

板材累积变形工艺

潘立栋¹, 郭永强^{2,3}, 李硕²

- (1. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司 中机精冲科技(福建)有限公司扬州分公司, 江苏扬州 225000;
2. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083; 3. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对板材带特征筋一体化成形展开研究, 提出了板材累积变形工艺, 其原理是在正向挤压凸模运动下, 引入反相挤压凸模, 通过对变形区的控制达到对材料的累积变形进而实现工件的整体成形。通过有限元模拟, 分析了累积变形过程, 发现变形区高度在超过 10.8 mm 后一定会出现失稳凹陷; 当反向挤压凸模与正向挤压凸模的速度比为 3/5 时累积变形效果良好。基于正交实验的研究结果, 归纳了挤压速度、材料温度、模具圆角以及摩擦因数对控制变形区高度的影响规律及显著性, 得出在短行程凸模运行过程中, 对于该工艺影响最大的因素为材料的加热温度。最后, 通过实验验证了该工艺模型的准确性。板材累积变形工艺的开发对于板材成形特征筋等功能集成的工件一体化成形具有指导意义。

关键词: 累积变形工艺; 稳定变形区; 板材成形; 挤压成形; 一体化成形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.015

中图分类号: TG376 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 12-0105-06

Cumulative deformation process for plate

Pan Lidong¹, Guo Yongqiang^{2,3}, Li shuo²

- (1. China Machinery Fine Blanking Technology (FuJian) Co., Ltd. Yangzhou Branch, Yangzhou 225000, China;
2. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China;
3. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The integrated forming of plates with characteristic ribs was researched, and a cumulative deformation process for plates was proposed. Then, the principle was to introduce a reverse extrusion punch under the movement of the forward extrusion punch and achieve the overall forming of workpiece by controlling the deformation zone to achieve cumulative deformation of material. Then, through finite element simulation, the cumulative deformation process was analyzed, it was found that the instability depression definitely appeared after the height of the deformation zone exceeded 10.8 mm, and when the speed ratio of the reverse extrusion punch to the forward extrusion punch was 3/5, the cumulative deformation effect was good. Based on the research results of orthogonal experiments, the influence rules and significance of extrusion speed, material temperature, mold fillet and friction factor on the height of the controlled deformation zone were summarized, and it was concluded that during the operation process of the short-stroke punch, the factor that had the greatest impact on this process was the heating temperature of material. Finally, the process model was experimentally verified, and the development of the cumulative deformation process for plate has guiding significance for the integrated forming of workpieces with integrated functions such as plate forming characteristic ribs.

Key words: accumulative deformation process; stable deformation zone; plate forming; extrusion forming; integrated forming

随着科技与装备制造业的发展, 制造行业向着优质轻量化、精密净化、高效低成本和多学科复合化、成形方法多样化、清洁绿色化的方向发展^[1-2]。金属塑性加工是利用材料的塑性在外力作用下成形, 获得所需形状、尺寸和性能的加工方法^[3]。

板材累积变形是金属塑性加工的一种, 板材在成

形功能特征时, 通过挤压的方式使材料流入变形区, 但是其一次变形量很小。如板材带筋类的产品, 若特征筋有多个, 需要多工步来完成成形, 且要考虑到锻造比的问题, 比例太大会使板材发生弯曲, 因此, 突破板材成形特征件的锻造比是行业的共性技术难题。

基于此类问题, 为了突破制约产品市场的技术瓶颈, 提出了基于累积变形的板材成形工艺, 其原理是通过板材局部变形的累加来实现常规变形无法实现的变形量。通过更深一步的研究, 使该项技术更具有理论性、系统性和应用性, 进一步丰富管材成形理论。

收稿日期: 2023-04-25; 修订日期: 2023-08-04

作者简介: 潘立栋 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: pld63639873@163.com

