

粉末塑性

加工原理 及其应用

任学平 康永林 著

FENMO SUXING
JIAGONG YUANLI
JIQI
YINGYONG

冶金工业出版社

粉末塑性加工原理及其应用

任学平 康永林 著

北京

冶金工业出版社

1998

图书在版编目 (CIP) 数据

粉末塑性加工原理及其应用/任学平, 康永林著. —北京:
冶金工业出版社, 1998. 12

ISBN 7-5024-2259-5

I. 粉… II. ①任…②康… III. 粉末冶金制品-金属压力加工 N. TR124. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 22340 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 张登科 美术编辑 李心 责任校对 刘倩

冶金工业出版社印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1998 年 12 月第 1 版, 1998 年 12 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 4.5 印张; 119 千字; 136 页; 1-1500 册

10.00 元

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

随着材料科学的发展，塑性加工学科随时都将面临着新材料成形加工的新课题，尤其是制粉技术的发展，使得粉末冶金技术在新材料研究中的优势更加突出，粉末塑性加工也逐渐引起了人们的高度重视。

传统的粉末冶金制品，由于具有一定的孔隙，使其强度和韧性大大降低，难以在高负荷条件下使用，因此，发展了粉末塑性加工技术。粉末塑性加工汲取了传统粉末冶金和塑性加工的优点，是现代加工技术中制造结构零部件的一种相当重要的方法。采用粉末塑性加工技术，可以提高粉末冶金制品的密度，使粉末冶金制品的性能接近甚至超过同类普通锻件的性能水平，并且具有变形力低、材料利用率高、尺寸精度高、组织结构均匀、无成分偏析以及节能、节约原材料、减少环境污染等一系列优点。粉末塑性加工的另一个显著的特点是可以制造难熔以及难加工材料，例如高温铸造合金、超导材料等。

虽然粉末塑性加工的特点是众所周知的，但是，粉末材料属于可压缩体，在塑性加工过程中，其密度（体积）是变化的，因此，以体积不变条件为基础的传统塑性加工理论在此已不适用，而必须采用以质量不变条件为基础的可压缩体的塑性加工理论。然而，目前在粉末塑性加工领域中，还没有一本可供参考的粉末塑性加工理论方面的书籍，这与飞速发展的粉末冶金技术和粉末塑性加工技术是很不谐调的。为此，作者在研究工作的基础上，综合了目前粉末塑性加工基础理论的研究成果，写出了《粉末塑性加工原理及其应用》一书，希望能为粉末塑性加工技术的发展尽微薄之力。由于作者水平所限，书中定有不妥之处，恳请读者批评指正。

作者

1998年6月于北京科技大学

目 录

1	绪论	1
1.1	粉末塑性加工及其特点	1
1.2	粉末塑性加工的发展概况	4
2	粉末的特性	10
2.1	制粉方法	10
2.2	机械合金化	17
2.3	粉末的粒度	21
2.4	粉末的颗粒形状和晶体结构	27
2.5	粉末体的密度	29
3	粉末成形	33
3.1	原料粉末的选择	33
3.2	钢模压制	35
3.3	等静压成形	39
3.4	粉末轧制	43
3.5	烧结概述	45
4	粉末材料的变形与致密化	47
4.1	基本假设	47
4.2	粉末材料的变形特征	47
4.3	粉末材料的致密化	53
4.4	粉末塑性加工时的摩擦与润滑	59

4.5	粉末材料在塑性加工过程中的断裂问题	66
5	粉末材料的屈服准则	71
5.1	粉末材料屈服准则的概念	71
5.2	粉末材料屈服准则的几何图形	72
5.3	库恩 (Kuhn) 屈服准则及其物理意义	73
5.4	粉末材料塑性变形时的应力应变关系	75
5.5	粉末材料屈服准则的特殊表达式	78
5.6	粉末材料屈服准则的实验验证	81
6	粉末塑性加工时的致密化和变形力解析	84
6.1	致密化	84
6.2	平行模板间圆柱体镦粗	91
6.3	平行模板间压缩矩形截面长坯料	98
7	粉末材料滑移线场理论和上限法	101
7.1	应力方程	101
7.2	速度方程	110
7.3	应力间断与速度间断	113
7.4	滑移线场理论的应用	115
7.5	上限法简介	122
8	粉末塑性加工有限元数值模拟	125
8.1	概述	125
8.2	刚塑性有限元法	125
8.3	弹塑性有限元法	130
8.4	粘塑性有限元法及粘弹塑性有限元法	132
8.5	结语	133
	参考文献	134

