



## 气雾化工艺对 Fe-Si-Ni-Al-Ti 软磁合金粉末物理性能的影响<sup>\*</sup>

刘 辛<sup>\*\*</sup> 毛新华 谢焕文 蔡一湘

(广东省工业技术研究院粉末冶金研究所, 广东 广州 510651)

**摘 要:** 采用惰性气体雾化法制备 Fe-3% Si-2% Ni-0.5% Al-1% Ti 软磁合金粉末, 通过化学分析、激光粒度分析仪、电子探针等手段分别对粉末的成分、粒度分布和表面形貌进行表征, 研究雾化压力、雾化温度和漏嘴直径对粉末粒度和形貌的影响。结果表明: 雾化粉末中的 Si、Ni、Al、Ti 微量元素的成分偏差可控制在  $\pm 0.2\%$  以内, 粉末碳含量可低至 0.011%, 氧含量低至 0.10%。随着雾化压力由 4.5 MPa 增大到 6.5 MPa, 粉末的中值粒径减小, 粉末粒度分布由双峰变为单峰, 粉末球形度增大; 随着雾化温度由 1 550  $^{\circ}\text{C}$  升高至 1 650  $^{\circ}\text{C}$ , 粉末的中值粒径显著减小, 粉末球形度先增大后降低; 随着漏嘴直径由 4 mm 增加至 6 mm, 粉末的中值粒径增加, 粉末球形度先增大后降低。实验得到的较优工艺参数为: 雾化压力 5.5 MPa、雾化温度 1 600  $^{\circ}\text{C}$ 、漏嘴直径 5 mm, 粉末粒度在 14.45 ~ 71.35  $\mu\text{m}$  范围内, 中值粒径  $D_{50}$  为 39.75  $\mu\text{m}$ , 粉末球形度高, 表面光洁。

**关键词:** 气雾化; Fe-Si-Ni-Al-Ti; 软磁合金粉末

## Influence of process parameters on characteristics of Fe-Si-Ni-Al-Ti soft magnetic alloy powder prepared by inert-gas atomization

Liu Xin, Mao Xinhua, Xie Huanwen, Cai Yixiang

(Department of Powder Metallurgy, Guangdong General Research Institute of Industrial Technology, Guangzhou, 510651, China)

**Abstract:** Fe-3% Si-2% Ni-0.5% Al-1% Ti soft magnetic alloy powders were prepared by inert-gas atomization. The composition, size distribution, and surface morphology of the powder were characterized by chemical analysis, laser scattering particle size distribution analyzer and electron probe microanalyzer, respectively. The effects of atomization pressure, temperature and nozzle diameter on the powder size and morphologies were also investigated. The results indicate that composition deviation of Si, Ni, Al, Ti trace elements in the powders can be controlled within  $\pm 0.2\%$ . Carbon and oxygen contents of the powders are low reach 0.011% and 0.10%, respectively. With atomization pressure increasing from 4.5 to 6.5 MPa, the median diameter of the powders decreases and the size distribution of the powders changes from bimodal to unimodal form, and the sphericity of the powders increases. With atomization temperature increasing from 1 550 to 1 650  $^{\circ}\text{C}$ , the median diameter of the powders decreases remarkably and the sphericity of the powders increases first and then decreases. With nozzle diameter increasing from 4 to 5 mm, the median diameter of the powders increases and the sphericity of the powders increase first and then decreases. The optimum parameters are as follows: atomization pressure is 5.5 MPa, atomization temperature is 1 600  $^{\circ}\text{C}$ , and nozzle diameter is 5 mm. The powder size mainly ranges from 14.45 to 71.35  $\mu\text{m}$ , and the median diameter of the powder is 39.75  $\mu\text{m}$ . The powders possess high sphericity and smooth surface.

**Key words:** Gas atomization; Fe-Si-Ni-Al-Ti; Soft magnetic alloy powder

<sup>\*</sup> 科技部科研院所技术开发研究专项资金(2010EG215058)

<sup>\*\*</sup> 刘 辛(1981), 男, 高级工程师, 博士; E-mail: shaneliu118@163.com

收稿日期: 2014-8-21

金属磁粉芯是一种将铁磁性粉末与绝缘介质混合压制而成的软磁复合材料,由于其较高的饱和磁感应强度、低的损耗、高的制造柔性等优点,被作为电感器、滤波器、逆变器等广泛应用于电子通讯、开关电源等领域<sup>[1]</sup>。Fe-Si 系磁粉芯作为一类重要的金属磁粉芯体系,粉末的组元成分、杂质含量、粒度分布、形状、组织结构等特性是影响其性能的重要因素。一方面,人们利用多元合金化的方法调整 Fe-Si 系合金的组元及成分,以此来改善合金的磁性能。在合金中添加 Al,得到 Fe-9.6% Si-5.4% Al 合金 (Sendust),其磁导率、饱和磁感应强度和电阻率均得到显著提高<sup>[2]</sup>;添加 Ni 并调整 Si 和 Al 的含量,得到 Fe-9.6% Si-5.4% Al-3.2% Ni 合金 (Super Sendust),其磁性和耐磨性都得到改善<sup>[3]</sup>;此外,在合金中添加少量 Cr、Ti、Co 等元素也可以改善合金的磁性等物理性能,降低其对 Si 和 Al 含量的敏感性<sup>[4-5]</sup>。

