

薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形规律

柴聪, 韩星会, 庄武豪

(武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了满足薄壁高筋框体高性能、高效率的制造要求, 提出了通过摆动模成形高筋型面, 以及采用多台阶飞边结构来约束金属流动的方法, 并通过有限元仿真揭示了薄壁高筋框体摆动辗压过程中等效应力、等效应变、温度和载荷的演化规律。结果表明: 接触区内金属的等效应力明显大于非接触区, 高筋与底板转角区域的等效应力相对较大、等效应变呈阶梯式上升趋势, 高筋区域的等效应变明显大于底板区域, 并且从高筋顶端至高筋底端逐渐增大; 薄板坯温度整体呈降低趋势, 高筋与底板转角区域的温度明显高于其他区域; 载荷呈周期性波动, 摆动模辗压长边与短边交汇的转角区域时载荷相对较大、辗压长边区域时载荷较小。研究结果为实现薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性变形过程的精确控制提供了理论依据。

关键词: 薄壁高筋框体; 摆动辗压; 塑性变形; 金属流动; 多台阶飞边结构

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.015

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 02-0118-08

Plastic forming law on multi-degree-of-freedom oscillating rolling for thin-walled and high-rib frame

Chai Cong, Han Xinghui, Zhuang Wuhao

(Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to meet the high-performance and high-efficiency manufacturing requirements for thin-walled and high-rib frame, the oscillating die was used to form the high-rib profile, and a method of constraining metal flow by a multi-step flash structure was proposed. Furthermore, the evolution laws of equivalent stress, equivalent strain, temperature and load during the oscillating rolling process of thin-walled and high-rib frame were revealed by finite element simulation. The results show that the equivalent stress of metal in the contact area is significantly greater than that in the non-contact area, and the equivalent stress in the high-rib and the corner area of bottom plate is relatively large. The equivalent strain shows a stepped upward trend, and the equivalent strain in the high-rib area is significantly larger than that in the bottom plate area, and gradually increases from the top to the bottom of high-rib. The temperature of thin plate billet decreases as a whole, and the temperature in the corner area between high-rib and bottom plate is significantly higher than that in the other areas. The load fluctuates periodically, and the load is relatively large when the oscillating die rolls the corner area where the long edge meets the short edge, while rolls the long edge area, the load is relatively small. The study result provides a theoretical basis for the precise control of plastic deformation process of the multi-degree-of-freedom oscillating forming for thin-walled and high-rib frame.

Key words: thin-walled and high-rib frame; oscillating rolling; plastic deformation; metal flow; multi-step flash structure

薄壁高筋框体因其强度高、重量轻, 为航空航

天等领域应用非常广泛的承载构件^[1-2]。该类构件底板薄、筋高且窄 (图1), 几何结构复杂, 成形难度大, 目前主要采用切削和焊接工艺制造。切削工艺是在厚板坯的基础上, 切除大量金属后, 获得薄壁高筋框体, 该工艺不仅材料利用率低、制造效率低, 而且切断了金属流线, 严重削弱了薄壁高筋框体的力学性能^[3-5]。焊接工艺是将分开加工的薄板和高筋焊接为整体后获得薄壁高筋框体, 属于分体式制造, 显著降低了薄壁高筋框体的承载能力^[6-8]。因此, 切削和焊接制造工艺均难以满足薄壁高筋框

收稿日期: 2022-04-04; 修订日期: 2022-07-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U21A20131); 国家自然科学基金资助项目 (52005357); 湖北省自然科学基金资助项目 (2019CFA041); 中国博士后科学基金资助项目 (2020M672429); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2022 III 008XZ)

