

单耳吊具复合挤压成形工艺数值模拟

崔继红, 郭永强

(中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对单耳吊具薄壁异形的产品结构特点, 提出了基于金属流动控制的新成形工艺。分析了闭式挤压过程中金属的流动规律, 其中温度场是影响最终充填效果的关键因素, 挤压速度的不同会引起变形温度场差异, 挤压速度越快, 坯料热量损失越少, 越有利于产品的成形。研究发现, 在单耳吊具成形过程中端面的高度差最大达到 16.6 mm。为提高产品尺寸的一致性和稳定性, 建立了金属流动控制的分析模型, 对 5 种背压力作用下产品成形后的高度差进行了研究, 发现在 500 kN 以上的背压力作用下, 高度差能够减小至 3 mm 以内。最后, 在分析的基础上设计了专用的工艺模具和设备, 其中背压力加载可采用 500~2000 kN 可调压力的油缸来实现, 并通过试验获得了合格的单耳吊具挤压件, 实现了此类产品的成形工艺开发。

关键词: 单耳吊具; 复合挤压; 薄壁异形件; 背压成形; 金属流动控制

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.015

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 08-0104-06

Numerical simulation on compound extrusion forming process for single ear sling

Cui Jihong, Guo Yongqiang

(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China)

Abstract: A new forming process based on metal flow control was proposed for the structural characteristics of thin-walled special-shaped single ear sling product. The metal flow law in closed extrusion process was analyzed, in which the temperature field was the key factor affecting the final filling effect, and the difference of extrusion speed could cause the difference of deformation temperature field that the faster the extrusion speed was, the less the heat loss of billet was, and the more conducive to the forming of product. The research finds that the maximum height difference of the end surface reaches 16.6 mm during the forming process of single ear sling. Then, in order to improve the consistency and stability of product size, an analysis model for the metal flow control was established, and the height difference of the product after forming under the action of five back pressures was studied. It is found that under the back pressure of more than 500 kN, the height difference reduces to less than 3 mm. Finally, based on the analysis, a special process mold and equipment were designed, in which the back pressure loading was realized by an oil cylinder with adjustable pressure of 500–2000 kN, and the qualified single ear sling extrusion parts were obtained by experiments, realizing the forming process development of such products.

Key words: single ear sling; compound extrusion; thin-walled special-shaped part; back pressure forming; metal flow control

机械工业“十四五”发展纲要中提出了重点发展近净成形技术、精密成形技术等绿色生产工艺的要求^[1]。热挤压工艺作为先进精密塑性成形技术的重要组成部分, 其通过凸模在压应力的作用下, 将放置于凹模型腔内的高温金属坯料从模具中挤出或者成形, 可制成长轴、深筒及特种管等形状复杂的零件, 具有材料利用率高、材料组织性能好以及生产效率

高等优势^[2-4], 得到了广泛应用。

单耳吊具为一种复杂的薄壁异形件, 应用在高铁输电线的接触网中, 是绝缘子的连接附件。其原有成形工艺为铸造成形, 但由于铸造工艺容易使产品产生砂眼、粘砂、偏析、气孔等常见缺陷, 容易出现金属附件因受大扭矩而导致开裂的情况, 对列车运行造成了安全隐患。随着我国高铁技术的迅猛发展, 为保证其安全运行, 对接触网中的零部件提出了更高的要求, 为确保绝缘子在使用过程中的安全, 将产品的生产工艺由铸造改为锻造是实现其性能提升的重要改进手段, 本文针对锻造新工艺开发进行了研究。

此类锻件成形适合闭式复合挤压成形, 国内外

收稿日期: 2023-07-11; 修订日期: 2023-08-16

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目 (2019JZZY010431)

作者简介: 崔继红 (1983-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 276681354@qq.com

