

不同缩比率对同轴多锥辊摆辗薄圆盘的影响

刘 鑫¹, 苏艳红¹, 朱春东², 曹一骄¹, 王莹琚², 门正兴¹

(1. 成都航空职业技术学院 航空装备制造产业学院, 四川 成都 610100;

2. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了研究同轴多锥辊摆辗薄圆盘的成形过程, 利用 Deform-3D 数值模拟软件对同轴多锥辊摆辗圆盘件进行模拟分析, 基于可靠的三维刚塑性有限元模型, 研究了多锥辊摆辗圆盘件的变形特征。同时, 研究了不同缩比率对同轴多锥辊摆辗成形的影响, 最后在摆辗机上验证了数值模型的正确性。结果表明: 同轴多锥辊摆辗成形过程中, 容易出现失稳翘曲和上大下小的“蘑菇头”形状; 工件在距离中心一定距离处的温度最高, 中心温度最低; 金属流动速度从中心至边缘逐渐增大; 成形中的缩比率越高, 变形抗力越大, 导致其力能参数和非均匀变形程度逐渐升高, 同时也将增大其中心缺陷。

关键词: 多锥辊摆辗; 薄圆盘; 变形特征; 缩比率; 金属流动速度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.019

中图分类号: TG331

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 01-0136-08

Influence of different reduction ratios on rotary forging thin disc with coaxial multi-tapered rollers

Liu Xin¹, Su Yanhong¹, Zhu Chundong², Cao Yijiao¹, Wang Yingjun², Meng Zhengxing¹

(1. School of Aeronautical Manufacturing Industry, Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China;

2. School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to study the forming process of thin disc by rotary forging with coaxial multi-tapered rollers, numerical simulation software Deform-3D was used to simulate and analyze it, and based on the reliable three-dimensional rigid-plastic finite-element model, the deformation characteristics of disc parts by rotary forging with coaxial multi-tapered rollers were studied. At the same time, the influences of different reduction ratios on rotary forging with coaxial multi-tapered rollers were researched, and the correctness of the numerical model was verified on the rotary forging machine. The results show that in the forming process of rotary forging with coaxial multi-tapered rollers, instability warpage and “mushroom head” shape with large top and small bottom are easy to appear, and the workpiece has the highest temperature at a certain distance from the center and the lowest temperature in the center. The metal flow speed gradually increases from the center to the edge, and the higher the reduction ratio in forming is, the greater the deformation resistance is, which leads to the gradual increasing of its force and energy parameters and non-uniform deformation degree, and also increases its central defect.

Key words: rotary forging with multi-tapered rollers; thin disc; deformation characteristic; reduction ratio; metal flow speed

薄圆盘件是工业生产中一种常见的零件, 在核电、航空航天、深海探测、远程导弹中发挥着重要作用。火箭的整体燃料箱需要直径为 $\Phi 4 \sim \Phi 5$ m、厚度为 0.08 m 的整体圆盘件, 核电的端板和封头需要直径为 $\Phi 10$ m 以上的圆盘件。现今对于圆盘件的生产主要以摆辗、铸造、常规锻造等技术为主, 而

对于直径大于 $\Phi 3$ m 的圆盘件, 主要采用焊接、多次局部锻打为主。随着工业安全等级要求的提高, 采用焊接等技术生产的圆盘件已经不能满足现有要求。

国内学者对成形盘件和摆辗技术进行了很多研究。周德成等^[1]研究了圆柱件摆辗变形过程中的缺陷。Oh H K 等^[2]发现在摆辗成形高径比较大的薄坯工件时, 工件心部容易出现中心减薄的现象。郑勇等^[3]研究了摆辗变形过程中不同阶段的温度分布和塑性变形区的变化, 提出了变形区的变化模式。王广春等^[4-5]分析了环形件在摆辗过程中的变形特征, 提出了接触区域新的金属流动模型, 并详细阐述了

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51875427); 四川省科技厅项目 (2019YJ0519)

