

楔横轧多楔成形铝合金轴心部质量影响规律与疏松位置预测

赵 静¹, 崔 欣¹, 徐文腾¹, 姜晓梅¹, 彭文飞², 束学道²

(1. 山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255049;

2. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 楔横轧多楔成形铝合金轴过程中, 模具工艺参数对成形质量影响较大. 利用三维建模软件建立了楔横轧多楔成形铝合金轴的有限元模型, 在 Deform 软件平台上模拟了不同楔横轧工艺参数对铝合金轴成形质量的影响. 通过数据分析, 获得了楔横轧模具不同工艺参数影响楔横轧多楔成形铝合金轴的规律. 研究结果为铝合金楔横轧多楔成形模具的设计奠定了基础.

关键词: 楔横轧多楔; 铝合金轴; 工艺参数; 心部质量; 影响规律

中图分类号: TG335.19

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 01-0013-06

楔横轧技术轧制零件的主要变形是在径向对金属材料进行压缩, 在轴向对金属材料进行拉伸, 基本工作过程是在 2 个轧辊上加工有楔形模具, 它们的旋转方向相同, 带动被轧制零件朝相反方向旋转, 被轧制零件在模具的作用下形成台阶轴. 铝合金的性能优良, 相较于钢制零件, 铝制零件在满足与钢制零件同等力学性能的要求下, 重量减轻 70%. 楔横轧具有生产效率高、工作载荷小和材料利用率高等优点, 被广泛应用于材料的成形^[1-4]. 多楔楔横轧成形过程中, 金属的流动规律比较复杂, 它是一种非线性的大变形, 如果模具工艺参数选择不当, 容易产生零件的内部缺陷, 影响零件的性能^[5-7].

本文以牌号为 6061 的铝合金为研究对象, 利用 Deform 软件平台, 对楔横轧多楔成形铝合金轴过程中, 不同工艺参数对铝合金轴心部质量的影响规律进行了分析, 并预测了易产生内部缺陷的位置. 研究结果对于楔横轧多楔成形铝合金轴模具的设计及参数选择提供了依据.

1 模拟方案设计

数值模拟所需的几何模型利用三维建模软件 PRO/E 建立, 在 Deform 软件平台中定义划分的单

元格属性及其材料属性并进行有限元网格划分, 建立有限元模型^[2]. 基于 Deform 软件平台, 分析了不同楔横轧模具工艺参数对铝合金轴成形时心部质量的影响情况. 通过分析, 选择楔横轧多楔模具的 4 个主要工艺参数进行研究, 分析各因素对轧件心部成形质量的影响的变化规律. 试验安排见表 1. 进行分组单因素试验, 即每次只变化 1 个模具工艺参数, 其余参数固定不变.

表 1 多楔模拟试验安排

编号	成形角/(°)	展宽角/(°)	断面收缩率/%	过渡角/(°)
1	24	6	50	35
2	28			
3	32			
4	28	6	50	35
5		8		
6		10		
7	28	6	45	35
8			50	
9			60	
10	28	6	50	35
11				45
12				55

收稿日期: 2017-11-07.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室开放基金 (ZKL-PR-200304); 山东省高等学校科技计划 (J11LD23); 山东省高等学校优势学科人才团队培育计划.

第一作者: 赵静 (1971-), 女, 江苏沛县人, 博士/副教授, 主要研究方向: 零件轧制成形及仿真. E-mail: zbceozj@163.com

2 工艺参数对心部质量的影响分析

通过轧件关键特征点在轧制过程中各方向应力的变化情况,分析模具工艺参数成形角、展宽角、断面收缩率和过渡角对楔横轧多楔成形铝合金轴过程中对轧件心部质量的影响.圆形轧件的特征点位置如图1所示.



图1 轴向特征点的位置示意

2.1 成形角对心部应力的影响分析

设定断面收缩率 $\psi=50\%$, 过渡角 $\alpha_z=35^\circ$, 展宽角 $\beta=6^\circ$, 成形角分别取 24° 、 28° 和 32° 进行模拟试验. 追踪特征点 $P1$ 的应力应变及其金属的流动情况. 图2所示为3个不同成形角情况下, 特征点 $P1$ 分别在 X 、 Y 、 Z 方向上的应力及等效应力.

