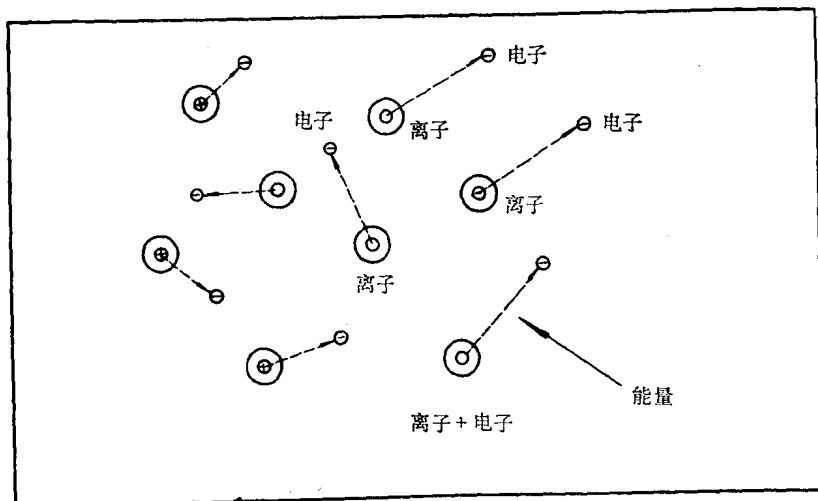


图1.5

单原子气体在外能作用后，形成等离子气体的示意图

当这些原子加给更多的能量时，每个原子至少可击出一个电子脱离其轨道，如箭头所示。原子被电离，被电离的这种气体叫做等离子体。应注意这种离子带正电荷，电子带负电荷。

完全分解为单原子气体并电离后，就形成一种带电微粒的等离子体。应注意，等离子体就其整体而言仍是电中性体，因为在整个等离子体中正、负电荷数量相等。

作为加热热源来说，等离子气体高过普通气体的优点是什么呢？等离子气体有两个突出优点：即温度较高，对其他物体的传热性能较好。高温的优点是明显的。如果我们想把钨加热到熔点 6170°F ，我们就需要一股比此温度更高的热流。一般来说，加热流与被加热物体之间温度差越大，物体受热就越快，特别是粉末火焰喷镀。我们要求高速喷镀微粒，因此必须使微粒在很短的时间内通过加热区。

一种能态中变化热流释放热量的能力，不是十分明显的。为了解这一点，讨论一下我们非常熟悉的类似的能态变化，会有所帮助。当水变成蒸气时，它要吸收大量的热能而不改变其温度。

图 1.6 中的图线表示在大气压下热容量与温度的关系，其中纵坐标表示每磅水的热容量，横坐标表示温度。当我们开始加热水时，温度随加入的热或能量增加而增加。然而，当达到 212°F 时，温度不再上升，所加入的热被水大量吸收，水变成蒸汽。直到全部水都煮沸成蒸汽前，温度不会高过 212°F 。此后，如进一步加热，干蒸汽温度又会上升。图中斜线的斜率，由温度变化率和加入能量的变化率决定，叫做蒸汽的比热。

干蒸汽或干气体不能加热物体也不能加热湿蒸汽，其原因就在于此。如果我们用干热气体加热某些物体，则此热气体将其能量供给要加热的物体，而物体受热的同时气体又在冷却，其温度下降。物体此时包上一层冷气，如果我们希望进一步地加热物体，就必须首先除去冷气层，然后再使热气体加热在物体上。这就是为什么用高速火焰，如氧——乙炔加热比用软火焰加热好的原因。高速火焰可以消除冷气。然而，当我们用湿蒸汽加热时，就没有必要用高速蒸汽了，因为湿蒸汽能在其变成水的过程中不降低温度而放出热量。这就是为什么湿蒸汽如此广泛地