

## 多向加载近净成形研究动态

张大伟, 杨合, 孙志超

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室 材料学院, 西安 710072)

**摘要:** 通过主动控制不同方向、不同成形阶段的多向加载条件并配合模具、变形温度等成形条件, 可有效控制变形, 提高坯料的成形性能, 以获得预期的结构形状及组织状态的零件, 实现净成形或近净成形, 为难变形材料的复杂整体构件的精确塑性成形提供了一条有效途径。多向加载技术在蒙皮拉形、管材挤胀、环件径轴向辗扩、多向模锻等塑性成形工艺中都得到体现, 但其工艺通用性差, 需要专门的设备, 不同成形工艺甚至当成形零件不同时, 其变形机理亦迥异。评述了目前多向加载成形工艺的应用与国内外研究现状, 指出了该工艺在体积成形中应用发展需要解决的关键技术问题。

**关键词:** 多向加载; 主动控制; 精确成形; 复杂整体构件

**中图分类号:** TG316      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2009)01-0039-08

## Research Status of Multi-way Loading Near-net Shape Forming

ZHANG Da-wei, YANG He, SUN Zhi-chao

(School of Materials Science and Engineering, State Key Lab of Solidification Processing,  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Under the suitable forming temperature and the geometry of die, the loading modes at different forming stages are controlled actively. The deformation in the process may be controlled effectively, the blank may obtain better formability and better filling, and the desirable deforming and microstructure maybe obtained. Then the net or near-net shape manufacture can be actualized. Thus, the multi-way loading process provides an efficient way for precision plastic forming of the key and large-scale components of material difficult to deform. The multi-way loading process has been used in stretch forming, bulge forming, radial-axial ring rolling and multi-way forging. However, the special machine and process is only available to shape metal into the special component. The deformation behaviors in different processes even in the same process for different components are different. The state-of-the-art of multi-way loading forming is summarized, and then some proposals for further study in bulk forming are put forward.

**Key words:** multi-way loading; active control; precision forming; complex integral component

随着航空、航天、汽车及兵器工业的迅速发展, 迫切需要实现装备轻量化、节能减耗的目标<sup>[1-2]</sup>。这就日益要求构件整体化、薄壁轻量化、形状复杂化, 而且要满足高性能和低成本制造<sup>[3]</sup>。诸如在多个方向带有孔穴或凸缘的铝合金阀体构件、高筋薄

腹钛合金筋板类构件等大型复杂整体构件, 从材料和结构两方面实现了构件轻量化, 因此在航天、宇航、兵器工业中得到广泛应用<sup>[4]</sup>。采用传统的塑性加工工艺难以一次成形大型复杂整体构件, 这就要求不断发展精确塑性成形新原理、新方法, 研究开发

收稿日期: 2009-05-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50735005); 国家“863”(2006AA04Z135); 国防基础科研资助项目; 西北工业大学基础研究基金

作者简介: 张大伟(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为先进塑性加工技术及数值模拟。

先进的成形技术来实现此类整体构件的精密成形,而多向主动加载成形工艺为此类复杂构件的精确成形提供了新的途径。

多向主动加载成形是通过在轴向和横向(侧面或径向)等一个以上的方向多组模具同时或顺序地对坯料局部区域主动施加载荷,并配合适合的变形温度、模具结构等条件使坯料发生塑性变形,以获得预期形状、尺寸、精度和性能的零件。目前多向加载技术已在本体承载能力研究,制备超细晶材料,板材性能实验,复杂构件塑性成形等方面得到应用<sup>[5-9]</sup>。在塑性成形领域应用多向加载成形并通过主动控制加载条件以改善成形质量,优化成形过程的工艺主要有蒙皮拉形、管材挤胀、环件径轴向辗扩、多向模锻等工艺。

文中评述了多向加载技术在塑性成形领域的应用进展,并着重指出了应用于体积成形方面所面临的问题和发展的趋势。

## 1 板料拉形

拉形工艺广泛用于宇航工业,一般用来制造表面区域大、曲率变化比较平缓的单件或小批量大型板金零件<sup>[10]</sup>,特别适于飞机气动外形蒙皮零件的成形。拉形是将板料两端由拉形装置的夹钳夹持,通过夹钳包覆运动、拉形模上升使坯料同拉形模接触,产生不均匀的拉应变,使坯料逐渐与拉形模表面贴合的成形工艺<sup>[10-11]</sup>。对于S形蒙皮零件的成形,需增加上压成形装置<sup>[11]</sup>。一般拉形设备的夹钳分布在板料两端,德国斯图加特大学研制了夹钳环绕拉形的实验设备,并引入计算机数控(CNC)夹钳的运动轨迹。该实验设备有6个独立运动系统的夹钳,每个夹钳可以在水平和垂直两个方向任意运动<sup>[10,12]</sup>。

