

粘度对溶液超声振动雾化颗粒粒径影响规律^{*}

Influence Law of Viscosity by Sizes of Ultrasonic Vibration Atomization Technology Particle Size

中航工业沈阳发动机设计研究所 徐庆泽
沈阳航空航天大学航空航天大学工程学院 蔡晋 李威

[摘要] 超声振动雾化技术是利用高频超声振动将液体雾化的技术,在粉末制备方面具有很高的工业应用前景,但是关于粘度对粒径的影响仍存争议。雾化效果由分布表征,通过研究分布参数与粘度的关系,建立了水溶液粘度与雾化颗粒粒径分布的关系模型。

关键词: 超声振动雾化 粒径分布 滤波算法 粘度

[ABSTRACT] Ultrasonic vibration atomization uses high-frequency vibration to atomize liquid with great potential in the application of powder preparation. While there is still debate on the effect of the viscosity of the liquid on the size of the droplets. The atomization effect is characterized with distribution of the droplets and the relationship between the viscosity and the size distribution is built.

Keywords: Ultrasonic vibration atomization Size distribution of droplets Filtering algorithm Viscosity

1 研究背景

超声雾化是在超声波的作用下液体在气相中分散而形成微细雾滴的过程。超声雾化最早报道于1927年^[1],此后大量研究人员积极地将超声雾化技术应用于各工程领域。20世纪50年代末,超声技术被应用于雾化金属熔液从而制备金属粉末,瑞典的Nilsson等利用带有Hartmann哨的Laval喷嘴产生20~100kHz脉冲超声气流冲击金属液流,成功制备了铝合金、铜合金等材料,这也就是超声气雾化金属粉末制备技术。此后不久,瑞典的Tova^[2]提出了采用电磁装置产生的高频超声机械振动雾化金属熔液的设想,并设计了相关的装置,从此金属超声雾化技术随着功率超声电源及信号跟踪技术、压电陶瓷材料及超声加工技术的进步得以不断发展。超声气雾化技术的应用使气体雾化效果显著提升,但是超声气雾化的能量利用率仍然很低并且需要消耗大量的

惰性气体,而超声振动雾化经过数十年的发展历程已逐步改善成为一种能量利用率高、惰性气体消耗量小而所制备粉末的球形度好、粒度可控、粒度范围窄的金属粉末制备技术。

近年来,金属粉末注射成型、金属粉末激光烧结等新工艺对金属粉末粒度、形貌、成分及提高制备工艺的能量利用率的要求,促进雾化制粉技术不断的发展,而金属超声振动雾化技术恰好符合这种发展趋势,故将在金属制备中得到更加广泛的应用^[3]。但关于超声振动雾化的机理尚不成熟,所用公式多为实验拟合。常用的公式中未考虑粘度因素,而近年甚至有文献关于粘度对雾化颗粒的粒径影响持相反观点。基于表面张力波理论建立的各种模型都是描述液滴粒径平均值与各个物理参数的关系,实际中,液滴的粒径分布在一个比较宽的范围,用粒径平均值不能完整地描述雾化效果。空化理论只是从机理上予以解释,并无定量的描述。文献[1]中,对于低粘度的液体如果超声波强度增加10dB,雾化颗粒粒径减小25%,而对于高粘度的液体,超声波强度从160dB增加到170dB时,雾化颗粒粒径增加33%。文献[4]认为滴颗粒粒径随着粘度的增加而增大,并给出关系式(1),而文献[5]认为液滴颗粒粒径随着粘度的增加而减小,二者结论相反。

$$d = 3.17[\sigma/\rho]^{0.354} \eta^{0.303} Q^{0.139} \quad (1)$$

其中, d 为液滴粒径, σ 为表面张力, ρ 为密度, η 为粘度, Q 为流速。

2 液滴测量模型

液滴粒径测量是进行粘度对雾化颗粒粒径影响研究的必须手段。微细颗粒测量方法的研究由来已久,方法有百余种之多,但是却没有适用于微小液滴的高精度廉价测量方法,本文基于表面张力波理论并结合图像处理建立了微小液滴粒径测量模型。