由图2可知, 模具刚进入轧制时零件中心应力增大迅速, 并很快达到最大值, 在最大值处应力变化平稳, 且变化幅度较小, 轧制阶段结束后就到了模具的精整段, 零件中心的应力变为0, 轧制结束.

由图2(a)可知, 零件中心应力在 X 方向上是拉应力, 应力值为正, 此拉应力的大小随着成形角的增大而减小. 成形角越大, 楔横轧模具的成形面就越小, 被轧零件与模具沿轴向的接触长度就越小, 材料变形就比较容易, 所以, 零件中心在 X 方向的应力随着成形角的增大而减小.

由图2(b)可知, 轧件心部应力在 Y 方向上的值为负, 证明是压应力. 此压应力随着模具成形角的增大逐渐增大. 其主要影响原因是: 随着模具成形角的增大, 楔横轧模具成形面的投影面积在 Z 方向上也将增大, 所以零件材料的径向变形也会随着增大, 故心部特征点压应力变大.

由图2(c)可知, 轧件心部应力在 Z 方向上值为正, 证明是拉应力. 此拉应力的大小与模具成形角的大小成反比例关系. 其主要影响原因是: 模具成形角增大, 在楔横轧模具的旋转过程中, 轧件材料向两端流动更容易, 这样轧件材料所受的横向拉应力将减小, 故轧件心部 Z 方向上的应力减小.

由图2(d)可知, 轧件心部的等效应力的大小与模具成形角的大小成反比例关系. 增大模具成形

角, 则可以减小零件中心的等效应力.

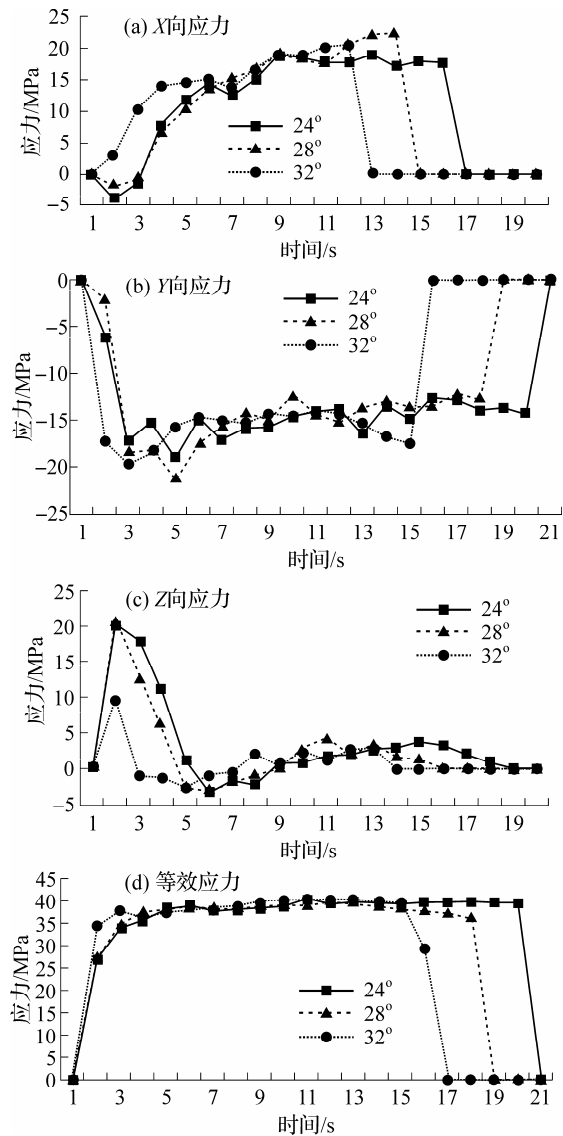


图2 不同成形角的心部应力

2.2 展宽角对心部应力的影响

设定断面收缩率 $\psi=50\%$, 过渡角 $\alpha_z=35^\circ$, 成形角 $\alpha=28^\circ$, 展宽角分别为 6° 、 8° 和 10° 进行模拟试验. 特征点选择心部中心点 $P1$, 追踪其在变形过程中应力应变的变化情况及金属材料的流动规律. 图3所示为在3个展宽角下, 轧件心部特征点 $P1$ 在 X 、 Y 、 Z 方向的应力及其等效应力.