蒙皮拉形过程中零件表面容易出现纵向鼓包、“滑移线”、卸载回弹等问题,通过加载路径优化控制变形可改善避免这些缺陷的产生<sup>[13-15]</sup>。

北京航空航天大学基于静态隐式算法开发了复杂蒙皮拉形数值模拟软件STRETCHFORM。通过对拉形模具、夹钳动作分析以及拉形过程的数值模拟,结果表明若拉形过程中板料始终处于均匀拉伸状态,则可避免板料由绷紧到松弛的现象,从而消除最终成形零件的鼓包现象<sup>[13]</sup>。改善润滑条件有助于

提高变形均匀性<sup>[14]</sup>,式(1)为拉形时板料的拉应力。

$$\sigma_2 = \sigma_1 e^{\mu \theta} + \sigma_w \quad (1)$$

式中, $\sigma_2$ 为悬空段与模具相切处板料的拉应力; $\sigma_1$ 为型面顶部板料的纵向拉应力; $\sigma_w$ 为附加弯曲应力; $\theta$ 为板料在拉形模上的包角; $\mu$ 为板料、拉形模间摩擦系数。

从式(1)发现板料、拉形模间摩擦系数减小, $\sigma_2$ 和 $\sigma_1$ 的差值减小,板料受力更均匀。镜面蒙皮拉形实验研究表明改善润滑条件还可延缓滑移带的出现,同时发现悬空段的变形量是影响滑移带出现的重要因素,拉形应变速率在 $\dot{\epsilon} = (0.280.42)\%/s$ 之间最佳<sup>[14]</sup>。

目前生产中和理论研究中加载路径主要有包覆-拉伸、拉伸-包覆-拉伸和持续拉伸,如图1所示。

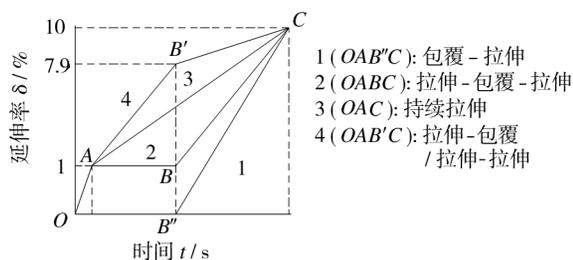


图1 蒙皮拉形加载路径<sup>[15]</sup>

Fig.1 Loading path of skin stretch forming

实验研究和数值模拟表明一定预拉伸率和补拉伸率可有效抑制回弹<sup>[14,16]</sup>,因此包覆-拉伸加载方式回弹量最大,成形质量也不理想,在实际中很少采用。持续拉伸加载方式下蒙皮零件回弹量最小,但成形过程应变均匀性最差,而拉伸-包覆-拉伸的成形过程应变均匀性较好,成形质量较佳,实际生产中多用此成形方式<sup>[51]</sup>。

在弯曲过程中施加一定的拉伸率可改善截面应力、应变分布减小拉形结束后截面上的应力差,从而减小卸载回弹<sup>[16]</sup>。文献[15]将最优化理论和有限元数值模拟相结合,以包覆阶段的拉伸率和补拉伸率作优化对象、拉形模和夹钳的加载路径作为设计变量,卸载后单元回弹最大值为目标函数,对拉伸-包覆-拉伸加载方式进行优化,获得优化加载轨迹OAB'C(如图1所示)。优化后的零件贴膜度提高了26%,厚度分布、应变分布进一步趋于均匀。

拉形蒙皮品种多、零件大、批量小,传统的实体模具生产研制周期长、费用高、模具调整修正困难,

为解决这些问题吉林大学、北京航空航天大学开展了可重构柔性多点模蒙皮拉形技术研究<sup>[17-18]</sup>。

可重构柔性多点拉形(多点拉形)是将传统的实体拉形模离散为有限个按一定规则排列的基本体的成形,并根据零件形状调整基本高度形成所需的成形面<sup>[17-19]</sup>,如图2所示。

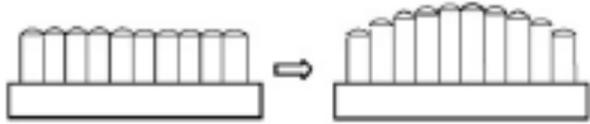


图2 可重构柔性多点拉形模<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Multi-point stretching die