作者简介: 柴聪 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 3212413767@qq.com

通信作者: 庄武豪 (1989-), 男, 博士, 特任副研究员

E-mail: zhuangwuhao@whut.edu.cn

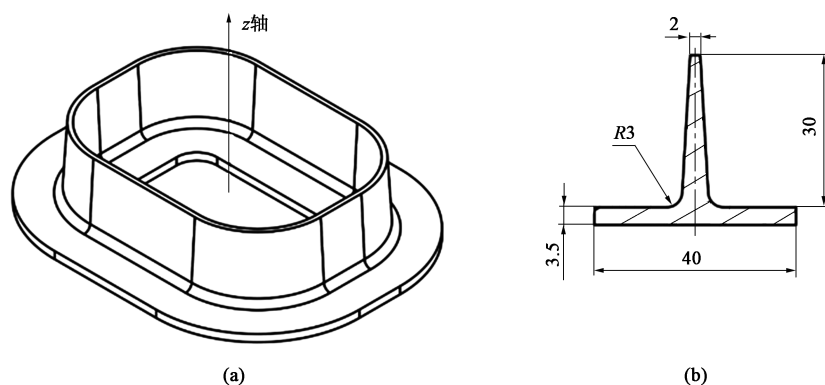


图1 薄壁高筋框体结构示意图

(a) 结构简图 (b) 尺寸图

Fig. 1 Schematic diagrams of thin-walled and high-rib frame

(a) Structure diagram (b) Sizes diagram

体高效、优质的制造要求。多自由度摆动辗压塑性成形工艺通过模具多道次辗压迫使金属多向流动,实现复杂构件成形,减少切削成形,为一种先进的连续局部塑性成形工艺^[9-11]。该工艺不仅金属流动能力强、制造效率高和材料利用率高,而且能够细化晶粒组织,获得连续的金属流线,大幅提高产品的力学性能^[12-15],为实现薄壁高筋框体高效、优质制造的重要途径。薄壁高筋框体多自由度摆动辗压原理为:将薄板坯放入凹模型腔内,凹模带动薄板坯向上作直线进给运动,同时摆动模作绕其自身轴线和 z 轴的多自由度运动,在摆动模和凹模的共同作用下,薄板坯金属发生多向流动,逐渐填充高筋,获得薄壁高筋框体。

然而,薄壁高筋框体几何形状和摆动辗压模具的运动轨迹较为复杂,这导致薄壁高筋框体的多自由度摆动辗压塑性成形的规律十分复杂,其原因在于:多自由度摆动辗压塑性成形过程中,摆动模绕其自身轴线和 z 轴多自由度转动,在摆动模的转动下,薄板坯内金属产生复杂的多向流动。同时,本文中薄壁高筋框体构件的几何形状较为极端,进一步加剧了薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中薄板坯内金属塑性变形的复杂程度。为了实现连续局部塑性变形,将摆动模运动轨迹设置为圆轨迹,且公转与自转速度相等,避免模具型腔与构件型面干涉而出现折叠等缺陷。其次,为了提高薄板坯内金属流动能力,保证薄壁高筋框体构件高筋区域的填充效果,薄板坯在多自由度摆动辗压塑性成形过程中需要多道次辗压。为此,本文中将摆动模的旋转速度设置为 $25.13 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,凹模的进给速度设置为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,使得薄板坯经过摆动模15道

次辗压后方可成形为薄壁高筋框体构件。其次,本研究基于DEFORM-3D有限元仿真平台建立了薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形有限元仿真模型,揭示了薄壁高筋框体在多自由度摆动辗压塑性成形过程中的等效应力、等效应变、温度和载荷等演化规律,为实现薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形制造提供了理论依据。

1 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形工艺设计方法

薄壁高筋框体可由两种多自由度摆动辗压塑性成形工艺方案成形,即凹模成形高筋方案和摆动模成形高筋方案,如图2所示,其中, O 为摆动模的摆动中心,箭头表示摆动模旋转方向。若采用如图2a所示的凹模成形高筋方案,高筋型面与凹模整体接触,金属流动阻力大,不利于高筋区域填充,且成形后高筋嵌入凹模型腔内,会导致脱模时高筋容易变形甚至破损,薄壁高筋框体脱模较为困难。若采用如图2b所示的摆动模成形高筋方案,摆动模与高筋型面局部接触,且摆动模在高筋型面上作多道次辗压,提升了高筋型面上金属的流动能力,更容易成形高筋,因此,本文采用摆动模成形高筋方案成形薄壁高筋框体。此外,本文中用于成形薄壁高筋框体的坯料为带内孔薄板坯,其轴截面形状与薄壁高筋框体底板轴截面形状相同,摆动辗压过程中薄板坯金属能够同时向内外两侧流动,从而避免发生穿筋缺陷。

采用摆动模成形高筋方案成形薄壁高筋框体时发现,尽管该工艺方案能够提高薄壁高筋框体高筋

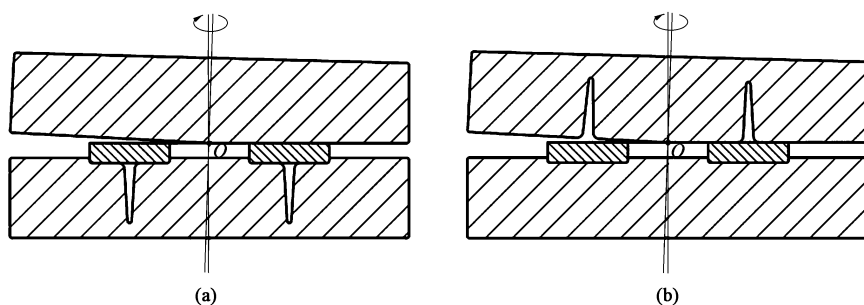


图 2 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形工艺方案

(a) 凹模成形高筋方案 (b) 摆动模成形高筋方案

Fig. 2 Multi-degree-of-freedom oscillating rolling plastic forming process schemes of thin-walled and high-rib frame

(a) Scheme of die forming high-rib (b) Scheme of oscillating die forming high-rib