1 绪 论

1.1 粉末塑性加工及其特点

1.1.1 粉末塑性加工方法

粉末冶金法是以粉末，也就是以分割成很细小的金属或非金属作原料，通过固结使其成为具有一定形状的制品。因此，粉末生产和粉末固结是粉末冶金的基本工序。像熔铸法一样，采用粉末冶金方法，可以得到所需形状的制品。

利用金属粉末来制造所需要的产品或坯料的方法，是在20世纪初作为难熔材料的成形方法开始被采用的。从1909年电灯钨丝的制造成功开始，粉末冶金技术得到了迅速的发展。1923年成功地制造出硬质合金，硬质合金的出现，被誉为是机械加工工业中的革命。此后粉末冶金多孔含油轴承在汽车、纺织、航空等工业中得到了广泛的应用。尤其是快速凝固以及机械合金化等新型制粉方法的出现，使粉末冶金的优势得以充分发挥。目前，粉末冶金正向着更高级的新材料、新工艺方向发展，如金属陶瓷、弥散强化材料、粉末高速钢、粉末高温合金、氧化物超导材料、金属间化合物、磁性材料、非晶态材料以及这些材料的制备与加工等。

传统的粉末冶金制品由于具有一定的孔隙，使其强度和韧性大大降低。为使粉末冶金产品能够在较高负荷条件下使用，从20世纪60年代开始研究和开发了粉末塑性加工技术。粉末塑性加工技术汲取了传统粉末冶金和塑性加工技术的优点，是现代加工技术中制造结构零部件的一种相当重要的方法。粉末塑性加工工艺流程如图1-1所示。从图1-1中可以看出，粉末塑性加工涉及粉末原料准备、粉末成形、粉末包覆、烧结、加热和塑性加工等基本工序。

(1) 粉末原料准备。粉末塑性加工对粉末原料纯度的要求，比传统的粉末冶金材料要严格。这是因为对于传统的粉末冶金产品来说，由于孔隙的存在，少量的杂质对材料或制品性能的影响不太明显。而粉末塑性加工制品，由于其密度已接近于材料的理论密度，杂质的影响就显得十分突出，因此，必须提高粉末原料的纯度。粉末原料的准备还包括粉末的预先处理（如粉末加工、粉末退火等）、粉末的分级、粉末的混合以及粉末的干燥等等。

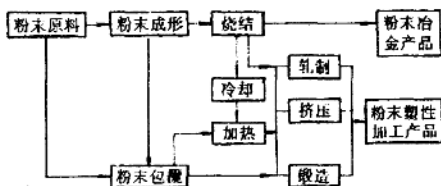


图 1-1 粉末材料塑性加工工艺流程

(2) 粉末成形。粉末成形是根据设计要求称量粉末，在适宜的压力下使之成形。其目的是制备一定形状和尺寸的粉末预成形坯，使其具有一定的密度和强度。粉末成形目前多采用金属模成形法。其他方法有等静压成形、粉末轧制、粉末挤压、振实成形、粉浆浇注以及粉末注射成形法等。

(3) 粉末包覆。这是将粉末原料装入包套材料内，抽真空并封焊，组成粉末、包套组合体，然后进行加热和塑性加工，包套材料为塑性较好的致密材料，该方法尤其适用于难变形材料的成形，例如高速钢和氧化物超导材料等。

(4) 烧结。烧结一般是在保护气氛中进行的，烧结的目的在于使混合元素合金化以及增加粉末制品的强度。对于用各类粉末原料制成的预成形坯，通过烧结可进一步降低其氧含量，有助于提高粉末材料或制品的力学性能。有时将烧结和塑性加工前的加热合并为一个工序进行，这对于用某些合金化粉末原料制备的预

成形坯及其塑性加工连续化作业，有特殊的经济意义。

(5) 加热。加热的目的在于使混合元素的合金化、氧化物还原以及提高塑性、降低变形抗力。目前生产中广泛采用中频感应加热，为避免氧化和脱碳，一般是在惰性气氛中进行的。