通信作者: 郭永强 (1984-), 男, 博士研究生, 正高级工程师

E-mail: shandong133@163.com

在闭式复合挤压的研究主要集中在有色金属领域，如涡旋盘及轮毂成形上。谢谈等^[5]采用精密流动控制成形方法实现了涡旋盘的成形。田野等^[6]对涡旋盘变形区的金属流动进行了理论分析，建立了目标函数，并对其关联系数和关联度进行了分析，获得了最优的成形工艺参数。吴进等^[7]针对涡旋盘挤压成形，提出了采用初始力非零的线性递增背压力施加的工艺。王强等^[8]提出了铝合金轮毂正向-反向-径向复合挤压的新技术，并对其成形过程进行了分析，研究了坯料尺寸、摩擦因数和模具圆角半径等工艺参数对等效应变的影响。张治民等^[9]提出了将直线运动与旋转运动相匹配的多向加载旋转挤压成形新技术。Shen X H 等^[10]研究了铁路车轮成形过程中的金属流动控制。Deng L 等^[11]针对筋板结构的热锻件提出了阻力控制成形技术来实现金属流线分布

优化。在复合挤压成形方面，任广升等^[12]应用光塑性方法研究了复合挤压变形，得到了变形区应变场的分布曲线。Noh J H 等^[13-14]对杯-杯等径形状的复合挤压进行了分析，发现最剧烈的塑性应变出现在冲头拐角附近，并得出局部最大磨损位置往往位于冲头头部区域的结论。

但是，针对单耳吊具类黑色金属复杂锻件热挤压成形领域的相关研究还很少。因此，本文对单耳吊具薄壁异形件的成形工艺进行了深入研究，以期获得最优的成形工艺参数。

1 挤压工艺分析

1.1 产品工艺分析

单耳吊具实物如图 1a 所示，其使用位置见图 1b，为高铁输电线的关键部件。

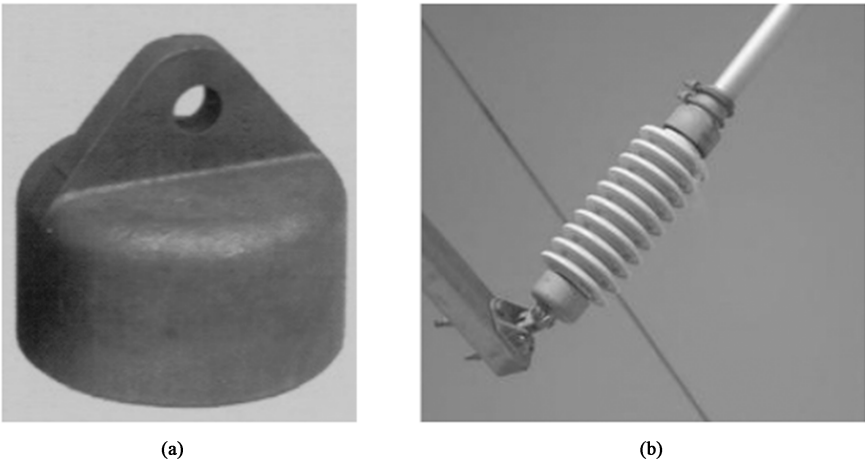


图 1 单耳吊具实物 (a) 及其使用位置 (b)
Fig. 1 Physical entity of single ear sling (a) and its use location (b)

图 2 为单耳吊具结构尺寸图，主要由上部筒形部分和下部三角板部分构成，筒形部分的最大外圆直径为 $\Phi 141$ mm、壁厚为 7.5 mm、高度为 72 mm，中间连接厚度为 7.6 mm，三角板区域夹角为 81.6° 、厚度为 18 mm，为一种复杂的异形筒形零件。对于这种异型零件挤压，金属流动极其复杂。该工艺的一个难点在于保证型腔充满，特别是筒形部分的端面平齐度和壁厚均匀度，另外一个难点在于保证筒形壁厚 7.5 mm 的尺寸要求。

1.2 有限元分析模型

建立单耳吊具结构的数值模拟分析模型，如图 3 所示，包含上模、下模和坯料，本研究中模具选用 H13 钢、坯料选用 AISI-1045 钢材料，模拟参数如表 1 所示。