另一方面,人们采用不同的粉末制备技术来调控 Fe-Si 系软磁合金粉末的杂质含量、粒度分布、形状、组织结构等特性。Fe-Si 系软磁合金粉末制备技术主要有机械破碎法和雾化法,其中雾化法又分为水雾化和气雾化两大类<sup>[6,7]</sup>。机械破碎法制备的软磁合金粉末形状不规则、存在高应变,因而导致绝缘包覆效果不佳、矫顽力相对较高,从而降低了磁粉芯的高频特性。水雾化法制备的软磁合金粉末也存在形状不规则、氧含量较高等缺点,同样不利于对磁粉芯高频特性的需求。同上述两种方法相比,气雾化制粉具有粉末球形度高、氧含量低、环境污染小、生产成本低以及适应多种金属粉末的生产等优点,尤其适用于磁粉芯用软磁合金粉末的制备。日本大同特殊钢公司的研究表明<sup>[8]</sup>,利用气雾化法获得的

Fe-Si-Al 合金粉末的氧含量较之传统的水雾化制粉法所生产的粉末减低了大约 4/5,消除了雾化过程中由于钢液中氧化物所引起的喷雾故障,生产成本大为减低;另外,由于减少了氧化物的析出,用这种低氧 Fe-Si-Al 合金粉末制造的压粉磁芯,其磁芯损耗大为降低。国内早期制备磁粉芯用软磁合金粉末主要是采用机械破碎以及水雾化方法,近年来气雾化法制备磁粉芯用软磁合金粉末发展迅速,但对于其系统性研究的报道甚少。

本文采用惰性气体雾化法制备 Fe-Si-Ni-Al-Ti 软磁合金粉末,系统研究雾化压力、雾化温度以及喷嘴直径对粉末物理性能的影响。

## 1 试验

试验采用工业纯铁、高纯硅、高纯铝、电解镍和海绵钛为原料(如表 1 所示),根据 Fe-3% Si-0.5% Al-2% Ni-1% Ti(质量分数,下同)名义成分配比后在 ZG-0.05 型中频感应熔炼炉内的氧化镁坩埚中熔化,熔化前先抽真空,然后充入氩气保护。利用红外测温仪测量熔体温度,待原料充分熔化并达到一定过热度后,将得到的合金熔液浇入经中频感应加热的保温漏包开始雾化。所用雾化介质为高纯氩气,雾化结束后,将粉末从雾化罐中取出,经标准筛筛分后称取 -100 目粉末作为样品。

采用化学分析法对粉末的化学成分进行检测,粉末中碳、氧含量的测定利用 LECO CS600 碳硫测定仪和 TC-600 氧氮测定仪进行。采用 Horiba LA-950 激光粒度分析仪对粉末进行粒度分析。采用 JEOL JXA-8100 型电子探针中的扫描电镜功能观察粉末形貌。

表 1 原料成分

Table 1 The chemical components of raw materials

名称	化学成分(质量分数)
工业纯铁	0.003% C, 0.085% Si, 0.101% Mn, 0.0082% P, 0.0088% S, 余量 Fe
高纯硅	0.35% Fe, 0.18% Al, 0.10% Ca, 余量 Si
电解镍	0.0064% C, 0.000656% Fe, 0.0045% O, 0.0001% S, 余量 Ni
高纯铝	0.07% Si, 0.058% Fe, 0.0035% Ca, 0.006% Ga, 0.008% Mg, 余量 Al
海绵钛	<0.070% Si, <0.001% Fe, 0.028% Cl, 0.018% C, 0.042% O, 0.006% N, <0.005% H, 0.005% Mn, <0.001% Mg, ≥99.7% Ti

## 2 结果与分析

### 2.1 粉末的化学成分及碳氧含量

表 2 所列是在不同熔炼雾化条件下制备的 Fe-

Si-Ni-Al-Ti 合金粉末的化学成分及碳氧含量。由表 2 可知,在当前熔炼炉和保温漏包双感应加热条件下,所制备的粉末中 Si、Ni、Al、Ti 微量元素的成分偏