作者简介: 刘 鑫 (1995-), 男, 硕士, 助教

E-mail: 2992372688@qq.com

接触区的金属流动规律,揭示了摆辗环件的变形规律。Loyda A 等^[6]对镍基高温合金盘摆辗成形进行数值模拟,对摩擦因数、工件预热、刀具温度等工艺参数对工件的微观结构的影响进行了研究。Gey N 等^[7]研究了锻造后的钛合金圆盘的微观组织,得出了锻造成形圆盘件微观组织的变化规律。张金龙等^[8]对大型盘类件——驱动盘的锻造工艺进行了研究,得出了可靠的成形工艺。刘刚等^[9-10]对圆柱形工件的蘑菇头效应和中心减薄进行了分析。韩星会等^[11-12]研究了摆辗圆柱件与常规锻造的区别、摆辗成形接触压力和接触滑移距离的演化和分布规律。

多锥辊摆辗技术是一种新型的增量式成形技术,主要应用于大型薄壁圆盘类零件的生产,以满足现今对大直径圆盘件的要求。目前,对于多锥辊摆辗技术的研究主要采用缩比模拟(工件的原始直径为 $\Phi 10$ m,将工件和锥辊同时缩小20倍)。而对于缩比率对成形影响的研究较少。因此,本文利用可靠的有限元模拟分析,采用 90° 同轴多锥辊摆辗(各锥辊旋转轴在一条直线上,与设备的夹角为 45° ,如图1所示)成形薄圆盘件,研究不同缩比率下圆盘件的成形变化,同时,对圆盘件的成形规律进行了研究。研究结果能进一步推动多锥辊摆辗技术的发展,推动多锥辊摆辗技术的实用化。

1 多锥辊摆辗工艺

多锥辊摆辗是一种新型的摆辗技术,锥辊为奇数并大于3。图1为多锥辊摆辗成形的原理图,滑动横梁带动锥辊向下做进给运动,工件在旋转下模的带动下绕设备轴线旋转,当锥辊与工件接触时,在摩擦力带动下锥辊绕自身轴线自传,同时对工件进行轧制。在多锥辊摆辗圆盘的成形过程中,前半圈同侧锥辊之间未被辗压到而产生凸起的部分在后半圈被另一侧的锥辊辗压。当工件高度接近圆盘高度值时,滑动横梁停止向下运动并保压,旋转下模与工件旋转 $1\sim 2$ 圈,辗平工件的上表面。

2 数值模拟设置

模具设为刚体,坯料设置为塑性体,材料为AISI1045钢,网格总数为72000。共产生72523个元素和16342个节点;摩擦边界条件选择常剪切因子摩擦模型。模具温度为 200°C ,环境温度定义为

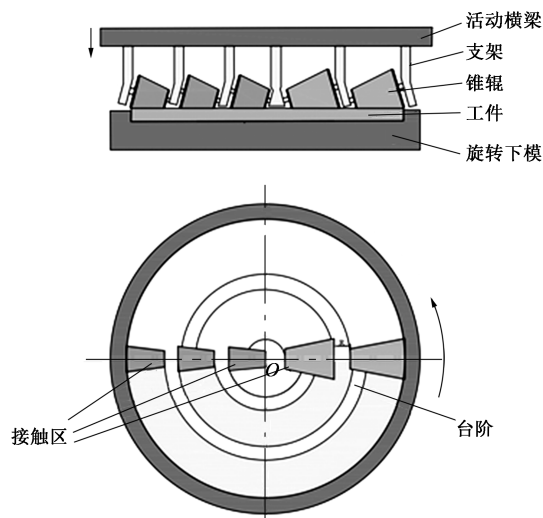


图1 多锥辊摆辗薄圆盘件的成形原理

Fig. 1 Forming principle of thin disc parts by rotary forging with multi-tapered rollers

