



喷射成形中的喷射雾化机理研究*

张 璞** 周哲玮

(上海大学、上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

摘要: 喷射成形技术是一项新兴的快速凝固技术。喷射雾化作为其中的一道重要的工序, 其机理的研究具有重要的意义。主要介绍了喷射雾化的阶段、各阶段的机理和时间尺度以及脉动因素对喷射雾化影响等方面的研究。着重讨论了各项物理参数(如粘性、表面张力和相对速度等)对喷射雾化过程的影响。

关键词: 喷射成形; 喷射雾化; 喷射雾化机理

1 前言

喷射成形工艺是一种新兴的粉末冶金工艺。早在 1958 年, Brennan^[1]就竭力支持用一种金属喷射工艺来生产半成品, 然而直到 1970 年才由 A.R.E. Singer^[2]开展了喷射成形的早期研究。Singer 利用氩气和氮气雾化铝合金连续生产铝带。此后 Osprey 公司进一步研究了该技术, 发展出了一种被称为“Osprey Process”的喷射成形技术。至 1994 年秋, Osprey 公司已经授权近二十五家公司或机构生产喷射成形产品和设备^[3]。类似的技术还有 CSD(控制喷射沉积, Controlled Spray Deposition) 和 LDC(液体动态冲击, Liquid Dynamic Compaction) 等。

喷射成形工艺一般都是利用喷射雾化技术使得液态金属破碎并直接沉积到模具上形成产品或半成品, 因此该工艺又被称为喷射雾化和沉积。在“Osprey Process”中使用的主要是一般的气体雾化技术, 而在 LDC 中使用

主要是超音速气体雾化技术。超音速气体雾化技术与一般的气体雾化技术相比, 它的特点在于雾化气体的速度达到超音速(通常为 2~2.5 马赫数左右), 而且雾化气体还发生高频脉动(脉动频率通常为 60~200kHz 左右)。因此利用超音速气体雾化技术可以得到比一般的气体雾化技术更细微的液滴、更集中的微滴直径分布和更快的凝固速率。研究表明雾化后的液态金属微滴的直径、直径的分布和微滴运动的速度直接影响到沉积过程的控制和沉积后产品的性能。因此喷射雾化的研究对于喷射成形工艺的进一步完善具有重要的意义。

2 影响雾化过程的物理因素

为了了解雾化过程的规律和预测液态金属雾化后形成的微滴的直径, 一些研究者在大量实验的基础上得到了一些经验公式。在这些经验公式中比较著名的是 Lubanska 公

* 国家自然科学基金(编号:19772026)、上海市科学技术发展基金(编号:97XD14006)和上海市新材料研究中心资助项目

** 主要从事力学中的流动稳定性和喷射成形中雾化机理的研究, 现在上海市应用数学和力学研究所攻读博士学位

收稿日期:1998-12-15

式^[4]、Small 和 Bruce 公式^[5]、Kim 和 Marshall 公式^[6]、Nichiporoko 公式^[7]及 Date, Tendolkar 和 Vartak 公式^[8]等。

在这些经验公式中 Lubanska 公式被认为是最准确和适用范围最广的^[3]。Lubanska 公式的形式如下：

$$\frac{d_m}{D} = \beta \left[\left(1 + \frac{M}{A} \right) \frac{v_m}{v_g We} \right]^n \quad (1)$$

其中 d_m 表示雾化微滴的质量中值直径, D 表示金属流的直径, v_m 、 v_g 分别表示金属和雾化气体的运动学粘性系数, M 、 A 分别表示金属和雾化气体的质量流量, $We = \rho_m \frac{V^2 D}{\gamma}$ 表示韦伯数 (ρ_m 表示液态金属的密度, V 表示雾化气体冲击金属流的速度, 而 γ 表示表面张力), 而 β 、 n 是经验常数。

由 Lubanska 公式可以看到在雾化过程中起重要作用的有以下这些物理因素。首先, 液态金属流和雾化气体的速度在整个雾化过程中是起重要作用的。根据 Lubanska 公式, 液态金属流的速度与雾化气体的速度相差越大, 则雾化微滴的质量中值直径越小; 雾化气体的速度越大, 则雾化微滴的质量中值直径越小。如果将雾化过程看作是一个能量转换的过程, 即由雾化气体的动能转换为液态金属的表面能、动能或其它形式的能量的过程, 可以从物理上解释以上的现象。如果雾化气体的速度越大, 则输入的气体动能越大, 因此可供转化为液态金属的表面能的能量也越大。如果液态金属的表面张力不变, 只有液态金属的表面积增大, 液态金属的表面能才能增大。而对于相同质量和密度的液态金属, 液态金属微滴的直径越小表面积越大。其次, 由 Lubanska 公式可以看到液态金属的表面张力也是影响雾化过程的重要的物理因素。一方面, 表面张力的增大将使雾化所需的能量增大; 另一方面, 有研究^[9]表明表面张力的增加将提高雾化的效率, 这可能是由于高的表面张力将阻碍已形成的微滴再次结合。