的填充效果,但成形后薄壁高筋框体飞边较大,且高筋尚未完全填充饱满,与实际所需高筋高度存在较大差距。这是因为:底板区域金属在摆动模辗压的作用下分别向高筋型腔与内外两侧飞边流动,并且金属填充高筋型腔阻力明显大于成形内外侧飞边阻力,大部分金属沿着水平方向流动形成内外两侧水平飞边,而流向高筋型腔的金属较少,导致高筋区域填充不满,形成的水平飞边过大,如图 3a 所示。为了进一步提高薄壁高筋框体高筋的成形效果,需要增加金属在摆动辗压过程中向内外两侧飞边流动的阻力,防止过多金属沿水平方向向四周流动形成飞边,进而提高薄壁高筋框体构件的高筋生长极限。为此,本文提出多台阶飞边设计方法,如图 3b

所示,即将飞机窗框构件内外两侧的水平飞边设计为多台阶飞边,从而增大金属向飞边区域流动的阻力,提高高筋的生长极限。为了研究台阶飞边长度对薄壁高筋框体构件高筋填充效果的影响规律,本文设计了带有不同长度台阶飞边的薄壁高筋框体构件,飞边长度分别为 5、6 和 7 mm。采用有限元仿真方法研究了不同长度台阶飞边对薄壁高筋框体构件多自由度摆动辗压塑性成形后高筋区域填充效果的影响规律,如图 4 所示。研究结果表明,随着台阶飞边长度的逐渐减小,薄壁高筋框体构件高筋区域的填充效果越来越好,当台阶飞边长度为 5 mm 时,高筋填充效果较好,满足了薄壁高筋框体构件所需的高筋尺寸要求。

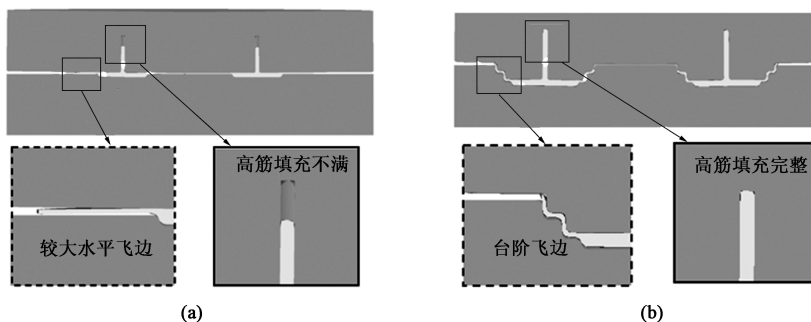


图 3 水平飞边 (a) 和多台阶飞边 (b) 设计方法对薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形高筋区域填充效果的影响

Fig. 3 Influences of horizontal flashing (a) and multi-step flashing (b) design methods on filling effect in high-rib area for multi-degree-of-freedom oscillating rolling plastic forming of thin-walled and high-rib frame

2 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压有限元仿真模型与实验验证

2.1 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压有限元仿真模型

根据所提出的摆动模成形高筋方案与多台阶飞边方案,基于 DEFORM-3D 有限元仿真平台建立薄壁高筋框体多自由度摆动辗压三维有限元仿真模型,

如图 5 所示。在本文提出的薄壁高筋框体构件多自由度摆动辗压塑性成形工艺中,摆动模倾角过大,会导致薄板坯摆动辗压过程中发生翘曲变形,摆动模倾角过小,会导致摆动辗压所需成形力增大,因此,摆动模倾角设置为 1° ;其次,在薄壁高筋框体构件多自由度摆动辗压塑性成形过程中,薄板坯经过摆动辗压的道次越多,其金属流动能力越强,薄壁高筋框体构件高筋区域填充效果越好。为此,

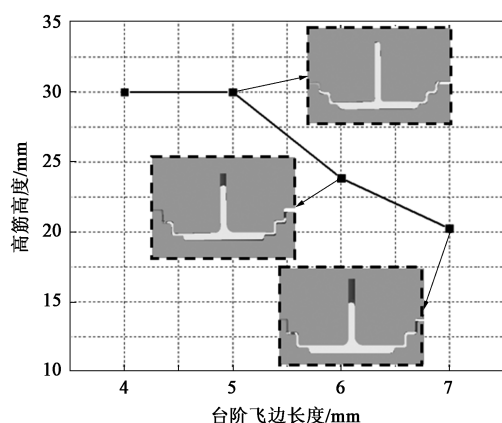


图4 台阶飞边长度对薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形高筋区域填充效果的影响

Fig. 4 Influence of step flash length on filling effect in high-rib area for multi-degree-of-freedom oscillating rolling plastic forming of thin-walled and high-rib frame

