

非限制式雾化器的 气体动力学分析

赵麦群*

(西安理工大学,陕西 710048)

摘要 对非限制式雾化器的气体动力学过程进行了实验研究,着重考察了喷射顶角、雾化压力对气体雾化过程的动力学影响规律,对其机理进行了初步探讨,并经实验验证,得出了使雾化过程正常进行的关键动力学条件。

主题词 雾化器 动力学

1 前言

雾化器是雾化装置中使雾化介质获得高能量、高速度的部件,也是对雾化效率和雾化过程稳定性起重要作用的关键部件。非限制式雾化器指金属液流可以从漏包出口到雾化介质相遇点之间无约束地自由降落。所有的水雾化器和多数气体雾化器为非限制式^[1]。影响这类雾化器雾化效果的关键结构因素是喷射顶角。喷射顶角大,易获得细的金属粉末,但易堵塞雾化器;反之,喷射顶角小的雾化器雾化过程稳定,但获得的粉末较粗。如何选择喷射顶角就成为雾化制粉工作者进行雾化器设计的关键。作者在生产实际中,曾经对喷射顶角从90°到30°每15°进行过系统的气体雾化铜合金粉试验。本文只对雾化过程从不正常到正常的两个临界喷射顶角的气体雾化动力学过程进行研究。

2 实验方法

雾化器示意图如图所示。依据作者的雾化实践发现,喷射顶角 α 为45°和35°是堵塞和不堵塞的两个临界状态,因此,选择这两种角度的雾化器,测定其中心线上的压力分布

及雾化器中心孔下口部(堵塞首先发生的部位)的压力状态与雾化压力、喷射顶角 α 及补流条件的关系,然后用实际雾化加以验证。采用空气雾化,雾化压力由减压阀控制。压力状态的测定用开口U形水压力计,测压导管为 $\phi 6\text{mm}$ 石英玻璃管。对中心线上的压力,从上至下每隔15mm测一个点;对雾化器下口部定点测定。对每一压力下的每一测点停留时间不得少于120s,当U形水压计稳定后读数。

3 实验结果与分析

图2a,b所示分别是喷射顶角为45°和35°时,自然补流条件下,中心线上的压力状态与雾化压力之间的关系。可以看出,从漏包出口到金属粉末冷却凝固区,压力经历了由较小的负压(或常压)减小至第一负压峰值,再增加到正压峰值,最后又至第二负压峰值,且第二负压峰值的绝对值远大于第一负压峰值。雾化压力的增大只改变峰值的大小,而不改变峰值的位置。比较图2a和图2b,可以看出喷射顶角的大小不但影响峰值的位置,而且改变峰值的大小。即对于小的喷射顶角,正压

* 赵麦群,工学硕士,工程师,主要从事以铜金粉为主的金属粉末研究工作。

收稿日期: 1996.8.26.