差均控制在±0.2%以内。C、O等杂质元素会以固溶方式或第二相存在于纯铁中,是影响纯铁磁性能的首要因素。当前条件下制备的粉末碳含量可低至0.011%,氧含量低至0.10%。

表 2 粉末的化学成分及碳氧含量  
Table 2 The chemical components, carbon and oxygen contents of the powders

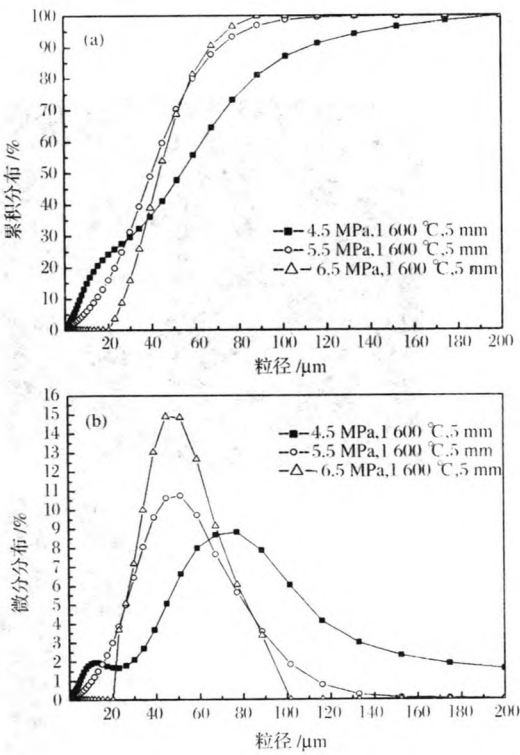
名义成分/%	雾化工艺参数			实际成分/%						
	雾化温度 /℃	雾化压力 /MPa	喷嘴直径 /mm	Fe	Si	Ni	Al	Ti	C	O
Fe-3Si-2Ni- 0.5Al-1Ti	1 550	5.5	5	93.10	3.13	2.03	0.5	0.87	0.018	0.11
	1 600	5.5	5	93.34	2.84	1.90	0.46	0.87	0.011	0.11
	1 650	5.5	5	93.10	3.17	2.03	0.43	0.91	0.019	0.13
	1 600	4.5	5	93.64	2.89	1.90	0.47	0.83	0.011	0.10
	1 600	6.5	5	92.95	2.90	1.95	0.40	0.85	0.012	0.11
	1 600	5.5	4	93.32	2.88	1.89	0.47	0.84	0.014	0.14
	1 600	5.5	6	93.30	2.87	1.96	0.40	0.86	0.019	0.10

2.2 雾化压力对粉末粒径及形貌的影响

图 1(a)是不同雾化压力条件下所获得的粉末粒度累积分布曲线。由图 1(a)可见,在雾化压力为 4.5 MPa 条件下,粉末粒度在 6.95 ~ 111.57 μm(分别对应累积分布曲线上 10% 和 90% 处的粒度,下同)范围内,以累积分布曲线 50% 处的粒度作为中值粒径 D<sub>50</sub>,其值为 53.48 μm。与此类似,在雾化压力为 5.5 MPa 条件下,粉末粒度在 14.45 ~ 71.35 μm 范围内,中值粒径 D<sub>50</sub>为 39.75 μm;在雾化压力为 6.5 MPa 条件下,粉末粒度在 26.73 ~ 66.96 μm 范围内,中值粒径 D<sub>50</sub>为 43.38 μm。比较不同雾化压力条件下的粉末粒度分布可知,粉末的中值粒径随雾化压力的增大由 4.5 MPa 时的 53.48 μm 减小至 5.5 MPa 时 39.75 μm。这是由于雾化压力通过雾化气流冲击熔融金属液流的有效动能来影响雾化过程,从而影响粉末粒度。雾化压力越大,雾化气流的速度及动能越大,气流与金属液流的相互作用越强烈,由于平衡受到破坏而引起的二次雾化过程进行得也就越充分,从而得到更多更细的粉末。然而,随着雾化压力进一步增加至 6.5 MPa,粉末的中值粒径反而略微有所增加(43.38 μm),此时容易出现反吹现象阻碍雾化过程进行。

图 1(b)是不同雾化压力条件下所获得的粉末粒度微分分布曲线。由图 1(b)可见,在雾化压力为 4.5 MPa 时,粉末粒度呈双峰分布,而随着雾化压力增加至 5.5 MPa 时,粉末粒度呈单峰并且近似于正态分布,随着雾化压力进一步增加至 6.5 MPa,单峰分布的粉末粒度区间变窄。上述粒度分布的形态与雾化过程中金属熔滴的二次破碎过程密切相关。该