本文中将摆动模的旋转速度设置为 $25.13 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 凹模的进给速度设置为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 使得薄壁板坯经过摆动模 15 道次辗压后方可成形为薄壁高筋框体构件, 从而保证高筋成形效果。为了提高薄壁高筋框体摆动辗压精度, 在摆动模做最后 2 道次辗压运动时, 凹模停止向上进给, 精整高筋型面。有限元计算步长决定了薄壁高筋框体摆动辗压过程中摆动模运动的连续性, 从而影响计算精度。过大的有限元计算步长会导致摆动模运动过程不连续, 摆动模与薄板坯的接触状态不稳定, 极易造成网格畸变和薄板坯金属损失, 降低计算精度。为此, 本文分析了有限元计算步长对薄板坯金属体积的影响规律, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 当步长为 0.002 时, 薄板坯金属体积损失仅为 1.41%, 然而严重影响有限元计算效率; 当步长为 0.005 时, 薄板坯金属体积损失为 3.81%, 在保证计算效率的同时, 能够满足薄壁高筋框体多自由度摆动辗压有限元仿真计算精度。本模型中薄板坯材料为 7075 高强铝合金, 模具材料为 H13 钢, 薄板坯设置为刚塑性体, 模具设置为刚性体。采用四面体网格对薄板坯进行网格划分, 其中, 有限元网格数量对计算效率和精度影响显著, 过少的网格难以表达出薄壁高筋框体的复杂型面, 降低计算精度; 而过多的网格则会影响计算效率。为了兼顾计算效率和精度, 薄板坯被划分为 30 万个四面体网格, 最小网格与最大网格的尺寸比设置为 1:3。此外, 由于薄壁高筋框体的底板和高筋均非常薄, 热量更容易散失, 导致金属流动能力差, 高筋填

充不饱满。为了保证高筋填充效果, 模具初始温度设置为 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 薄板坯初始温度设置为 $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 从而减弱薄壁高筋框体内热量的损失, 保证薄壁高筋框体多自由度摆动辗压过程中薄板坯金属具有良好的流动性。薄壁高筋框体摆动辗压主要工艺参数如表 1 所示。

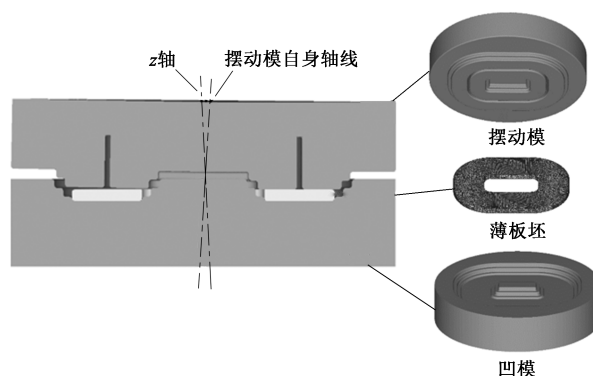


图5 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压有限元仿真模型

Fig. 5 Finite element simulation model of multi-degree-of-freedom oscillating rolling for thin-walled and high-rib frame

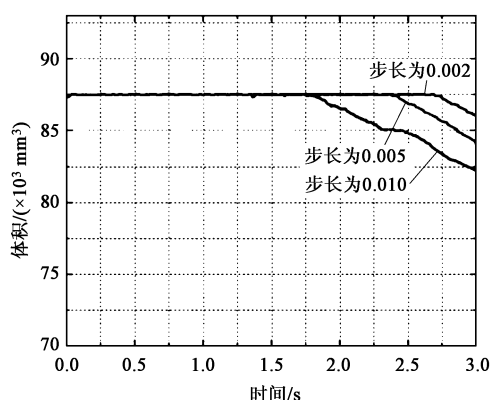


图6 不同步长薄板坯金属体积变化曲线

Fig. 6 Variable curves of metal volume for thin-walled blank with different step increments

2.2 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压实验验证

为了验证有限元仿真模型的准确性, 开展了薄壁高筋框体多自由度摆动辗压工艺实验, 其工艺参数与表 1 所建立的有限元仿真工艺参数一致。在薄壁高筋框体构件多自由度摆动辗压塑性成形实验中, 薄板坯通过加热炉加热至 $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 模具通过套在模具外侧的加热线圈整体加热至 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 确保实验温度与有限元仿真模型温度保持一致。图 7a 和图 7b 分别为试样的仿真结果和实物图, 由图 7 可知, 有限元仿真和工艺实验所得到的薄壁高筋框体形状非常接近, 验证了薄壁高筋框体多自由度摆动辗压有限元仿真模型的可靠性。

表 1 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压有限元仿真工艺参数
Table 1 Finite element simulation process parameters of multi-degree-of-freedom oscillating rolling for thin-walled and high-rib frame

参数	数值
薄板坯厚度/mm	6.70
飞边厚度/mm	1
摆动模倾角/(°)	0.50
摆动模转速/(rad · s ⁻¹)	25.13
下模进给速度/(mm · s ⁻¹)	1
模具初始温度/℃	400
薄板坯初始温度/℃	450
摩擦因数	0.30

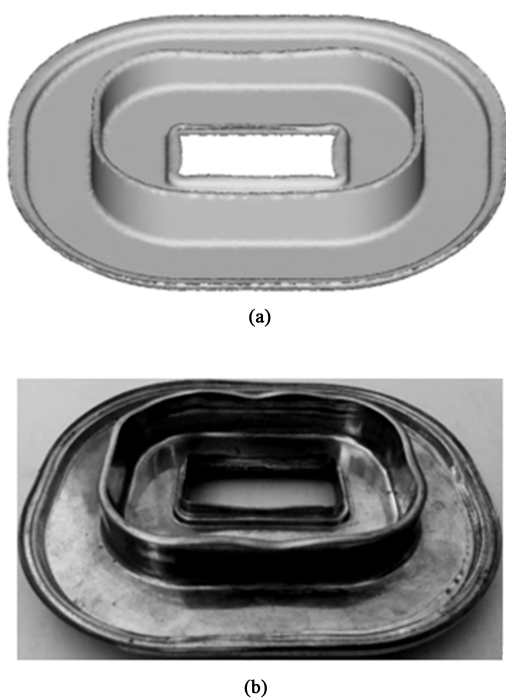


图 7 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压有限元仿真结果 (a) 和实验结果 (b)