20°C ,工件与空气、模具与空气之间的对流换热系数数值均为 $0.02\text{ N}\cdot(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$,其他工艺参数如表1所示。图2为 90° 同轴多锥辊摆辗成形大直径圆盘的有限元模型。由于圆盘件的高径比小,成形过程容易出现失稳现象,因此,在成形下模中心设计厚度为3 mm的圆槽,以固定工件和防止成形过程中出现失稳现象,如图3所示。

表1 数值模拟参数

Table 1 Parameters in numerical simulation

参数	初始温度/ $^\circ\text{C}$	上模进给速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	下模转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	下模和工 件摩擦因 数	锥辊与 工件摩 擦因数
数值	900	1.0	75	0.70	0.05

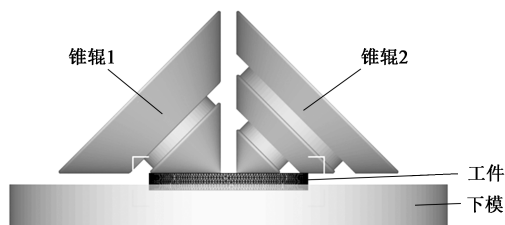


图2 同轴多锥辊摆辗成形大直径圆盘的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of large diameter disc formed by rotary forging with coaxial multi-tapered rollers

3 模拟结果分析

3.1 成形效果

同轴多锥辊摆辗成形圆盘件的结果见图4。根据

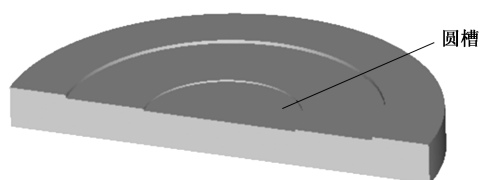


图 3 下模底部圆槽

Fig. 3 Circular groove at bottom of lower die

摆辗成形过程可知, 由于前期工件的厚度相对较大, 所以此阶段的成形较为平稳, 随后工件厚度逐渐减小、直径逐渐增大。由于工件上、下表面直径的增长

速度的不同, 工件一直呈现上大下小的“蘑菇状”, 并且由于两侧锥辊交错分布于圆盘的径向, 一侧锥辊之间的间隙凸起被另一侧的锥辊辗平; 当成形至第 700 步时, 工件的厚度相对较小, 抗弯截面减小, 被动变形区在主动变形区力的作用下容易失稳, 出现翘曲现象; 在精整阶段, 由于锥辊停止了轴向进给, 此时锥辊在精整工件上表面的同时, 工件的翘曲程度逐渐减小, 工件表面趋于平整; 当成形至第 1000 步时, 圆盘件成形结束, 成形后的圆盘件表面光滑, 中心部分未出现凹陷、也未出现凸起, 翘曲现象消失。