阶段的破碎遵循 Weber 数准则,其定义如下<sup>[9]</sup>:



(a) 累积分布曲线; (b) 微分分布曲线  
图 1 不同雾化压力制备的粉末粒度分布曲线  
Fig. 1 The distribution curves of powder size under different atomization pressures

$$W_e = \rho v^2 d / \sigma_m \tag{1}$$

式中,ρ为气体密度,v为气液相对速度,d为熔滴直径,σ<sub>m</sub>为表面张力。由上述公式可知,在W<sub>e</sub>数为定值及金属熔滴温度一定时,气流与熔滴的相对速度v便对熔滴的二次破碎起决定性作用。在本实验

中,当雾化压力较小时(4.5 MPa),气液相对速度较小,只有  $d$  值较大的熔滴才能发生二次破碎,其产生的一个峰与初始破碎时形成的峰叠加形成双峰分布。随着雾化压力的增加(5.5 MPa),气液相对速度增大,发生二次破碎的熔滴直径范围也相应扩大,初始破碎后的熔滴几乎全部得到二次破碎,形成细小熔滴,粉末粒度呈单峰并且近似于正态分布。随着雾化压力进一步增加(6.5 MPa),初始破碎后的熔滴经二次破碎得更充分,从而粉末粒度区间变窄。

图 2 是不同雾化压力条件下所获得的粉末形貌图。由图 2 可见,随着雾化压力由 4.5 MPa 增大至 6.5 MPa,粉末粒度逐渐细化。当雾化压力为 4.5 MPa 时,粉末球形度较差,部分颗粒呈椭球状,粉末表面粗糙;随着雾化压力逐渐增大至 6.5 MPa,粉末球形度高,表面更为光洁。

在凝固过程中,金属熔滴一方面会由于表面张

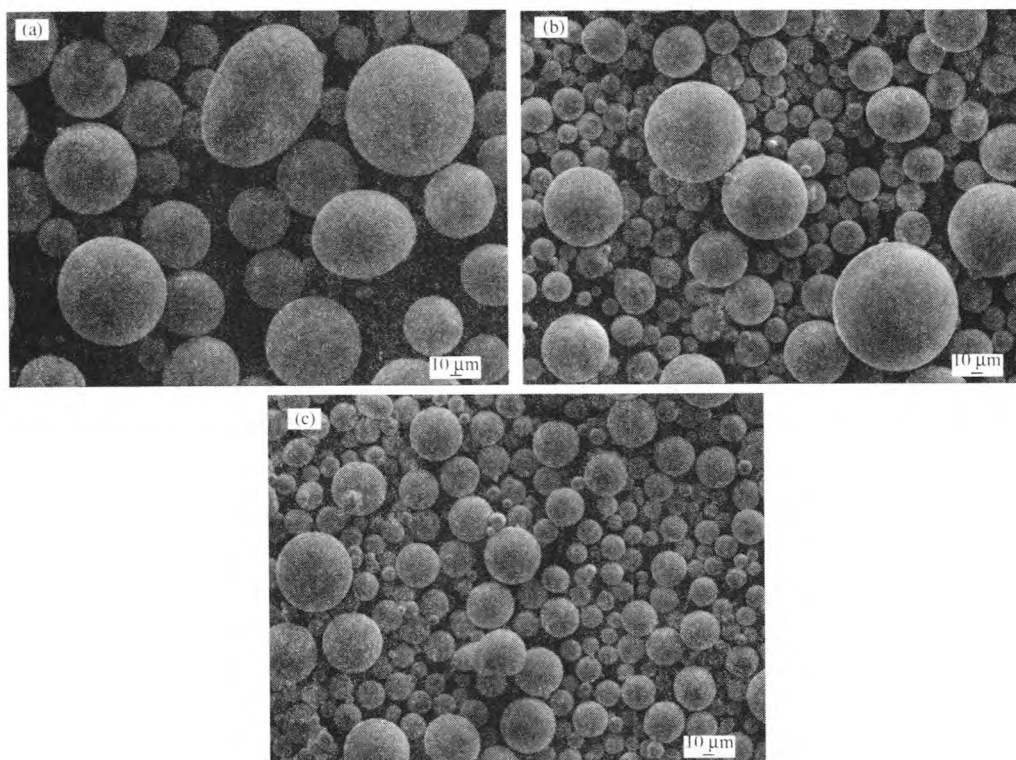
力的作用而发生球化,另一方面则会受到重力和气流冲刷的作用而发生不规则形变。气雾化粉末的球形度主要取决于金属熔体破碎后熔滴球化时间  $t_{sph}$  和凝固时间  $t_{sol}$  的相对大小,其表达式分别如下<sup>[10]</sup>:

$$t_{sph} = [3\pi^2\eta_m/(4V\sigma_m)](R^4 - r^4) \quad (2)$$

式中,  $t_{sph}$  为球化时间,  $\eta_m$  为金属熔液粘度,  $V$  为熔滴体积,  $\sigma_m$  为金属熔液的表面张力,  $R$  和  $r$  分别为球化后与球化前的熔滴半径。

$$t_{sol} = (d_{50}\rho_m/6h_c)c_{p,m}\ln[(T_c - T_g)/(T_m - T_g)] + \Delta H_m/(T_m - T_g) \quad (3)$$