由图3可知, 在模具刚到轧制阶段时, 轧件中心部的应力快速增加, 很快达到最大值, 在最大值处平缓稳定, 并且变化幅度不大, 随即到模具精整段, 心部应力也减小至0, 整个轧制过程完成.

由图3(a)可知, 轧件中心特征点 $P1$ 在 X 方向

的应力为正值,证明是拉应力.此拉应力的大小与展宽角的大小成正比例关系.展宽角数值越大,心部应力在 X 方向的拉应力值也会越大.因为当增大模具展宽角时,将会增大轧件材料在轴向的压缩变形量,这样就会使材料在变形过程中受到的阻力增大,轧件材料在轴向延伸的过程中,轧件表面会受到较大的轴向力作用,带动轧件心部材料轴向流动,故轧件心部金属材料受到的拉应力增加.

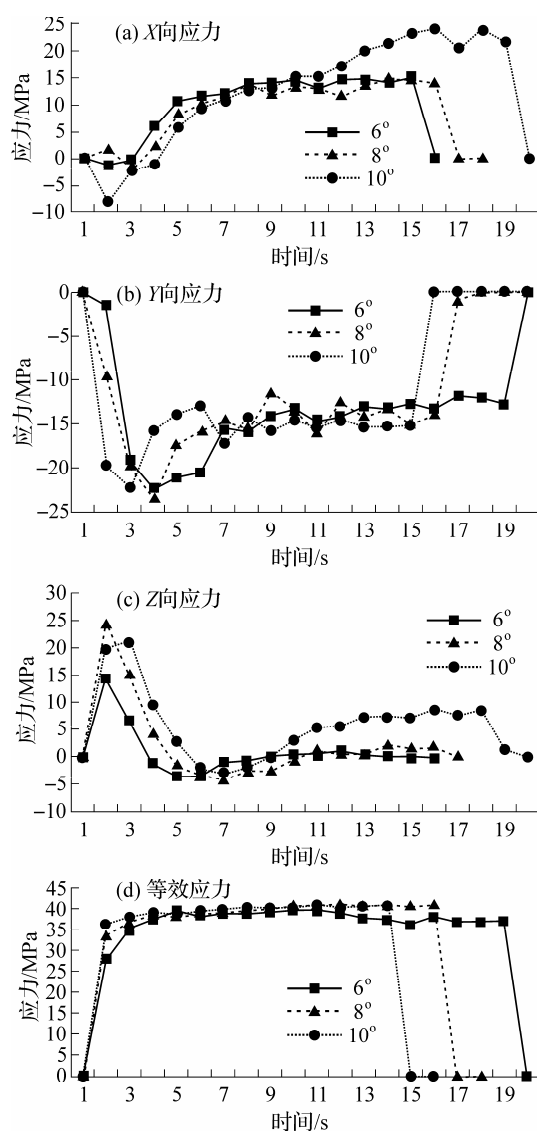


图3 不同展宽角的心部应力

由图3(b)可知,轧件中心特征点 $P1$ 在 Y 方向的应力为负值,证明是压应力.此压应力的大小与展宽角的大小成正比例关系.展宽角越大, Y 方向上的压应力也越大.因为增大模具的展宽角,轧件金属材料在轴向受到的流动阻力也会增加,导致

金属在轧件径向产生流动,心部压应力变大.

由图3(c)可知, $P1$ 在 Z 方向的应力为正值,是拉应力.此拉应力的大小与展宽角的大小成正比例关系.展宽角越大, Z 方向上的拉应力也就越大.原因是当增大模具展宽角时,轧件材料在轴向的流动也会变大,引起轧件材料在横向的变形增大.

由图3(d)可知,等效应力大小与展宽角大小成正比例关系.展宽角的值越大,等效应力也越大.