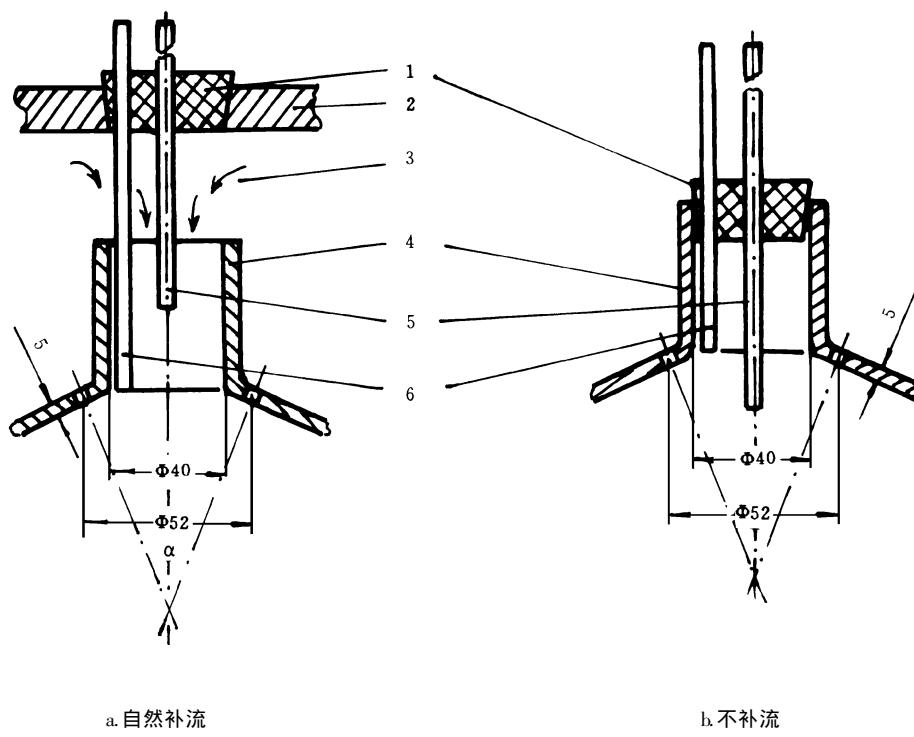


图1 雾化器及测量装置示意图

1.橡皮塞 2.漏包底座 3.补流气流 4.喷咀 5.中心线上的石英测管 6.雾化器下口部石英测管

Fig. 1 Sketch of atomizer and measuring apparatus

峰值点更靠近雾化器下口部,峰值点均向正压方向移动。其原因将在后面讨论。

图3a 3b 分别是不补流条件下,喷射顶角 α 为 45° 和 35° 两种雾化器中心线上的压力状态与雾化压力的关系。与自然补流条件下的关系相似,均出现三个峰值,小喷射顶角的峰值较大。所不同的是,峰值的位置不象自然补流那样落在同一点上,尤其是正压峰值依雾化压力不同而在一个较大的范围内出现,峰值的绝对值也比补流条件下的大得多(负压峰值大 $0.5\sim 1$ 倍,正压峰值大 $5\sim 10$ 倍)。

与限制式雾化器相比,非限制式雾化器雾化过程中的金属液流是靠重力自由下落到雾化点,而不是靠高速气流的吸动效应到达雾化点^[2]。因此,非限制式雾化器中心线上的负压也比限制式小得多。非限制式雾化器中心线上的变化规律是,从漏包出口到雾化器

上口,虽然高速气流形成了很强的吸动效应,但因有充足的气体补充,所以,负压值较小。随着位置愈接近雾化器上口部,气流的补充也愈不好,负压逐渐增大。在雾化器上下口之间,随着补流条件的进一步恶化,负压进一步增大到第一负压峰值,其位置处于雾化器上下口之间偏上的位置。受雾化气体的散射和紊流的影响,使负压从第一峰值开始不断减小,而进入负压紊流区。由于高速射流相撞而产生的散射作用,在原始液滴形成区产生了气体分子的堆积,压力也由负压状态变到正压状态。试验所用的雾化器为环孔式,从每一小孔射出的气流都可以看作射流,其中心线与雾化器中心线交于一点,称为打击点。打击点上下一段小区域称为有效雾化区。随着有效雾化区的接近,所有小孔射流愈接近,对周围气体的卷吸作用愈强,使负压在有效雾化