(6) 塑性加工。粉末塑性加工的方法很多，如锻造、挤压、轧制、摆动碾压以及超塑性成形法等。

1.1.2 粉末塑性加工的特点

粉末塑性加工由于汲取了传统的塑性加工和粉末冶金的特点，使其本身在技术和经济上具有更为突出的特点。

(1) 可提高产品的力学性能。用粉末冶金方法所得到的烧制品，通常含有10%~30%的孔隙，其力学性能如抗拉强度、伸长率以及疲劳强度均比同类致密材料低。采用粉末塑性加工方法可以提高粉末材料的密度，从而提高产品的力学性能。用低合金雾化钢粉制造的锻件，在抗拉强度、伸长率、冲击值、硬度及疲劳强度等方面，都达到甚至超过同类致密材料锻钢的水平。从疲劳强度看，致密材料锻钢的纵向与横向疲劳强度的差值可达到50%，而粉末塑性加工产品，例如粉末锻件连杆，由于具有各向同性结构，因此，与普通模锻连杆相比，具有较高的疲劳寿命。粉末锻造高速工具钢可将合金偏析降至最小，使刀具寿命得到大大提高。

(2) 可以得到高精度的制品、减少甚至省略后续加工。传统的塑性加工制品，由于成形精度较低，一般均需要后续的机械加工，而粉末塑性加工制品由于尺寸精度高，通常可以减少甚至省略后续加工工序，根据所需要的尺寸精度的程度不同，后续精加工的省略程度也不一样，对于需要切齿和铣切的零件，就更能反映出粉末塑性加工的优越性。

(3) 可提高材料的利用率。采用粉末塑性加工方法，可以制造与最终产品形状相接近的制件，因此，大大提高了材料利用率。粉末塑性加工时的材料利用率一般可达80%以上，而传统锻件的材料利用率通常在50%以下，尤其是对一些非对称零件以及带孔

的扁平零件的制造等可以大幅度地提高材料的利用率，这是传统的塑性加工和机械加工所不能比拟的。同时节省原材料可以适当地弥补粉末原料成本较高的不足。

(4) 适用性强。粉末塑性加工对材料种类以及产品形状的要求不像传统的塑性加工那样苛刻，因此，适用性很强，可以成形那些一般称为不可锻的金属或合金，例如高熔点金属。粉末塑性加工还可以成形复合结构产品，例如表面采用耐磨粉末材料，而基体为高韧性粉末材料的齿轮，与切削后进行表面硬化处理的齿轮相比，不仅齿根强度高，而且齿面疲劳强度也较高。

(5) 降低变形力。由于粉末预成形坯通常含有 80% 左右的孔隙，并且坯料形状也接近于最终制品的形状，所以可以降低变形所需要的压力，例如丰田汽车公司粉末锻造连杆的能量消耗，为普通锻造的 49%。由于变形力降低，模具磨损也较小。

1.2 粉末塑性加工的发展概况

1.2.1 加工工艺的发展

在粉末塑性加工方法中，粉末锻造是粉末冶金加工技术中最有潜力的一种，是国外近年来用于制造汽车高精度、高强度粉末冶金零件的重要工艺。至于其它的塑性加工方法，由于粉末原料的特殊性，其发展是很缓慢的，有些还停留在实验室水平上。但是随着社会的发展，人们对产品质量的要求越来越高，从而必将推动粉末塑性加工技术的进一步发展。

美国通用汽车公司 (GM) 早在 20 世纪 40 年代初，就开始对粉末塑性加工技术进行研究，当时所使用的粉末，是将机加工废屑通过机械粉碎制备的，以及对氧化皮的还原粉进行处理所得到的铁粉。由于当时铁粉制造技术水平较低，所制成的粉末中非金属夹杂物含量较多，难以达到所需要的性能，因此在战后粉末冶金的兴盛时期，粉末塑性加工也就被淡忘了。1964 年美国 GKC 公司为了提高汽车零件的性能，采用粉末锻造方法研制了汽车发动机连杆，该研究虽然没有公开发表，但是，这一研究工作在世界