表 1 模拟参数
Table 1 Simulation parameters

参数	数值
摩擦因数	0.25
挤压速度/(mm·s ⁻¹)	100、50、22
热传导系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	11
模具温度/℃	200
坯料温度/℃	1180
坯料尺寸/(mm×mm)	$\Phi 75 \times 90$

2 闭式挤压金属流动规律和高度差变化规律分析

2.1 闭式挤压金属流动规律

采用一次闭式挤压的方式对成形过程进行分析，图 4 为考虑和未考虑热传导情况下成形过程的载

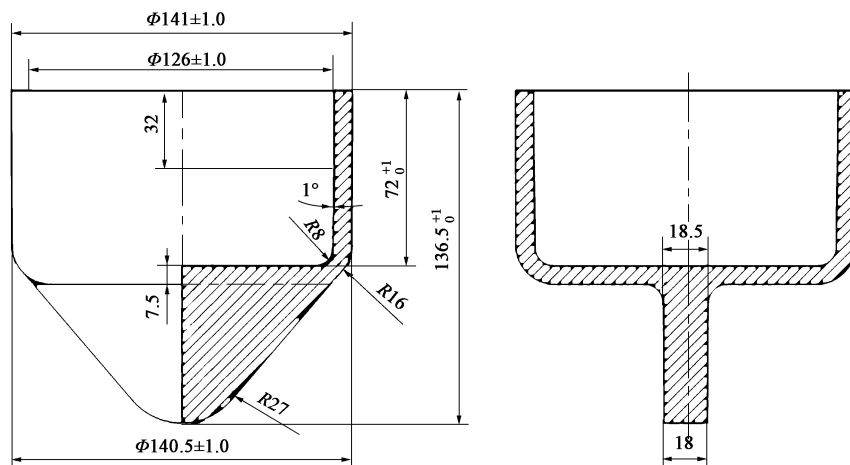


图 2 单耳吊具结构尺寸图

Fig. 2 Structure and dimension drawing of single ear sling

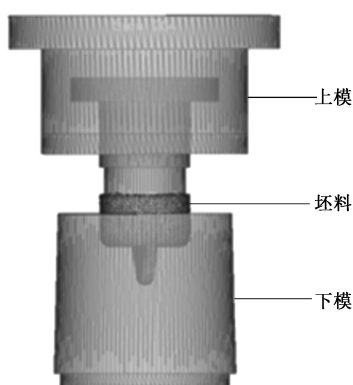


图 3 单耳吊具结构的数值模拟分析模型

Fig. 3 Numerical simulation analysis model of single ear sling structure

荷-时间曲线。考虑热传导情况时，锻造过程中最大的成形载荷为 1000 kN 左右，在闭式挤压开始阶段，冲头挤压热坯料首先填充坯料与模具的空隙，随后温度急剧上升，到达一定阶段后，根据最小阻力定律，上部筒形部分和下部三角板部分交替成形。未考虑热传导情况时，成形载荷曲线近似水平分布，而在考虑热传导情况下，成形载荷曲线呈线性上升的趋势，这主要是由于：坯料和模具间的热传导导致坯料温度下降，变形抗力增加。成形最后阶段为上端面的成形，此时载荷急剧上升。在实际生产过程中挤压速度直接决定了变形时间的长短，变形时间越长，温度热量损失越大，成形载荷也越大。

在研究过程中，选用的快速挤压液压机在压力不同的情况下挤压速度也不同，取挤压速度分别为 100、50 和 $22 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 这 3 组数据进行比较，其成形载荷-行程曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出，3 种挤压速度的成形载荷-行程曲线的变化趋势基本