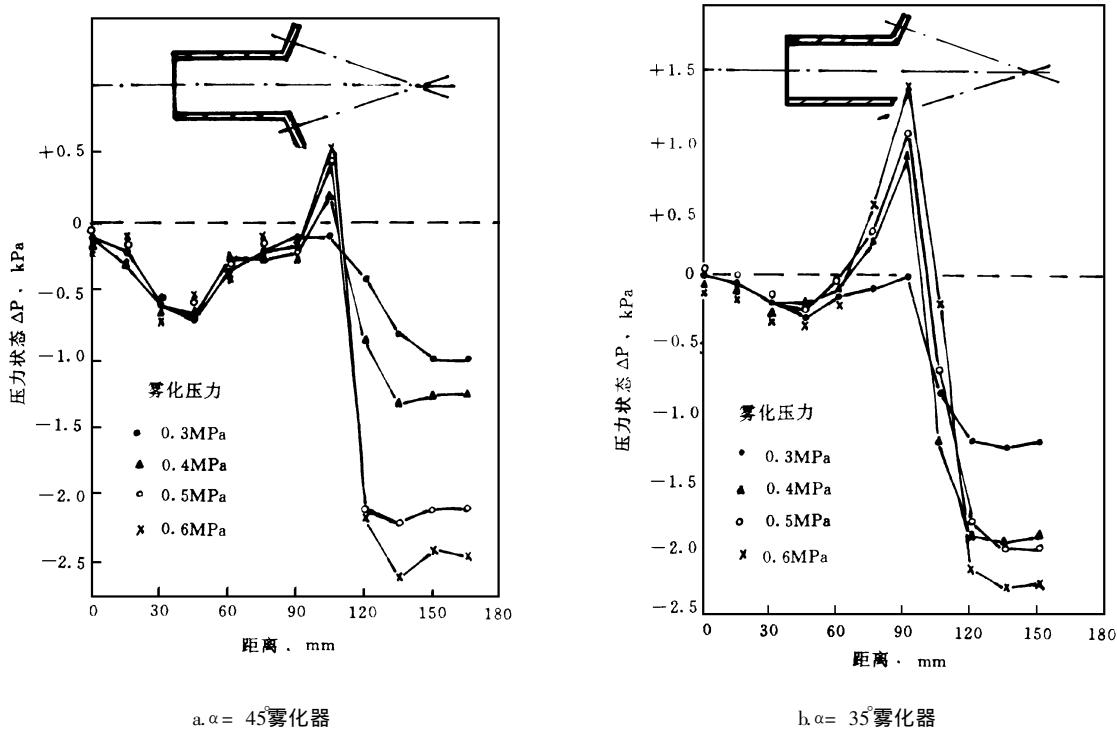


图 2 自然补流条件下,中心线上的压力状态与雾化压力的关系

Fig. 2 Relation between pressure condition of axis and atomizing pressure with gas compensation

区达到第二峰值,且较第一负压峰值的绝对值大得多,甚至在粉末冷却区,负压依然很大。

正压峰值随喷射顶角的减小向雾化器下口部方向移动的现象,所有峰值在小的喷射顶角的情况下偏向正压方向的现象,以及不补流条件下的峰值绝对值变大现象等,可以用气流的散射作用和卷吸作用来解释。射流的卷吸速度与到射流中心线的距离的关系为^[3]:

$$V_e = -0.5503 (J \nu \rho^2 x^2)^{1/3} \quad (1)$$

式中 V_e —卷吸速度, m/s

J —动量通量, $kg \cdot m/s$

ρ —气流密度, $10^3 kg/m^3$

x —卷吸点至射流中心的距离, m

ν —运动粘性系数, m^2/s

负号说明环境气体被卷吸进射流。喷射顶角小,射流中心线与雾化器中心线的距离较远

(环孔所在圆半径相同),则 V_e 越小,因而使射流相撞的散射在环境中的气体分子不能及时清除,而过早地堆积,密度更大,从而具有较大的正压峰值,且正压峰更靠近下口部。在无自然补流时,气体分子得不到充分的搅拌和混合,使正压值比自然补流情况下大得多。同时,也使气体场变得不稳定,峰值范围变宽。

表 3 雾化器下口周边的压力状态与雾化压力、补流条件及喷射顶角的关系。可以看出,此处的压力状态为小于或等于环境压力的负压状态。在补流的条件下,负压大小与雾化压力关系不大;在无补流条件下, $\alpha = 45^\circ$ 时,负压的绝对值随雾化压力的增加而增大。此外,还可以看出,负压绝对值大小与喷射顶角有关,喷射顶角小,其负压绝对值也小,不补流时两种角度雾化器的差值更大。射流是产生负压的根源。由于雾化器下口周边靠近环孔(射流出口),强烈的卷吸作用使该处产