2.1 颗粒粒径的测量模型

由于本文的所有雾化颗粒都沉积在采样玻璃片上,且工质为液体,沉积后很容易汽化,无法采用沉降法等测量方法。因此,本文建立了一种液滴粒径与其留在玻璃片上的痕迹的关系模型,通过液滴留在纸上的痕迹面

^{*} 国家自然科学基金(51205260),沈阳航空航天大学博士启动基金(13YB12)资助。

积计算出液滴的粒径。

液滴滴在玻璃片上会形成一个凸包,如图 1 所示。顶部的黑色条状是标定指针,眼状的图像为水滴,其中下半部分为上半部分在玻璃片上的倒影,中间白色图像为液滴反光造成的。

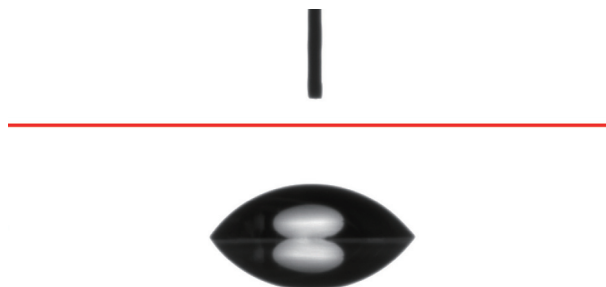


图 1 液滴在玻璃片上的形态
Fig.1 Droplet on the glass

如图 2 为液滴截面简化图。根据表面张力波理论,在液体及承载介质相同时,液滴的接触角相同,并有体积球缺公式,即体积约束条件(式(2))成立^[6-8]。

$$V = \frac{1}{3}\pi R^3(2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)^2 \quad (2)$$

式中, V 为液滴体积, r 为接触面的半径, θ 为接触角, R 为拟合圆的半径。

对于球形的液滴的粒径为:

$$d = 2\sqrt{3V/4\pi} \quad (3)$$

联立式(2)与式(3)得:

$$d = \sqrt[3]{2(2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)^2} R \quad (4)$$

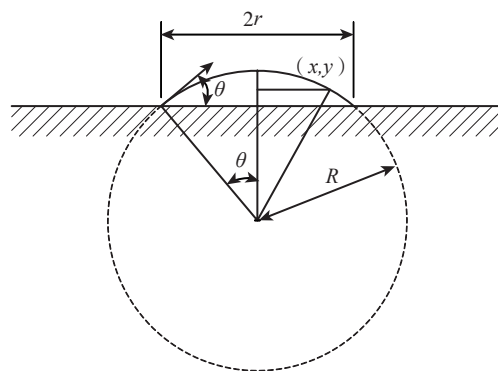


图 2 液滴截面简化图

Fig.2 Schematic of the cross section of the droplet

粒径测量模型中将接触痕迹简化为圆,故有:

$$R = m/\sin\theta = \sqrt{\frac{s_j}{\pi\sin^2\theta}} \quad (5)$$

其中, s_j 为液滴与介质表面接触的面积。

将式代入式中得:

$$d = \sqrt[3]{2(2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)^2} \sqrt{\frac{s_j}{\pi\sin^2\theta}} \quad (6)$$

2.2 液滴接触面积的测量

液滴在玻璃表面的接触面积很小,将玻璃片放到显微镜下进行放大,图 3 (a) 为金相显微镜中观测到的液滴沉积图像,中间较亮的痕迹为标定块,中间的很多斑点即为沉积的液滴。从图中可以看出液滴痕迹并不规则,而且需要测量大量的颗粒。为了方便而准确地测量液滴痕迹的面积,本文采用 Matlab 编程对图像进行批量处理,其流程图如图 4 所示。