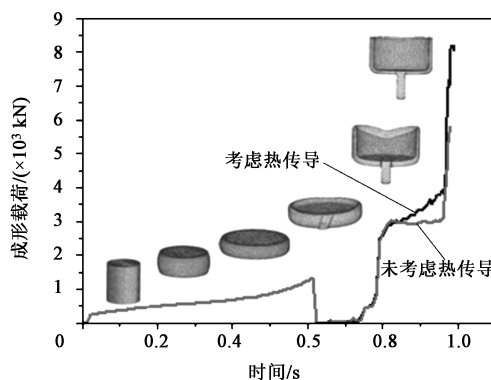


图 4 成形载荷随时间变化的曲线

Fig. 4 Curves of forming load changing with time

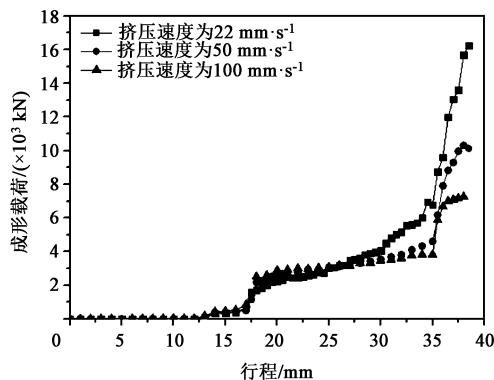


图 5 3 种挤压速度下的成形载荷-行程曲线

Fig. 5 Forming load-stroke curves under three extrusion speeds

相同，但是在交替成形阶段，挤压速度越慢，成形载荷-行程曲线的增加幅度越大。同时也可以看出，挤压速度为 $22 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的成形载荷最大，达到 16210 kN。而挤压速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的成形载荷仅为 7160 kN。在成形全过程中，挤压速度越快，成形载荷越小，越有利于成形。因此，对于闭式挤

压成形需要较高的挤压速度来降低其成形载荷。

2.2 高度差变化规律分析

图 6 为复合挤压过程模拟的最大主应力图，从图 6 可以看出，成形过程大概分为两个阶段：第 1 阶段，筒形部分和三角板部分根据最小阻力定律，交替成形；第 2 阶段为整形阶段，筒形部分流动

快的金属接触上模具，随着轴向金属陆续接触上模具，挤压力急剧上升，金属同时沿着圆周方向流动。在第 1 阶段，筒形部分端面受下部三角板部分成形的影响，呈现出不同的填充程度，这种金属流动变化极易引起产品端面的不平整和壁厚不均匀等缺陷。

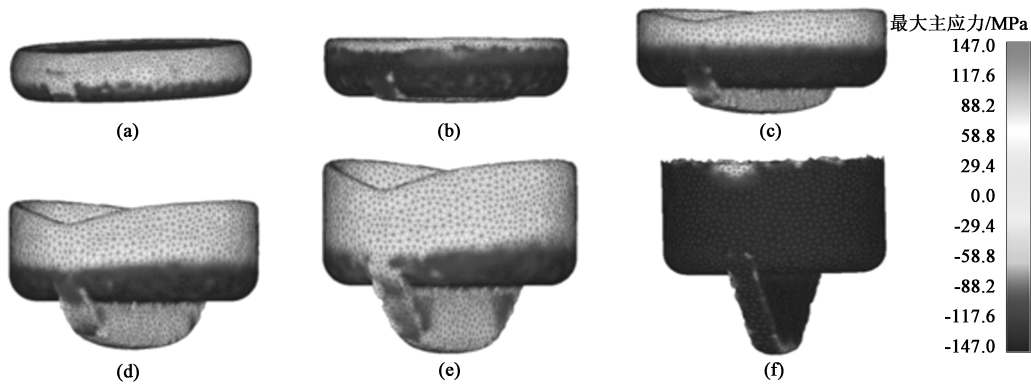


图 6 复合挤压过程金属流动规律
(a) 1 步 (b) 17 步 (c) 23 步 (d) 28 步 (e) 35 步 (f) 50 步
Fig. 6 Metal flow laws during compound extrusion process
(a) Step 1 (b) Step 17 (c) Step 23 (d) Step 28 (e) Step 35 (f) Step 50