当调整后的拉形模直接用于蒙皮拉形时,基本体同板料接触趋于产生压痕缺陷(如图3所示),特别是壁厚较薄的板料、变形程度小零件压痕现象明显<sup>[19]</sup>。这些缺陷不但影响零件外观,更会成为潜在疲劳源而威胁使用安全<sup>[18]</sup>。因此必须在板料和模具之间放置弹性垫层<sup>[17-18]</sup>,以抑制或消除压痕缺陷。

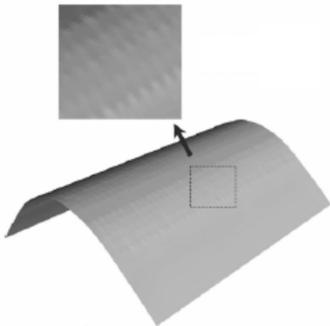


图3 多点拉形中的压痕现象<sup>[17]</sup>

Fig. 3 Dimples in process of stretch forming using multi-point stretching die

随着弹性垫层厚度的增加,坯料厚向应变分布曲线趋于平滑,坯料厚度变化趋于稳定,压痕减少直至消失;随着弹性垫层厚度增加,多点模拉形产品形状同目标产品形状差别更大。这是因为弹性垫层受压产生不均匀变形,从而影响到零件外形<sup>[17]</sup>。为了消除弹性垫层对零件外形的影响,必须对多点模的外形包络面进行修正,文献<sup>[20]</sup>建立了基于有限元法的多点模型面优化方法。此外引入增强结构的新型复合垫层,不仅改善垫层变形均匀度,还可在较小垫层厚度情况下,有效抑制消除压痕缺陷<sup>[18]</sup>。

## 2 管材挤胀成形

多向加载成形技术用于管状坯料成形为管材挤胀成形。一般通过管坯内的传力介质产生内压力,并作用于被限制在具有一定形状模具中的管状坯料使之成形<sup>[8]</sup>。可通过两种方式实现:只通过内压力对管材径向施压成形;径向内压力和轴向压力共同施压成形。挤胀成形的传力介质有:液体、气体、粘性介质、弹性介质(如橡胶)、塑性介质(如较软的金属)和低熔点化合物等<sup>[21-23]</sup>。研究应用较多的是液力成形和塑性介质挤胀成形。目前的液力成形设备已具备对轴向进给力、径向内压力、平衡力的独立控制,如图4所示。采用固体作为传力介质时,不需要内压力增压系统,通过挤压管坯内的固态介质产生高压动力<sup>[22]</sup>。图4中 $p_i$ 为内压力, $F_a$ 为轴向进给力, $F_p$ 为平衡力, $F_c$ 为合模力。

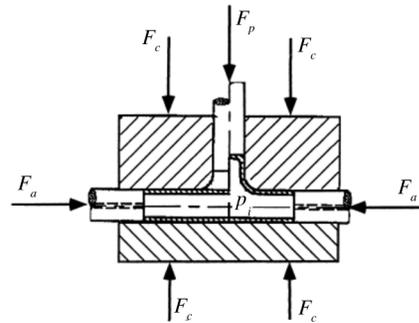


图4 三通管液压胀形示意<sup>[8]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of hydroforming of tee tube

管材多向加载成形过程中,主要塑性变形区发生在管材的局部区域,一般变形区的管材厚度都要变薄<sup>[8]</sup>。管材壁厚的过度减薄会影响成形零件的使用性能,甚至在成形过程中就因局部变形量过大而产生破裂现象。有限元和实验研究均表明管材多向加载成形过程中变形区因壁厚减薄易出现破裂现象<sup>[8,24-25]</sup>,如图5所示。

对于图5a所示零件,根据实验结果建立破裂时的可近似应力、应变判据为<sup>[24]</sup>:

$$\sigma_{\theta} = 2\sigma_b |\varepsilon_n| = \delta \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\theta}$ 为环向应力; $\sigma_b$ 为强度极限; $\varepsilon_n$ 为试件裂口处法向应变; $\delta$ 为材料断裂后伸长率。

比较内压力、轴向力共同作用和仅依靠内压力成形四通管接头的有限元模拟结果表明,内压力和

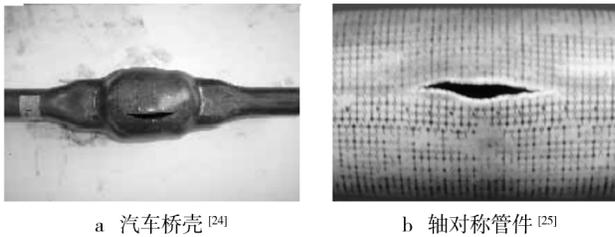


图5 破裂试件

Fig. 5 Bursting parts

轴向力共同作用下所成形的零件不仅支管高度增大,而且支管顶端减薄率减小<sup>[21]</sup>。通过轴对称零件的塑性介质挤胀成形进行试验研究,表明同自然胀形零件相比较,有轴向力所成形零件胀形区减薄率有所减少<sup>[26]</sup>。