Fig. 7 Finite element simulation result (a) and experiment result (b) of multi-degree-of-freedom oscillating rolling for thin-walled and high-rib frame

3 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形规律

3.1 等效应力分布与演化规律

图 8 为薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形的等效应力分布与演化云图, 其中 t 为时间。从图 8 中可以看出, 在薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中, 摆动模和薄板坯之间发生了局部接触, 接触区内金属等效应力明显大于非接触区

内金属的等效应力。其次, 高筋与底板转角区域的等效应力相对较大, 这是因为: 金属流过该转角区时, 其流动方向发生了改变, 导致金属产生剧烈剪切变形, 同时该区域几何形状突变, 容易产生应力集中。为了更详细地揭示薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中等效应力的演化过程, 分别在薄壁高筋框体高筋、底板以及高筋与底板转角区域选取测量点 $P1 \sim P4$ 进行等效应力演化过程跟踪, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 在摆动模每个辗压

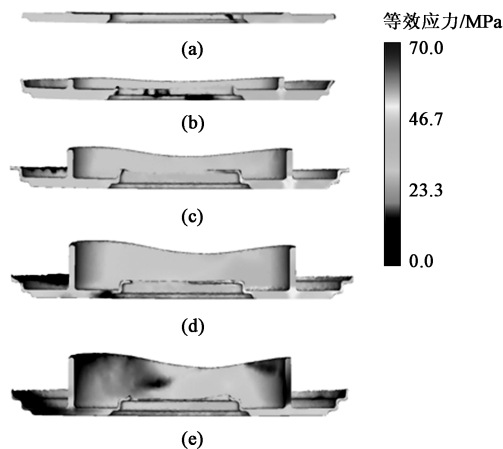


图 8 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形等效应力分布与演化云图

(a) $t=0.75$ s (b) $t=1.50$ s (c) $t=2.25$ s
(d) $t=3.25$ s (e) $t=3.70$ s (精整)

Fig. 8 Equivalent stress distribution and evolution cloud diagrams of multi-degree-of-freedom oscillating rolling plastic forming for thin-walled and high-rib frame

(a) $t=0.75$ s (b) $t=1.50$ s (c) $t=2.25$ s
(d) $t=3.25$ s (e) $t=3.70$ s (Sizing)

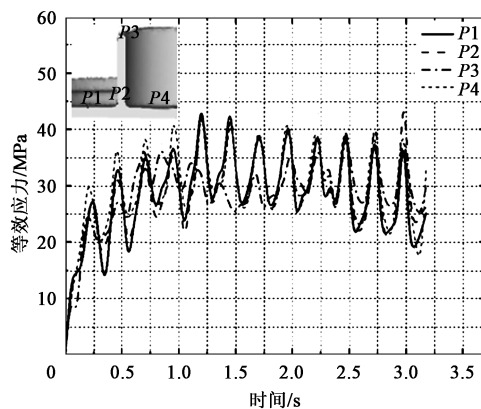


图 9 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形等效应力演化过程

Fig. 9 Equivalent stress evolution process of multi-degree-of-freedom oscillating rolling plastic forming for thin-walled and high-rib frame

道次内, 所有测量点处的等效应力均呈先增大后降低的变化趋势, 这是因为: 当摆动模逐渐接近测量

点时,测量点处金属的变形程度逐渐增强,当摆动模逐渐远离测量点时,测量点处金属的变形程度逐渐减弱。对比摆动模不同辗压道次之间的等效应力曲线可以看出,随着摆动辗压过程的逐渐推进,等效应力整体呈逐渐增大趋势,这是因为金属塑性变形逐渐累积,变形程度逐渐增强;但在薄壁高筋框体多自由度摆动辗压精整阶段,等效应力明显降低,这是因为在精整阶段凹模停止进给,金属塑性变形程度减弱。

3.2 等效应变分布与演化规律

图 10 为薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中等效应变分布和演化云图,图 11 为薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中不同测量点等效应变演化曲线。从图 10 可以看出,在摆动模的不断辗压下,薄板坯内金属塑性变形逐渐累积,其各区域等效应变均呈逐渐增大趋势。从图 11 可以看出,薄壁高筋框体不同测量点下的等效应变均呈阶梯上升趋势,导致该现象的原因为:当接触区域经过测量点时,测量点处的金属发生塑性变形,等效应变逐渐增大;当接触区域离开测量点后,测量点处的金属几乎不发生塑性变形,因此,等效应变基本保持不变。其次,高筋区域的等效应变明显大于底板区域,这是因为:高筋区域金属是底板区域金属经过转角区域时发生剧烈剪切变形后形成的,因此,高筋区域的金属累积更多的塑性变形。此外,从高筋顶端至高筋底端,等效应变呈逐渐增大趋势(图 10),这是因为:越晚流入高筋区域的金属在底板区域经历越长时间的摆动模辗压变形后,累积了越多的塑性变形。