式中,  $t_{sol}$  为冷却凝固时间,  $d_{50}$  为粉末中值粒径,  $\rho$  为金属熔液密度,  $h_c$  为热导系数,  $c_{p,m}$  为金属定压比热容;  $T_c$  为熔滴初始温度,  $T_g$  为雾化气体温度,  $T_m$  为金属熔点,  $\Delta H_m$  为金属熔化焓。



(a) 4.5 MPa; (b) 5.5 MPa; (c) 6.5 MPa

图 2 不同雾化压力制备的粉末形貌图

Fig. 2 The surface morphologies of powders prepared under different atomization pressures

本实验中,雾化压力 4.5 MPa 时的粉末球形度差且表面粗糙,这可能是由于此时的熔滴球化时间比凝固时间长,金属熔滴在凝固前未能进行充分的球化,导致凝固后的粉末颗粒呈不规则形状、表面较

为粗糙。随着雾化压力逐渐增大至 6.5 MPa,此时的熔滴球化时间与凝固时间相接近,金属熔滴在凝固前能够进行充分的球化,因此凝固后的粉末颗粒球形度高,表面更为光洁。此外,在金属液流的成分



和过热度确定的条件下,熔滴的球化时间  $t_{sp}$  主要取决于它的表面张力和尺寸,而表面张力又随熔滴尺寸的减小而增大,因此球化时间随着熔滴尺寸的减小而迅速缩短。凝固时间  $t_{sol}$  则主要取决于熔滴的尺寸,凝固时间随着熔滴尺寸的减小也缩短,并与其成正比关系,但凝固时间的变化幅度远没有球化时间的大。这导致小粒径的粉末比大粒径的粉末更容易在凝固前充分球化,导致其球形度更高。因此,随着雾化压力由 4.5 MPa 逐渐增大至 6.5 MPa,粉末粒度逐渐细化,这也将导致粉末球形度的增大。

在本研究中,当雾化压力达到 5.5 MPa 后,再增大压力只会带来生产成本的增加而几乎不会进一步细化粉末粒度;相反,当雾化压力达到 6.5 MPa 后,容易出现反吹现象阻碍雾化过程进行。因此,可以认为 5.5 MPa 是当前实验的较优雾化压力。

2.3 雾化温度对粉末粒径及形貌的影响

图 3 是不同雾化温度条件下所获得的粉末粒度累积分布曲线。由图 3 可见,在雾化温度为 1 550 ℃ 条件下,粉末粒度在 6.03 ~ 84.06  $\mu\text{m}$  范围内,  $D_{50}$  为 47.36  $\mu\text{m}$ 。与此类似,在雾化温度为 1 600 ℃ 条件下,粉末粒度在 14.45 ~ 71.35  $\mu\text{m}$  范围内,  $D_{50}$  为 39.75  $\mu\text{m}$ ;在雾化温度为 1 650 ℃ 条件下,粉末粒度在 6.01 ~ 97.07  $\mu\text{m}$  范围内,  $D_{50}$  为 14.83  $\mu\text{m}$ 。比较不同雾化温度的粉末粒度分布可知,粉末的中值粒径随雾化温度的升高而降低,由 1 550 ℃ 时的 47.36  $\mu\text{m}$  减小至 1 650 ℃ 时 14.83  $\mu\text{m}$ 。这是因为雾化温度的提高使得金属熔液粘度和表面张力下降,粘度小的流体在雾化气流剪切应力作用下容易被破碎,而表面张力小的液流由于环境对其所做的表面功减小也有利于破碎。此外,雾化温度的提高将导致金属熔液冷却凝固时间的延长,因而其发生形变破碎的时间也相应延长,这也有利于金属熔液的破碎。

图 4 是不同雾化温度条件下所获得的粉末形貌图。由图 4 可见,当雾化温度为 1 550 ℃ 时,在粉末中存在长条和哑铃形粉末颗粒;当雾化温度为 1 600 ℃ 时,粉末球形度高,表面光洁;当雾化温度为 1 650 ℃ 时,粉末中存在近球形和水滴状的大颗粒。当雾化温度较低时(1 550 ℃),金属液滴在发生充分球化前就已经凝固,破碎产生的不规则液滴形成了椭球和长条形的粉末颗粒。随着雾化温度的提高,使得金属液流的粘度和表面张力下降,一方面有助于金属液流的破碎,使得粉末粒度减小,从而提高球形

