

超塑性微挤压尺度效应有限元模拟与分析

Finite Element Numerical Simulation and Analysis of Superplastic Micro-Extrusion Size Effect

西北工业大学机电学院 孙敬 杨方 齐乐华

[摘要] 针对超塑性微挤压工艺的特点,利用有限元方法建立微挤压模型。以制件在微小尺寸下尺度效应的特征为基础,通过挤压力、等效应力分布以及流动网格的变化模拟分析尺度效应对微挤压过程的影响,为微小零件挤压成形的深入研究提供必要的信息与指导。

关键词: 超塑性 尺度效应 微挤压

[ABSTRACT] According to the characteristics of superplastic micro-extrusion, micro-extrusion finite element model is built. The influences of size effect are simulated and analyzed by extrusion pressure, effective stress distribution and the changes of flow grid, on the basis of size effect of parts at micro dimension. Through this study, the necessary information and guides are provided for the further research of extrusion of micro-parts.

Keywords: Superplasticity Size effect Micro-extrusion

微细塑性成形是指成形零件尺寸至少有两维在毫米以下的塑性加工^[1]。随着军事、医疗器具、航空航天、电子及机电系统等行业的发展以及对各类轻、薄、短、小产品的需求,相关的金属零部件也不可避免地日益趋向微细化。微锻造、微冲压等金属微细成形技术成为目前塑性成形工艺新的发展方向。

超塑性挤压成形作为一种近净成形技术,在难加工材料及复杂结构件的加工生产中具有其他加工方法无法比拟的优点。该方法具有材料利用率高、产品质量好、成本低等特点,为零件成形、超塑性试验研究提供了一种方便的手段。

对于制备微型零件的微挤压工艺,坯料尺寸处于微米量级,存在强烈的尺度效应,极大地影响了挤压成形过程。本课题利用 DEFORM 有限元软件,通过对微挤压过程的数值模拟,揭示材料的变形规律,并针对材料的摩擦及流动不均匀现象讨论尺度效应对微挤压工艺及成形零件质量的影响,为微挤压试验提供理论指导。

1 超塑性挤压成形工艺

金属在超塑性状态下具有延伸率大和流变应力小

的特点,金属超塑成形所需的压力只相当于普通压力加工时的几分之一到几十分之一。利用金属的这种特点设计出了超塑性挤压系统(如图1所示),已实现了小型零件的制备,并且为进一步研究微型制件奠定了基础。

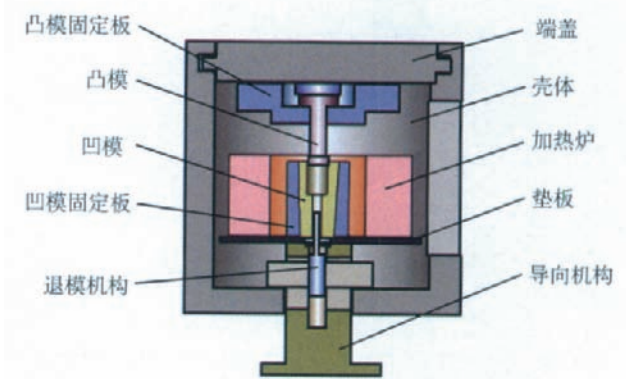


图1 超塑性挤压系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of superplasticity micro-extrusion structure

为了实现微小型零件成形,达到微挤压试验的目标,本研究将坯料尺寸微小化,选取制件尺寸为 $\phi 0.6\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。但此时已不能将微成形过程简单地理解成宏观成形的等比微型化,因为在具体的微成形过程中,材料的成形性能、变形规律以及摩擦状态均出现特殊的变化,即呈现出尺度效应,因此分析讨论微尺寸下的尺度效应对微成形工艺具有重要意义。

2 超塑性微挤压工艺的数值模拟

随着产品的微型化,材料的力学特性与宏观尺度下的力学特性有很大不同,那些在宏观加工中与尺度无关的力学量,在微尺度下表现出强烈的尺度效应。

2.1 受尺度效应影响的材料特性

微细塑性成形工艺由于制件尺寸微小化,不可避免地存在尺度效应问题,使得微观领域的成形规律不同于传统的塑性成形,例如流动应力随着坯料尺寸的减小呈现出下降的趋势^[2];坯料与模具的摩擦成为成形过程中重要的影响因素^[3-4];构成坯料的晶粒数目减少,呈现出各向异性,材料流动出现不均匀。本课题以数值模拟的