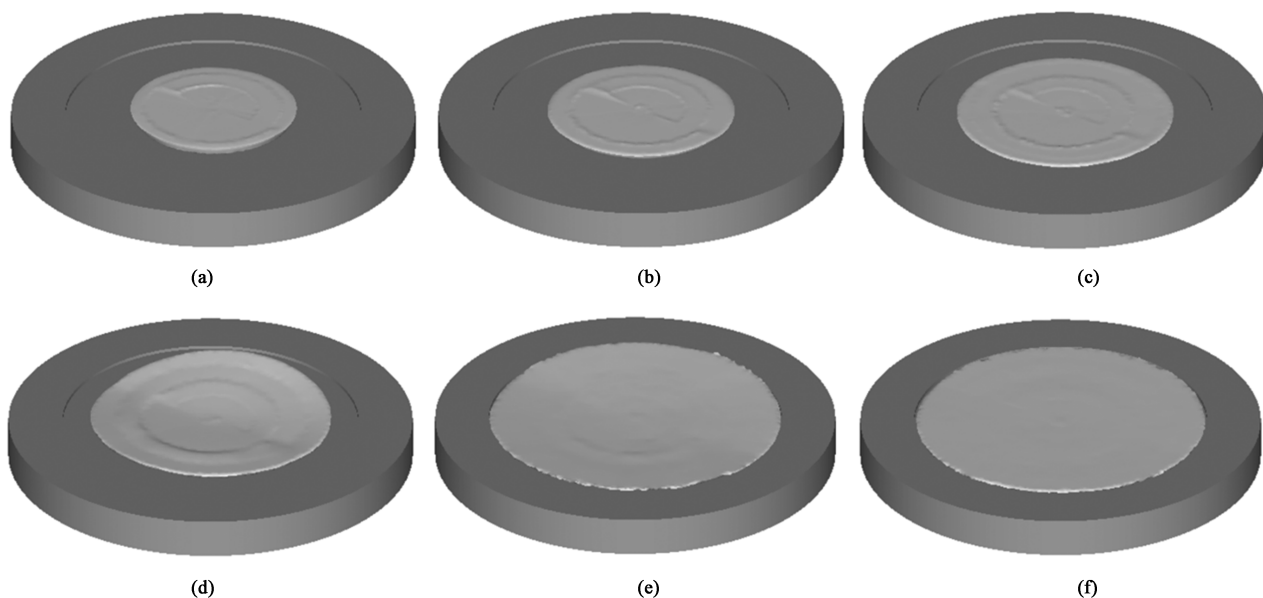


图 4 同轴多锥辊摆辗薄圆盘件的成形结果

(a) 第 200 步 (b) 第 400 步 (c) 第 600 步 (d) 第 700 步 (e) 第 900 步 (f) 第 1000 步

Fig. 4 Forming results of thin disc parts by rotary forging with coaxial multi-tapered rollers

(a) Step 200 (b) Step 400 (c) Step 600 (d) Step 700 (e) Step 900 (f) Step 1000

3.2 成形载荷分析

图 5 为锥辊 1 和锥辊 2 的轴向成形载荷变化图。对于锥辊 1, 轴向成形载荷在 0~10 s 均逐渐增大, 最大值约为 814.5 kN, 这一方面是因为随着工件变形程度的增加, 其变形抗力增加, 另一方面是由于随着工件的变形, 其直径逐渐增大, 所以, 与锥辊的接触面积逐渐增加。锥辊 1 的轴向成形载荷增大至一定值后在小范围内波动, 进入精整阶段后, 由于锥辊的进给速度减为 0, 轴向成形载荷迅速减小至一定值, 精整阶段的轴向成形载荷约为 100 kN, 如图 5a 所示。对于锥辊 2, 其变化趋势基本与锥辊 1 类似, 也是先增大、后波动, 最大值约为 660.5 kN。在精整阶段轴向成形载荷减小, 精整阶段的轴向成形载荷约为 70 kN, 如图 5b 所示。可以看出, 在整个成形过程中, 锥辊 1 的轴向成形载荷值较锥辊 2 大,

这主要是因为锥辊 1 与工件的接触面积比锥辊 2 与工件的接触面积大。

3.3 温度场分析

圆盘件的温度变化如图 6 所示, 分别选取了第 200、600 和 1000 步的工件温度变化云图。由图 6a 知, 第 200 步即摆辗初期时, 工件与锥辊接触部分的温度低于未接触区域, 此时坯料大部分温度保持在 900 ℃ 左右; 到第 600 步时, 如图 6b 所示, 与摆辗中期, 圆盘件的心部温度明显降低, 中心温度为 700 ℃ 左右; 由图 6c 可知, 第 1000 步时即摆辗末期, 即使是进入保压整形阶段, 由于摩擦生热, 圆盘件大部分的温度还是保持在 900 ℃ 左右, 但由于中心部分与锥辊的接触面积较小, 中心低温区进一步扩散, 最低温度在 650 ℃ 左右, 外边缘的温度较内侧温度低。