对 V 型端面的填充进行分析，如图 7 所示。V 型的高度差随模拟工步变化的曲线呈现先增大后减小的趋势，造成这种趋势的原因为：参与筒形部分成形的金属同时参与到下部三角板部分的成形，造成上部筒形部分成形不均匀。在 101 步时，高度差达到最大，为 16.6 mm，但由于闭式型腔挤压，随着最后型腔的填满，高度差在压力作用下逐渐消失。此种成形工况依靠最后成形时的整形达到产品的尺寸要求，一方面需要具有较大的成形载荷，另一方面不均匀的金属流动对模具的磨损加大，模具容易失效。

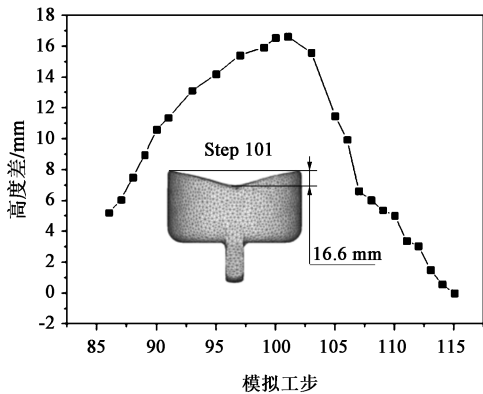


图 7 填充高度差变化曲线
Fig. 7 Changing curve of filling height difference

3 基于背压力加载的金属流动控制工艺

控制金属流动的工艺需要在筒形上端添加线性变化的压力，对添加线性压力的成形过程进行了模拟分析，模拟分析模型如图 8 所示。

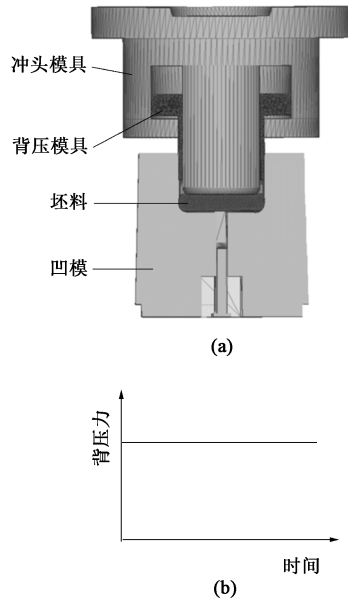


图 8 控制金属流动分析模型 (a) 和背压力施加方式 (b)
Fig. 8 Analysis model for controlling metal flow (a) and application mode of back pressure (b)

通过分别施加 100、200、300、400 和 500 kN 的背压力,得到的 V 型填充面最大的高度差如图 9 所示,当背压力为 500 kN 时,其填充高度差能够控制在 3 mm 左右。