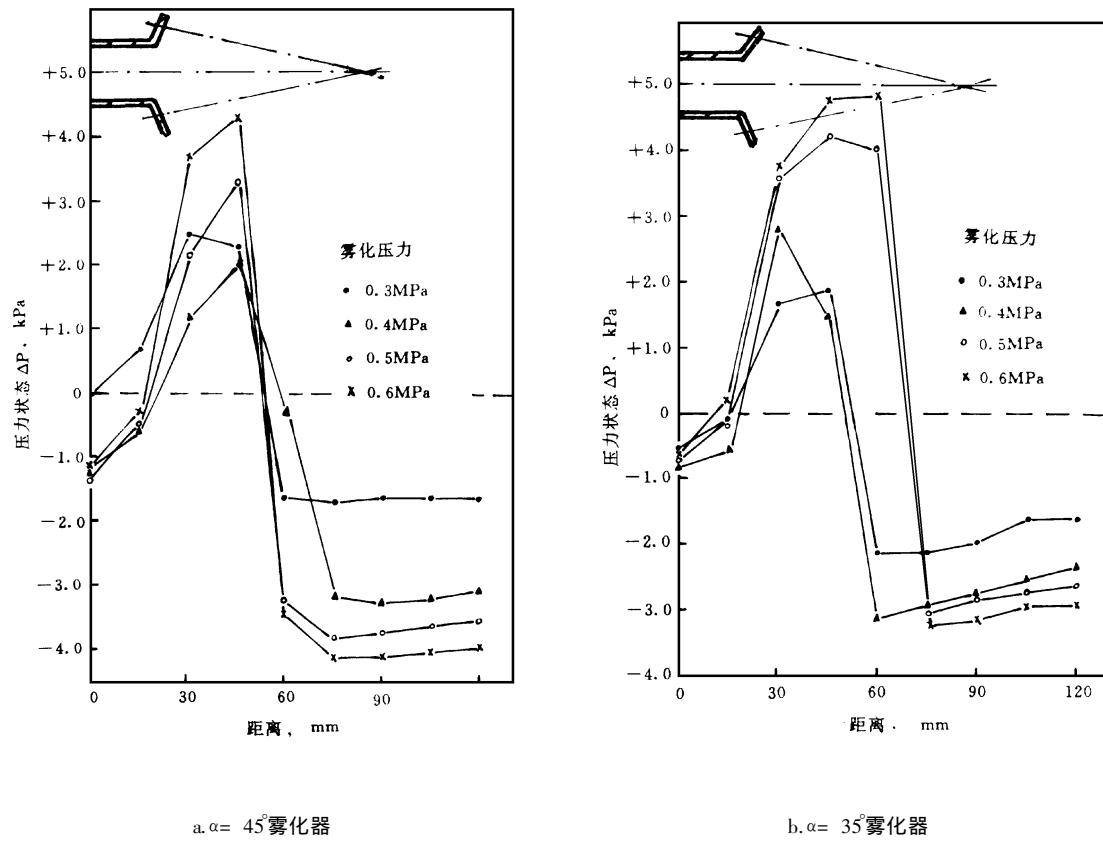


Fig. 3 Relation between pressure condition of axis and atomizing pressure without gas compensation

表 1 雾化器下口周边压力状态与雾化压力、补流条件及喷射顶角的关系

Table 1 Relation between circumferential pressure state of lower mouth of atomizer and the atomizing pressure, compensating flow condition and spray vertex angle

雾化压力 P M Pa	雾化器下口周边的压力状态 ΔP , kPa			
	补流		不补流	
	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 35^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 35^\circ$
0.3	-6	-2.5	-8	0
0.4	-6	-2	-14	0
0.5	-6	-2	-13	0
0.6	-6.5	-3.2	-27	0

生较大的负压;另一方面,负压绝对值的大小还取决于气体的补充和混合程度,雾化器下口周边压力状态与同一高度中心线上的压力

状态相差甚大,即使雾化器下口中心线上的压力状态为正压(见图2b),下口周边亦处于较大的负压状态(见表1),说明了气体的不均匀性和混合程度对压力状态的影响。气体的混合程度由气体的运动状态决定,而气体的运动与射流卷吸产生的气体上下运动的搅拌作用有关。可以将射流分解成垂直射流分量和水平射流分量,由于对称性,射流的水平分量相互对撞并卷吸进的气体散失在环境中,对整个系统气流的混合作用甚小;垂直射流分量因没有对消作用,产生有效的卷吸作用,决定着上下口间气体的运动和混合。当喷射顶角较大时,垂直射流分量较小,气体得不到有效的混合,从而维持较大的负压,并且在无补流时更明显。至于不补流时,小角度雾化