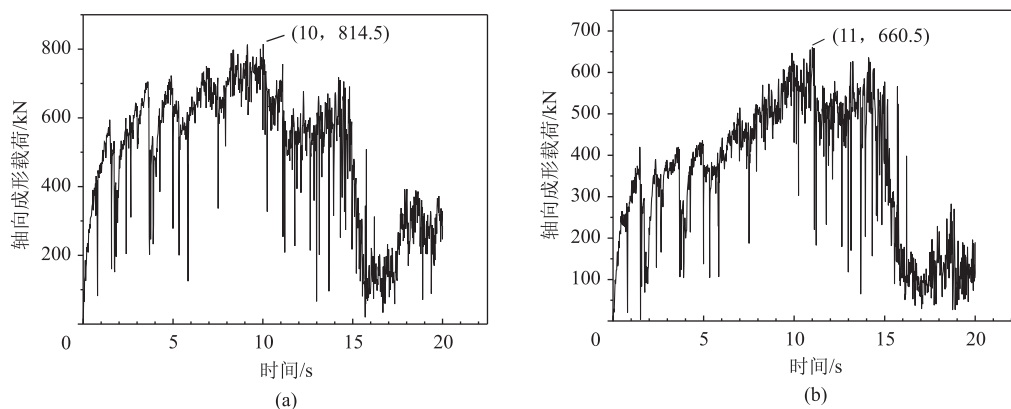


图5 轴向成形载荷变化图

(a) 锥辊1 (b) 锥辊2

Fig. 5 Axial forming load change diagrams

(a) Tapered roller 1 (b) Tapered roller 2

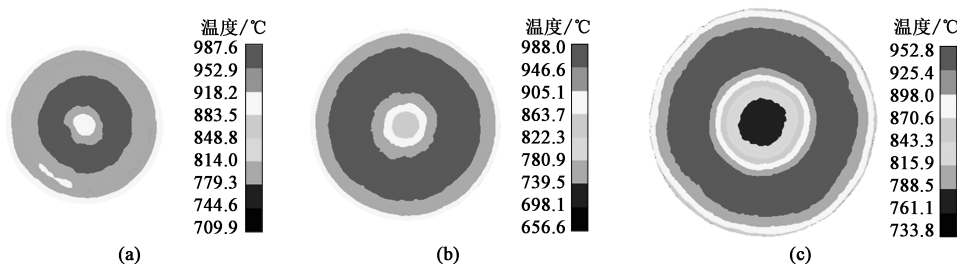


图6 工件温度变化

(a) 第200步 (b) 第600步 (c) 第1000步

Fig. 6 Temperature changes of workpiece

(a) Step 200 (b) Step 600 (c) Step 1000

3.4 速度场分析

图7为摆辗过程中材料的金属流动速度场,分别选取了第200步、600步和1000步的上、下表面的金属流动速度场分布图,从图7可以直观地看出,金属流动速度从中心至边缘逐渐增大。为了深入研究成形过程中金属流动速度的演化规律,在圆盘件上表面与锥辊各个接触区域的中心点处选取追踪点,研究他们

在成形过程中的金属流动速度场的变化情况。

图8为圆盘件追踪点处的金属流动速度的变化规律。图8a为圆盘件上表面与锥辊各接触区域的中心点处的追踪点的位置分布图,其中追踪点 $P1 \sim P3$ 位于锥辊1与材料接触的3个区域的中心点处,追踪点 $P4 \sim P5$ 位于锥辊2与材料接触的2个区域的中心点处。图8b分别为材料上表面5个追踪点的金属流