3.3 温度分布与演化规律

图 12 为薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中的温度分布和演化云图,图 13 为薄壁高筋框体不同测量点温度演化曲线。从图 12 可以看出,由于薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中薄板坯与温度较低的模具接触,薄板坯内热量逐渐向模具内扩散,因此,薄板坯温度整体呈逐渐降低趋势。从图 13 可以看出,在摆动模每个辗压道次内,所有测量点处的金属温度均呈先增大后降低的变化趋势,这是因为:当摆动模辗压至测量点时,测量点处的金属发生塑性变形,变形产热使得测量点处的金属温度明显升高,此后随着摆动模逐渐远离,测量点处的金属热量逐渐向其相邻区域扩散,测量点温度逐渐降低。其次,从图 12 可以看出,高筋与底板转角区域温度明显高于其他区域,这是因

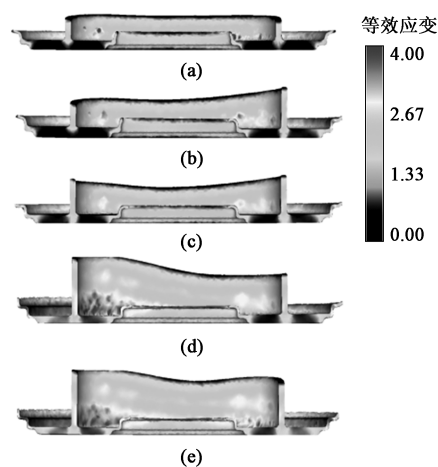


图 10 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形等效应变分布与演化云图

(a) $t=2.25\text{ s}$ (b) $t=2.55\text{ s}$ (c) $t=2.90\text{ s}$
(d) $t=3.25\text{ s}$ (e) $t=3.70\text{ s}$ (精整)

Fig. 10 Equivalent strain distribution and evolution cloud diagrams of multi-degree-of-freedom oscillating rolling plastic forming for thin-walled and high-rib frame

(a) $t=2.25\text{ s}$ (b) $t=2.55\text{ s}$ (c) $t=2.90\text{ s}$
(d) $t=3.25\text{ s}$ (e) $t=3.70\text{ s}$ (Sizing)

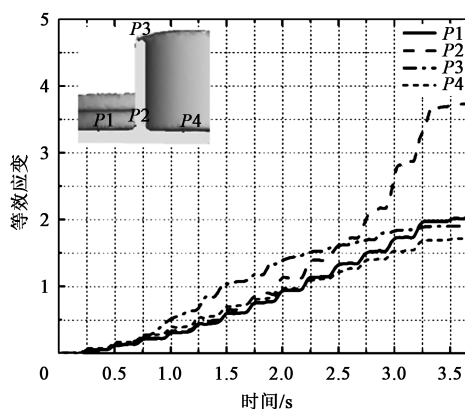


图 11 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形等效应变演化过程

Fig. 11 Equivalent strain evolution process of multi-degree-of-freedom oscillating rolling plastic forming for thin-walled and high-rib frame

为:该区域的金属塑性变形更剧烈(图 10),变形产热更多。从图 13 可以看出,高筋与底板转角区域的温度整体呈先降低后增大的趋势,这是因为:在薄壁高筋框体摆动辗压初期,模具与薄板坯间的温差较大,薄板坯向模具内传递的热量多于该区域塑性变形产生的热量,因此该区域温度逐渐降低;其次,在薄壁高筋框体摆动辗压后期,模具与薄板坯间的温差逐渐缩小,同时高筋与底板转角区域的金属塑性变形更加剧烈,变形产生的热量多于薄板坯向模具内传递的热量,因此,高筋与底板转角区域的温度逐渐升高。此外,越接近高筋顶端的金属温

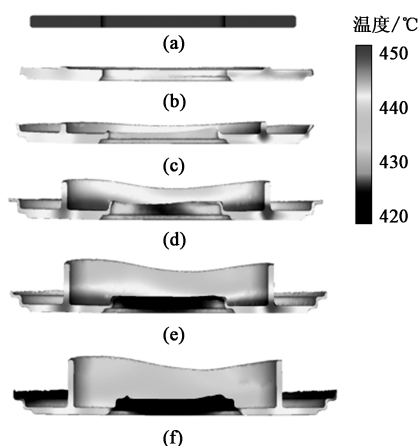


图 12 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形温度分布与演化云图

(a) $t=0.00\text{ s}$ (b) $t=0.75\text{ s}$ (c) $t=1.50\text{ s}$
(d) $t=2.25\text{ s}$ (e) $t=3.00\text{ s}$ (f) $t=3.70\text{ s}$ (精整)