虽然通过施加轴向力同时控制轴向进给和内部压力,可改善材料成形能力,增加轴向补料;但在成形后期内压力增大,并且若二者作用不协调将产生胀形缺陷<sup>[21]</sup>。采用应变样条分析法,忽略摩擦影响可建立三通管挤胀成形内压力、轴向进给力、平衡力三者之间的相互关系<sup>[27]</sup>:

$$\frac{4F_a}{\pi(D^2-d^2)} + \frac{\sigma_s t}{2D} = \frac{4F_p}{\pi(D^2-d^2)} - \frac{d^2}{D^2-d^2} F_i \quad (3)$$

式中: $\sigma_s$ 为管坯流动应力; $D$ 为管坯外径; $d$ 为管坯内径; $t$ 为管坯壁厚。

根据式(3)确定的关系,在实验装置上可胀形出支管长径比达3.6的三通管件<sup>[27]</sup>。对比固态物质作为传力介质和液力成形所获得的四通管件支管减薄率(都施加轴向进给力),前者减薄率较小<sup>[23]</sup>。其实质是前者以减少所成形支管高度来降低减薄率。

管材多向加载成形后期,复杂型腔的小圆角处最终成形需要很大的内压力<sup>[28]</sup>。采用花瓣形预成形截面,在内压力作用下在管壁产生指向圆角区的推力 $F_b$ (如图6所示)可有效解决这一问题<sup>[29]</sup>。针对截面形状沿轴线变化或轴线弯曲的零件,也只有通过合理的预成形和加载路径优化才能获得满足要求的零件。用于液力成形的弯曲管坯,在弯曲区域不能出现皱纹和翘曲<sup>[28]</sup>,数控绕弯薄壁管技术可满足此类要求,并获得具精确尺寸和弯曲角的管坯<sup>[30]</sup>。采用预成形-液力成形工艺可成形管材壁厚达3 mm、直径127 mm、长2.5 m的空心曲轴零件<sup>[28]</sup>。

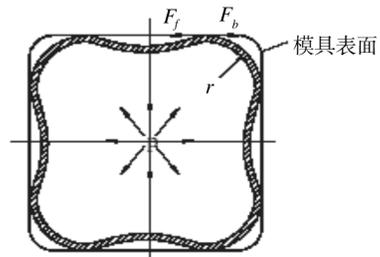
图6 花瓣形预成形截面<sup>[29]</sup>

Fig. 6 A petal-like section shape

通过控制加载路径可对液力成形中的失稳起皱进行有效控制,利用有益皱纹进行聚料以改善材料成形性能、拓展液力成形区<sup>[31]</sup>。文献[32]以式(4)表示的成形前后壁厚差( $T_D$ )以及管件与模具的贴合程度(对于轴对称形状构件)或支管高度(T型构件)为目标函数,结合约束条件优化确定了设计变量内压力和轴向位移。

$$\begin{cases} T_D = \sqrt{\sum_i^N \left( \frac{t_i - t_0}{t_0} \right)^2} \\ \bar{\sigma}_i < \sigma_u \end{cases} \quad (4)$$

式中: $t_i$ 为变形后*i*单元内的壁厚; $t_0$ 为管坯壁厚; $\bar{\sigma}_i$ 为*i*单元内的等效应力; $\sigma_u$ 为管坯材料极限拉应力。

### 3 环件径轴向辗扩

环件径轴向辗扩可改善环件端面质量、成形复杂截面轮廓的环件,为大型环件、异型环件的精密成形提供了一条有效的路径。其工艺原理为<sup>[33]</sup>:驱动辊作旋转运动,芯辊作径向直线进给运动,轴向锥辊作旋转运动和轴向进给运动;导向辊绕自身轴线旋转且随着环件直径长大移动。成形过程中,环件的径向壁厚减小,轴向高度减小,内外直径扩大,截面轮廓成形的连续局部塑性变形。

目前国内外文献大多研究环件径向辗扩<sup>[33-35]</sup>,对径轴向辗扩成形机理的研究较少<sup>[36]</sup>。为了优化大型、复杂截面环件径轴向辗扩工艺,拓展进口径轴向环轧机的应用范围,迫切需要展开建立径轴向辗扩理论体系的研究。

为此笔者在提出了导向辊运动调节机构控制的模型和高效算法<sup>[37]</sup>,建立轴向锥辊运动模型<sup>[38]</sup>的基础上,发展了环件径轴向辗扩三维热力耦合有限