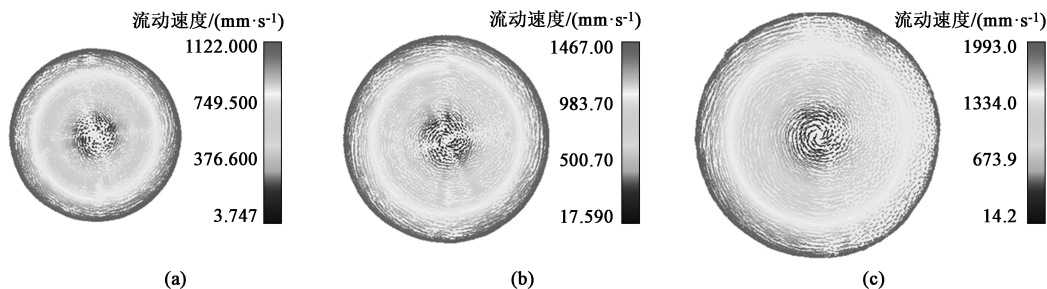


图7 金属流动速度场分布

(a) 第200步 (b) 第600步 (c) 第1000步

Fig. 7 Metal flow velocity field distributions

(a) Step 200 (b) Step 600 (c) Step 1000

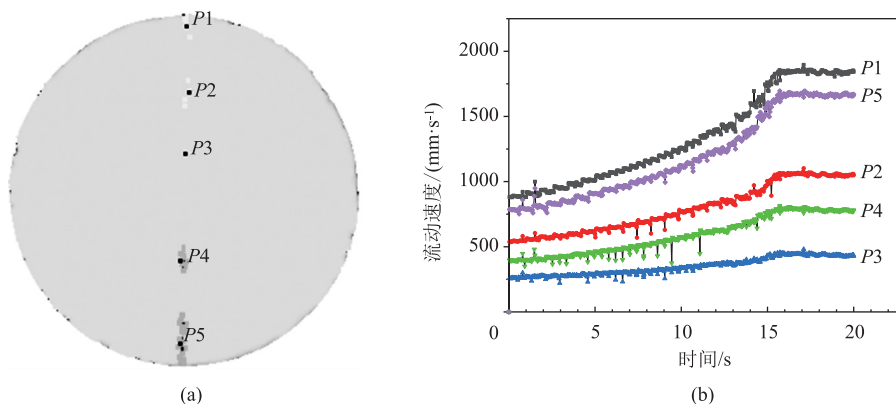


图 8 追踪点的金属流动速度变化规律

(a) 追踪点位置 (b) 各追踪点的金属流动速度变化曲线

Fig. 8 Variation laws of metal flow rates at tracking points

(a) Positions of tracking points (b) Variation curves of metal flow rates at various tracking points

动速度的变化情况。在摆辗成形过程中,从成形初期到成形中期,追踪点 $P1 \sim P5$ 的金属流动速度保持一致的、逐渐增大的趋势,进入保压阶段后均稳定在某一值处,距离圆盘中心最近的追踪点 $P3$ 的金属流动速度最小,距离圆盘中心最远的追踪点 $P1$ 的金属流动速度最大,即:距离圆盘圆心越远,金属流动速度越大,越近则金属流动速度越小。在成形阶段,各追踪点处的金属流动速度均呈现出周期性的、如锯齿状的波动,这是由于锥辊与坯料间歇性接触导致的。

4 90° 同轴多锥辊摆辗的尺寸效应

由于原始工件的尺寸太大,为了节省模拟时间,本文选择进行缩比模拟。但是工件的尺寸变小会对

工件的性能产生影响,因此,为了进一步完善多锥辊摆辗成形新技术,对不同缩比率(模拟时工件尺寸与原始工件的比值)的工件进行了模拟分析。设定缩比率为 $1:20$ 、 $1:10$ 、 $1:5$,由于进给速度是成形中的重要参数,设定工件直径为 $\Phi 500$ mm,进给速度为 0.50 、 0.75 和 $1.00 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,其余参数保持不变。

4.1 尺寸效应对力能参数的影响

图 9 为不同缩比率对力能参数的影响曲线。从图 9a 和图 9b 可以看出,随着缩比率的逐渐增大,最大轴向成形载荷和最大扭矩的增大幅度逐渐明显,大进给速度可增大最大轴向成形载荷,对最大扭矩的作用不明确。如图 9a 所示,缩比率从 $1:20$ 到 $1:10$,最大轴向成形载荷扩大了近 4 倍,而缩比率从 $1:10$