范围内已是众所周知的事情，这对粉末塑性加工技术的发展，起到了积极的推动作用。同年英国 GKN 公司对粉末锻造材料、工艺及预成形坯的力学、物理性能进行了研究，并使 Porsche928 连杆的生产获得了成功。1969 年 Cincinnati 公司与 Delco 公司联合进行差速器小齿轮的试生产。1970 年美国通用汽车公司建成了汽车后桥差速器齿轮粉末锻造生产线。1972 年 Federal Mogul 公司则大规模生产粉末锻造齿轮，用于自动变速机构，随后是轴承座圈。在 1976 年这两条粉末锻造生产线的年产量达到 60 万件。

进入 20 世纪 80 年代，粉末塑性加工进入了迅速发展的阶段。德国蒂森公司实现了小批量生产 928 型赛车用粉末锻造零件。1981 年日本丰田汽车建立了发动机连杆粉末锻造生产线，模具寿命达到了 10 万件，该产品属于中等尺寸的汽车发动机连杆，质量较大，引起了世界各国的瞩目。1987 年 Ford 公司研制成功了 Escort Lix 用 1.9L 发动机连杆，由于连杆与传统的产品相比，具有精度高、产品质量容易控制，而且省略了后续的切削工序等优点，目前，正逐渐地被使用到 V-6、V-8 等大型发动机上。美国通用汽车公司在 1993 年，将粉末锻造连杆用在 Cadillac V-8 型发动机上。美国 Chrysler 公司也在 1994 年使用了粉末锻造连杆。

目前粉末塑性加工技术，在世界各国已经得到了迅速的发展，英国汉丁堡大学的 J. R. 穆恩 J. R. Moon 研究组研究了粉末烧结体的摆辗技术，该技术被认为是目前可以获得大型粉末制品的唯一的先进方法。粉末包覆加工技术，例如粉末高速钢包覆锻造、氧化物超导线带材的拉拔—轧制工艺等，钨合金以及金属间化合物的热静液挤压技术均取得了一系列可喜的成果。美国俄亥俄州克利夫兰市变形控制技术公司设计了粉末锻造预成形坯的“专家系统”，利用计算机软件来设计粉末锻造预成形坯，这种软件可以根据已获得的粉末锻造的经验，不断加以更新、修改和强化，以处理更复杂的工艺条件和材料种类等粉末锻造预成形坯的设计问题。目前粉末塑性加工进入实用化阶段的产品，除连杆、各种齿轮外，还有刹车导轨、转子、凸轮环、汽车用变速器、扳手、棘

爪、摇臂杆、传动链轮、法兰、轴承等等。

粉末塑性加工的发展前景，主要取决于该工艺与其他工艺的竞争能力，目前影响该工艺经济效益的主要因素是粉末原料价格过高，如果粉末塑性加工的产量能够稳定增长，钢粉需求量不断增加，价格下降是无疑的。随着粉末塑性加工生产方式的确立与低合金雾化钢粉价格的不断降低，粉末塑性加工将会得到迅速的发展。随着材料科学的发展，各种新型的结构材料和功能材料不断涌现，例如超导材料、非晶态材料、粉末高温合金以及金属间化合物等，因此，针对新材料研究与发展的趋势，不断地研究和开发不受材料变形能力束缚的、较为灵活的成形技术，以适应科学技术的发展，是粉末塑性加工领域中的重要研究工作之一。

1.2.2 基础理论的发展

粉末塑性加工工艺的发展，促进了粉末塑性加工理论研究的进行，尤其是在20世纪70年代初期，粉末塑性加工工艺的发展比较缓慢，使人们认识到了粉末塑性加工理论研究的重要性。例如粉末材料屈服准则、塑性变形致密、变形力的解析等都是在此期间进行的。这些研究对20世纪70年代末期和20世纪80年代粉末塑性加工工艺的迅速发展起到了积极的推动作用。粉末材料塑性理论的研究，对变形力的计算、流动规律以及致密化过程的分析具有重要的意义。

粉末材料属于非连续体，这种非连续体的变形是一个非常复杂的过程，需要以各个颗粒的变形以及各颗粒之间的协调关系来研究其整体变形，即粉末材料的塑性变形与致密问题，由于非连续介质力学的基础还很不完善，还无法用于分析粉末材料的塑性变形与致密等问题。因此，目前对粉末塑性变形理论的研究，是在将粉末材料作为连续体的假设基础上进行的，即将粉末材料视为“可压缩的连续体”，这样就可以应用连续体塑性力学的理论来研究粉末材料的塑性变形。