成大的液滴。除雾化气体和液态金属的速度及液态金属的表面张力以外, 气体和液态金属的粘性也是一个很重要的影响因素。可以将大多数的过热金属或合金看作牛顿流体, 也就是说应力与应变成比例, 比例系数就是粘性系数。但是粘性系数随温度变化很大, 随着温度的降低液态金属的粘性将显著的增大。与表面张力的影响不同, 粘性切应力的作用在雾化过程中是随时间变化的, 因此很难建立起在破碎过程中克服粘性力所需能量的公式。作为近似, 可以用下式估计克服粘性力所需能量 E_μ , 即:

$$E_\mu \approx \mu_m \Delta U d^2 \quad (2)$$

其中 μ_m 表示液态金属的动力学粘性系数, ΔU 表示雾化气体与液态金属的相对速度, d 表示雾化微滴的直径^[11~12]。

总之, 通过实验建立的经验公式可以了解影响雾化过程的一些物理因素的规律, 并作出一定的物理解释。但是由于从这些经验公式中无法了解规律变化的细节而无法作更详细和精确的分析, 因此有必要在实验研究的基础上从理论研究的角度出发来作更进一步的分析。

3 雾化过程的各个阶段及机理

整个喷射雾化过程是一个相当复杂的过程, 因此有必要对实际情况作一定的简化。根据 Johnston 和 See^[13] 及 Dombrowski 和 Johns^[14]的研究, 雾化过程可以分为三个阶段, 即主要破碎阶段、二次破碎阶段和球化及凝固阶段。(如图 1 所示)

在主要破碎阶段, 在雾化气体的作用下引起液态金属表面波波幅的增长, 从而使得熔融金属在表面波的波峰处与主流分离成为带状或大的液滴。关于该阶段机理的研究可以追溯到本世纪初的 Castlemean^[15]的工作。随着雾化技术的发展, 三、四十年代以后又有一些理论模型发展了起来, 其中以 G. I. Taylor^[16]的模型最为著名。到七十年代初, 随着

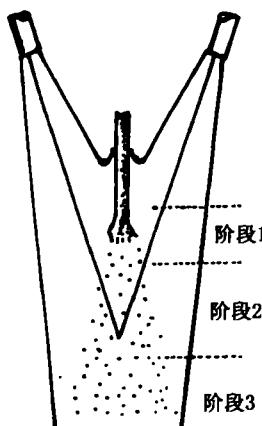


图1 喷射雾化的三个阶段

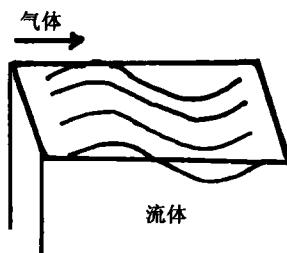


图2 Bradley 气体雾化模型

Osprey 过程的发展, D. Bradley^[17]提出了一个新的气体雾化模型(如图 2 所示)。

该模型考虑到在气体雾化过程中雾化气体的速度与音速相近, 将雾化气体看作是可压缩流体。同时忽略了气体的粘性而只考虑了金属流的粘性。从 Navier - Stokes 方程出发, 利用正则模态分析的方法得到了不稳定波的波数与频率的关系式(即所谓的色散关系)。由该关系式就可以找到具有最大增长率的不稳定波的波数, 因此不稳定波的波长为

$$\lambda = \frac{2\pi}{k_{\max}} \quad (3)$$

其中 k_{\max} 表示具有最大增长率的不稳定波的波数。由于假设熔融金属在表面波的波峰处与主流分离成为带状或大的液滴, 因此不稳定波的波长与带状液滴的直径 D_l 成正比, 所以有:

$$D_l = \epsilon \lambda \quad (4)$$

其中 ϵ 表示经验常数。再根据 Castleman^[15] 的经验公式可以得到最终的微滴直径为:

$$d = \frac{11.86\epsilon}{k_{\max}} \quad (5)$$

Bradley 将其理论计算的结果与实验作了比较, 此后, Bradley^[19]又将其分析推广到雾化气体速度为超音速的情况。G. Antipas、C. Lekakou 和 P. Tsakirooulos^[20]基于 Kelvin - Helmholtz 不稳定性理论建立了主要破碎阶段的理论模型。在模型中利用力平衡来计算临界振幅, 并认为当超过这个振幅时就出现波峰顶端的剥离, 从而确定环形液滴的直径和体积。根据 Bradley 和 Antipas 等人的分析, 在气体雾化的主要破碎阶段雾化气体与液态金属间的剪切作用引起的不稳定波的增长是金属流破碎的主要因素。

在二次破碎阶段, 带状或大的液滴破碎成为小的液滴。A. Unal^[21]指出二次破碎可能存在着三种不同的机理, 即(1)气流冲击使金属液滴破碎,(2)在气流作用下金属液滴变形成降落伞状至最终破碎,(3)金属液滴振动而导致破碎。Yule 和 Dunkley 描述了后两种机制引起的破碎的过程, 认为液滴如何破碎主要取决于气体韦伯数 $We_g = \rho_g \Delta U^2 D_l / \gamma$, 其中, ρ_g 表示雾化气体的密度, γ 表示液态金属的表面张力系数。当处于低的气体韦伯数的情况下, 在气流的作用下液滴变形, 同时表面张力的作用使其保持在一种类似于“降落伞”的形状, 随着液滴形状的发展液滴的薄壁破碎成一团细小的微滴。因此 Yule 和 Dunkley 形象地将这个过程称为“穿透模式”, 如图 3 所示。

当处于高的气体韦伯数的情况下, 高速气流的冲击使得液滴在开始阶段变平而成为“碟形”, 然后在气流的进一步作用下变成类似“章鱼”的形状, 并最终破碎成细小的微滴, 如图 4 所示。

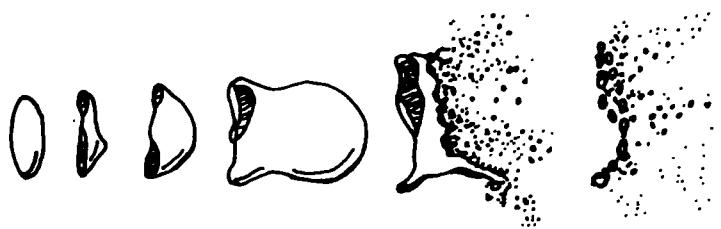


图3 微滴的二次破碎模式 - 空包状

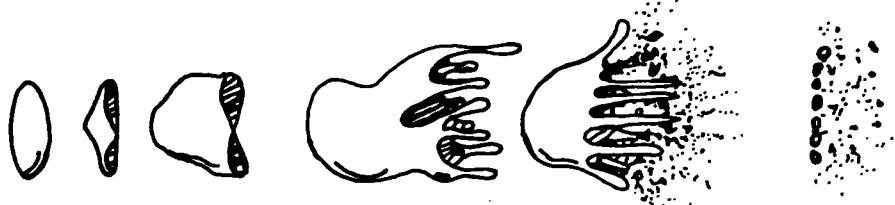
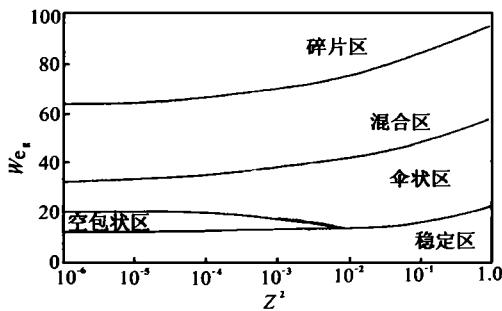


图4 微滴的二次破碎模式 - 伞状

当然,实际的情况要比以上描述的复杂得多,例如一个液滴以低速飞行,并在重力作用下加速到某一高速度,显然要比一开始就具有这一高速度的液滴更可能按所谓的“穿透模式”破碎。Krzeczkowski^[22]划分了液滴的二次破碎区,如图5所示,同时发现对于大多数的熔融金属当气体韦伯数低于一个临界韦伯数($We_{g, crit} \approx 13$)时液滴是稳定的,对于铁这样的金属发生二次破碎是很困难的。

图5 二次破碎的分区(图中粘性数
 $Z = \mu_l / (\rho_l \gamma D)^{0.5}$)