2.3 过渡角对心部应力的影响

设定断面收缩率 $\psi=50\%$,展宽角 $\beta=6^\circ$,成形角 $\alpha=32^\circ$,过渡角分别为 35° 、 45° 和 55° ,进行轧制仿真模拟,追踪心部特征点 $P1$ 在3个方向的应力应变变化情况及其轧制材料的流动规律.图4即在3个不同的轧件过渡角的情况下,心部特征点 $P1$ 在 X 、 Y 、 Z 方向上的应力图.模具刚进入轧制段时,过渡角对轧件中心的等效应力的影响比较小,随即迅速增大,直至达到顶点峰值后开始趋于平缓稳定,变化幅度比较小;精整段之后,轧件心部的等效应力便迅速减小,直到其值变为0,此时完成整个轧制过程.

由图4(a)可知,轧件心部特征点 $P1$ 在 X 方向上的应力为正值,证明是拉应力.随着模具过渡角的增大,轧件心部在 X 方向的应力值减小.其主要影响因素是:在模具主楔变形区的金属轴向变形时,模具侧楔及过渡段金属会对其形成阻碍,过渡角增大,模具成形面和模具轴线夹角也增大,使得模具侧楔对主楔变形区的金属的阻碍变小,故增大模具过渡角,将会使轧件中心部的应力减小.

由图4(b)可知,轧件心部特征点 $P1$ 的应力在 Y 方向上为负值,证明为压应力.随模具的过渡角增大,轧件心部特征点在 X 方向上应力值逐渐减小.主要是因为增大过渡角,侧楔对主楔变形区的金属材料的阻碍减小,轧件金属材料在径向的流动就会减小,导致在 Y 方向压应力变小.

由图4(c)可知,轧件心部特征点的应力在 Z 方向上为拉应力,随过渡角增大,轧件心部在 Z 方向的应力值会减小.这是因为:过渡角越大,主楔变形区的轧件金属的流动性就会变好,金属产生的横向变形小,故轧件心部在 Z 方向的应力减小.

由图4(d)可知,增大模具过渡角,将会使轧件中心部的等效应力减小.