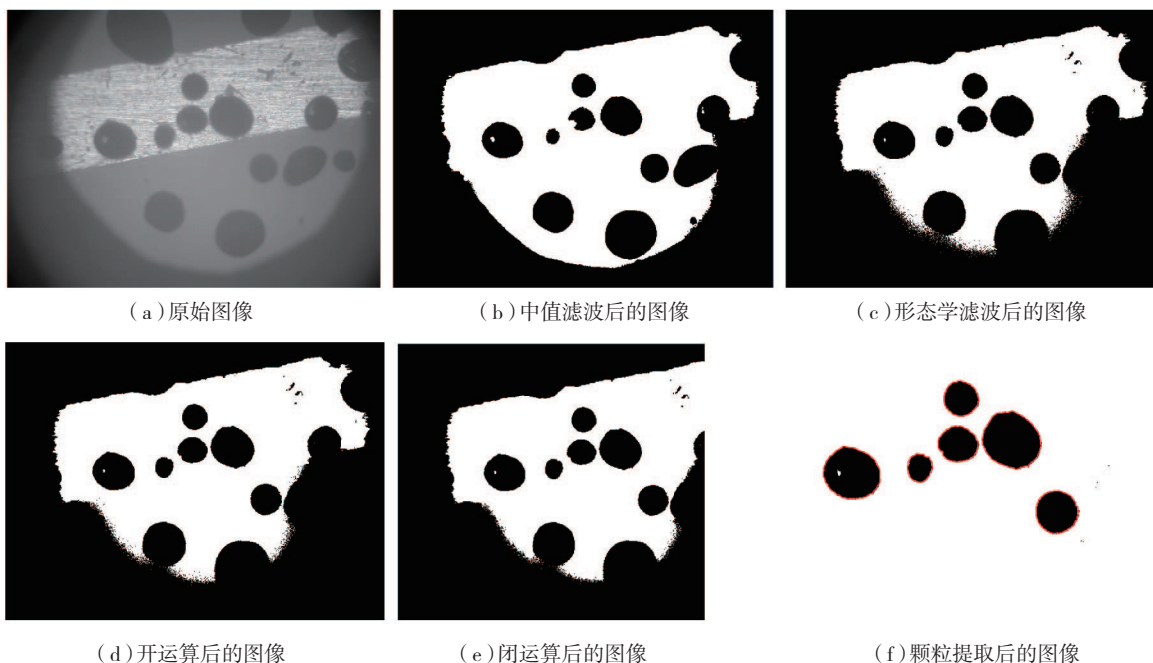


图 3 颗粒提取过程图像

Fig.3 Flow chat of the imagine operations

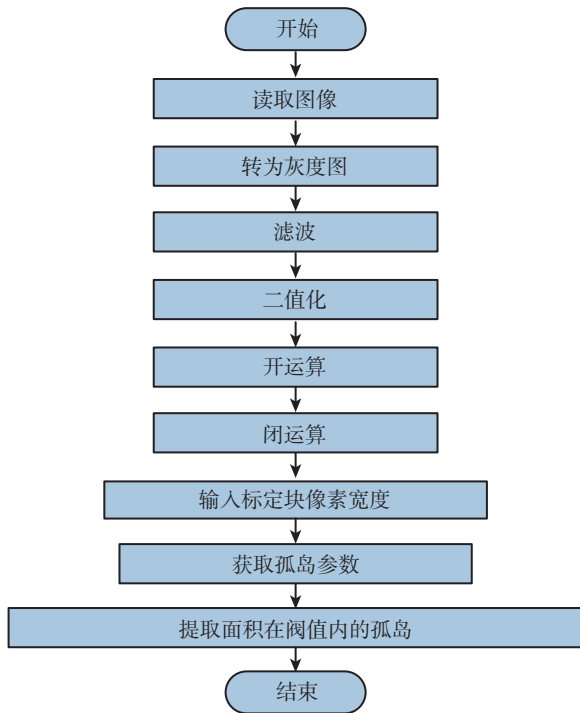


图4 流程图

Fig.3 The process of droplets extraction

图像则与实际边界吻合较好。说明中值滤波会破坏图像的线段,而形态学滤波可以很好地保护图像轮廓,避免轮廓钝化。其原因是中值算法仅考虑了灰度值特性,而形态学滤波则考虑了图像的形态学特征。从图5(a)中可以看出缺陷颗粒出现在标定块上,而在其它区域提取边界则会与实际边界很好地吻合。而且,中值滤波可以提取出更多的颗粒,如图5(a)中提取出了8个点,而图5(b)中只提取出了6个点。为了综合二者的优点,本文将二者的滤波后的图像进行与运算,得到的效果如图5(c)所示,将准确度与效率提高。

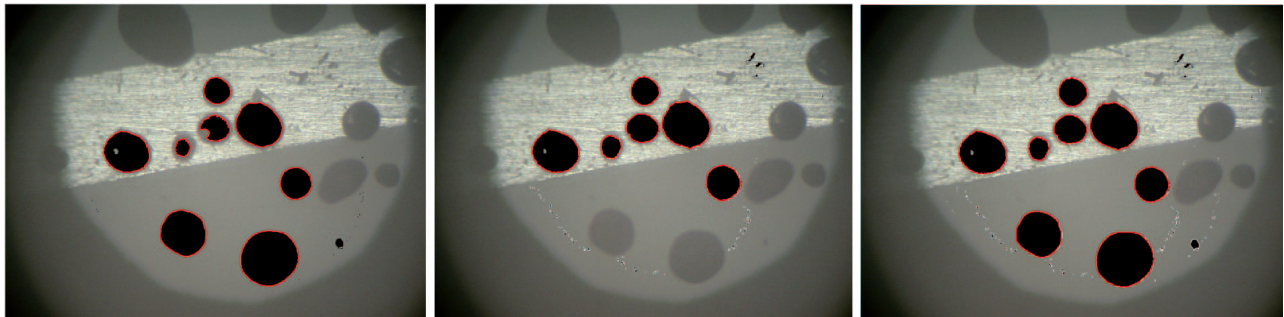
提取出液滴图像后,可以计算出液滴图像的像素面积(每个像素点面积为1),通过测量标定块的图像宽度可以计算出液滴痕迹的实际接触面积。

$$s_j = s_i l_{bj}^2 / l_{bi}^2 \quad (7)$$