方法近似地反映超塑性微挤压的成形规律,揭示尺度效应在该工艺中的影响。

2.2 有限元模型的建立

利用 DEFORM 有限元软件,采用轴对称模型进行有限元模拟,根据其对称性,将模型简化为轴对称问题来处理,以坯料轴线为中心取其一半作为研究对象,如图 2 所示,主要包括冲头、坯料和凹模 3 部分。

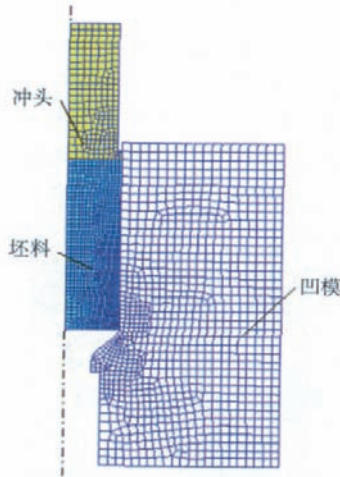


图2 挤压实心棒料对称有限元模型

Fig. 2 Symmetric finite element model of solid bar stock

模拟按照以下条件进行:(1)选取 7075 铝合金作为超塑性微挤压模拟材料;(2)坯料为直径 0.6mm、高 1mm 的圆柱形棒料;(3)冲头、凹模定义为刚性体,挤压过程中模具不发生变形,不会破坏,挤压比为 4:1;(4)坯料温度、模具温度及环境温度均为材料的最佳超塑性温度 475℃;(5)坯料网格划分数为 1000,且网格畸变较大时自动重新划分网格;(6)坯料对称面上的点施加径向约束,使其沿法向的速度为零;(7)冲头下移速度为 0.001mm/s。

3 数值模拟结果及分析

3.1 摩擦尺度效应

由于坯料尺寸微小,表面积与体积之比增大,所以表面效应增强,这是导致材料产生尺度效应的主要原因^[5],因此作为主要表面作用力的摩擦力成为影响微挤压工艺的重要因素。

图 3 分别是摩擦系数 f 为 0、0.4 和 0.8 时挤压力随冲头下移时间变化的示意图。由图 3 中挤压力的变化趋势,可以把变形过程分为 3 个阶段:填充密实阶段、稳定挤压阶段和挤出结束阶段。填充密实阶段,坯料在压力的作用下充满凹模的楔形腔,金属的变形抗力及剧烈的摩擦使挤压力近似于直线上升;稳定挤压阶段,金属

开始流出模孔,挤压力达到最大值并处于较稳定状态;挤出结束阶段,挤压筒内金属体积减少,与凹模壁面接触面积减小,使得挤压力最终下降。

由图 3 可以看出,当摩擦系数 f 为 0 时,由于没有摩擦的阻碍,挤压力最大值仅有 50N 左右,全部用来克服金属的变形抗力^[6];摩擦系数为 0.4 时最大挤压力为 80N 左右;随着摩擦系数增大到 0.8,挤压力也迅速增大至 120N 左右,此时作用在冲头上的挤压力除了克服金属的变形抗力之外,有近 2/3 是用来克服挤压过程中产生的摩擦阻力的^[7]。因此,在微挤压成形工艺中,提高模具和坯料的表面质量以及添加适当的润滑剂有利于减小摩擦尺度效应对挤压过程及成形零件质量的影响。