器下口周边负压绝对值较补流时的小,可能是由于吸动效应使气体在上下口间形成自循环。关于这一点,有待于进一步实验验证。

测量雾化器下口周边的压力状态,是因为该处是雾化器堵塞首先发生的地方。雾化实践中发现,自然补流条件下, $\alpha = 45^\circ$ 时,雾化时间不能长,否则就发生堵塞现象,且一般在下口周边有粘附的粉末。但当 $\alpha = 35^\circ$ 时,雾化时间无论多长,从未发生堵塞现象;无补流条件下, $\alpha = 45^\circ$ 时,雾化几乎不能进行,一开始就堵,而 $\alpha = 35^\circ$ 时,雾化却能正常进行。这与表 1 的数据有良好的对应关系,负压的绝对值越大,越容易堵塞雾化器。由此可见,雾化正常进行的动力学条件是雾化器下口周边的负压绝对值要小,在本文的试验条件下, $|\Delta P| < 3.2 \text{ kPa}$ 。从正常雾化的角度来考虑,限制式喷嘴总希望喷嘴口部有较大的负压绝对值^[2,4],而对非限制式雾化器研究甚少,往往认为是涡流的作用形成正压将粉末卷溅到雾化器口部。本次实验结果使我们对正常雾化的动力学条件有了一个全新的认识。有效雾化区是在最大负压区,经雾化的少量粉末随气流的散射作用进入正压区,再被吸附到雾化器下口周边的负压区,负压特别大时,金属液流在紊流区形成的原始液滴也会被吸附到该负压区,由此而引起堵塞现象。

假设吸附粉末或金属初始液滴为片状或盘状,忽略空气的浮力和粉末初始速度的影响,则金属原始液滴或粉末所受的力为: 片或盘两边的压差形成的力促使粉末向雾化器下口周边方向运动; 重力则使粉末离开雾化器方向运动。当压差形成的力大于或等于重力时,粉末或初始液滴才能向雾化器运动和在雾化器下口周边吸附,即满足下列条件:

$$|\Delta P| \cdot S \geq mg \quad (2)$$

式中, $|\Delta P|$ —— 盘或片状粉末两边的压力差的绝对值

S —— 盘或片状粉末的底面面积

m —— 粉末的质量

设片的厚度为 h , 运动方向为 y , 则:

$$|\Delta P| = \left| \frac{dP}{dy} \right| \cdot h \quad (3)$$

式中, $\left| \frac{dP}{dy} \right|$ —— 运动方向上的压力梯度

$$m = V \rho = S h \rho \quad (4)$$

将式(3)和(4)代入(2)整理得

$$\left| \frac{dP}{dy} \right| \geq g \rho \quad (5)$$

式中, ρ —— 被雾化金属的密度

g —— 重力加速度

式(5)为金属粉末或初始液滴向雾化器下口周边运动和吸附的条件表达式,即雾化器下口周边是否会吸附雾化金属,主要决定于该处的压力梯度和所雾化的金属的密度。压力梯度的绝对值越大,金属密度越小,越容易发生吸附粘粉、堵塞雾化器的现象。

下面通过一个算例来说明:

已知: 雾化器下口直径 $D = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$

下口中心线上的压力状态分别为:

$$\overline{\Delta P}(\text{补流}, \alpha = 45^\circ) = -0.2 \text{ kPa}$$

$$\overline{\Delta P}(\text{补流}, \alpha = 35^\circ) = +0.7 \text{ kPa}$$

$$\overline{\Delta P}(\text{不补流}, \alpha = 45^\circ) = +0.32 \text{ kPa}$$

$$\overline{\Delta P}(\text{不补流}, \alpha = 35^\circ) = +0.42 \text{ kPa}$$

(以上数据由图 2 图 3 上量得各雾化压力下的值再取平均值)

