

减少铝合金半环零件变形工艺研究

Reduce Deformation of Half-Ring Forging Aluminum Alloy Part

四川成发航空科技股份有限公司 彭绘屏 张亚莉 郑喜华 安全乐

[摘要] 铝合金材料因其密度低、耐腐蚀性能好、抗疲劳性能优异、质量轻等优点在航空发动机中得到广泛的应用。但由于航空发动机零部件公差要求较严格,而铝合金零件在机械加工完成后,由于残余应力的释放使零件变形较大,无法满足使用要求,从而导致该类零件废品率居高不下,造成了严重的经济损失和资源浪费。本文通过试验对比的方法找出造成残余应力产生的主要原因,并通过相应的工艺改进减小了零件的变形,从而满足了零件的使用要求,取得了很好的经济效益。

关键词: 铝合金 零件变形 残余应力 工艺改进

[ABSTRACT] Aluminum alloy was applied widely for aviation engines because of its low density, good corrosion resistance, excellent fatigue resistance performance, light mass and so on. But the tolerance for the components of aviation engines is required strictly, and the parts with aluminum alloy could not meet the usage requirement after machining due to the residual stress release, which caused the part with bigger deformation, thus this led to such kind of parts with high scrap rate, serious economic losses and resources waste. By test comparison method in the thesis, the main reason that caused the residual stress was found out, by relevant process improvement to minimize part deformation, thus met the part usage requirement, and good economic performance was obtained.

Keywords: Forging aluminum alloy Parts deformation Remanent stress Improving process

铝合金不仅具有比重小、塑性高、抗腐蚀、良好的导热及导电性能外,还具有良好的机械性能、物理性能和工艺性能,大多数铝合金都易进行切削。由于铝合金具有工艺性能优良,成形方便,成本低廉等其他合金不能比拟的优点,所以在发动机中得到了广泛的应用。但是,铝合金零件在机械加工后极易产生变形,如何确保它在机械加工后满足设计要求是个制造难题。

某型航空发动机的中压压气机部分为半护罩组件,由两个箍环组合而成^[1],如图1所示。该零件材料为铝合金,成分为Al-2.3Cu-1.5Mg-1.1Ni-1.1Fe。毛料的供

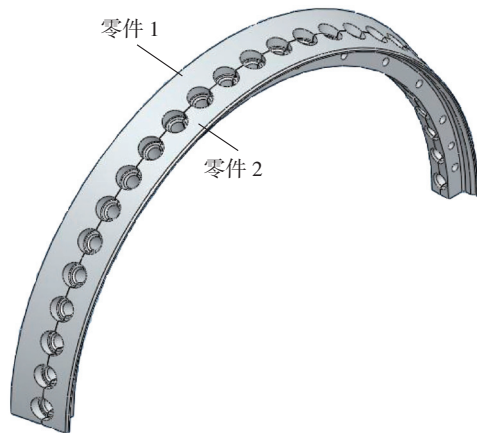


图1 半环组合件三维示意图

Fig.1 3D sketch of semi-ring assembled

应状态和材料处理步骤为固溶处理(温度 530℃,时间 10h)、水淬、沉淀处理(温度 200℃,时间 20h)、空冷。处理后材料的硬度范围为 HB120~140。

该型零件为典型薄壁零件,零件最薄处仅有 1.8mm,如图 2 所示。由于铝合金零件强度较低,在加工完成后由于加工残余应力的释放所引起的零件变形较大。同时该零件设计图要求在零件自由状态下需要满足外锥面交点尺寸①、②和半环间孔的位置度条件①①、①②、①③、①④,导致该零件加工难度较大,废品率较高。

本文通过试验对比的方法,确定了零件在不同加工工艺流程下的尺寸变形量,找到较为理想的加工工艺流程,减小了零件加工后的变形量,提高了零件的成品率和经济效益。

1 零件变形原因分析

该零件的主要成分为铝、铜、镁、铁、镍,属于热强合金,合金中不含锰与铬,无挤压效应,在零件各个方向上的性能较为一致。在该零件加工完成后,由于金属内部相邻组织间发生不均匀的体积变化而产生变形^[2]。体积变化的主要因素来自于零件的热加工与冷加工,主要有以下 3 方面的原因。