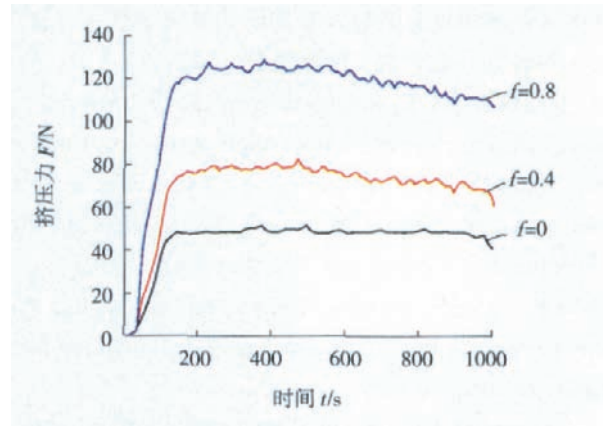


图3 不同摩擦系数情况下挤压力-时间示意图

Fig. 3 Schematic of extrusion pressure-time at different friction coefficients

图 4 为挤压不同时间步坯料的等效应力分布图。由图可以看出,随着时间步的增加,最大应力值也在增大。在挤压进行到第 310s 时最大应力值达到 138MPa,如图 4 (d) 所示,应力主要集中在材料流入凹模的圆角区域,在该区域材料受到剧烈挤压,是材料进入工作带前的集中变形区。坯料的上部存在一个小应力区,且随着挤压的进行逐渐减小。这是因为材料与挤压筒接触存在摩擦,靠近筒壁的材料流动困难,而心部的材料流动容易,且流动速度较快,最终在制件的末端可能会产生凹陷。

在坯料上选取 3 个质点 P_1 、 P_2 和 P_3 作为跟踪对象,位置如图 4 (a) 所示,分析它们在挤压过程中的应力变化,如图 5 所示。由图 5 可以看出,挤压开始阶段,坯料受到挤压力的作用,等效应力迅速上升。 P_3 在第 28s 其应力达到最大值,随后开始迅速下降;而 P_1 、 P_2 两点的应力分别继续上升至第 85s 和 119s 时达到最大,之后迅速下降。由图 4 (a) 中 3 个点的位置可以看出, P_3 位于坯料中部,基本不受摩擦的影响,因此流动速度很快,流出模口后仅沿流动方向作刚性平移,应力趋于零;由

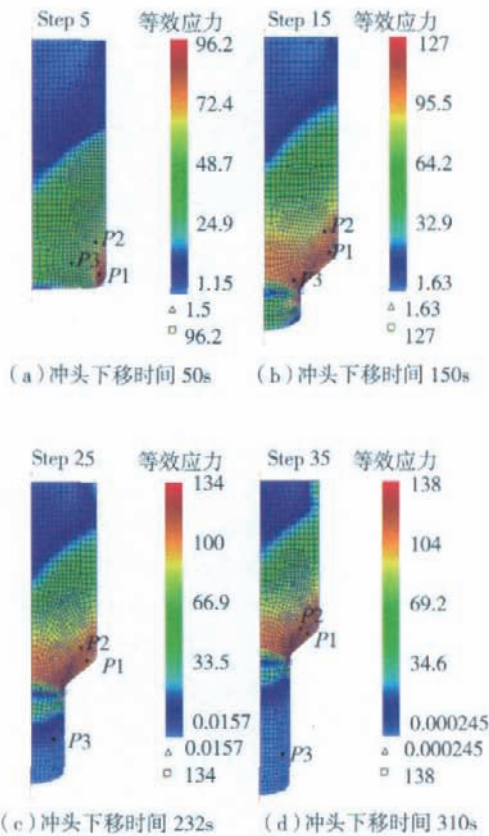
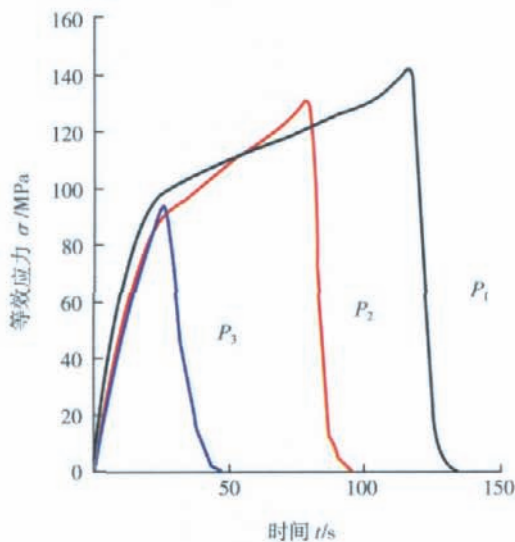


图4 不同时间步坯料的等效应力分布图

Fig. 4 Effective stress distribution of billet at different time steps

图5 坯料上3个质点在挤压过程中的等效应力变化曲线
Fig. 5 Equivalent stress curve of 3 points on billet during extrusion