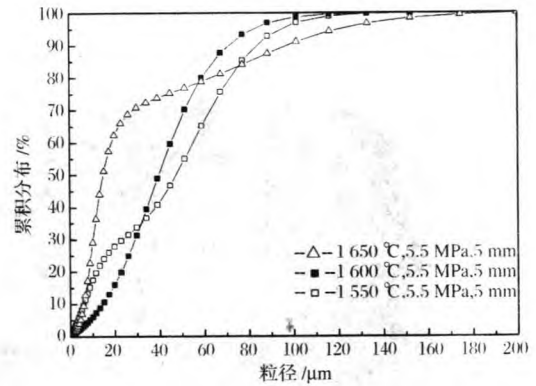


图 3 不同雾化温度制备的粉末粒度累积分布曲线  
Fig. 3 The cumulative distribution curves of powder size prepared at different atomization temperatures

度;另一方面,金属液流粘度的减小使得熔滴的凝固时间延长,从而充分球化。因此,在 1 600 ℃ 时,金属液滴能在冷却凝固的同时发生充分球化,形成球形度高的粉末;如果不与未凝固颗粒碰撞,凝固后的球形粉末的飞行过程能保持其光洁表面和高的球形度。然而,随着雾化温度的进一步提高(1 650 ℃),金属液滴凝固时间较长,一方面,球形金属液滴冷却凝固前受到气流的冲刷、重力作用等外界因素影响而发生形变的可能性也增大;另一方面,金属液滴温度升高,粘度和表面张力随之减小,粘度小的液滴易受气流冲刷、重力作用等外界因素影响而发生形变,表面张力的减小又弱化了液滴的球化作用。这将对粉末颗粒的球形度和表面产生不利影响。

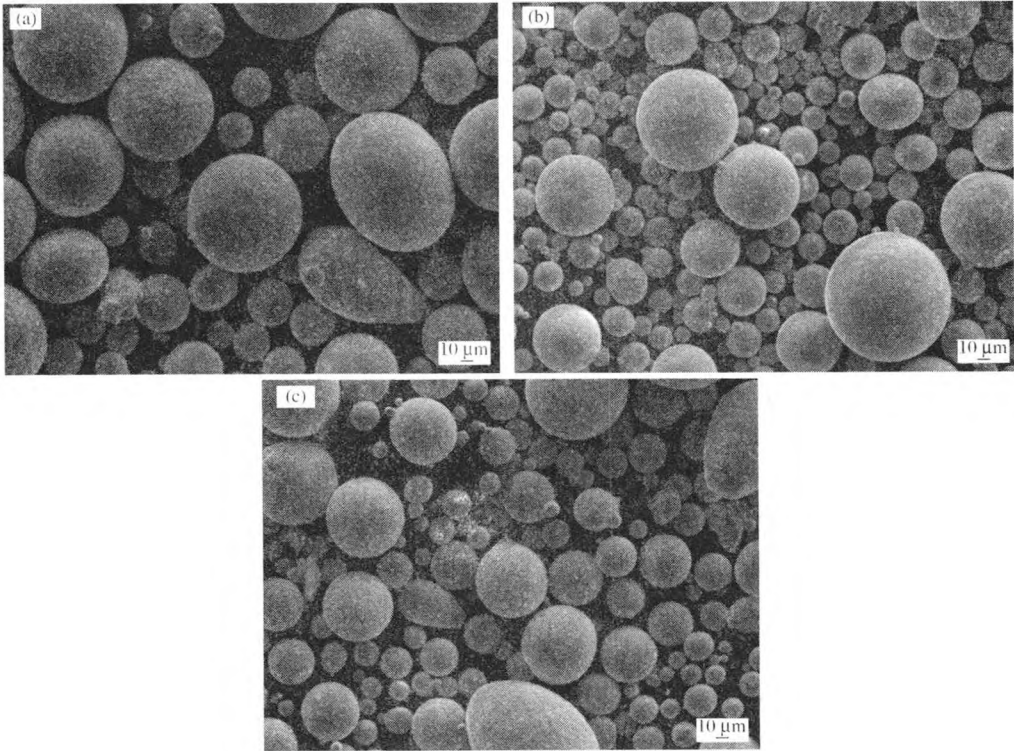
在本研究中,粉末的粒度随雾化温度的升高而降低,虽然 1 650 ℃ 条件下得到的粉末平均粒径比 1 600 ℃ 时小,但粉末中存在近球形和水滴状的大颗粒,而且 1 650 ℃ 接近氧化镁坩埚的使用温度极限(1 700 ~ 1 850 ℃),导致安全系数下降、生产成本增加。因此,实验中较优的雾化温度选择 1 600 ℃。