通信作者: 郭永强 (1984-), 男, 博士, 教授

E-mail: guoyq@brimet.ac.cn

上海交通大学的丁泰然等^[4]通过上限法对板材的镦挤工艺进行分析,基于整理得到的凹陷判别式绘制出成形极限图,并分析了关键参数之间的关系,绘制出安全区和危险区,发现板材的尺寸参数和工艺参数均对特征功能的成形极限有影响。朱圣法^[5]通过基于流函数的上限法得出反挤压模具的成形载荷公式,并通过实验验证了公式的可靠性,从而提高了板材的成形极限;且通过引入反顶模具提出了一种控制稳定变形区的工艺方法,将材料从模具的保持区推入成形区中,并在反顶模具的作用下建立稳定变形区,从而消除了传统镦粗方法中初始高径比的限制,通过模具与材料形成的定位区,管材法兰可以成形在任意位置(管材中部与端部),并且没有缺陷。杜顾伟等^[6]基于有限元模拟软件分析了金属质点的流动性,并通过正交实验确定了单点渐进成形的关键影响因素的显著性分析。Gontarz A 等^[7]通过控制可移动套筒与固定套筒的距离解决了管材镦挤成形过程中的失稳弯曲问题。目前,国内外对累积成形工艺的研究报道很少,并且主要是介绍成形理论和数值模拟研究,而在实际工程应用方面还需进一步探索和研究。本文针对上述背景和形势,对板材累积变形工艺展开深入研究^[8]。

针对板材形状特点,将管材无限放大,可以将其看做板材,因此,对板材累积变形的研究结果同样符合管材的累积变形的相应规律^[9],因此,板材的累积变形工艺的开发具有较为深远的意义^[10]。

1 累积变形工艺的原理

对高度为 80 mm、宽度为 3 mm、长度为 3 mm 的板材进行累积变形的有限元模拟,其工艺示意图如图 1 所示。具体过程为:累积变形开始后,正向挤压凸模以速度 V_1 向下运动,在填充完反向挤压凸模圆角预留的成形型腔后,反向挤压凸模以速度 V_2 向上运动,采用相对运动的正向挤压凸模与反向挤压凸模是为了生成变形型腔,板料在挤压下进入变形型腔,通过连续的小范围局部变形的累积实现整个板材的变形。其模拟条件为:材料选择为 AISI-1045 钢,温度设置为 1050 °C。模具不参与变形,所选模具均设置为刚性体,为了更好地反映板料的累积变形过程,勾选 Simulation Controls 中的 Heat Transfer 选项,热交换系数为 1,相向运动的两凸模的材料选择 H13 模具钢,模具温度设置为 250 °C。将坯料划分为 60000 个网格,设置模拟步长为最小单元格的

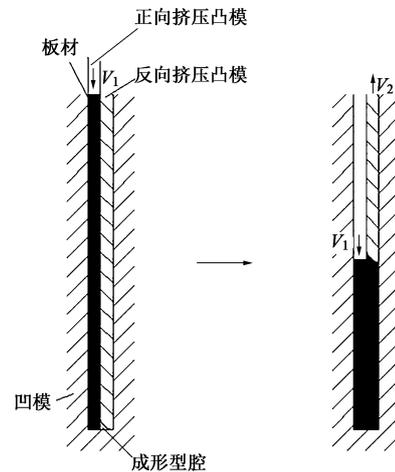


图 1 板材累积变形工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sheet accumulative deformation process

2/5。整个累积变形工艺有两个阶段,因此分两次模拟:第 1 次模拟设置正向挤压凸模的下压速度为 $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,反向挤压凸模速度为 0;第 2 次模拟考虑到累积变形过程中金属质点的运动速度,设置合理的反向挤压凸模速度,正向挤压凸模速度保持不变。模拟过程如图 2 所示,其中正向挤压凸模与反向挤压凸模相对运动开始的临界状态为对预留成形型腔的填充达到一定程度。