(1) 在毛坯制造过程中产生的残余应力。

在锻造及热处理过程中,由于工件各部分热胀冷缩不均匀以及金相组织转变时的体积变化,使毛坯内部产生了相当大的残余应力。当毛坯的结构越复杂、壁厚越

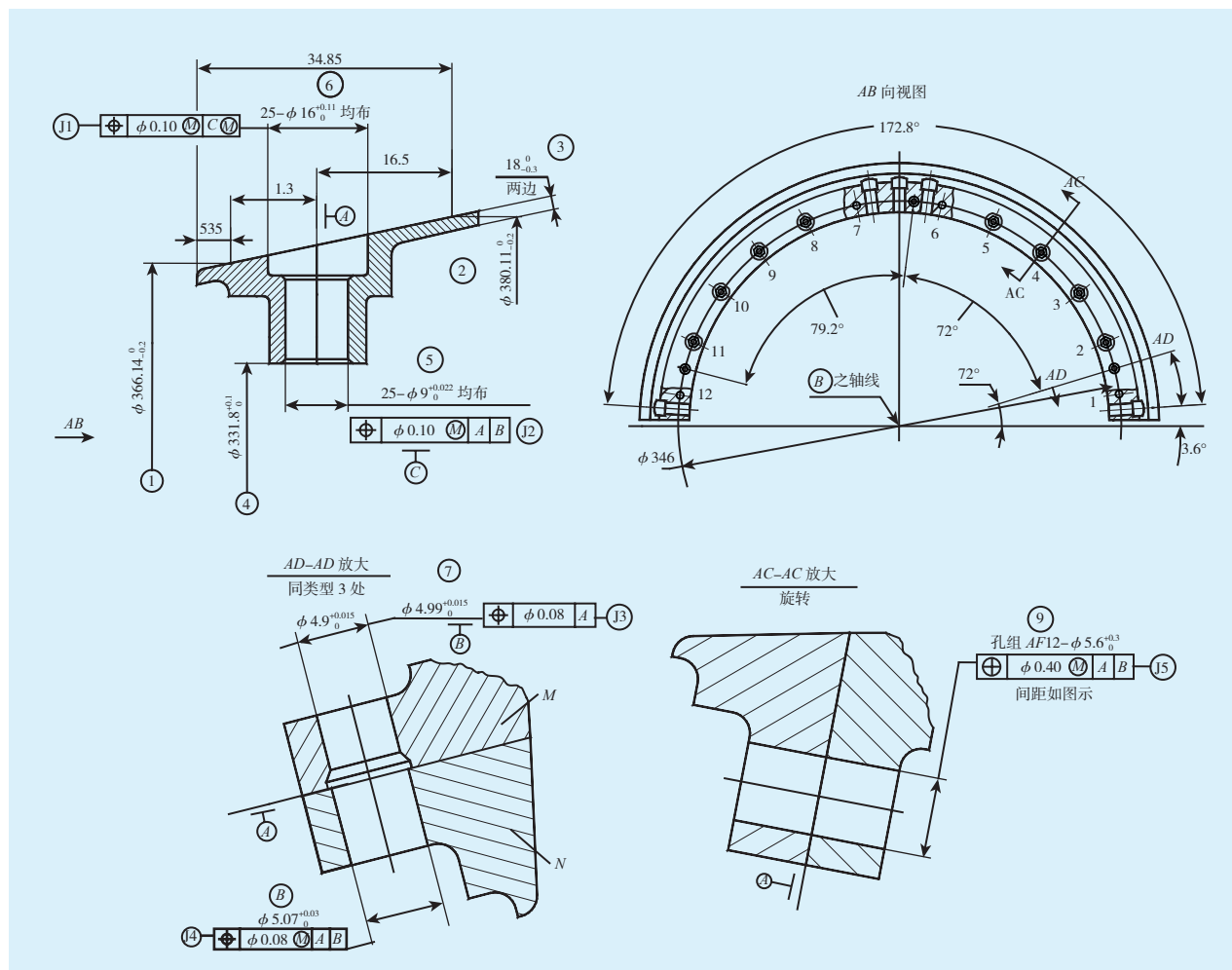


图2 下半环零件交点尺寸和技术条件

Fig.2 Intersection dimension and technical requirement of low ring part

不均匀,则其散热条件差别也就越大,从而在其内部所产生的残余应力也越大。但在毛坯中的残余应力暂时处于平衡状态,变化缓慢,当进行机械加工后,该平衡被打破,残余应力将重新分布,从而导致零件出现明显的变形。