元模型(如图7所示)。

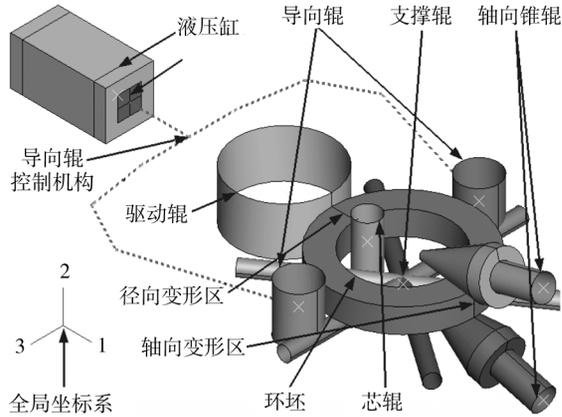


图7 环件径轴向辗扩三维有限元模型<sup>[38]</sup>

Fig.7 3D-FE model of radial-axial ring rolling process

基于径向辗扩理论体系,国内华林等人建立了环件径轴向辗扩的咬入条件,分析了轴向锥辊和环件间摩擦,锥辊位置和锥辊的锥顶角对轴向孔型咬入条件的影响<sup>[39]</sup>,建立了式(5)所示的径轴向辗扩过程中环件刚度条件模型<sup>[40]</sup>:

$$R \leq R_{\max} = \frac{H^2 \tan \theta}{27R_2 \left( \mu_1 - \frac{\mu_2 H}{B \sqrt{\Delta h}} \sqrt{S \Delta h_a \tan \gamma} \sqrt{\frac{2}{R_1} + \frac{2}{R_2}} \right) + 2} \quad (5)$$

式中: $B, H, R$ 为环件瞬时壁厚、高度、外径; $\theta$ 为导向辊位置角; $R_1, R_2$ 为驱动辊、芯辊半径; $\mu_1, \mu_2$ 为驱动辊、轴向锥辊同环件间的摩擦系数; $\Delta h, \Delta h_a$ 为芯辊、轴向锥辊每转进给量; $S$ 为环件中径线到轴向锥辊顶点的距离; $\gamma$ 为轴向锥辊顶角的1/2。

径轴向辗扩过程中,环件外径应当满足式(5)描述的环件刚度条件,才能保证工艺稳定性,避免环件突然压扁现象<sup>[40]</sup>。

## 4 多向模锻

多向模锻工艺中凹模(或组合凹模)一般先合成封闭空间,多个方向的凸模对坯料施加载荷,成形出多个方向上带有空穴和凸缘的锻件。但加载路径的复杂性导致成形过程异常复杂,参数优化和过程控制十分困难。多个方向局部加载加剧了成形过程的不均匀变形,容易导致产品缺陷产生,制约着该工艺在重大构件成形中的应用推广。

邱积粮对筒形零件多向模锻工艺试验研究和飞机歼七外筒零件多向模锻的试验,积累了一些工艺参数<sup>[41]</sup>。

燕山大学和一重集团研究了等径三通多向模锻工艺,进行了二维弹塑性有限元分析,实现了三通阀体在多向模锻压机上的锻制<sup>[42]</sup>。清华大学胡忠等,通过对ANSYS的二次开发,对三通多向模锻过程及模具进行了二维有限元模拟,对金属流动和模具受力进行了分析<sup>[9]</sup>。

波兰的Gontarz对具有3个型腔的阀体模锻成形工艺进行了有限元模拟与实验研究,材料为铝<sup>[43]</sup>。

以上研究的加载路径均为2个方向依次加载,即一个方向的凸模加载完成后另一方向开始加载,且为定速或定能量加载,这种加载路径便于工业生产实际的实现。但是在此加载条件下成形多通阀体时,水平凸模加载时会出现空腔现象,在打靠时载荷达到最大(如图8所示),而且在随后垂直凸模加载时该空腔容易造成折叠,出现缺陷<sup>[9]</sup>。

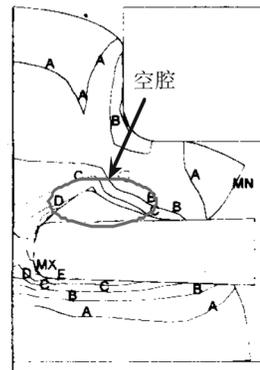


图8 成形过程中的空腔现象<sup>[9]</sup>

Fig.8 Undesirable cavity in process

为了避免折叠缺陷产生,应当先加载凸模抵达终锻位置前的适当时候,另一方向的凸模开始加载,最终同时到达终锻位置。基于DEFORM-3D建立了四通阀的多向加载成形有限元三维模型如图9所示。采用如图10所示的加载路径对多向模锻成形过程进行了三维有限元模拟研究。