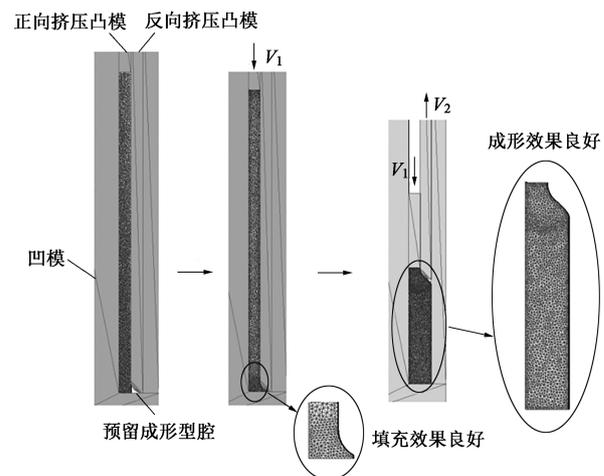


图 2 板材累积变形工艺模拟过程

Fig. 2 Simulation process of sheet accumulative deformation process

2 累积变形模拟结果分析

2.1 镦粗阶段分析

根据累积变形工艺特点可将板材的累积变形分为两个阶段,即镦粗阶段和累积成形阶段。镦粗阶段通过点追踪仔细观察板材金属质点在横纵方向的位置变化情况^[11],如图 3a 所示;取板材的子午面

并设置点矩阵，其中点与点之间的距离为 0.5 mm；随着墩粗过程的进行，观察点的移动情况，如图 3b 所示。在正向挤压凸模的单向压力下，板材向成形

型腔流动，靠近型腔区域的流动幅度远高于其他部分，而靠近凹模内壁部分仅做纵向运动，随着凸模继续下压，板材在成形型腔填充良好。

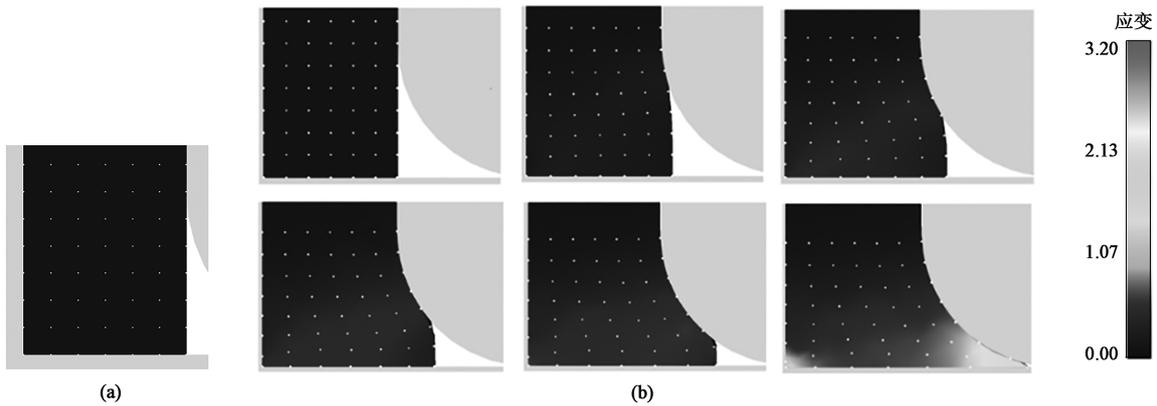


图 3 点追踪布局图 (a) 和点追踪示意图 (b)

Fig. 3 Point tracking layout (a) and schematic diagram of point tracking (b)

2.2 累积成形阶段分析

累积成形阶段的等效应变及成形效果如图 4 所示。选取完整行程的 10%、20%、40%、60%、80% 和 100% 等几个典型的正向挤压凸模进给节点，观察板材在累积变形过程中的成形情况。从图 4 中可知，将板材分为 3 个区域，分别为未变形区、变形区和已变形区。在应变为 0 的区域内，材料不发生塑性变形，仅发生刚性移动，在累积成形初始阶段，板材在凹模与反向挤压凸模的夹持下，深色区域的应变为 0，说明该区域未发生塑性变形，金属的流动方向与正向挤压凸模的运动方向相同；随着板材不断进入成形型腔，板材在正向挤压凸模与反向挤压凸模的作用下，板材宽度增加；当板材的右壁完全贴合成形型腔的右壁时，证明板材完成了累积变形^[12]。