其中, s_j 为液滴与玻璃片的实际接触面积, s_i 为液滴的图像面积, l_{bj} 为标定块的实际宽度, l_{bi} 为标定块的图像宽度。

3 粘度与粒径的关系

为了考察雾化颗粒粒径与粘度的关系,本文在墨水



(a) 中值滤波算法下提取的颗粒与原图像的对比图

(b) 形态学滤波算法下提取的颗粒与原图像的对比图

(c) 混合滤波算法提取的颗粒与原图像的对比图

图5 不同滤波算法下的颗粒提取结果对比图

Fig.5 Droplet extraction with different filters

在图像处理过程中直接影响颗粒边界提取效果的是滤波算法。图像滤波,即在尽量保留图像细节特征的前提下对目标图像的噪声进行抑制,是图像预处理中不可缺少的操作,其处理效果的好坏将直接影响到后续图像处理和析的有效性和可靠性。图3(b)为采用中值滤波算法后的图像,图3(c)为采用形态学滤波后的图像,从图中可以看出采用中值滤波算法提取的图像的缺陷大于形态学滤波算法,中值滤波算法提取的边界比实际边界要小,且容易出现凹陷等缺陷。图5(a)和图5(b)分别为中值滤波和形态学滤波提取的颗粒图像与原图像的对比图,从图中可以看出采用中值滤波算法提取的图像偏离实际边界较大,而采用形态学滤波算法提取的

