

# 楔横轧变形过程中内部空心缺陷 产生机理的模拟研究\*

刘桂华 任广升 徐春国 蒋智 沈智  
(北京机电研究所 北京 100083)

**摘要:** 利用 Deform-3D 软件对楔横轧变形过程进行了三维有限元模拟仿真, 得到了三维变形状态下轧件内部应力、应变场的全部信息和材料的流动形态, 揭示了在整个变形过程中轧件内部应力应变状态及其历史演化过程, 进而对楔横轧内部空心缺陷产生的机理做出了明确的阐述。

**关键词:** 楔横轧 三维有限元模拟 应力应变状态 内部空心缺陷

**中图分类号:** TG156

## 0 前言

楔横轧作为高效节材的轴类锻件成形和提供精确预制坯的主要手段之一, 在汽车、农机、工程机械、矿山机械、电机、铁路机车、军工车辆及舰船等行业有着广泛的应用。楔横轧件通常作为传动部件承受繁重交变的工作负荷, 工作环境对零件的性能要求很高。同时, 作为一种正处于上升发展阶段的新兴工艺, 其应用领域亦在不断地发展扩大。因此, 提高楔横轧产品的质量, 特别是改善其组织性能, 预防内部缺陷的产生, 既是楔横轧理论研究和工艺发展的客观要求, 又是生产实践中迫切需要解决的课题。

为了提高楔横轧产品质量, 国内外研究者做了大量的工作<sup>[1~4]</sup>。其中, 参考文献[1,2]主要是针对提高产品尺寸精度和几何精度所作的工作; 参考文献[3,4]在楔横轧内部缺陷的产生机理和工艺参数对其影响规律等方面进行了理论分析和试验研究, 一些研究者甚至建立了楔横轧中心开裂的上限法模型。但是这些研究多数是定性的解释, 少数是在近似的条件下, 进行的定量研究。迄今为止, 仍未对内部空心缺陷产生的机理从力学及材料流动本质特点上做出明确的解释。其主要原因是楔横轧复杂的三维变形及其在材料内部的发生发展过程缺乏强有力的研究手段。

计算机技术的发展, 为楔横轧理论研究提供了有利的手段。利用数值模拟和物理模拟相结合的方法, 已有研究者对楔横轧动态变形过程进行了模拟仿真并进行了试验验证<sup>[5]</sup>, 这些研究工作对深入认

识楔横轧变形过程中的材料流动规律、力学特性等具有重要的意义。

利用计算机模拟仿真技术, 建立了楔横轧变形的系统模型, 对其变形的全过程进行了三维数值模拟, 得到了楔横轧轧件内部应力、应变场的全部信息, 准确把握了轧件内部的应力、应变分布特点及材料流动规律, 从而解释了楔横轧内部空心缺陷产生的机理。

## 1 楔横轧内部空心缺陷

### 1.1 楔横轧变形过程中的内部空心缺陷

楔横轧工艺应用中的一个重要问题就是轧件内部的曼乃斯曼缺陷。曼乃斯曼缺陷是轧件内部金属在变形过程中产生疏松及其发展而形成的孔洞, 一般在轧件的中心部位出现, 称为中心开裂, 又叫做内部空心缺陷。

图1即是楔横轧轧件在实际生产中产生的内部空心缺陷。在张应力作用下, 轧件在塑性变形的同时产生塑性疏松, 这是一个微孔的形核、长大和聚合, 形成裂纹的过程。当裂纹达到临界尺寸时, 失去稳定, 然后“爆破”般地发展, 在轧件中心沿着轴向产生宏观破坏。

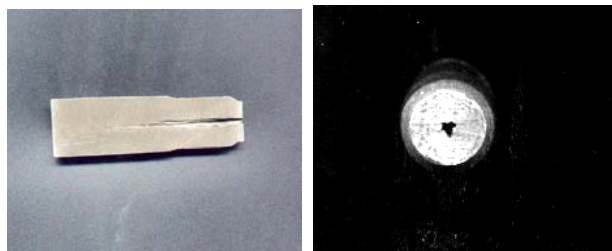


图1 楔横轧实际生产中产生的内部空心缺陷

\* 国家自然科学基金(50175039)和国家攀登 B 预选基金(95-子-42)资助项目。20030224 收到初稿, 20030819 收到修改稿

1.2 横轧实心圆坯内部孔隙形成的机理

目前关于二辊轧制过程中轧件内部空心缺陷产生的机理，主要是关于横轧实心圆坯产生内部孔隙的解释，归纳起来有以下 3 种观点<sup>[6]</sup>。

(1) 第一种解释是以德国的 E.Siebel 为代表的切应力理论，认为中心撕裂是轧件中心受交变的切应力作用的结果。

(2) 第二种解释是以斯米尔诺夫为代表的三向拉应力理论，认为轧件的中心破裂是由于中心金属受拉应力作用的结果。

(3) 第三种理论为综合应力理论，认为轧件的中心破裂是由于中心部分金属受交变切应力和很大的拉应力作用的结果，大都属于延性断裂。轧件在异名应力场的作用下不断旋转加工，轧件中心部分金属受不断增大的交变的切应力和横向拉应力作用。