根据凸模轴线同坯料轴线的位置可将凸模分为两类:轴线方向与坯料轴线方向平行的凸模,记为MD1;轴线方向与坯料轴线方向垂直的凸模,记为MD2。成形过程可分为3个阶段:第1阶段,从先

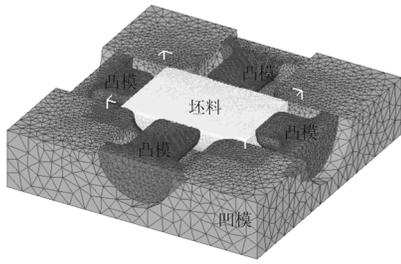


图9 四通阀多向加载有限元模型

Fig.9 Finite element model of cross valve under multi-way loading

加载的凸模冲头同坯料接触到后加载的凸模冲头同坯料接触;第2阶段,后加载的凸模冲头同坯料接触到 MD1 凸模座同坯料接触为止;第3阶段,MD1 凸模座同坯料接触到成形结束。研究揭示了不同变形阶段的变形行为,如图 11 所示。

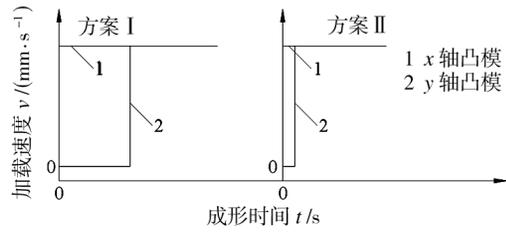


图 10 凸模加载路径

Fig.10 Loading path of male die

两种成形方案的变形程度相当,最大等效应变都接近 3.5,其标准差和平均等效应变相差甚微。但二者的锻造载荷和成形质量差别甚大。后者的模具受力较前者均匀。图 12 为两种成形方案下损伤因子分布图,方案 I 的损伤因子远高于方案 II,特别是在碳钢多向加载的成形局部区域(如图 12a 标示区域所示)可能已经出现宏观裂纹。

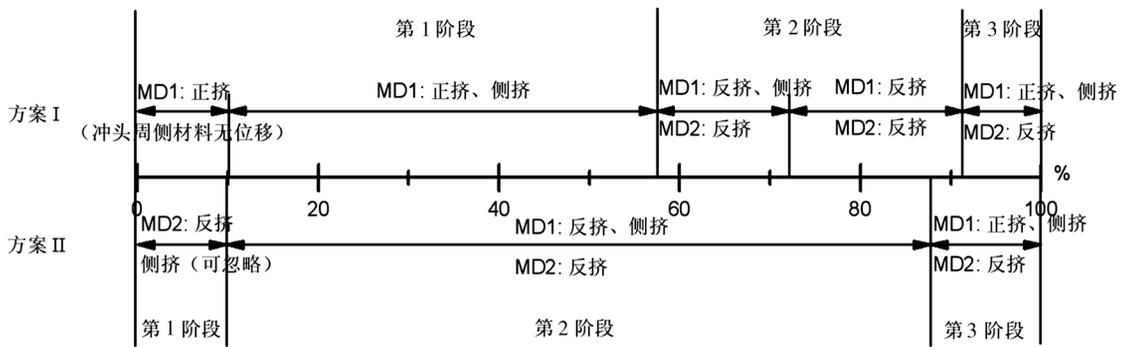


图 11 四通阀多向加载成形过程中的变形行为

Fig.11 Deforming behavior in forming process of cross valve under multi-way loading

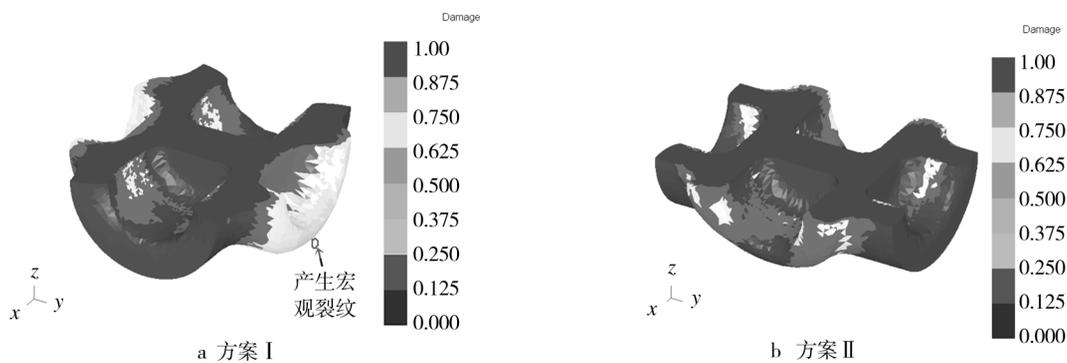


图 12 不同成形方案下的损伤因子分布

Fig.12 Distribution of damage in different version

## 5 结论和展望

通过多向主动加载控制不均匀变形,使不同变

形区域的变形协调,为大型复杂整体构件(如大型阀体类零件)塑性成形,特别是对采用难变形材料(如钛合金、高强铝合金等)的复杂整体构件成形,开辟一条高效、节能、精密成形新途径。