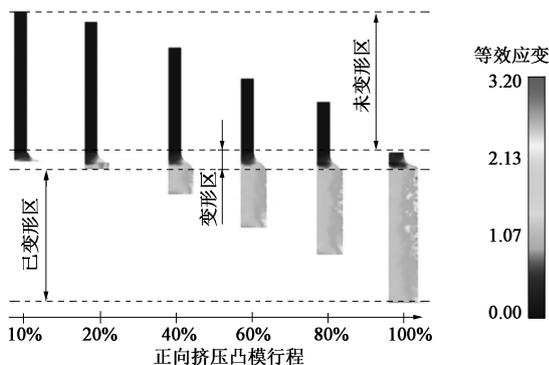


图 4 板材累积变形过程

Fig. 4 Cumulative deformation process of sheet

3 稳定变形区的控制

如前文所述，累积变形工艺的核心是变形材料的逐渐累积，从而实现板材增厚，因此，反向挤压凸模的运动速度对于变形区的稳定控制起着决定性作用。根据体积不变原则， $V_2/V_1 = \text{反向挤压凸模下压板料体积} / \text{正向挤压凸模上移成形体积}$ ，此时反向挤压凸模的速度最大，逐步减小反向挤压凸模的运行速度，直至满足工件成形质量要求。选取 25、30、40 和 50 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为 4 组典型的反向挤压凸模的运动速度，进行成形模拟分析，结果如图 5 所示。

反向挤压凸模运动速度为 50 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、正向挤压凸模行程为 40% 时，出现了明显的凹陷，其他运动速度条件下未发生失稳弯曲。可以比较直观地看出，随着反向挤压凸模运动速度的增大，变形区变大。为了使数据更为完整，增加反向挤压凸模运动速度 75 和 100 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 各 3 组对比，取正向挤压模具总行程的 60%，其结果如表 1 和表 2 所示。其中， h_m 为变形区的高度。

表 1 和表 2 显示，当相对运动凸模的速度相同时，材料均会出现失稳弯曲现象。通过对比不同速度下的变形区高度可知，当变形区超过 10.8 mm 时一定会出现失稳弯曲现象，如图 6 所示，其中圆圈处出现凹陷缺陷。通过图 4、图 5、表 1 和表 2 的对比，发现当 $V_2/V_1 = \frac{3}{5}$ 时，材料的成形效果更好。

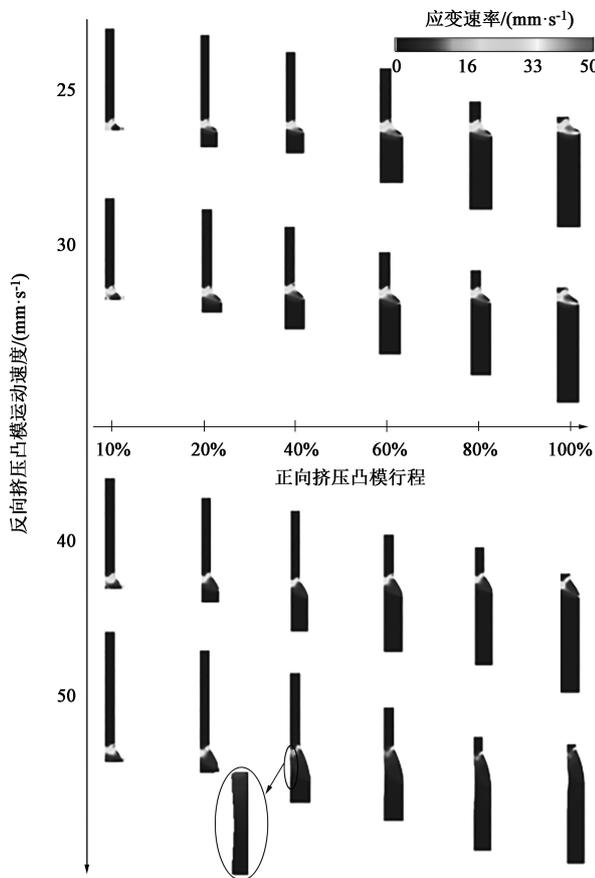


图 5 不同反向挤压凸模运动速度下的材料应变速率

Fig. 5 Material strain rates at different motion speeds of reverse extrusion punch