2.4 漏嘴直径对粉末粒径及形貌的影响

图 5 是不同漏嘴直径条件下所获得的粉末粒度累积分布曲线。由图 5 可见,在漏嘴直径为 4 mm 条件下,粉末粒度在 7.11 ~ 57.25  $\mu\text{m}$  范围内,粉末  $D_{50}$  为 29.07  $\mu\text{m}$ 。与此类似,在漏嘴直径为 5 mm 条件下,粉末粒度在 14.45 ~ 71.35  $\mu\text{m}$  范围内,  $D_{50}$  为 39.75  $\mu\text{m}$ ;在漏嘴直径为 6 mm 条件下,粉末粒度在 5.60 ~ 76.62  $\mu\text{m}$  范围内,  $D_{50}$  为 50.07  $\mu\text{m}$ 。

比较不同漏嘴直径的粉末粒度分布可知,粉末的中值粒径随漏嘴直径的增加而增大,由 4 mm 时

的 29.07 μm 减小至 6 mm 时的 50.07 μm。由于漏嘴直径的大小直接反映了熔体质量流量的大小,显然随着熔体质量流量的增加,粉末粒度增大。粉末平均粒径  $D$  与熔体质量流量的关系如下<sup>[11]</sup>:



(a)1 550 ℃;(b)1 600 ℃;(c)1 650 ℃

图 4 不同雾化温度制备的粉末形貌图

Fig. 4 The surface morphologies of powders prepared at different atomization temperatures

$$D = C \frac{G_m}{G_g} \frac{\sigma_m}{v_g^2 \rho_m}$$

(4)

式中:  $C$  为常数;  $\rho_m$  和  $\sigma_m$  分别为金属熔体的密度和表面张力;  $v_g$  为雾化气体的流速;  $G_m$  和  $G_g$  分别为金属熔体和雾化气体的质量流量。在雾化器喷嘴不变的前提下, 气体质量流量  $G_g$  主要取决于雾化压力。当雾化压力和雾化温度固定时, 根据上述公式, 粉末粒径主要取决于金属熔体质量流量  $G_m$  (漏嘴直径) 的大小, 即可通过改变漏嘴直径来改变粉末粒度。因此, 本实验中粉末粒度随漏嘴直径(金属熔体质量流量)的增大而增加。

图 6 是不同漏嘴直径条件下所获得的粉末形貌图。由图 6 可见, 随着漏嘴直径由 4 mm 增大至 6 mm, 粉末粒度逐渐增大。当漏嘴直径较小时(4 mm), 气流与金属液滴的相互作用强烈, 球形金属液滴冷却凝固前受到气流的冲刷等外界因素影响而发生形变的可能性也增大, 在粉末中存在椭球和哑铃形粉末颗粒; 当漏嘴直径为 5 mm 时, 粉末球形度

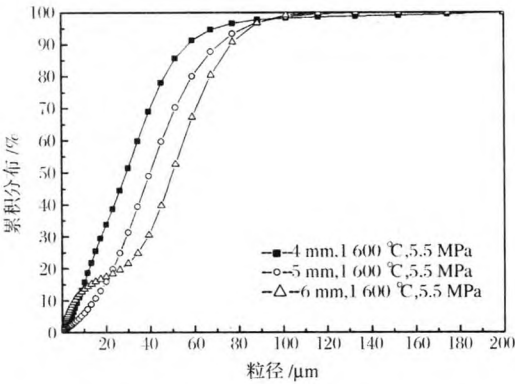


图 5 不同漏嘴直径制备的粉末粒度累积分布曲线

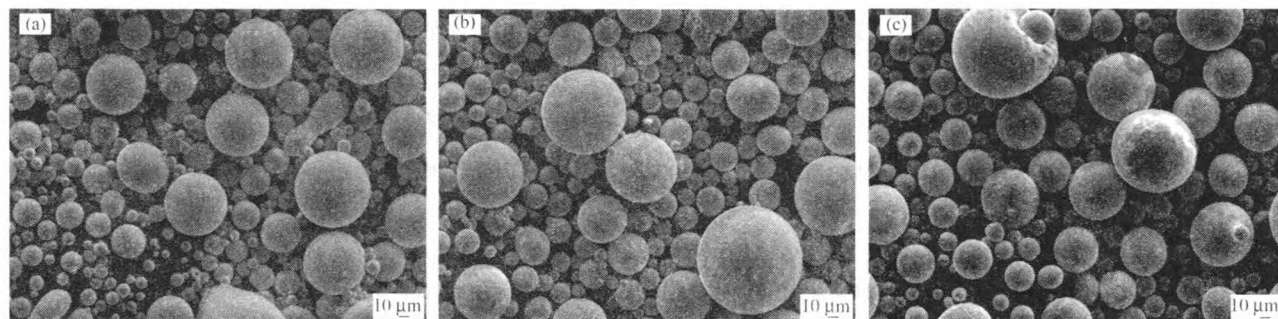
Fig. 5 The cumulative distribution curves of powders size prepared at different nozzle diameters