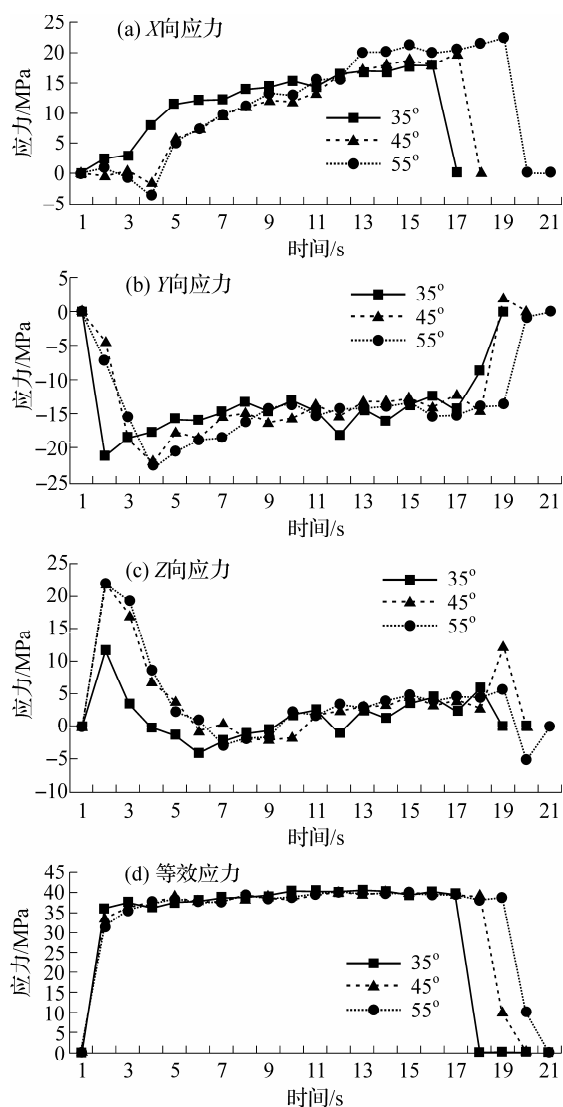


图4 不同过渡角的心部应力

2.4 断面收缩率对心部应力的影响

取成形角 $\alpha=28^\circ$, 展宽角 $\beta=6^\circ$, 过渡角 $\alpha_z=35^\circ$ 进行单因素模拟, 选取 45%、50%和 60%状态下的断面收缩率对轧制过程模拟实验. 图 5 为轧件心部特征点在不同断面收缩率情况下的 3 个方向的应力. 由图 5 可知, 轧件心部在开始轧制阶段时, 单位时间内应力变化幅度较大, 处于应力增加状态, 当轧件变形结束后, 心部应力开始趋于稳定状态, 折线图相对平缓, 继续轧制进行精整阶段, 应力迅速减低至 0, 此时已完成轧件的轧制, 可进行取件.

从图 5(a)可知, 轧件心部应力值在 X 方向均为正, 是拉应力, 随着模具断面收缩率的增加, 轧件心部的拉应力值在 X 方向上呈现降低趋势. 其主要影响原因为: 随着模具断面收缩率的增加, 其径向

加工量也随之增大, 故轧件金属更容易流向两端, 轧件心部特征点在 X 方向的拉应力会变大.

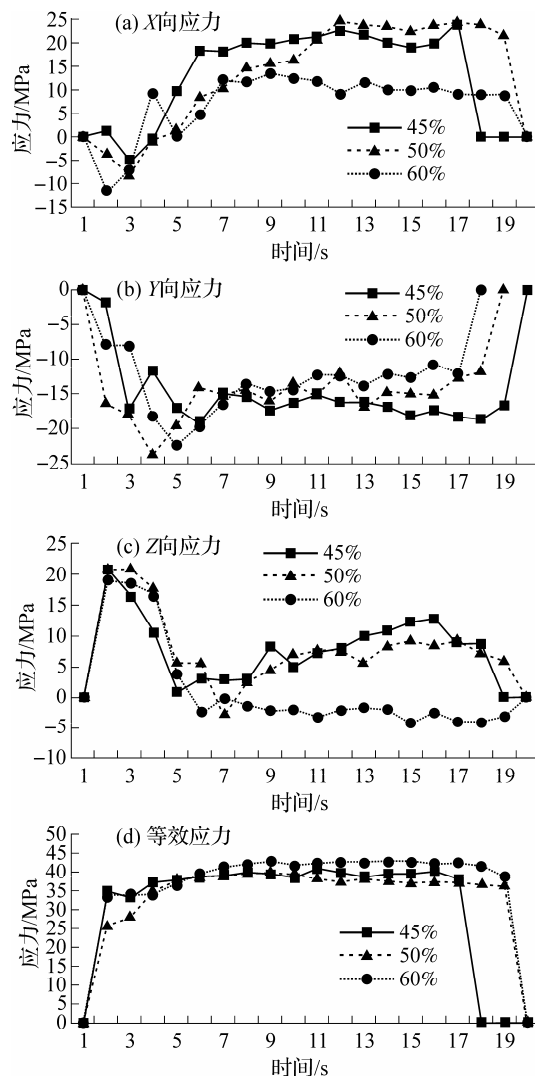


图5 不同断面收缩率的心部应力

从图 5(b)可知, 轧件心部的应力值在 Y 方向均为负, 是压应力, 随着断面收缩率的增加, 轧件心部的压应力值在 Y 方向上呈现降低趋势. 其主要影响原因为: 随断面收缩率的增加, 轧件心部的金属更容易沿轴向流动, 受到的模具阻力较小, 故轧件心部的压应力也较小.

从图 5(c)可知, 轧件心部的应力值在 Z 方向为正, 是拉应力, 随着断面收缩率的增加, 轧件心部的拉应力值在 Z 方向上呈现降低趋势. 其主要影响原因为: 随断面收缩率的增加, 使得模具在径向上具有更大的加工量, 使得轧件金属更容易进行轴向流动, 故横向变形量小, 轧件的成形质量更好.