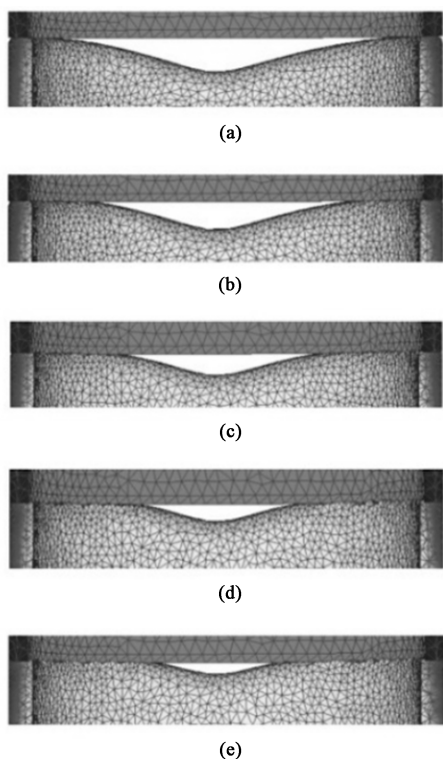


图 9 不同背压力下的填充高度差对比
(a) 100 kN (b) 200 kN (c) 300 kN
(d) 400 kN (e) 500 kN

Fig. 9 Comparison of filling height difference under different back pressures

在实际应用中增加背压力,通常采用高强弹簧和液压缸来实现,而考虑到新工艺开发存在技术风险,故背压力采用 500~2000 kN 可调压力的油缸来实现。图 10 为背压力为 1000 kN 时的复合挤压成形过程,可以看出,背压力加载后,能够有效地改变挤压过程中的金属流动,有利于改善变形的不均匀性,解决筒形部分填充不饱满的现象。同时,也可以看出,背压力加载能够改善下部三角板区域的成形,底部能够完全填充、完成成形,而在无背压力的情况下,底部未完全填充(图 6e)。

4 实际试验验证

为验证数值模拟分析结果,进行了试验验证,采用的挤压工艺流程如下:首先,使用圆盘锯将棒料锯切至所需尺寸,而后将毛坯置于中频加热炉进行加热,加热完成后进行高压水除磷工序,清除完氧化皮后将其放置于镦粗工序,进而压机下行,热坯料镦至所需尺寸;最后,将镦粗后的毛坯放入复合挤压工序的凹模型腔中,压机下行完成挤压成形。根据数值模拟分析结果,设计开发了如图 11 所示的专用的工艺模具和如图 12 所示的专用快速挤压液压机,模具装有高强弹簧机构,快速挤压液压机在设备满载下的挤压速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,吨位为 1000 t,采用多工位布局。背压力通过高强弹簧机构和液压机滑块内的 500~2000 kN 的双动顶出油缸来添加。

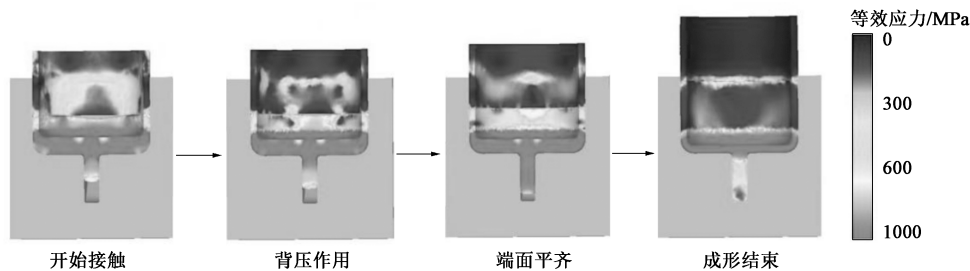


图 10 背压力加载复合挤压成形过程

Fig. 10 Compound extrusion forming process of back pressure loading

采用控制流动的挤压方式获得的成形件如图 13 所示,可以看出,筒形部分端面填充饱满,壁厚均匀,成形件尺寸满足图纸要求,说明背压力加载控制金属流动的方式能够有效实现复杂薄壁异形零件的成形,验证了工艺数值模拟的准确性。

5 结论

(1) 分析了闭式挤压成形过程中金属的流动规

律,得到了端面高度差的变化曲线,最大差值为 16.6 mm;对比了 100、50 和 $22 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 共 3 种挤压速度对成形的影响,发现挤压速度越快,成形效果越好。

(2) 建立了金属流动控制的分析模型,对不同背压力作用下的填充高度差进行了研究,针对 1000 kN 背压力加载挤压成形过程进行了分析,发现背压力加载控制金属流动的成形方式有利于减少端面高度差和改善下部三角板区域的成形。