高, 表面光洁; 当漏嘴直径较大时(6 mm), 气流与金属液滴的相互作用减弱, 金属液滴的破碎不够充分, 粉末中存在卫星球, 表面粗糙。

本研究中, 粉末的平均粒径随漏嘴直径的增加而增大, 而漏嘴直径过小则易导致金属熔体热损失

过大而提前凝固,堵塞漏嘴并阻碍雾化过程的进行。当漏嘴直径减小到 4 mm 时,易出现漏嘴堵塞的现

象。因此,5 mm 是能保证雾化过程顺利进行的最小漏嘴直径,即较优漏嘴直径。



(a) 4 mm; (b) 5 mm; (c) 6 mm

图 6 不同漏嘴直径制备的粉末形貌图

Fig. 6 The surface morphologies of powders prepared at different nozzle diameters

综上所述,实验得到的较优工艺参数为:雾化压力 5.5 MPa、雾化温度 1 600 ℃、漏嘴直径 5 mm。粉末粒度在 14.45 ~ 71.35 μm 范围内,中值粒径  $D_{50}$  为 39.75 μm,粉末球形度高,表面光洁。

### 3 结论

1) 在当前熔炼雾化条件下,制备粉末中的 Si、Ni、Al、Ti 微量元素的成分偏差可控制在  $\pm 0.2\%$  以内,粉末碳含量可低至 0.011%,氧含量低至 0.10%。

2) 随着雾化压力由 4.5 MPa 增大到 6.5 MPa,粉末的中值粒径减小,粉末粒度由双峰分布变为单峰,粉末球形度增大;随着雾化温度由 1 550 ℃升高至 1 650 ℃,粉末的中值粒径显著减小,粉末球形度先增大后降低;随着漏嘴直径由 4 mm 增加至 6 mm,粉末的中值粒径增加,粉末球形度先增大后降低。

3) 实验得到的较优工艺参数为:雾化压力 5.5 MPa、雾化温度 1 600 ℃、漏嘴直径 5 mm,粉末粒度在 14.45 ~ 71.35 μm 范围内,中值粒径  $D_{50}$  为 39.75 μm,粉末球形度高,表面光洁。

### 参考文献

- [1] Shokrollahi H, Janghorban K. Soft magnetic composite materials (SMCs). *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 189 (1): 1-12
- [2] Masumoto H, Yamamoto T. On a new alloy "Sendust" and its magnetic and electric properties. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 1937, 1(3): 127-135
- [3] Yamamoto T, Utsushikawa Y. Effects of Ni content on magnetic properties of a new high permeability magnetic alloy "Super Sendust" in the Fe-Si-Al-Ni system. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 1978, 19(6): 326-334
- [4] Otomo S. Effects of Cr and Ti additions on wear resistance and magnetic properties of Fe-Al-Si alloy. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 1994, 58: 455-460.
- [5] 王伟, 马天宇, 罗伟, 等. Co 添加对快淬 Fe-Si-Al 合金结构及磁性能的影响. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(6): 1081-1084
- [6] 金丹, 孙可为. 工艺参数对铁硅铝磁粉芯性能的影响. *磁性材料及器件*, 2008, 39(4): 62-66
- [7] Takanobu S, Shin-Ichiro Y. Electromagnetic properties of compressed cores with Fe-Si-Al system atomized powders. *DENKI-SEIKO*, 1998, 69(3): 181-187
- [8] Norihiro O, Narito S, Satoshi T. Production of Fe-Si-Al alloy powder with low oxygen content by atomization. *DENKI-SEIKO*, 2003, 74(4): 275-278
- [9] 陈欣, 欧阳鸿武, 黄誓成, 等. 紧耦合气雾化制备 Al 基非晶合金粉末. *北京科技大学学报*, 2008, 30(1): 35-39
- [10] 刘文胜, 彭芬, 马运柱, 等. 工艺条件对气雾化制备 SnAgCu 合金粉末特性的影响. *中国有色金属学报*, 2009, 19(6): 1074-1079
- [11] 朱盼星, 张少明, 徐骏, 等. 气雾化参数对 316L 不锈钢粉末粒度的影响. *粉末冶金材料科学与工程*, 2010, 15(4): 388-393