(2)冷校直工艺带来的残余应力^[3]。

零件在冷校直过程中,其校直部位会受到压力的作用,从而使零件产生塑性变形以达到校直目的。但当校直零件恢复自由状态后,由于塑性变形的影响将在零件内部产生残余应力。

(3)机械切削加工中产生的残余应力。

零件切削时,加工表面在切削力的作用下产生强烈的塑性变形,表层金属的比容增大、体积膨胀,但受到与其相连的里层金属的阻止,从而在表层产生残余压应力,在里层产生残余拉应力。同时,大量的切削热会使加工表面产生热膨胀,由于基体金属的温度较低,会对表层金属的膨胀产生阻碍作用,从而在表层产生热压

应力。当加工结束后,表层温度下降要进行冷却收缩,但受到基体金属阻止,从而在表层产生残余拉应力,里层产生残余压应力^[4]。

2 试验对比

由于该零件在加工中并未采用冷校直工艺,所以本文主要针对毛坯的残余应力和切削加工中的残余应力两方面设计试验方案。

(1)方案1。

直接将锻件纵向切断(图3),对比检查零件切断前后尺寸的变化,试验结果见表1所示。

从试验结果可见锻件在制造过程中的残余应力较大,在切断后该零件的直径尺寸增加了1.13~1.22mm,平面度也增加了0.07mm。

(2)方案2。

采用与方案1相同炉批号和锻批号的毛坯加工出设计图要求的零件尺寸和形状,然后纵向切断,检查切

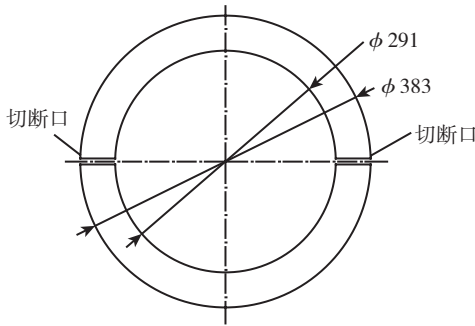


图3 零件切断示意图

Fig.3 Sketch map of cutting out the part

表1 锻件直接切断前后零件尺寸变化情况

零件尺寸	内孔直径 /mm	外圆直径 /mm	平面度 /mm
毛坯设计图尺寸要求	292 ₋₁ ⁰	383 ₀ ⁺¹	<0.05
切断前尺寸	291.84	383.38	0.03
切断后尺寸	292.97	384.60	0.1
尺寸变化量	增加 1.13	增加 1.22	增加 0.07

断前后零件尺寸和形状的变化,试验结果见表 2 所示。本方案主要工艺流程如图 4 所示。

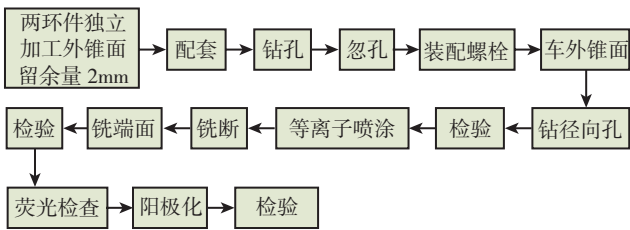


图4 方案2流程图

Fig.4 Flow chart of project 2

表2 零件加工完后进行切断前后尺寸变化情况

零件尺寸	内孔直径 /mm	外圆直径 /mm	平面度 /mm
零件设计图尺寸要求	298.3 ₀ ^{+0.16}	383 ₀ ⁺¹	<0.05
切断前尺寸	298.35	383.31	0.03
切断后尺寸	299.56	384.63	0.12
尺寸变化量	增加 1.21	增加 1.32	增加 0.09

从表 2 中结果可知在零件加工完成后再切断零件,切断后零件直径也同样变大,其尺寸变化量与毛料直接切断时的变化量几乎相同,圆度保持不变。所以,锻造残余应力也在零件切断后得到释放。