中加入羧甲基纤维素钠以调节溶液的粘度。不同的配比会造成溶液密度的变化,但实验中溶液的密度变化小于3%,故本文忽略密度的变化。

实验中共配制了5种不同粘度的溶液,配比如表1所示。表2为各粘度溶液在不同体积时滴在玻璃片上的接触角测量值,对其做平均处理便得到了特定粘度下的接触角。

将接触角及采样颗粒的面积代入式中便得到了采样液滴的粒径,其统计结果如图6所示。

实验结果表明雾化颗粒粒径在一个较宽范围内分布,不能用单一数值表征某一特定粘度下的雾化颗粒粒径。所以,本文研究颗粒粒径分布规律与粘度的关系。

表1 试剂配方

编号	配方			粘度 / (Pa·s)
	墨水 /ml	水 /ml	羧甲基纤维素钠 /g	
1	300	500	30	0.0255
2	300	500	60	0.0375
3	300	500	120	0.0523
4	300	500	200	0.0834
5	300	500	250	0.0954

表2 不同粘度接触角数据 (°)

体积	接触角				
	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组
1 μl	13.9	18.9	20	23.2	24.2
2 μl	14.5	15.6	21.7	26.5	27.2
3 μl	13.5	12.1	15.3	23.5	25.4
4 μl	14.7	17.3	22.1	20.4	23.2
5 μl	14.5	15	21.1	24.6	26.4
平均值	14.22	15.78	20.04	23.64	25.28

本文共做了5不同粘度的实验,在0.97的置信度下对颗粒粒径分布进行正态分布、γ分布、指数分布、Rayleigh分布及对数正态分布检验。分布检验结果总结如表3所示,从表3中可以看出在所有的粘度组别中均服从γ分布,所以本文考虑粘度与γ分布的关系。

γ分布的密度函数为:

$$f(x; k, \theta) = x^{k-1} \frac{e^{-\frac{x}{\theta}}}{\theta^k \Gamma(k)}, \quad (8)$$

表3 分布检验结果

编号	1	2	3	4	5
粘度 / (Pa·s)	0.0255	0.0375	0.0523	0.0834	0.0954
样本数量 / 个	98	123	87	135	95
正态分布	✓	×	×	✓	✓
γ分布	✓	✓	✓	✓	✓
指数分布	×	✓	×	×	×
Rayleigh分布	✓	×	✓	✓	✓
对数正态分布	✓	×	✓	✓	✓

注:✓表示服从该分布,×表示不服从该分布。

其分布由形状参数k和尺寸参数θ确定,故只要考察各物理参数与k及θ的关系,即可确定其与γ分布的关系。

对k值和粘度进行直线拟合得到如图7所示的直线,并得到:

$$k = -79.22\eta + 16.85 \quad (9)$$

对θ值和粘度进行直线拟合得到如图8所示的直线,并得到:

$$\theta = 0.008\eta + 0.004 \quad (10)$$

4 结论

本文提出用分布参数描述超声振动雾化效果,通过分布检验,确定雾化粒径符合γ分布,并测出了粘度与γ分布形状参数k和尺寸参数θ的关系。同时为了方便低成本地测出液滴粒径,建立了图像法测量雾化颗粒粒