G. Antipas、C. Lekakou 和 P. Tsakirooulos^[20]还基于 Kelvin - Helmholtz 不稳定性理论建立了二次破碎的理论模型。该模型考虑了

各种波长以及它们对应的增长率,并根据 Bradley^[17,19]的分析确定波长的上、下限,此时重力场与流向相同,从而建立起二次破碎的理论模型。在球化及凝固阶段,液滴由不规则的形状变为球形并逐步凝固成固体。应当指出的是很多金属液滴可能在球形化以前凝固就已经发生了。

根据以上的研究,如果认为整个雾化的过程分为三个阶段的话,则液态金属的破碎主要发生在前两个阶段,即主要破碎阶段和二次破碎阶段;现有的理论分析主要考虑了气、液间的相对速度对液态金属破碎的影响。

4 脉动对液态金属破碎的影响

现有的一些研究表明,当雾化气体或熔融金属脉动时将使雾化微滴的直径分布变得更均匀,而且直径也更小^[23]。

产生脉动的方法很多,主要有电子的和声学的两类。有一种超音速气体雾化技术(USGA)就是利用声学原理产生高频脉动的,该技术被MIT的N.J.Grant教授用于喷射成形中。超音速气体雾化技术利用的声学原理是被称“Hartmann 效应”的物理现象,即将具

有或接近音速的气流射入一端封闭的管路时,气流将发生震荡的现象^[27]。

虽然实验表明脉动能使雾化微滴的直径分布大大的变窄,并且可以制得更细小的粉末,但是对脉动雾化过程的作用机理还不很了解。前文提到在二次破碎过程中可能存在的机理包括微滴的振动。C. A. Sleicher^[24]分析了微滴的振动行为并得到了使微滴发生二次破碎的气流脉动频率为:

$$\omega = 4\pi^{-1} D^{-1.5} \gamma^{0.5} \rho_l^{-0.5} \quad (6)$$

其中 ρ_l 是液滴的密度。但方程(6)没有考虑气、液间的速度差对自振频率的影响,而在实际的工况下液滴不可能是静止的,而且 Sleicher 也没有从机理上解释脉动使微滴直径分布变窄的原因。

L. C. Morin 等人^[25]利用一项被称为脉动雾化过程(Impulse Atomization Process, IAP)的新的雾化技术控制雾化粉末的粒度和粒度分布,并得到了很好的效果。该技术的关键是使用一种机电装置使熔融金属脉动。实验结果表明利用 IAP 技术微滴的粒度分布的典型的标准差为 1.2~1.5。这一数据与一般的雾化技术的结果相比是很小的,并且所制的粉末的显微结构是相当均匀的,在实验过程中消耗的能量也是很低的。利用 IAP 技术对各种金属作了实验,其中包括 Pb-Sn、Zn-Pb、Zn-Al、Al-Mg、Al-Cu、Al-Fe-Ni、6061 Al、Se、Cu 和 Fe-C,实验温度最高达 1800K。研究的结果清楚的表明利用脉动雾化技术制造的粉末比利用一般的雾化技术得到的在显微组织上更精细和均匀。

5 破碎的时间尺度

对于喷射成形的实际生产来说,整个雾化过程的时间与雾化微滴的粒度和粒度分布一样也是一个重要的参数。

在主要破碎阶段,对于在较低速度下的破碎过程,Grant 和 Middleman^[26]提出了下式:

$$t_{BU} \Delta U / D = 19.5 We_g^{0.5} (1 + 3Z)^{0.85} \quad (7)$$

其中 t_{BU} 表示主要破碎阶段的破碎时间。应当指出的是当相对速度 $\Delta U \geq 3.25 \mu_l \rho_l^{-1} D^{-1} Z^{-0.28}$ 时,方程(7)由于破碎机制的变化将失效。对于高速流动来说,Baron(见文献[9])则给出了下式:

$$t_{BU} \Delta U / D = 538 We_g^{0.5} Re_l^{-0.625} \quad (8)$$

其中 $Re_l = \rho_l \Delta U d / \mu_l$ 。由方程(7)和(8)可知,主要破碎阶段的破碎时间是随相对速度增加的,这原因是相对速度的增加有利于破碎。

在二次破碎阶段,Gordon^[28]提出了一个经验公式,在作些修正后可写成如下形式:

$$t_{SA} = (We_g - 16)^{-0.5} 2d^{1.5} \rho_l^{0.5} \alpha^{-0.5} + (We_g - 16)^{-1} 32 \mu_l d \gamma^{-1} \quad (9)$$