(3) 方案 3。

在零件粗加工后进行时效处理(温度 185~195℃,时间 8~12h),然后再将零件纵向切断,检查切断前后尺寸变化,试验结果见表 3 所示。本方案主要工艺流程如图 5 所示。

表3 零件粗加工阶段进行热处理对零件尺寸变化影响

零件尺寸	内孔直径 /mm	外圆直径 /mm	平面度 /mm
零件设计图尺寸要求	298.3 ₀ ^{+0.16}	383 ₀ ⁺¹	<0.05
切断前尺寸	298.39	383.37	0.05
切断后尺寸	299.84	384.87	0.14
尺寸变化量	增加 1.45	增加 1.50	增加 0.09

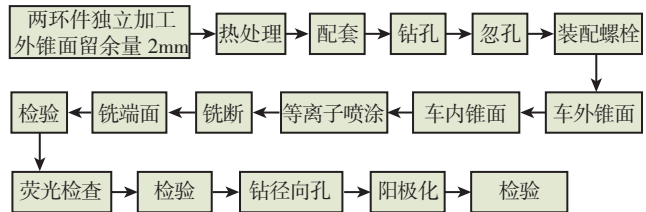


图5 方案3流程图

Fig.5 Flow chart of project 3

从表 3 中试验结果可知,粗加工后进行了时效热处理的零件,在最终精加工完成后的变形量与未进行时效热处理的零件变形量基本一致。因为该零件工艺所选用的时效热处理温度较低,对该铝合金零件基本没有起到消除应力的作用,所以为了减小加工应力对零件的影响,在本零件实际加工中采用自然时效的方法来释放加工应力。

对以上 3 个方案的结果进行对比分析,得到以下结论:

- (1) 毛坯在锻造中产生的残余应力是零件变形的主要原因;
- (2) 切削加工中产生的残余应力对该零件变形的影响较小;
- (3) 该铝合金零件粗加工后的时效处理对零件的变形影响较小。

3 优化后工艺路线

从上述试验可以看出,零件变形的主要原因是由锻造过程产生的残余应力造成的。因此,消除锻造后的残余应力成为优化工艺路线的关键。在零件切成两个半环后大部分的锻造残余应力得到释放,基本完成了残余应力的重新分布。所以合理安排零件加工工艺过程可以有效减少或消除残余应力,同时可以避免多余的加工工艺。将零件切成两个半环工序安排在粗加工后还是精加工后是实施工艺方案的两个方向。

在工艺调整前,零件的毛坯残余应力、切削应力、等离子喷涂应力等都是最终切断工序才得以重新分布,导致零件的最终变形量较大。而在工艺调整后毛坯残余应力、等离子喷涂的应力等在精加工工序前由于铣断工序使得残余应力得以重新分布,再通过铣断后的精加

工工序来控制零件尺寸最终满足设计图纸要求。因此,本文将零件的精加工调整到切断成半环之后可有效减小零件变形。

优化后的工艺路线采用在精加工之前先将两零件整环件独立加工,仅将零件组合相配面基准 A 加工至设计要求,其余进行粗加工,不钻孔。粗加工后给精加工留 2.5mm 余量,大于零件切断后变形量。优化后采用的精加工流程如图 6 所示。