同致密材料一样，粉末材料塑性理论的中心内容是屈服准则，从20世纪70年代初开始，许多学者先后提出了粉末材料的屈服

准则，都是从经典的米塞斯 (Von Mises) 理论引伸出来的，都建议粉末材料的屈服准则是应力张量第一不变量 J_1 和应力偏量第二不变量 J'_2 的函数，材料状态只与相对密度有关。一些学者给出的屈服准则如表 1-1 所示，均可以写成一个通式，即

$$Y = (a_1 3J'_2 + a_2 J_1^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1-1)$$

式中 a_1 、 a_2 ——相对密度或泊松比的函数；
 Y ——屈服应力。

根据提出者的不同， Y 等于粉末材料的屈服应力 σ_c 或等于同种致密材料的屈服应力 σ_0 。

当密度 $\rho=1$ 时，泊松比 $\nu=0.5$ ， $a_1=1$ ， $a_2=0$ ，与米塞斯 (Von Mises) 屈服准则一致。库恩 (Kuhn) 屈服准则与多瑞维鲁 (Doraivelu) 屈服准则的物理意义是非常清楚的，即当粉末材料内质点的单位体积弹性总能量达到某一临界值时，粉末材料进入屈服状态。由式 1-1 所确定的屈服准则在主应力空间均可以用一与三个坐标轴等倾斜的回转椭球表面来表示。

泊松比与相对密度的关系是粉末塑性加工理论的重要内容之一，扎丹诺维奇 (Zhadanovich) 首先给出了泊松比与相对密度的经验关系式，即

$$\nu = 0.5\rho^n \quad (1-2)$$

马克斯-戴维斯 (Marx-Davies) 给出了泊松比与相对密度的线性方程。图瓦利 (Tewari) 和沙伦 (Sharan) 给出了由马克斯-戴维斯和库恩-道尼 (Kuhn-Downey) 方程的计算值与实测值的比较，认为二者均随粉末材料密度的增加，公式的准确度下降。参考文献 24 根据铜粉烧结体以及图瓦利-沙伦的铁粉烧结体的无摩擦压缩试验，提出了泊松比与相对密度的关系，与实际情况吻合较好，并采用粉末薄壁管复合拉 (压) 扭实验验证了粉末材料屈服准则的可靠性。

在粉末材料变形与致密的解析方法的研究方面，库恩首先研究了单向压缩、平面应变压缩以及复压的计算方法，大矢根等人采用近似屈服准则对粉末材料变形的滑移线场理论和上限法进行

了探讨；岛进、小坂田等人分别研究了粉末材料弹塑性有限元法和刚塑性有限元法，并用于自由锻过程的解析；岛进还探讨了矩阵算子法在粉末材料非稳态变形中的应用；高桥等人给出了烧结合体冷挤压加工的流动应力曲线，利用该曲线可以很精确地推测出挤压变形力；参考文献 31 采用应力莫尔圆理论及求解塑性平衡方程两种方法，从理论上建立了粉末材料的滑移线场理论，由该理论可以利用致密体的滑移线场来求解粉末材料的塑性变形问题，在使用上是非常方便的。