从图 5(d)可知,随着断面收缩率的不断增加,轧件心部的等效应力呈现降低趋势。

3 多楔成形铝合金轴时疏松位置预测

从模拟实验的 Damage 云图(图 6)中可以看出,轧件的中心位置最容易出现损伤。铝合金长轴类零件在楔横轧成形时,很容易产生心部疏松和孔洞等缺陷,该类缺陷对产品的质量和寿命影响很大。因此楔横轧加工铝合金轴类零件过程中,对轧件心部的应力和应变的变化情况以及各模具工艺参数对轧件心部应力应变的影响规律进行分析^[8],能够有效改善加工过程中出现缺陷的状况。



图6 Damage云图

多楔楔横轧轧制铝合金轴类零件时,在轧制零件内部往往出现小空隙,俗称“疏松”。零件在轧制过程中轧件内部很容易产生较细小的裂纹,这将降低零件的强度,减少其使用寿命,而且轧制过程形成的裂纹会随着轧制的进行不断生长、扩大形成孔洞,导致零件的强度难以达到要求,甚至出现残次品。对于轧件内部疏松产生的原因,有很多说法及理论。近年来,人们能通过轧制过程中多种因素对零件产生的影响来预测零件缺陷的产生状况。本文对多楔成形铝合金轴类零件的过程中缺陷发生的难易程度进行预测,故主要对最大主应力、最大剪切应力以及平均应力的变化进行研究^[9]。

$$s_m = (s_1 + s_2 + s_3) / 3, \quad (1)$$

$$s_{\max} = (s_1 - s_3) / 2, \quad (2)$$

式中, s_m 为平均应力; $s_{\max}$ 为最大剪切应力; s_1, s_2, s_3 为三向主应力。

剪切应力在零件楔横轧成形过程中呈现周期性变化,为交变应力,较大的剪切应力值将使轧件内部金属的晶格扭曲,微观内应力变大,导致零件失效。从图 7 可知,在整个楔横轧多楔成形过程中心点 P_1 的值最大, P_2 、 P_3 点均远低于 P_1 的剪切

应力且相互之间差距较小。

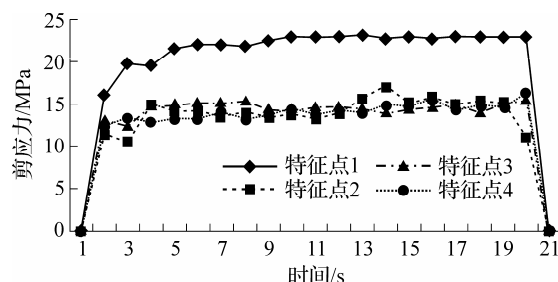


图7 剪应力

当轧件内部产生小裂纹后,这些小裂纹在模具横向力的作用下渐渐演变,直至扩展为孔腔。从图 8 可以看出,在模具主楔楔入段,轧件心部特征点 P_1 、 P_2 、 P_3 的主应力值迅速增加,并在开始阶段以较小的差值呈现 $P_1 > P_3 > P_2$ 的状态。随着轧制过程的进行,除 P_2 点的主应力值出现较大幅度的下滑,其他均趋于稳定, P_2 点的主应力值产生大幅下滑后出现缓慢回升并趋于稳定。当数值达到稳定状态时, P_1 、 P_3 两点的主应力值相对较大,其中 P_1 点最大, P_2 点相对较小,各数值依然呈现 $P_1 > P_3 > P_2$ 的状态,但差值有所增大。

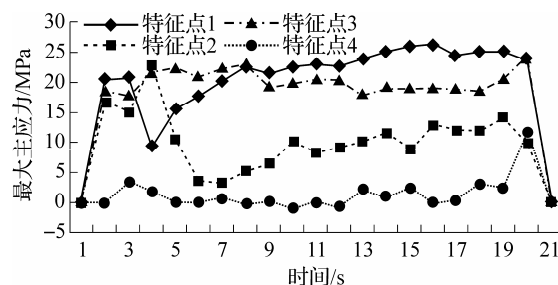


图8 最大主应力

平均应力(图 9)对轧件材料在塑性成形过程影响较大。应力值的正负定义了是拉应力还是压应力。当平均应力为负时,应力表现为压应力,对铝合金轴类零件在轧制过程中产生的细小裂纹进行挤压,能够促进这些裂纹的愈合;当平均应力为正时,应力表现为拉应力,对铝合金轴类零件在轧制过程中产生的细小裂纹进行拉伸,使裂纹不断生长、扩大,甚至生成孔洞。由图 9 可得出, P_1 、 P_2 点平均应力值相近,数值先增大后减小,然后缓慢提高,最后趋于稳定,其中 P_1 点的数值存在较多的负值阶段, P_2 点的数值基本处于负值,平均应力为压应力,能够促进裂纹愈合; P_3 点均为较大的正平均应力值,为拉应力,可能会促进裂纹的生长。