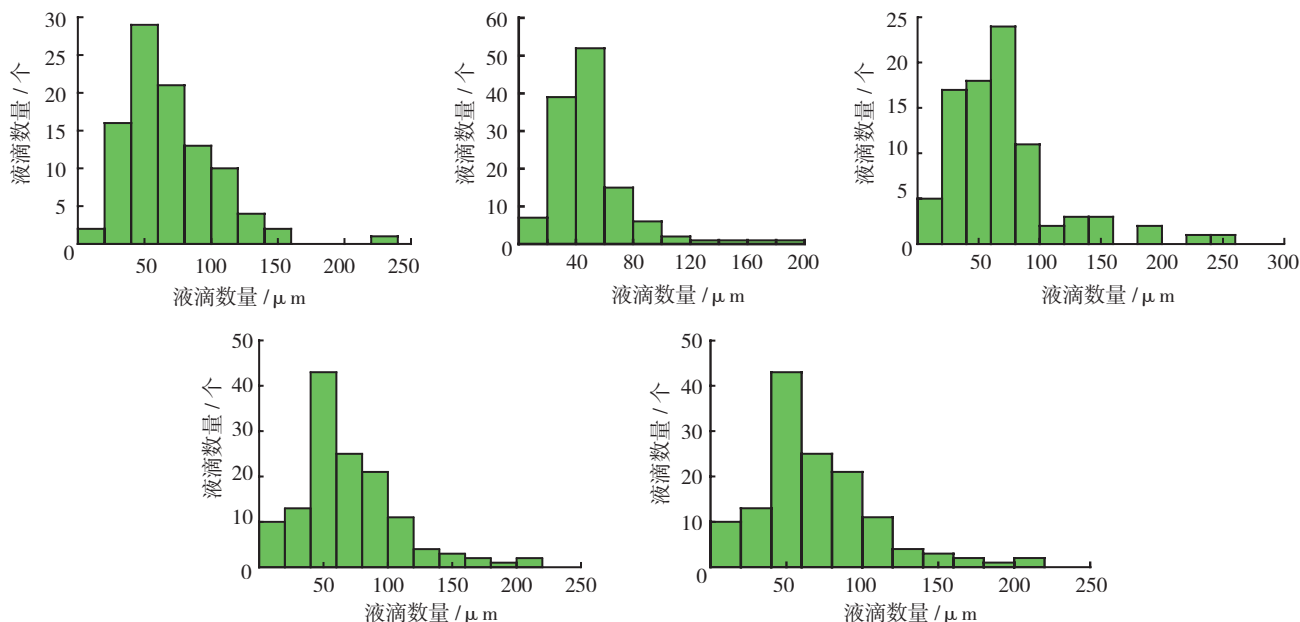


图6 液滴粒径统计图

Fig.6 Statistical charts of the diameter of the droplets

(下转第82页)

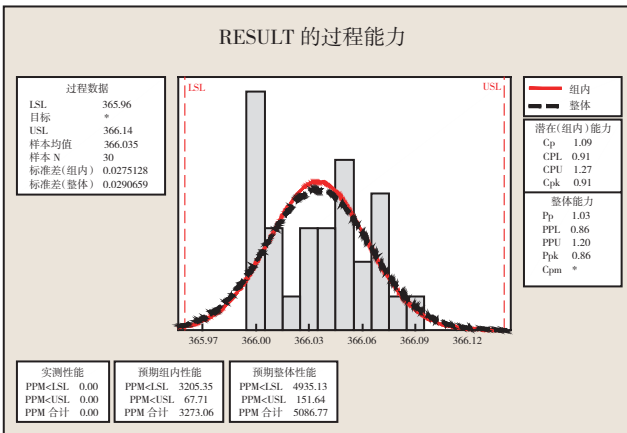
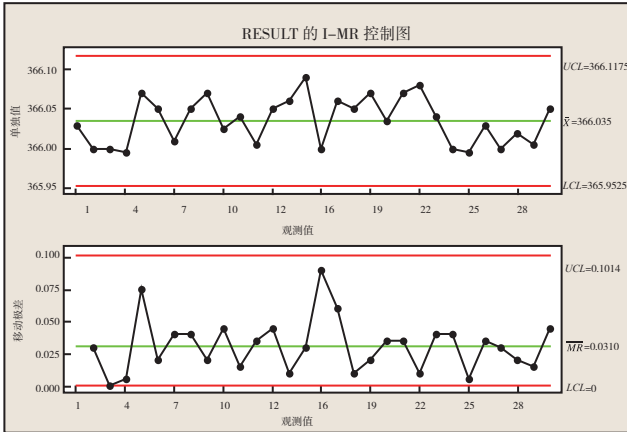