表 1 反向挤压凸模运动速度为 $75 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时不同反向挤压凸模运动速度对变形区的影响

Table 1 Influence of different motion speeds of reverse extrusion punch on deformation zone at motion speed of $75 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ for forward extrusion punch

$V_2 / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	h_m / mm
37.5	4.68
45	5.50
60	7.70
75	12.90 (失稳)

表 2 反向挤压凸模运动速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时不同反向挤压凸模运动速度对变形区的影响

Table 2 Influence of different motion speeds of reverse extrusion punch on deformation zone at motion speed of $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ for forward extrusion punch

$V_2 / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	h_m / mm
50	4.98
60	5.58
80	8.01
100	13.10 (失稳)

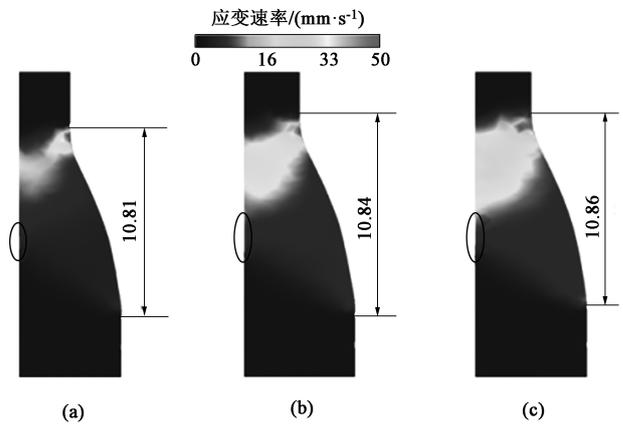


图 6 失稳出现时不同凸模运动速度下的变形区高度

(a) $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $70 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (c) $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 6 Heights of deformation zone when instability occurs under different punch motion speeds

4 基于正交实验的最优参数选择

成形参数是生产工艺规程的核心部分，因素的参数变化对金属零件成形性的影响规律便成为金属塑性成形领域中的重点研究内容，其意义在于可通过获得工艺因素对生产结果的影响程度来辅助工艺参数的优化。其中，极差分析是测量数据变化程度的最重要、最常用的指标，利用极差分析可以有效估算实验误差。挤压速度、材料温度、反向挤压模具圆角半径和摩擦因数的选择对控制变形区的高度有着密切联系，对关键因素设计 4 因素 3 水平的正交实验因素水平，如表 3 所示。

表 3 正交实验的因素水平表

Table 3 Factors and levels of orthogonal test

水平	A 挤压速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	B 材料 温度/ $^{\circ}\text{C}$	C 摩擦 因数	D 反向挤压凸模 圆角半径/ mm
1	50	950	0.15	1
2	75	1050	0.20	2
3	100	1150	0.25	3

表 4 为正交实验表，对表 4 中的 9 组实验方案进行模拟可得关键影响因素对变形区高度的影响，如表 5 所示，其中， K_1 、 K_2 、 K_3 为各因素在 3 水平下的变形区高度的平均值， R 为极差。

观察极差可以发现： $R_B > R_C > R_D > R_A$ ，因此，对变形区影响最大的因素是材料温度，其次是摩擦因数，再次是反向挤压凸模圆角半径，最后是模具的