雾化器下口周边压力状态由表 1 得:

$$\overline{\Delta P}'(\text{补流}, \alpha = 45^\circ) = -6.1 \text{ kPa}$$

$$\overline{\Delta P}'(\text{补流}, \alpha = 35^\circ) = -2.4 \text{ kPa}$$

$$\overline{\Delta P}'(\text{不补流}, \alpha = 45^\circ) = -15.5 \text{ kPa}$$

$$\overline{\Delta P}'(\text{不补流}, \alpha = 35^\circ) = 0 \text{ kPa}$$

根据两点的压力状态差的绝对值除以两点间的距离得出该两点间的压力梯度的绝对平均值,即:

$$\left| \frac{dP}{dx} \right| = 2 |\Delta P - \Delta P'| / D \quad (6)$$

由式(6)求得两种角度雾化器在补流和不补流条件下,水平方向的压力梯度绝对平均值:

$$\left| \frac{dP}{dx} \right|_{\text{补流}, \alpha=45^\circ} = 2.95 \times 10^5 \text{ N/m}^3$$

$$\left| \frac{dP}{dx} \right|_{\text{补流}, \alpha=35^\circ} = 1.55 \times 10^5 \text{ N/m}^3$$

$$\left| \frac{dP}{dx} \right|_{\text{不补流}, \alpha=45^\circ} = 7.9 \times 10^5 \text{ N/m}^3$$

$$\left| \frac{dP}{dx} \right|_{\text{不补流}, \alpha=35^\circ} = 0.2 \times 10^5 \text{ N/m}^3$$

对铜锌合金, ρ 取 $8.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 则:
 $g \cdot \rho = 8.5 \times 10^3 \times 9.8 = 0.83 \times 10^5 \text{ N/m}^3$

对铝, ρ 等于 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 则:
 $g \cdot \rho = 0.2 \times 10^5 \text{ N/m}^3$

比较压力梯度绝对平均值和 $g \cdot \rho$ 值, 二者相差并不悬殊, 说明对金属初始液滴或粉末的运动, 是重力和压力梯度共同作用的结果。虽然水平方向上的压力梯度并不代表垂直方向的压力梯度, 即不能直接用式(5)进行判断, 但总的的趋势还是符合实验事实的。 $\alpha = 45^\circ$ 时, 雾化不能正常进行, 尤其是在不补流情况下, 雾化几乎不能进行, 从计算结果看, 其压力梯度绝对平均值较 $g \cdot \rho$ 值大得多, 不补流时更大; $\alpha = 35^\circ$ 时, 雾化可顺利进行, 其压力梯度绝对平均值小于或接近 $g \cdot \rho$ 值。水平方向的压力梯度迫使进入下口区的初始液

滴或粉末向下口周边运动, 重力使其向下运动, 结果初始液滴或粉末的运动是一个水平向和垂直向的复合运动, 压力梯度绝对值较 $g \cdot \rho$ 值大得多时, 容易产生粘粉、堵塞现象, 反之, 有利于雾化的顺利进行。

为了验证实验结果, 对两种角度的雾化器在补流条件下, 分别用铝、铜锌合金进行了雾化实验。表 2 是雾化的实验结果 (雾化量 10kg)。为防止粘粉堵塞, 在雾化器下口周边涂以水玻璃石墨涂料, 雾化效果以 55 目粉的百分数和雾化过程中是否出现粘粉及雾化池中掉落的粘接粉圈的个数来评定。粉的粘接位置及形状如图 4 所示。

表 2 雾化实验结果

Table 2 Experimental results of atomization

雾化器	雾化压力	材料	堵塞程度	
			α	M Pa
45	0.5	铝	73.8	粘粉, 6个圈
45	0.5	铜合金	84.2	少量粘粉
45	0.6	铜合金	80.7	粘粉, 9个圈
35	0.5	铝	55.6	无粘粉, 无圈
35	0.5	铜合金	58.6	无粘粉, 无圈
35	0.6	铜合金	66.8	无粘粉, 无圈