图9 工艺改进后过程能力数据
Fig.9 SPC after processing amelioration

在锻造过程中存在残余应力。在工艺优化后,主要采用了零件在粗加工后进行切断,让残余应力释放后再进行精加工的方法,解决了零件在加工完成后变形较大的难题,零件完全符合设计图的要求,降低了废品率,取得了良好的经济效益。

同时,本文所采用的工艺流程可作为铝半环类薄壁零件制造工艺的借鉴方案,具有较大的应用价值。但在后续工作中,应进一步验证非铝合金材料半环类零件在粗加工后,增加消应力热处理方法能否有效解决零件的变形问题。

参考文献

- [1] 哈尔滨工业大学,上海工业大学. 机械制造工艺学. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [2] 哈尔滨工业大学,上海工业大学. 机床夹具设计. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
- [3] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [4] 王笑天. 金属材料学. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [5] 刘长福. 航空发动机构造. 北京: 国防工业出版社, 1989.

(责编 深蓝)

(上接第 77 页)

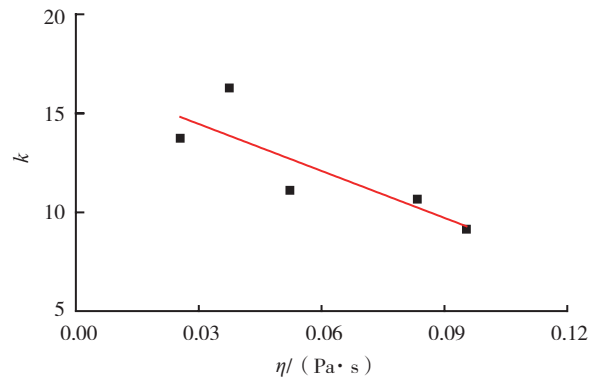


图7 γ 分布下 k 值与粘度的关系
Fig.7 Relationship between k and viscosity under Gamma (γ) distribution

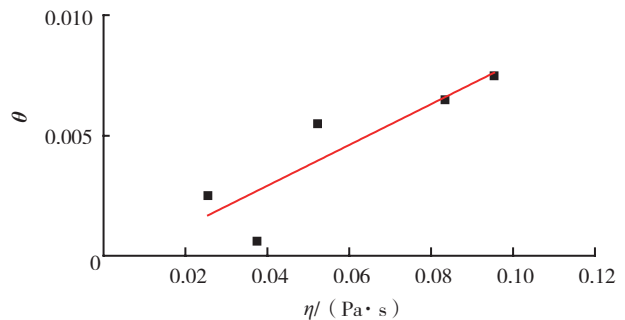


图8 γ 分布下 θ 值与粘度的关系
Fig.8 Relationship between θ and viscosity under Gamma (γ) distribution

径的模型,并将将形态学滤波与中值滤波结合使用提高了图像提取的效率和准确度。

参考文献

- [1] Sears J, Huang K, Ray S, et al. Effect of liquid properties on the production of aerosoles with ultrasound. Ultrasonics symposium proceedings, 1977(8): 131-133.
- [2] Tovapa. Method and device for pulverizing and/or decomposing solid materials, 1962.
- [3] 党新安,刘星辉,赵小娟. 金属超声雾化技术的研究进展. 有色金属, 2009, 61(2): 49-54.
- [4] Rajan R, Pandit A. Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomization. Ultrasonics, 2001, 39: 235-255.
- [5] Avvaru B, Patil M N, Gogate P R, et al. Ultrasonic atomization effect of liquid phase properties. Ultrasonics, 2006, 44: 146-158.
- [6] 崔树稳,朱如曾,闰红. 关于线张力对液滴-固体接触角的影响问题. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4):622-626.
- [7] 吕存景,殷雅俊,郑泉水. 线张力作用下微纳米尺度液滴的非线性粘附. 应用数学和力学, 2008, 29(10): 1135-1146.
- [8] 冯杰,毛健,孟真真. 超声辅助共沉淀法制备的 NiFe2O4 纳米颗粒. 磁性材料及器件, 2011, 6: 27-30.

(责编 亿霖)