于 P_1 点处于凹模圆角处,受到挤压筒壁的摩擦比 P_2 点更加剧烈,变形更严重,流动速度也更慢,因此 P_1 点最后流出凹模模口。

3.2 金属流动不均匀尺度效应

由于真实的晶粒流动模拟困难,本文采用“网格追踪”法^[8]来近似反映挤压过程中晶粒的流动特性。图6所示为不同时间步的坯料流动网格变化分布图。

坯料尺寸处于微观尺度,构成坯料的晶粒数目减少。在这种情况下,单个晶粒的形状、尺寸、取向等对坯料整体变形的影响增大,呈现出各向异性,材料流动出现不均匀。从图6可以看出,晶粒在材料流动过程中不断发生转动,并且不同位置处晶粒的转动是不同的。由

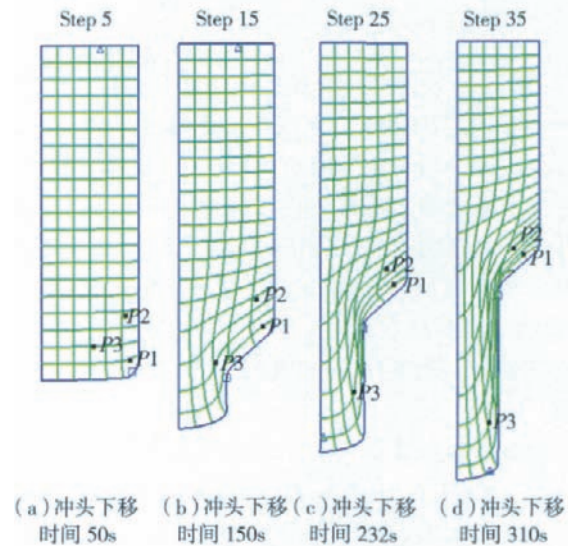


图6 坯料流动网格随时间变化的分布图

Fig. 6 Distribution map of flow grid changes with time

坯料上3个质点所在的网格分析, P_3 点所在网格在流动时仅产生较小的变形和小角度的转动,如图6(b)所示。而 P_1 和 P_2 点所在的网格受到挤压发生严重畸变,为了使金属能够顺利流动,网格产生很大的转动,从横向变为纵向,如图6(d)所示,使滑移方向与受力趋于一致,从而加剧了材料流动的不均匀。

4 结论

(1)建立了超塑性微挤压的有限元模型,通过数值模拟研究发现,微细成形中摩擦力对成形的影响尤其突出。当摩擦系数增大时,挤压力也在增大,其中大部分是用来克服摩擦对材料流动的阻碍的;应力主要集中在材料流入凹模的圆角区域,此处的材料流动困难,而心部的材料流动容易,最终在心部会产生凹陷;材料呈现出各向异性,出现流动不均匀现象。

(2)尺度效应的影响使得挤压力仅有普通压力加工的几十分之一,有利于挤压过程的进行。但是摩擦阻力的增大和金属流动不均匀都会导致零件的质量下降,甚至产生缺陷。因此模具与坯料需要有很高的表面质

(下转第95页)

面加工,零件设计要求及加工状态如图4所示。

零件的外圆尺寸为 $\phi 116\text{mm}$,最终加工到尺寸 $\phi 105 \pm 0.1\text{mm}$ 。该零件加工过程中我们采用了 17° 的小弧面扇形电极,每次加工都以 0.3mm 的进给量进行一周分段伺服加工,以 72° 为起始角度旋转加工到 360° 停止加工,共加工18周。第1周,由于使用新的电极没有产生炭黑层及存在毛刺尖点等影响,加工时间略长,约为 75min ;第2周及第3周加工时间分别为 40min 和 35min ,后15周平均加工时间为每周 30min ;加工整个零件所用时间大概为 10h 。