然而，上述有关曼乃斯曼破坏的解释都是在简化条件下，即径向压缩量比较小，当作平面应变、小变形情况下得出的试验结论。在实际生产中，楔横轧不仅在径向有很大的压缩量，而且金属沿轴向也有较大的变形。这样从平面应变状态得出的研究结果，用于解释楔横轧工艺中产生的曼乃斯曼破坏是困难的。

2 楔横轧内部应力应变场数值模拟

2.1 模拟方案

以直径为 30 mm，材料为 45 钢的圆柱坯为原料，建立了楔横轧系统模型，用 Deform 三维有限元软件模拟了下表的工况下的楔横轧变形过程(表中  $\alpha$  为成形角， $\beta$  为楔展角， $\Delta h$  为压下量， $\eta$  为断面缩减率， $D$  为轧件直径， $b$  为变形宽度， $\theta$  为轧制温度)，得到了轧件内部应力、应变场的全部信息及材料的流动规律。

表 楔横轧模拟工艺、变形参数表

| 成形角<br>$\alpha/(\text{°})$ | 楔展角<br>$\beta/(\text{°})$ | 压下量<br>$\Delta h/\text{mm}$ | 断面缩<br>减率 $\eta/\%$ | 轧件直径<br>$D/\text{mm}$ | 变形宽度<br>$b/\text{mm}$ | 轧制温度<br>$\theta/^\circ\text{C}$ |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 25                         | 8                         | 11                          | 60                  | 30                    | 30                    | 1 150                           |

2.2 轧件应力、应变场数值模拟结果

图 2、3 为轧件内部等效应力应变场数值模拟云图。从轧件内部等效应力、应变场分布云图看，轧件内部等效应力、等效应变由外至内逐渐减小，靠近轧件表面的应力、应变大，内部即轧件的心部应力、应变小，表明了轧件表面变形大于内部和心部的变形。

图 4 为轧件内部最大主应力云图。从图 4 中看到，轧件在内部及不与模具接触的两侧区域内，主应力大于零，表明在这些部位轧件所受主应力是拉应力。而在轧件与模具接触的上、下两部分区域内，主应力为负，表明在这些部位轧件所受应力为压应力。在轧件的两侧，越是靠近边部拉应力越大；相对应的，在轧件的上下区域，越是靠近模具压应力就越大。由于轧件在变形过程中始终处于不断的旋转状态，外围的金属一会儿受压应力的作用，一会儿又受拉应力的作用，并且这种交变的应力在变形过程中不断地交替进行；而在轧件的心部则始终受着拉应力的作用。

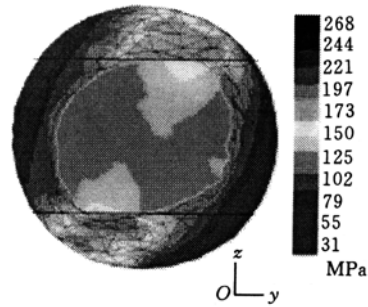


图 2 轧件内部等效应力云图

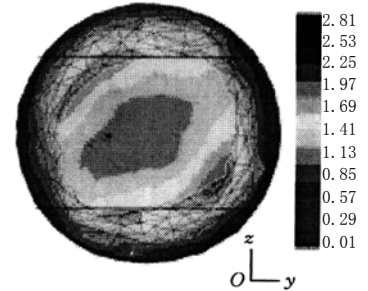


图 3 轧件内部等效应变云图

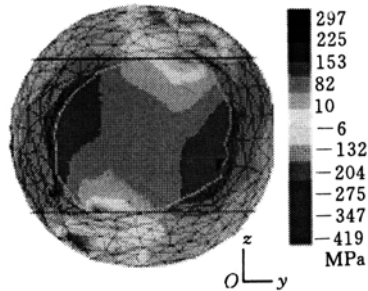


图 4 轧件内部最大主应力云图

3 楔横轧内部空心缺陷形成机理

3.1 轧件内部的应力状态

同时模拟了随楔横轧变形过程的进行，轧件内部应力应变场的变化。在轧件的轴截面上沿径向从中心开始向外每隔 2 mm 取一点，得到 1、2、3、4

共四个点, 绘制各点随着变形的进行, 轴向应力、切向应力和径向应力的变化曲线如图 5 所示。从图中看出, 轧件心部如 1、2 点在切向和轴向均受拉应力, 而靠近外部如 3、4 点所受的应力表现为交变的拉应力和压应力; 在径向则无论是心部还是边部承受的都是压应力。同时, 轧件还承受着交变的切应力的作用。可见, 在楔横轧变形中, 轧件心部的应力状态为两向拉应力, 一向压应力和交变的切应力。