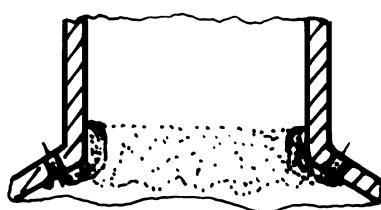


图 4 粉末在雾化器上的粘接位置与形状

Fig. 4 Schematic drawing of the place of sticking powder and the ring of sticking powder

表 2 中的结果进一步证实了雾化正常进行的动力学分析是正确的。 45° 角的雾化器, 由于压力梯度的绝对平均值较 $g \cdot \rho$ 值大得多, 其结果是初始液滴或粉末的粘接是不可避免的; 35° 角雾化器因具有小的压力梯度, 无粉末在雾化器上粘接。

4 结论

(1) 非限制式雾化器的压力分布状态是, 从漏包出口到金属粉末的有效冷凝区, 压力要经历两个负压峰值和一个正压峰值, 且雾化压力不改变峰值的位置, 只改变峰值的大小。

(2) 非限制式雾化器压力峰值的位置和大小受喷射顶角的控制。有补流时,小角度雾化器的正压峰值更靠近雾化器下口部。无补流时,正压峰值位置不集中于一点,而是在一个范围内出现,峰值也比补流时大得多。

(3) 喷射顶角不同,在雾化器下口周边形成的压力状态不同,角度越大,形成的负压也越大,从而形成较大的压力梯度。压力梯度和重力决定了进入雾化下口区金属粉末的运动方向,当压力梯度的绝对值比 $\rho \cdot g$ 值大得多

时,雾化将难以正常进行;当压力梯度小于或接近 $\rho \cdot g$ 值时,雾化可以顺利进行。

5 参考文献

- 1 黄培云.粉末冶金原理.北京:冶金工业出版社,1988. 99
- 2 沈军,蒋祖龄,曾松岩等.气体雾化过程的增压与吸动现象.粉末冶金技术,1994, 12(1): 15~17
- 3 庄礼贤.流体力学.合肥:中国科学技术出版社,1991. 405
- 4 赵麦群,王迪功,孙俊国.铝粉雾化影响因素的研究.粉末冶金技术,1995, 13(4): 268

· 动态·

新型 V3N 模具在粉末冶金上应用获得成功

粉末冶金工业生产中,当生产批量较大时,模具的寿命直接影响产品成本。北京科技大学超硬工模具中心研制的新型 V3N 模具 (W12MoCr4V3N),具有一般合金类模具的韧性,烧结碳化物类模具的硬度和耐磨性,以及优良的综合力学性能,已成功地应用于粉末冶金生产。

V3N 钢是介于高速钢和硬质合金之间的一种超硬高速钢。目前,我国的超硬高速钢系列只有 M2Al, M42, V3N 等几个品种。M2Al 热处理硬度可达 HRC67,但在热处理过程中易产生混晶,韧性不够理想。M42 具有较好的力学性能,但由于 Co 含量较高,因此成本较高,性能价格比不够理想。V3N 钢是一种无 Co 超硬耐磨高速钢,与 M2Al 相比,具有优良的综合力学性能,热处理后硬度可达 HRC69.5,同时保持较好的韧性;与 M42 相比,价格仅为 1/3,但所有的力学性能达到相应水平;与硬质合金相比,综合力学性能接近,但成本仅为 1/4~1/6。

V3N 钢适于用来制造粉末冶金模具。阴模、上下冲头、芯杆在工作时都要承受高压,在与各种粉末的高压力摩擦下,要求有很高的硬度和耐磨性。V3N 钢能很好地满足上述要求,当产品批量比较大时,更能显示它的优越性。除上述零件外,阴模镶块、滑动压垫、滚轮、滚轮芯轴、楔等都可选用 V3N 钢。V3N 钢还可以用来制造粉末冶金挤压模具,如制造挤压糊状陶瓷粉末的挤压杆,用硬质合金成本高,而且难以加工。目前国内选用的是 W18Cr4V 或 W6Mo5Cr4V2,但是挤压杆的螺旋表面磨损严重,寿命短。用 V3N 钢制造易于加工,而且寿命是普通高速钢的 3~4 倍。