其中 t_{SA} 表示二次破碎的破碎时间。Lefebvre^[29]建议利用在上式中的每一项乘以实际的气体韦伯数与假设的临界韦伯数的差来修正雾化条件的影响。实际的气体韦伯数与假设的临界韦伯数的差越大,空气作用力与表面张力相比越重要,破碎的时间越短。当气体韦伯数接近于临界韦伯数或粘性远大于表面张力时,粘性的影响将起重要的作用。

利用以上的经验公式可以预测破碎的时间。在某些工况下,破碎还没有完成就产生凝固,实验中的观察也证明了这种可能。此外,在雾化过程中热交换将影响金属的物理性质,而物理性质的变化对雾化过程的影响是很大的,因此在破碎机理的研究过程中就有必要将热量的因素考虑进去。然而现有的分析中往往没有考虑这一因素,这是一个有意义的研究方向。

6 结束语

由于对喷射成形中喷射雾化的原理缺乏深入的研究,直接影响了该技术的进步和完善。虽然现有的研究已经得到了很多有用的结果,但是在理论模型中还不可能仔细考虑

如液面形状、气流冲击和热量等因素的影响,而在实际过程中条件十分复杂,尚未清楚地了解整个过程的机理。此外,随着雾化技术的发展,一些新的现象如脉动的影响急待研究。近年来,随着计算技术和流体力学的发展,有可能在前人研究的基础上将喷射雾化机理的研究向前推进一步,例如利用非线性力学的方法研究喷射雾化机理。

参考文献

- 1 J Brennan. US Patents. 2639390 and 2864157, 1958.
- 2 A R E Singer. The Principles of Spray Rolling of Metals. Metallurgy Material, 1970, 4:246.
- 3 P S Grant. Spray Forming. Progress in Material Science, 1995, 39:497.
- 4 H Lubanska. Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals. Journal of Metals, 1970, 22:45.
- 5 S Small and T J Bruce. International Journal of Powder Metallurgy, 1968, 4:7.
- 6 K Y Kim and W R Marshall. Drop - size Distributions from Pneumatic Atomizers. AIChE J, 1971, 17(3):575.
- 7 O S Nichiporenko. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1967, 60(112):947.
- 8 U R Date, G S Tendolkar and M N Vartak. International Journal of Powder Metallurgy, 1967, 3(2):49.
- 9 A H Lefebvre. Atomization and Sprays. New York: Hemisphere, 1989.
- 10 A J Yule and J J Dunkly. Atomization of Metals for Powder Production and Spray Deposition. Oxford: Clarendon Press, 1994.
- 11 A Lawley. Atomization - The Production of Metal Powders. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1992.
- 12 马峥. 喷射雾化最小等效直径的能量判断准则. 应用数学和力学, 1998.
- 13 J B See and G H Johnston. Interactions Between Nitrogen Jets and Liquid Lead and Tin Streams. Powder Technology, 1984, 21:119.
- 14 N Dombrowski and W R Johns. The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets. Chemical Engineering Science, 1963, 18:203.
- 15 R A Castleman. NBS J. Res. 1931, 6:369.
- 16 G I Taylor. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. Proceeding of Royal Society A, 1950, 201:192.
- 17 D Bradley. On the Atomization of Liquids by High - Velocity Gases. Journal of Physica D, 1973, 6:1724.
- 18 S Nukiyama and Y Tanasawa. Trans. Soc. Mech Engrs, 1938, 4:86.
- 19 D Brakley. On the Atomization of Liquids by High - Velocity Gases: II. Journal of Physica D, 1973, 6:2267.
- 20 G Antipas, C Lekakou and P Tsakirooulos. Second International Conference on Sprayforming. Swansea, UK, 1993:15.
- 21 A Unal. Effect of Processing Variables on Particle Size in Gas Atomization of Rapidly Solidified Aluminium Powders. Material Science and Technology. 1987, 3:1029.
- 22 S A Krzeczkowski. Measurement of Liquid Droplet Disintegration Mechanisms. International Journal of Multiphase Flow, 1980, 6:227.
- 23 N J Grant. Rapid Solidification of Metallic Particulates. Journal of Metals, 1983, 35:20.
- 24 C A Sleicher. Maximum stable drop size in turbulent flow. AIChE J, 1962, 8:471.
- 25 E J Lavernia and N J Grant. Ultrasonic Gas Atomization. Metal Powder Report, 1986, 41:255.
- 26 R P Grant and S Middleman. Newtonian jet stability. AIChE J, 1966, 12:669.
- 27 L S Morin et al. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials. T M Cadle and K S Narasimhan eds. Metal Powder Industries Federation and APMI International, 1966: 185.
- 28 D G Gordon. Journal of Applied Mathematics. 1959, 30: 1759.
- 29 A H Lefebvre. Proc. Atomization and Sprays 2000, Pittsburgh, USA 1991.