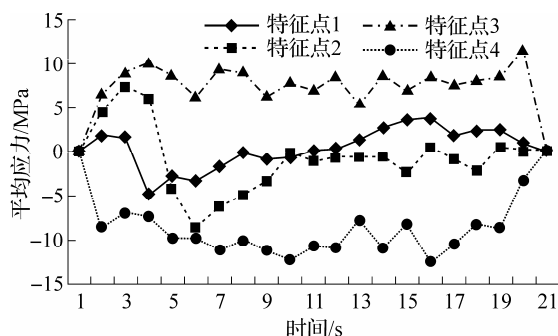


图9 平均应力

根据上述分析,多楔楔横轧成形铝合金轴类零件时,容易发生疏松缺陷的位置一是在主楔的成形区对称面周围($P1$ 点);二是在侧楔的楔入段邻近位置($P3$ 点),这是因为在该区域的最大横向应力、剪切应力都比较大,而且平均应力正值所占的比例较多,为压应力,会促进裂纹的生长。

4 结论

(1)轧件心部在 X 方向受到拉应力的作用,拉应力的随断面收缩率、成形角和过渡角的增大而减小,随展宽角的增大而增大;

(2)轧件心部在 Y 方向受到压应力的作用,压应力大小随成形角、展宽角的增大而增大,随过渡角和断面收缩率的增大而减小;

(3)轧件心部在 Z 方向受到拉应力的作用,拉

应力随展宽角的增大而增大,随成形角、过渡角和断面收缩率的增大而减小;

(4)通过有限元模拟与分析,得出在多楔楔横轧成形铝合金轴过程中,模具主楔成形区的对称面附近($P1$ 点)、以及侧楔楔入段附近($P3$ 点)比较容易形成疏松缺陷。

参考文献:

- [1] 胡正寰, 华林. 零件轧制成形技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [2] 赵静, 许庆斌, 姜晓梅, 等. 铝合金轴类零件楔横轧多楔成形机理分析[J]. 热加工工艺, 2016(3):121-124; 127.
- [3] 赵培峰. 6061 铝合金楔横轧变形研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2006.
- [4] 姜晓梅. 多楔楔横轧成形 6061 铝合金农用车半轴变形机理研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.
- [5] 胡正寰, 张康生, 王宝雨, 等. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [6] 胡正寰, 张康生, 王宝雨, 等. 楔横轧理论及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [7] 赵静, 束学道, 胡正寰. 汽车半轴多楔楔横轧成形应力变化规律分析[J]. 重型机械, 2005(6):31-34.
- [8] 崔丽华, 王宝雨, 崔丽霞, 等. 楔横轧加工铝合金内部损伤的研究[J]. 机械设计与制造, 2011(9):101-103.
- [9] 赵静. 楔横轧多楔成形长轴类零件关键技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2007.

Influence rules of core quality and forecast of loose location of aluminum alloy shaft formed by multi-wedge cross wedge rolling

ZHAO Jing¹, CUI Xin¹, XU Wen-teng¹, JIANG Xiao-mei¹, PENG Wen-fei², SHU Xue-dao²

(1.School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The die parameters of multi-wedge cross wedge rolling have great effect on quality in the process of forming aluminum alloy shaft. The finite element model of aluminum alloy shaft formed by multi-wedge cross wedge rolling is established, and the influence of different parameters on the forming quality of aluminum alloy is simulated based on the Deform platform. Through the analysis, it concludes with the influence rules of different process parameters on the forming quality of aluminum alloy shaft. The research results provide the basis for the design of multi-wedge cross wedge rolling die for forming of aluminum alloy shaft.

Key words: multi-wedge cross wedge rolling; aluminum alloy shaft; process parameters; quality of center; influence rule

(责任编辑 韩 超)