〔本刊通讯员〕

Abstract(Selected)

Equation for Predicting the Glass Transition Temperature of Binder Using for Warm Compaction Process Guo Shiju, Lin Tao and Li Mingyi (University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

T_g of binder lubricant will be decreased by addition of plasticizers. This is benefit for reducing warm compaction temperature of powder system. A predicting equation to adjusting T_g was deduced. The rationality of the equation was also discussed.

Key words warm compaction organic binder-lubricant glass temperature

The Investigation on the Static Thermit SHS Ceramic Coating Tong Jianmin and Wang Min (Tsinghua University, Beijing 100084)

This paper investigated the static thermit SHS ceramic coating. The composition, microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of the ceramic coating have been analysed. It is obtained from experiments that adding Re or SiO_2 can improve the microstructure distribution, decreases porosity of coating and enhances its mechanical properties and corrosion resistance.

Key words static thermit SHS ceramic coating

Analysis of the Product of Ball Milling Ti-Ni and Study on Properties of Hydrogen Storage Chen Demin (Shenyang University, Liaoning 110015) Wang Genshi, Song Deying and Niu Guangliang (Nankai University, Tianjin 300071)

The product of ball milling Ti and Ni powders of two kinds of ratio (Ti:Ni= 50:50, Ti:Ni= 65:35) has been investigated by XRD and XPS analyses. It is found that most part of the ball milling product is amorphous alloy. The slightly crystallization is attributed to the high ambient temperature and long milling time. The oxidation of the product's surface is thought to be caused by cleaning the stirring rod and the container during the milling process. The properties of hydrogen storage of the product are studied. It is found that the product is easy to activate. The quantity of absorbed hydrogen increases with increasing Ti content, and there is no plateau over 1 atm in P-C-T curves.

Key words mechanical alloying amorphous alloy Ti-Ni hydrogen storage alloy

Aerodynamic Analysis on Unlimited Atomiser Zhao Maiqun (Xi'an University of Technology, Shanxi 730074)

In this paper, the aerodynamic processes of unlimited

atomiser have been studied. The emphasis is put on examining the influence of spray vertex angle and atomizing pressure on dynamic properties in the atomization. The mechanism has been dealt with and the conclusion has been proved by the experiments. The key condition for successfully atomizing has been given.

Key words atomiser dynamics

SiC Powder Manufactured by Preheating SHS Wang Tiejun and Wang Shenghong (Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

A more comprehensive study has been made on the particle size of SHS SiC powder and its influencing factors. It has been found the particle size of SiC is mainly depended on the particle size of carbon powder regardless of the particle size of silicon powder. On this base, the reaction mechanism of $Si + C$ has been outlined. With preheating SHS technology, by using preset detonator, the ignition apparatus in SHS reaction equipment can be cancelled, thus realizing industrial continuous production.

Key words preheating SHS SiC preheating detonator process

Study on Reaction Synthesis of TiN by Mechanical Alloying Liu Zhijian, Qu Xuanhui and Huang Baiyun (Central-South University of Technology, Changsha 410083)

Nano-structural TiN powder was synthesized with TiH_{1.924} powder in N atmosphere by high energy milling, compared with Ti powder as primary powder, it is shown that the synthesizing rate of TiN will be increased if TiH_{1.924} is taken as a start powder.

Key words reaction synthesis mechanical alloying TiN compound

Forming Method of Non-Coaxial Compact Lu Wimin and Yang Xuanzeng (Central-South University of Technology, Changsha 410083)

The present paper has introduced a method of die forming non-coaxial compact which is hardly formed by normal die forming method. The paper has put emphasis on the introduction of the structural design of die, mechanical calculation, structural characteristics and the action fundamental of the die. Result has shown that the formation of non-coaxial compact can be completed when pressure is given along the axial direction of special-shaped lower punch in a direction of forming angle.

Key words non-coaxial compact formation