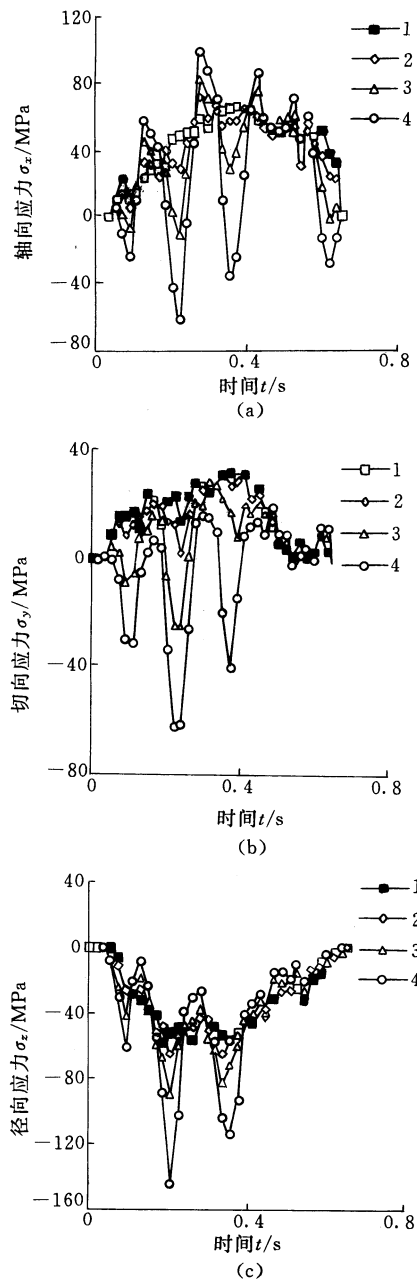


图 5 轧件内部各向应力随时间变化图

### 3.2 轧件内部空心缺陷形成的力学解释

在楔横轧变形过程中, 之所以会产生内部疏松或空心缺陷, 是由其内部金属的流动特点和应力状态决定的。对于所模拟的楔横轧变形, 径向压缩量

很大(断面缩减率为 60%), 沿轴向也有较大的变形(轧件的变形宽度为 30 mm), 金属在径向压缩的同时又产生轴向延伸, 模拟结果证实了楔横轧变形过程中金属的这一流动规律。应力应变场模拟结果表明, 在轧件的横截面上, 沿压下方向为压应力; 而在轴向和切向则随着变形的进行, 心部金属始终承受着拉应力, 边部金属则承受着交变的拉应力和压应力。同时轧件在变形过程中, 还承受着切应力的作用。

总之, 对于轧件心部金属而言, 其应力状态为两向拉应力, 一向压应力, 即轴向和切向为拉应力, 径向为压应力且较小, 此外还有切应力。在变形过程中, 心部金属在轴向和切向都承受着较大的拉应力, 沿轴向延伸沿径向压缩, 在拉应力的作用下随着轧件旋转产生塑性疏松, 形成裂纹。当裂纹失去稳定时, 沿轧件轴向“爆破”般发展, 最终在轧件心部形成一条贯通的孔隙。可见, 轧件内部空心缺陷的形成是由于心部金属在变形过程中承受着轴向和切向的拉应力以及切应力综合作用的结果。

## 4 结论

(1) 从理论和实际生产两方面分析了楔横轧内部缺陷产生的原因和特点。

(2) 用有限元数值模拟得到了轧件内部的应力应变分布状态及历史演化过程, 分析楔横轧变形过程中轧件内部应力分布的特点, 得知楔横轧轧件心部的应力状态为两向拉应力, 一向压应力, 同时, 还存在着交变的切应力。

(3) 模拟仿真结果表明, 楔横轧变形过程中, 轧件内部空心缺陷的形成是由于心部金属在变形过程中承受着轴向和切向的拉应力以及切应力综合作用的结果。

## 参 考 文 献

- 徐春国, 任广升, 王景樑. 楔横轧成形直角台肩精确截齐曲线的计算. 塑性工程学报, 1999, 6(2): 19~24
- Wang J L, Xu C G, Ren G S. The numerical simulation on hollow part's precise sizing process with cross-wedge rolling. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, E-5(1): 248~252
- Avitzur B. Analysis of central bursting defects in plane strain drawing and extrusion. Journal of Engineering for Industry, 1968, 90: 79~91
- 任广升, 张庆勇, 白志斌, 等. 楔横轧中心开裂研究. 塑

(下转第 156 页)