ON THE SPRAY ATOMIZATION MECHANISM IN SPRAYFORMING

Zhang Jing Zhou Zhewei

(Shanghai University, Shanghai Institute of Applied Mechanic and Mathematics, Shanghai 200072)

Abstract: Sprayforming is a developing technology for rapid solidification. Spray atomization is an important process in sprayforming, so the research of its mechanism is of great importance for the improvement of sprayforming. In this paper, authors discussed the state of art on the study of the stages in spray atomization, the mechanism and time scale of each stage, the effect of impulse on spray atomization and especially how the variations of physical parameters (such as viscosity, surface tension, relative velocity between gas and liquid, etc.) affect the process of spray atomization.

Key words: sprayforming; spray atomization; mechanism of spray atomization

1999 年海峡两岸粉末冶金技术研讨会圆满结束

1999 年海峡两岸粉末冶金技术研讨会于 1999 年 7 月 12 日至 13 日在上海市举行。出席本次会议的台湾粉末冶金界学者和企业家 18 人,大陆学者和企业家 200 人,共计 218 人。是一次粉末冶金届的盛会。

中国钢协粉末冶金协会理事长李森蓉先生主持了开幕式。中国机协粉末冶金专业协会副会长倪冠曹先生、台湾粉末冶金协会理事长刘国雄教授、中国工程院院士黄培云教授分别向大会致词。上海合众公司副总经理张宗德先生出席了开幕式并发表了热情洋溢的讲话。

这次会议分别由朱秋龙先生、李献璐女士、刘国雄先生、倪冠曹先生、邱绍宽先生、李森蓉先生、黄坤祥先生、吕海波先生、汪建民先生和曹勇家先生主持学术交流活动。会上发表学术论文 25 篇,这些论文分别介绍了大陆和台湾粉末冶金科研、生产的发展情况,特别是反映了学术领域中的一些热点课题的动态及进展,使大家进一步了解了海峡两岸在粉末冶金机械零件、注射成形、温压、微波烧结、喷射成形、功能材料、硬质合金、纳米技术、磁性材料、粉末制备技术及预处理技术、粉末高速钢等各方面取得的新成果,受到代表们的热切关注和欢迎。海峡两岸的学者和企业家都十分重视这次大会的召开,认为本次会议为两岸学术交流、共同振兴粉末冶金事业提供了良好的机会。

这次大会取得了圆满的成功,并将促进海峡两岸粉末冶金生产、技术、科学的研究的交流和发展,加深两岸同行的相互了解和同胞的情谊,推动粉末冶金行业技术进步,共创 21 世纪华夏粉末冶金工业新篇章。

(印红羽 供稿)

中国机协粉末冶金分会 1999 年会员大会在上海召开

中国机械通用零部件工业协会粉末冶金分会会员大会于 1999 年 7 月 13~14 日在上海召开,会议进行了换届选举,产生了第四届理事会,理事会的成员是:

倪冠曹、卢德宝、苏天祝、马世海、张海涛、李庆安、曲在纲、关秀虎、汪南东、李森蓉、叶晓波、冯金国、张宏才、陈秀发、徐哲之、郑平龙、王三全、温怀志、曹西刚、刘和气、颜启谈、尉少林、邹赤兵
理事会分工:

会 长:倪冠曹

副 会 长:卢德宝、苏天祝、马世海、张海涛、李庆安、曲在纲

顾 问:韩凤麟、周开礼、于茂武

秘 书 长:陈 越

副秘书长:单海昌

秘 书:庞淑芳、毛美莲

会议讨论了协会的工作,代表们一致认为协会应加强国内外市场的开拓、技术与信息的交流和咨询服务工作。在近期内开展粉末冶金名优产品的评估工作,积极参加于今年 11 月在上海举行的中国国际机械通用零部件及其专用装备展览会的参展工作。

(中国机械通用零部件工业协会粉末冶金分会 供稿)