表 1-1 一些学者所提出的粉末材料的屈服准则

通 式	$(a_1 3J'_2 + a_2 J''_1)^{1/2} - Y = 0$			
提出者	a_1	a_2	Y	备 注
库恩-道尼 (Kuhn-Downey)	$\frac{2}{3} (1+\nu)$	$\frac{1}{3} (1-2\nu)$	σ_s	见参考文献 15
多瑞维鲁 (Doraivelu)	$\frac{2}{3} (1+\nu)$	$\frac{1}{3} (1-2\nu)$	$\frac{\nu_c - \nu}{1 - \nu_c} \sigma_0$	见参考文献 16， 当 $\nu = \nu_c$ 时， $\sigma_s = 0$
格林 (Green)	$\left[\frac{3-2\sqrt{\theta}}{3(1-\sqrt{\theta})} \right]^2$	$\frac{1}{4} \left(\frac{1}{\ln\theta} \right)^2$	σ_0	见参考文献 17， θ 为孔隙率
大矢根 ほか等	$\frac{1}{\rho^{2k}}$	$\left(\frac{1}{3g\rho^k} \right)^2$	σ_0	见参考文献 18， g 为相对密度的函数， k 为常数
马尔特诺瓦 (Мартынова)	$\frac{3}{\rho g_1^2}$	$\frac{1}{3\rho g_2^2}$	σ_0	见参考文献 19， g_1, g_2 为相对密度的函数
赵仲治	$\left[\frac{3}{2\pi(1-\sqrt{\theta^3})} \right]^2$	$\left(\frac{2}{3\ln\theta} \right)^2$	σ_0	见参考文献 20
格森 (Gurson)	$\frac{1}{1-\rho+\rho^2}$	$\frac{(1-\theta)^2}{8(1-\rho+\rho^2)}$	σ_0	见参考文献 21

粉末材料塑性理论与致密材料的塑性理论相比还很不完善。由于引入了相对密度，使粉末材料的塑性理论的基本关系式一般化了，这样就可以采用连续体塑性力学来处理粉末材料的塑性变形问题。但是，实际粉末材料的塑性变形是非常复杂的，即使相对密度相同，若孔隙的形状和大小不同，则可压缩性的程度也不同。另外，在外观上虽然是均匀变形，但由于孔隙的存在，变形体内的应变分布也是不均匀的。并且，即使粉末材料是各向同性的，由于孔隙的形状不同，也可能产生各向异性。但是，粉末塑性加工理论也有其自身的特点，例如由列维-米塞斯 (Levy-Von Mises) 关系式可知，对于不可压缩材料，即使已知应变增量也只能求出应力偏量，应力值还是未知数，而粉末材料则具有若已知应变增量就可以直接求出应力值的优点；众所周知，所谓上限定理，是指“实际外力所做的功不比由运动学许可的位移计算的材料内所消耗的功大”，这里所说的许可位移，在不可压缩材料中是指满足位移的边界条件和体积不变条件的位移。但是，在可压缩的粉末材料中，只满足位移的边界条件即可，由此可知，上限定理在粉末材料中的应用方面有时更简单。因此，应充分利用粉末塑性加工理论上的特点，对粉末塑性加工理论做进一步深入的研究。例如对于具体的加工工序，质量不变条件的具体形式的研究；当拉压性能不同时，对粉末材料屈服准则的研究以及对变形力的解析方法的研究等等。

总之，虽然粉末材料的塑性理论还很不完善，但是在各国学者的辛勤努力下，粉末材料的塑性理论已初步建立起来了，我们相信在不久的将来，粉末材料的塑性理论一定会像完全致密材料的塑性理论一样逐步地完善起来。

2 粉末的特性

2.1 制粉方法

粉末的制取方法是多种多样的，从制粉过程的实质来看，现有的制粉方法大体上可分为如表 2-1 所示的两大类，即机械法和物理化学法。机械法是将原材料进行机械粉碎，而化学成分基本上不发生变化的过程；物理化学法是借助化学的或物理的作用改变原材料的化学成分或聚集状态而获得粉末的过程。在粉末生产中用得最广泛的是还原法、雾化法和电解法，其中适应性最强的是雾化法，因为它能生产合金粉末，而且能很好地控制粉末性能。

表 2-1 制粉方法

物理化学法	还原法	碳还原；气体还原；金属热还原
	还原-化合法	碳化或碳与金属氧化物作用；硼化或碳化硼法；硅化或硅与金属氧化物作用；氮化或氮与金属氧化物作用
	气相还原法	气相氢还原；气相金属热还原
	化学气相沉积法	
	气相冷凝或离解法	金属蒸气冷凝；羰基物热离解
	液相沉淀法	置换；溶液氢还原；从熔盐中沉淀
	从辅助金属浴中析出法	
	电解法	水溶液电解；熔盐电解
机械法	电化腐蚀法	晶间腐蚀；电腐蚀
	机械粉碎法	机械研磨；旋涡研磨；冷气流粉碎；机械合金化
	雾化法	气体雾化；水雾化；旋转圆盘雾化；旋转电极雾化