Fig. 12 Temperature distribution and evolution cloud diagrams of multi-degree-of-freedom oscillating rolling plastic forming for thin-walled and high-rib frame

(a) $t=0.00\text{ s}$ (b) $t=0.75\text{ s}$ (c) $t=1.50\text{ s}$
(d) $t=2.25\text{ s}$ (e) $t=3.00\text{ s}$ (f) $t=3.70\text{ s}$ (Sizing)

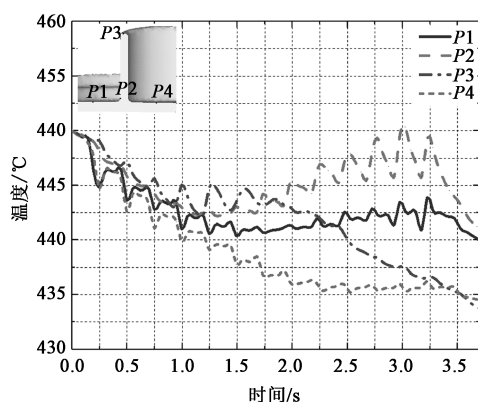


图 13 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形温度演化过程

Fig. 13 Temperature evolution process of multi-degree-of-freedom oscillating rolling plastic forming for thin-walled and high-rib frame

度越低 (图 12), 这是因为: 越接近高筋顶端的金属, 流入高筋模具型腔越早, 与温度较低的模具型腔接触, 向模具内传递热量越多, 同时越接近高筋顶端的金属塑性变形越弱 (图 10), 变形产热越少。

3.4 载荷演化规律

图 14 为薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中的载荷演化曲线。从图 14 中可以看出, 在 $0.00\sim 3.25\text{ s}$ 内, 载荷整体呈逐渐增大趋势, 导致该现象的原因为: 随着薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程的逐渐推进, 金属塑性变形不断累积, 变形程度逐渐增强, 同时薄板坯温度逐渐降低 (图

12), 金属流动能力减弱, 并且高筋和飞边逐渐成形, 金属流动阻力不断增大。但在薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形精整阶段 ($3.25\sim 3.75\text{ s}$), 载荷明显降低, 这是因为: 在精整阶段凹模停止进给, 参与变形的金属减少, 同时金属变形程度减弱。图 15 为摆动模辗压 1 个道次内的载荷变化曲线。从图 15 可以看出, 当摆动模从薄壁高筋框体长边向短边移动时, 载荷逐渐增大, 并在摆动模经过长边与短边交汇的转角区时载荷达到最大值, 这是因为: 此时金属流动方向发生改变, 流动阻力显著增强; 当摆动模从短边向长边移动时, 摆动模经过另一侧转角区, 金属流动方向再次发生转变, 载荷再次上升; 此后, 摆动模沿长边移动, 其流动阻力相对较小, 载荷逐渐降低。

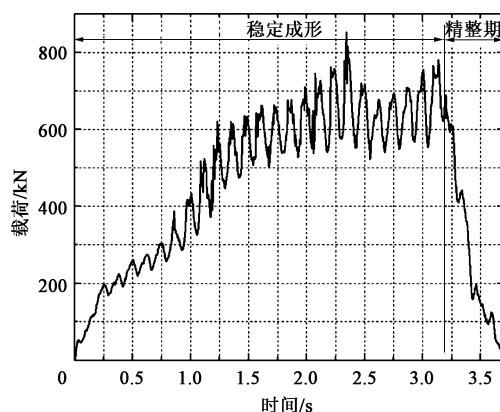


图 14 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形载荷演化曲线

Fig. 14 Load evolution curve of multi-degree-of-freedom oscillating rolling plastic forming for thin-walled and high-rib frame

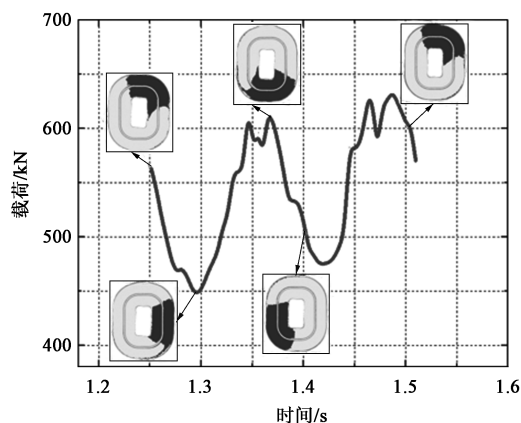


图 15 摆动模辗压 1 个道次内载荷变化曲线

Fig. 15 Load variation curve of oscillating die rolling in one pass

4 结论

(1) 提出了通过摆动模成形高筋型面和多台阶

飞边约束金属流动的方法制造薄壁高筋框体,提升了薄壁高筋框体中高筋的填充效果,实现了薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形,并通过工艺实验验证了有限元仿真模型的可靠性。

(2) 在薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中,接触区内金属的等效应力明显大于非接触区内金属的等效应力,高筋与底板转角区域的等效应力相对较大,在摆动模每个辗压道次内,等效应力呈先增大后降低的变化趋势。