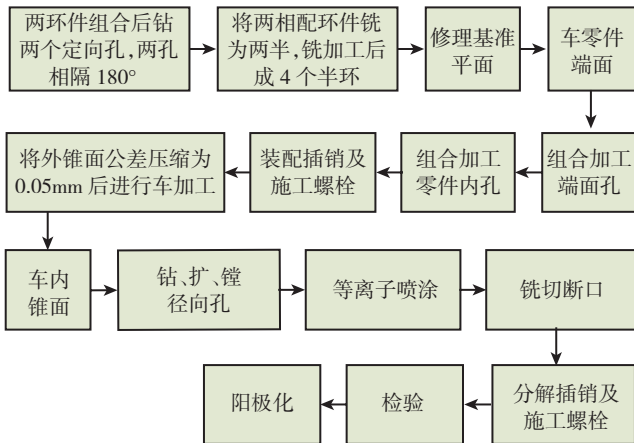


图6 优化后零件精加工流程图
Fig.6 Finish machining flow chart after optimizing

4 装夹方式对精度的影响

改进前的零件装夹方式为大端面支撑,小端面采用 6 个压板压紧零件,由于未在角向采用定位,定位支撑点的数目少于 6 个,属于不完全定位方式,从而造成零件的装夹变形较大,对加工精度有影响。改进后采用内孔基准 C 和定位销定位,压板压紧的形式装夹零件。改进后零件的 6 个自由度全部被夹具的定位元件所限制,在夹具中占有完全确定的唯一位置,实现了完全定位,从而使零件装夹变形小,保证了加工精度。定位销位置如图 7 中所示的 2 个 6# 孔,装夹零件前先找正夹具基面与基圆跳动不大于 0.02mm,定位销跳动不大于 0.01mm。加工零件前需分别找正上、下半零件外锥面 a 与 a' , b 与 b' 处对点跳动不大于 0.05mm,零件与夹具的贴合面 0.03mm 塞尺不过。加工前采用与切口宽度相同的垫片塞紧对开面间隙 C ^[5]。

5 改进前后过程能力数据对比

工艺改进前过程能力原始数据如图 8 所示。零件设计尺寸为 $\phi(366.04 \pm 0.10)$ 。改进前抽检 30 个零件,该尺寸只有 6 个零件合格。从图 8 中看出,零件尺寸分布区间在 365.5~366.5 之间,80% 的零件尺寸超出图纸要求。

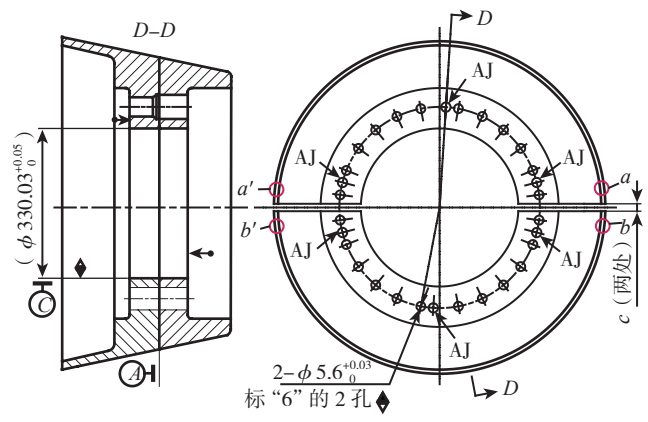


图7 零件装夹示意图
Fig.7 Part Loading Sketch

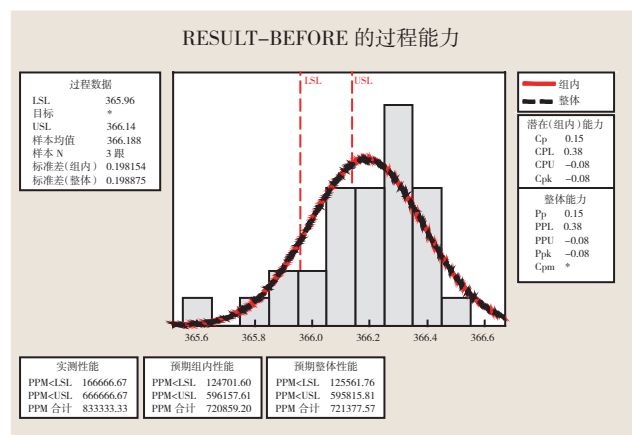
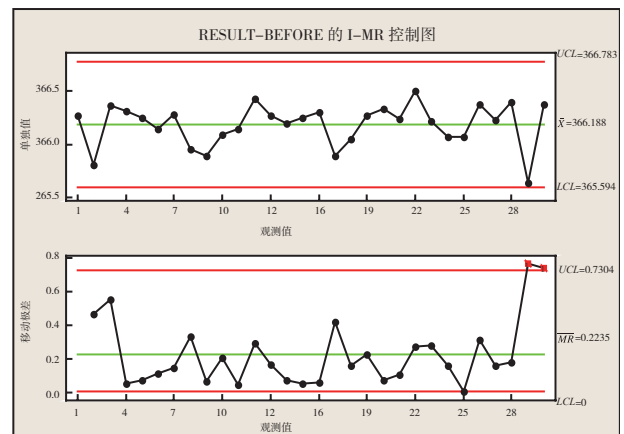