目前在板料拉形、管材挤胀成形工艺中的变形规律研究方面取得了长足的进步,建立了加载路径及模具优化方法,避免了成形缺陷,可以控制成形过程中的变形。对环件径轴向辗扩变形机理研究的文献少见,现有多向模锻工艺缺乏加载路径的优化方法,无法实现成形过程的精确控制,更不能根据材料、形状、不同阶段变形特征来调整加载条件,以控制材料流动和微观组织。

对重大整体构件多向加载成形的应用尚显不足,特别是对难变形材料的大型复杂整体构件的成形鲜见报道,因此多向主动加载成形技术在体积成形中的应用尚需深入系统地展开以下几个方面的研究。

1) 体积成形中复杂加载路径下的材料性能(本构关系)。相关文献多见于管材液力胀形、板料多向加载条件下的材料性能研究。为了建立对不同材料的多向加载工艺设计,应用计算机仿真技术研究多向加载工艺,迫切需要展开复杂加载路径下的材料性能研究。

2) 复杂加载条件下的材料流动规律、微观组织演化规律。复杂加载条件下的金属塑性变形由于加载条件的复杂性,成形过程中的流动异常复杂,材料经历复杂的组织演化,其规律是多向加载成形制度工艺控形控性的关键问题。

3) 加载路径优化。如何通过主动控制加载路径,实现材料流动和不均匀变形的控制,达到构件形状和组织可控的目的,是多向主动加载研究迫切需要解决的又一问题。

4) 复杂加载路径的控制方法。复杂加载路径在工业生产中的精确实现,是多向主动加载技术生产化应用的关键技术。

5) 重大复杂整体构件多向加载精确成形工艺研究及应用。如何降低成形载荷,提高构件成形质量,实现重大复杂整体构件的精确成形,是多向加载的重要课题。

#### 参考文献:

[1] 周贤宾. 塑性加工技术的发展——更精、更省、更净[J]. 中国机械工程, 2003, 14(1): 85-87.

[2] YANG He, ZHAN Mei, LIU Yu-li, et al. Some Advanced Plastic Processing Technologies and Their Numerical Simulation [J]. Journal of Materials Processing

Technology, 2004, 151: 63-69.

- [3] 杨合, 孙志超, 詹梅, 等. 局部加载控制不均匀变形与精确塑性成形研究进展[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 6-14.
- [4] 吴跃江, 杨合, 孙志超, 等. 局部加载对筋板类构件成形材料流动影响的模拟研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(增刊): 12-15.
- [5] 张坤勇, 殷宗泽, 徐志伟. 国内真三轴试验仪的发展及应用[J]. 岩土工程技术, 2003(5): 289-293.
- [6] GUO Qiang, YAN Hong-ge, CHEN Zhen-hua, et al. Fracture Behaviors of AZ80 Magnesium Alloy During Multiple Forging Processes [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16: 922-926.
- [7] 万敏, 洪强, 吴向东, 等. 十字形试件双向拉伸试验系统建立及加载精度分析[J]. 机械工程学报, 2001, 37(1): 57-62.
- [8] AHMETOGLU M, SUTTER K, LI X J, et al. Tube Hydroforming: Current Research, Applications and Needs for Training [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98: 224-231.
- [9] 胡忠, 王本一, 刘庄, 等. 三通挤压工艺过程中的二维弹塑性有限元模拟[J]. 塑性工程学报, 1996, 3(2): 33-40.
- [10] SIEGERT K, FANN K J, RENNT A. CNC-controlled Segmented Stretch Forming [J]. Annals of CIRP, 1996, 45(1): 273-276.
- [11] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册——飞机钣金工艺 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1992: 353-363.
- [12] SIEGERT K, RENNT A, FANN K J. Prediction of the Final Part Properties in Sheet Metal Forming by CNC-controlled Stretch Forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71: 141-146.
- [13] 孔永明, 周贤宾, 吕杰武, 等. 蒙皮拉形前处理软件开发及关键技术研究 [J]. 塑性工程学报, 2001, 8(2): 29-31.
- [14] 万敏, 周贤宾, 李晓星, 等. 镜面蒙皮拉形工艺参数研究 [J]. 航空学报, 1999, 20(4): 326-330.
- [15] 张彦敏, 周贤宾. 蒙皮拉形加载轨迹优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(2): 201-205.
- [16] CLAUSEN A H, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M. Stretch Bending of Aluminium Extrusions for Car Bumpers [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 102: 241-248.
- [17] ZHONG Yi-cai, SHAO Hui-wang, XU Dong-xu, et al. Numerical Simulation for Multi-point Stretch Forming