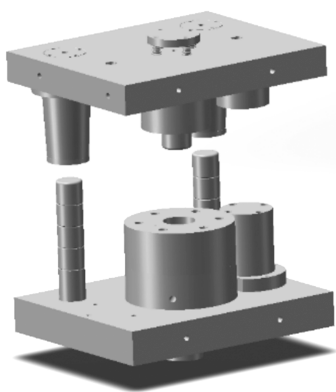


图 11 专用工艺模具

Fig. 11 Special process die

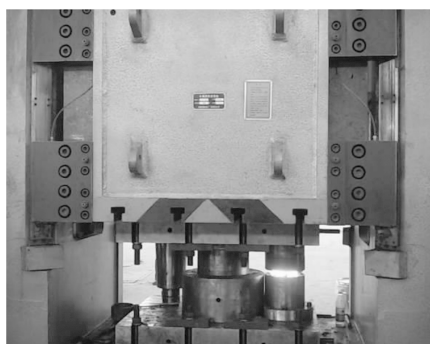


图 12 专用设备

Fig. 12 Special equipment



图 13 最终成形零件

Fig. 13 Final formed parts

(3) 设计了专用的模具工装和挤压设备,通过模具高强弹簧和液压机滑块内油缸实现背压力加载,并通过实际试验,获得了合格的单耳吊具挤压件,实现了此类产品成形的工艺开发。

参考文献:

- [1] 中国机械工业联合会. 工程机械行业“十四五”发展规划 [Z]. <http://www.cnema.org/article/10579>. China Machinery Industry Federation. The ‘14th Five-Year’ development outline of machinery industry [Z]. <http://www.cnema.org/article/10579>.
- [2] Kanani J B, Lalwani D I. An experimental and FEA investigation of near-net-shape cold forging of spur gear [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44 (1): 92–98.
- [3] Pruncu C I, Hopper C, Hooper P A, et al. Study of the effects of hot forging on the additively manufactured stainless steel preforms [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57 (9): 668–676.
- [4] Rajput S P S, Datta S. Sustainable and green manufacturing-A narrative literature review [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26 (2): 2515–2520.
- [5] 谢谈, 贾德伟, 蒋鹏, 等. 精密塑性成形技术在中国的应用与进展 [J]. 机械工程学报, 2001, 37 (7): 100–104. Xie T, Jia D W, Jiang P, et al. Development and application of precision plastic forming technology in China [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37 (7): 100–104.
- [6] 田野, 薛克敏, 孙大智, 等. 涡旋盘背压成形工艺研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (16): 143–149. Tian Y, Xue K M, Sun D Z, et al. Study on backpressure forming process of scroll [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (16): 143–149.
- [7] 吴进, 王成勇, 何大宏, 等. 背压加载方式对轻量化压缩机涡旋盘成形质量的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (1): 77–84. Wu J, Wang C Y, He D H, et al. Influence of back pressure loading mode on forming quality of lightweight compressor scroll [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (1): 77–84.
- [8] 王强, 孟模, 房庆龄, 等. 复合挤压在铝合金轮毂成形中的应用研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (12): 18–23. Wang Q, Meng M, Fang Q L, et al. Application of compound extrusion in aluminum alloy wheel hub forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (12): 18–23.
- [9] 张治民, 李国俊, 王强, 等. 多向加载旋转挤压成形技术及装备 [J/OL]. 机械工程学报: 1–8 [2023–06–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20230602.1600.012.html>. Zhang Z M, Li G J, Wang Q, et al. Multi-directional loading rotary extrusion forming technology and equipment [J/OL]. Journal of Mechanical Engineering: 1–8 [2023–06–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20230602.1600.012.html>.
- [10] Shen X H, Chen W, Yan J, et al. Experiment and simulation of metal flow in multi-stage forming process of railway wheel [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, 22 (1): 21–29.
- [11] Deng L, Wang X Y, Xia J C. Process design of flow control forming for rib-web structure [J]. Materials Research Innovations, 2011, 15 (1): 431–434.
- [12] 任广升, 白志斌, 刘化民, 等. 复合挤压变形的模拟研究 [J]. 机械工程学报, 1994, 30 (1): 56–61. Ren G S, Bai Z B, Liu H M, et al. Modelling study for the deformation of combined extrusion [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1994, 30 (1): 56–61.
- [13] Noh J H, Hwang B B. Characteristics of tool wear in a combined double cup extrusion process [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29 (1): 375–386.
- [14] Noh J H, Hwang B B. Influence of punch geometries on the divided material flow in a double cup extrusion process [J]. Metals and Materials International, 2013, 19 (6): 1193–1202.