图8 工艺改进前过程能力数据
Fig.8 SPC before Processing Amelioration

工艺改进后过程能力原始数据如图 9 所示。零件的设计尺寸为 $\phi(366.04 \pm 0.10)$ 。改进后抽检 30 个零件,从图 9 中看出,所有零件尺寸全部合格。均在图纸要求范围内。

6 结论

通过试验,可知零件变形的根本原因在于零件毛坯

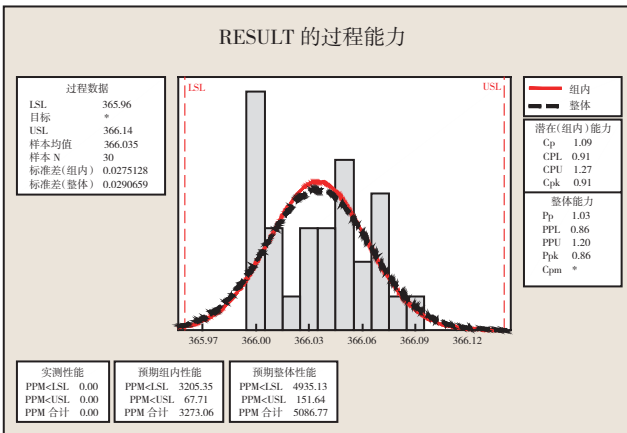
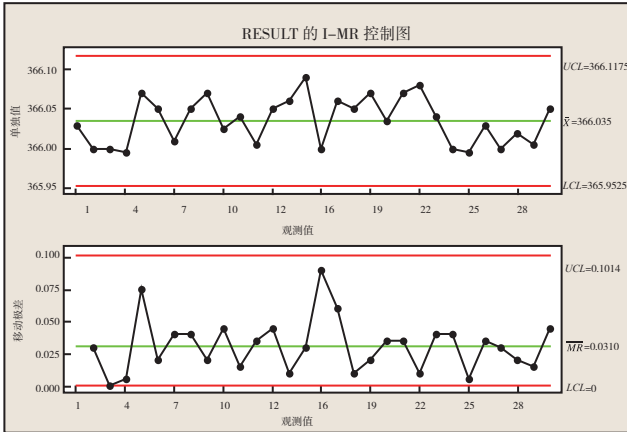


图9 工艺改进后过程能力数据
Fig.9 SPC after processing amelioration

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)

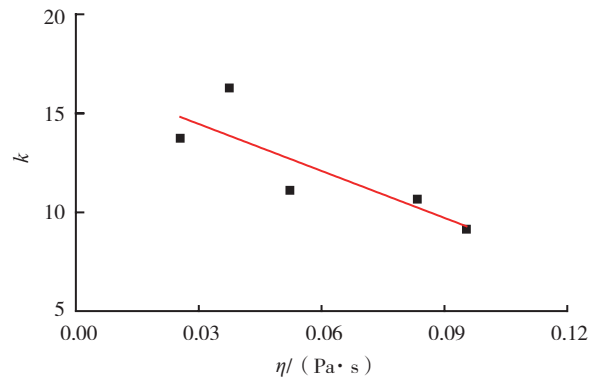


图7 γ 分布下 k 值与粘度的关系
Fig.7 Relationship between k and viscosity under Gamma (γ) distribution

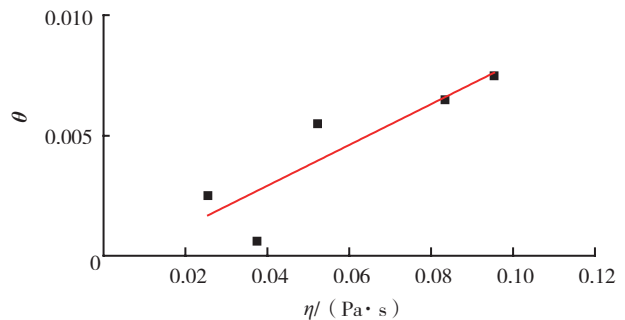


图8 γ 分布下 θ 值与粘度的关系
Fig.8 Relationship between θ and viscosity under Gamma (γ) distribution

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 aerosols 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)