- Process of Sheet Metal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 396-407.
- [18] 汪华, 周贤宾, 罗红宇, 等. 复合垫层在多点模蒙皮拉性中的应用[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(5): 43-46.
- [19] 陈志红, 李明哲, 高占民. 蒙皮件多点拉形过程中成形缺陷的数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(3): 112-116.
- [20] 白雪飘, 曾元松, 吴为, 等. 典型双曲率零件柔性多点磨具蒙皮拉形技术研究[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(6): 105-108, 113.
- [21] DONALD B J M, HASHMI M S J. Finite Element Simulation of a Cross-joint form a Tubular Blank[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 103: 333-342.
- [22] WANG Chen-lu, LU Yan, ZHANG Yi. Research on Extrude-bulge Forming of Tee Tubes with Plastic Medium [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997(4): 83-85.
- [23] DONALD B J M, HASHMI M S J. Three-dimensional Finite Element Simulation of Bulge Forming Using a Solid bulging Medium[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 37: 107-116.
- [24] 王连东, 程文冬, 梁晨, 等. 汽车桥壳液压胀形极限成形系数及胀裂判据[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 210-213.
- [25] YUAN Shi-jian, QI Jun, HE Zhu-bin. An Experimental Investigation into the Formability of Hydroforming 5A02 Al-tubes at Elevated Temperature[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 680-683.
- [26] 单德彬, 徐文臣, 吕炎. 厚壁管低熔点塑性介质挤胀成形实验研究[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(3): 258-261.
- [27] 夏巨谌, 杨雨春, 胡国安, 等. 多通管挤压胀形过程的分析与计算[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(3): 24-28.
- [28] AHMETOGLU M, ALTAN T. Tube Hydroforming: State-of-the-art and Future Trends [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98: 25-23.
- [29] YUAN S J, HAN C, WANG X S. Hydroforming of Automotive Structural Components with Rectangular-sections [J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 2006, 46: 1201-1206.
- [30] LI Heng, YANG He, ZHAN Mei, et al. The Interactive Effects of Wrinkling and other Defects in Thin-walled Tube NC Bending Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 502-507.
- [31] YUAN Shi-jian, WANG Xiao-song, LIU Gang, et al. Control and Use of Wrinkles in Tube Hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182: 6-11.
- [32] IMANINEJAD M, SUBHASH G, LOUKUS A. Loading Path Optimization of Tube Hydroforming Process [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45: 1504-1514.
- [33] 华林, 黄兴高, 朱春东. 环件轧制理论和技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [34] SONG J L, DOWSON A L, JACOBS M H, et al. Coupled Thermo-mechanical Finite-element Modelling of Hot Ring Rolling Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121: 332-340.
- [35] YANG He, GUO Liang-gang, ZHAN Mei, et al. Research on the Influence of Material Propertied on Cold Ring Rolling Processes by 3D-FE Numerical Simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 634-638.
- [36] CHOI H D, CHO H S, LEE J S. On the Dynamic Characteristics of Radial-axial Ring Rolling Processes [J]. Journal of Engineering for Industry, 1992, 114(2): 188-195.
- [37] LI Lan-yun, YANG He, GUO Liang-gang, et al. A Control Method of Guide Rolls in 3D-FE Simulation of Ring Rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205: 99-110.
- [38] GUO L G, YANG H. Keytechnologies for 3D-FE Modeling of Radial-axial Ring Rolling Process [J]. Materials Science Forum, 2008, 575-578: 367-372.
- [39] 华林, 潘利波, 李超. 环件径轴向轧制的咬入条件分析[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(5): 102-105.
- [40] HUA Lin, PAN Li-bao, LAN Jian. Researches on the Ring Stiffness Condition in Radial-axial Ring Rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 2570-2575.
- [41] 邱积粮. 筒形零件多向模锻工艺[J]. 金属成形工艺, 1991, 9(4): 11-18.
- [42] 徐吉生. 等径三通多向模锻金属流动研究[J]. 锻压技术, 2002, 27(4): 11-14.
- [43] GONTARZ A. Forming Process of Value Drop Forging with Three Cavities [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 228-232.