(3) 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中的等效应变呈阶梯式上升趋势,高筋区域的等效应变明显大于底板区域,并且从高筋顶端至高筋底端的等效应变逐渐增大。

(4) 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中薄板坯温度整体呈降低趋势,高筋与底板转角区域的温度明显高于其他区域,越接近高筋顶端,金属温度越低,在摆动模每个辗压道次内薄板坯温度先增大后降低。

(5) 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形过程中载荷呈周期性波动,摆动模辗压长边与短边交汇的转角区域时载荷相对较大,辗压长边区域时载荷较小。

参考文献:

- [1] 刘飞,贾晓飞,王文宁,等. TC4 薄腹高筋构件等温塑性成形研究 [J]. 航天制造技术, 2018, (3): 31-34.
Liu F, Jia X F, Wang W N, et al. Research on isothermal plastic forming of TC4 thin belly and high rib members [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2018, (3): 31-34.
- [2] 林海涛,吴道祥,陈焕良,等. 基于数值模拟的某飞机旅客观察窗窗框模锻成型工艺研究 [J]. 铝加工, 2017, (5): 4-10.
Lin H T, Wu D X, Chen H L, et al. Study on forging process of an aircraft window frame based on numerical simulation [J]. Aluminum Fabrication, 2017, (5): 4-10.
- [3] 杨德一,张孝华,孙志建. 高速切削加工技术及其应用 [J]. 机械, 2007, 34 (8): 53-65.
Yang D Y, Zhang X H, Sun Z J. Technology and development of high speed machining [J]. Machinery, 2007, 34 (8): 53-65.
- [4] 王光宇,吴运新,闫鹏飞. 航空铝合金薄壁件铣削加工变形的预测模型 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43 (5): 1696-1702.
Wang G Y, Wu Y X, Yan P F. Prediction model for machining deformation of aeronautical aluminum alloy thin-walled workpiece [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43 (5): 1696-1702.
- [5] 朱启儒,李军. 铝合金薄壁筒形零件车削与夹具 [J]. 现代制造工程, 1996, (8): 29-30.
Zhu Q R, Li J. Turning and fixture of aluminum alloy thin-walled cylindrical parts [J]. Modern Manufacturing Engineering, 1996, (8): 29-30.
- [6] 刘大海,黎俊初,熊洪森. 2A12 铝合金焊接筋板件蠕变时效成形有限元分析 [J]. 南昌航空大学学报: 自然科学版, 2012, 26 (1): 28-34.
Liu D H, Li J C, Xiong H M. Finite element analysis of creep aging forming of 2A12 aluminum alloy welded rib plate [J]. Journal of Nanchang Hangkong University: Natural Sciences, 2012, 26 (1): 28-34.
- [7] 邵青,何宇廷,张腾,等. 铝合金搅拌摩擦焊接加筋板剪切稳定性研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (20): 93-99.
Shao Q, He Y T, Zhang T, et al. Study on stability performance of friction stir welded aluminum alloy stiffened panel under shear load [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (20): 93-99.
- [8] 吕涛. 钛合金舱体结构件激光点焊变形预测与焊接顺序优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Lyu T. Deformation Prediction and Welding Sequence Optimization of Titanium Cabin Using Laser Spot Welding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [9] 伍太宾. 国内外摆动辗压技术的研究和发展 [J]. 精密成形工程, 2009, 1 (3): 1-6.
Wu T B. Research and development of the rotary forging technology at home and abroad [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1 (3): 1-6.
- [10] 胡亚民,李春天,周全义. 摆动辗压机的现状及其发展 [J]. 精密成形工程, 2009, 1 (2): 7-11.
Hu Y M, Li C T, Zhou Q Y. Status quo and development for the orbital forming press [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1 (2): 7-11.
- [11] Yuan S J, Wang X H, Liu G, et al. The precision forming of pin parts by cold-drawing and rotary-forging [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 86 (1/3): 252-256.
- [12] 邓小宾. 锥齿轮冷摆辗精密成形规律和工艺参数优化设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
Deng X B. Deformation Mechanisms and Optimization of Processing Parameters of Cold Rotary Forging of Bevel Gears [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [13] Han X H, Hua L, Zhuang W H, et al. Process design and control in cold rotary forging of non-rotary gear parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (11): 2402-2416.
- [14] 韩冠军,杨合,樊晓光,等. TA15 合金大型筋板件等温局部加载晶粒尺寸演化研究 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (5): 112-117.
Han G J, Yang H, Fan X G, et al. Numerical simulation of microstructure evolution of TA15 alloy large-scale rib-web parts during isothermal local loading process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (5): 112-117.
- [15] 刘钢,苑世剑,王仲仁. 摆辗滑轮形工件形成过程的数值模拟及分析 [J]. 塑性工程学报, 2000, 7 (2): 5-8.
Liu G, Yuan S J, Wang Z R. Simulation and analysis of forming process of pulley shaped workpiece during rotary forging [J]. Journal of Plastic Engineering, 2000, 7 (2): 5-8.