表 4 正交实验方案

Table 4 Schemes of orthogonal test

方案	A 挤压速度/ (mm · s ⁻¹)	B 材料温 度/℃	C 摩擦因数	D 反向挤压凸模 圆角半径/mm
1	50	950	0.15	1
2	50	1050	0.20	2
3	50	1150	0.25	3
4	75	950	0.25	2
5	75	1050	0.15	3
6	75	1150	0.20	1
7	100	950	0.20	3
8	100	1050	0.25	1
9	100	1150	0.15	2

表 5 变形区高度的均值和极值分析

Table 5 Analysis on mean and extreme values of deformation zone height

方 案	A 挤压速度/ (mm · s ⁻¹)	B 材料温 度/℃	C 摩擦因 数	D 模具圆角 半径/mm	变形区高 度/mm
1	50	950	0.15	1	4.72
2	50	1050	0.20	2	4.73
3	50	1150	0.25	3	5.92
4	75	950	0.25	2	4.60
5	75	1050	0.15	3	6.13
6	75	1150	0.20	1	4.64
7	100	950	0.20	3	5.76
8	100	1050	0.25	1	4.69
9	100	1150	0.15	2	4.75
K ₁	5.123	4.670	5.040	5.200	
K ₂	5.123	4.707	5.183	5.030	
K ₃	5.067	5.937	5.090	5.083	
R	0.056	1.267	0.143	0.17	

挤压速度。图 7 为各因素水平对变形区影响的方差折线图，其中模具运动速度越快，对变形区的控制程度就会越低；同样地，材料的温度越高，材料的流动性就会越强，也不利于对变形区的控制；反向挤压凸模圆角半径为 2 mm 时变形区高度为最大值，如果圆角半径过小，则材料在镦粗阶段的流动性不会很好。因此，针对控制变形区，最优参数组合选择为 A1B1C2D3，即挤压速度为 50 mm · s⁻¹、材料温度为 950 ℃、摩擦因数为 0.2、反向挤压凸模圆角半径为 3 mm。

基于累积变形工艺并在最优参数的条件下，进

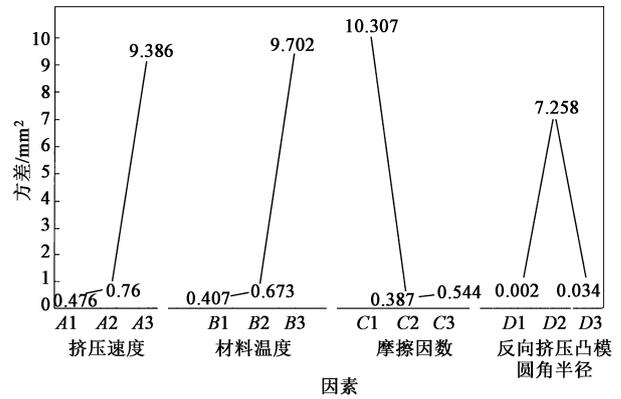


图 7 各因素水平对变形区高度的影响

Fig. 7 Effect of each factor and level on height of deformation zone

行实验验证，得出的工件如图 8 所示。工件成形效果较好，未出现失稳弯曲等缺陷。



图 8 工件实物图

Fig. 8 Physical diagram of workpiece

5 结论

(1) 累积变形工艺下，反向挤压凸模运动速度与正向挤压凸模运动速度比 V_2/V_1 = 反向挤压凸模上移板料体积/正向挤压凸模下压成形体积，若 V_2/V_1 大于 $\frac{3}{5}$ 或小于 $\frac{3}{5}$ ，则发生失稳弯曲。

(2) 累积变形工艺最优的速度比为 $\frac{V_2}{V_1} = \frac{3}{5}$ 。

(3) 其他因素对变形区高度影响的显著性顺序为：材料温度 > 摩擦因数 > 反挤压凸模圆角半径 > 挤压速度。

参考文献：

[1] 姚泽坤. 锻造工艺学与模具设计 [M]. 第 2 版. 西安：西北工业大学出版社，2007.
Yao Z K. Forging Technology and Die Design [M]. 2th Edition.