3 试验结论

通过工艺试验以及对试验结果的分析,确定了电火花蜂窝磨分段成型加工工艺方法的优势,优化了工艺参数,突破了传统工艺的束缚,在原先只能进行工件内径连续磨削的电加工设备,通过转变控制方式、结合计算机系统控制和优化工艺参数,完成了实体零件外形面的成型磨削加工,使航空难加工材料因硬度高、结构特殊而造成的机加工刀具损耗大、周期长的技术难题有了一个合理的解决方案。经检测该方法所加工的零件外形面尺寸及表面粗糙度均达到图纸要求,目前该工艺方案已应用于某发动机轴承油气封严圈零件的生产,并取得了良好效果,单件可降低成本近万元,每年可创造效益百万元。但目前存在的问题是设备数控化、柔性化程度低,建议在设备工作台上增加周向伺服进给和轴向精确分度功能,则可进一步扩展设备功能,大大提高设备利用率。相信随着工艺的日臻完善,该项技术将会在航空发动机制造领域得到更加广泛的应用。

参考文献

- [1] 曹凤国. 电火花加工技术. 北京: 化学工业出版社, 2001.
(责编 泰山)

(上接第75页)

量,以及添加适当的液体润滑剂,以利于提高产品的质量。

(3) 数值模拟作为一种有效的仿真工具,能够近似地模拟并直观地显示出材料变形情况及金属流动特性。这不但降低了实验成本,而且对微挤压工艺的设计和参数优化具有指导意义。同时也是提高产品质量的基础,最终为微小零件挤压工艺的深入研究提供必要的信息与指导。

参考文献

- [1] Geiger M, Kleiner M, Eckstein R, et al. Microforming. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2001, 50(2): 445-462.

[2] 申昱, 于沪平, 阮雪榆. 流动应力下降尺度效应的数值模拟. 上海交通大学学报, 2006(10):1667-1670.

[3] Engel U, Eckstein R. Microforming—from basic research to its realization. Journal of Materials Processing Technology. 2002, 125-126: 35-44.

[4] Tiesler N E U. Microforming—effects of miniaturization. Metal Forming. 2000: 355-360.

[5] 王世明, 彭林法, 来新民. 微挤压成形工艺仿真建模与分析. 机械制造, 2006(9):23-25.

[6] 赵亚西, 童国权. 微型齿轮挤压成形. 模具工业. 2006(11):32.

[7] Saotome Y. Superplastic nanohydroforming of bulk metallic glasses and the application to micromachines. 2003.

[8] 黄晓慧, 王广春, 赵国群. 正向挤压成形均匀性的有限元仿真. 锻压机械, 2001,36(3):11-13.

(责编 淡蓝 岩石)

(上接第89页)

各节点成员的库存水平显著低于效率型供应链系统,可以节约大量资金。总体而言,反应型供应链中各节点通过信息共享可使供应链获得较低的库存数量。近年来,市场环境变化越来越剧烈,企业间只有有效合作,才能在保证服务水平的前提条件下降低整体库存水平。供应链管理思想虽然实现了一体化,但在实施过程中,必须有效利用信息通过信息系统形成的供应链网路,可以在满足顾客需求服务水平情况下,将传统生产方式中的不确定因素造成的库存量有效降低,提升企业的竞争力。此外,还需要进一步讨论将原材料供应商纳入供应链的情况,这样对企业更具指导意义。

参考文献

[1] 马士华, 李华焰, 林勇. 平衡记分法在供应链绩效评价中的应用研究. 工业工程与管理, 2002, 7(4): 5-9.

[2] Ballou R H. 企业物流管理——供应链的规划、组织和控制. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[3] 徐贤浩, 马士华. 供应链关键绩效评价指标及优化. 华中理工大学学报, 2000, 28(3): 30-32.

[4] Stephens S. The Supply Chain Council and the Supply Chain Operations Reference (SCOR) Model. Logistics Spectrum, 2000, 34(3): 16-18.

[5] 叶春明, 马慧民, 李丹, 等. BP神经网络在供应链绩效评价指标中的应用研究. 工业工程与管理, 2005(5): 37-43.

[6] 胡晓燕. 基于供应链绩效评定的物流成本评价体系研究. 武汉理工大学学报, 2003, (10): 687-692.

[7] 余锦华, 杨维权. 多元统计分析与应用. 广州: 中山大学出版社, 2005.

[8] Dallas E Johnson. Applied Multivariate Methods for Data Analysts. Duxbury: Thomson Learning, 1998.

[9] 赵林度. 供应链与物流管理: 理论与实务. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[10] 李贲春. 供应链绩效评价指标体系与评价方法研究. 管理工程学报, 2004(1):104-105.
(责编 岩石)