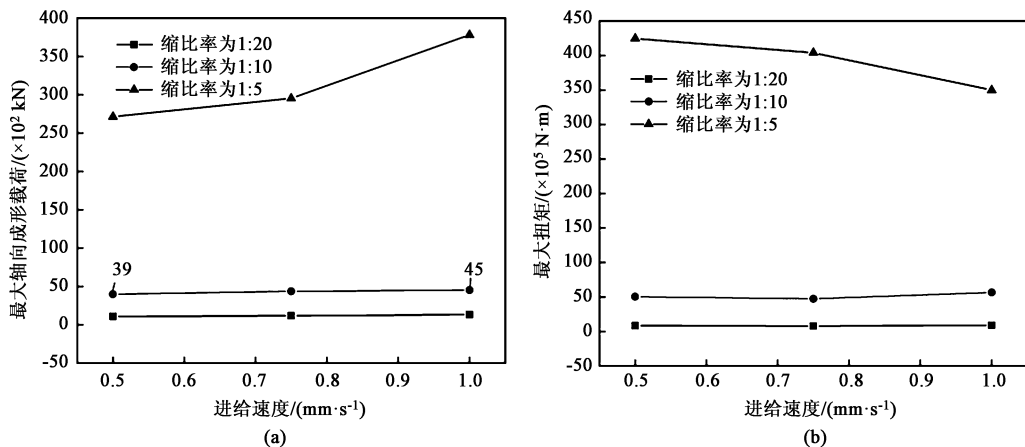


图 9 不同缩比率对力能参数的影响

(a) 最大轴向成形载荷 (b) 最大扭矩

Fig. 9 Effects of different reduction ratios on force and energy parameters

(a) Maximum axial forming load (b) Maximum torque

到1:5,最大轴向成形载荷扩大了近7倍,说明坯料尺寸的增大使得金属的塑性变形抵抗力相对增强。因此,随着坯料尺寸的扩大,成形中的相对阻力增大,最大轴向成形载荷和最大扭矩相对成倍增加,对多锥辊摆辗机的性能要求也会更高。

4.2 尺寸效应对成形缺陷的影响

图10为不同缩比率对圆盘件中心厚度的影响曲线,其中,1:20(4)表示将缩比率为1:20的坯料中心厚度扩大4倍,1:10(2)表示将缩比率为1:10的坯料中心厚度扩大2倍。从图10可以看出,随着缩比率的增加,圆盘件中心厚度呈现出逐渐增大的趋势,表明随着坯料尺寸的倍增,金属从中心向外流动的阻力增大的幅度高于坯料尺寸增大的幅度。同等进给速度下,中心向外流动减缓,造成圆盘件中心厚度随着缩比率的增加而逐渐升高,造成中心加厚缺陷。从图10还可以看出,进给速度有助于减小中心厚

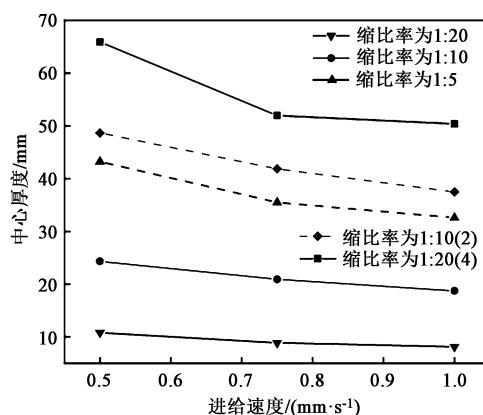


图10 不同缩比率对圆盘件中心厚度的影响

Fig. 10 Effects of different reduction ratios on center thickness of disc part

度,因此,在大缩比率下应适当增加其进给速度。

4.3 尺寸效应对塑性变形的影响

图11为不同缩比率对塑性变形的影响,从图

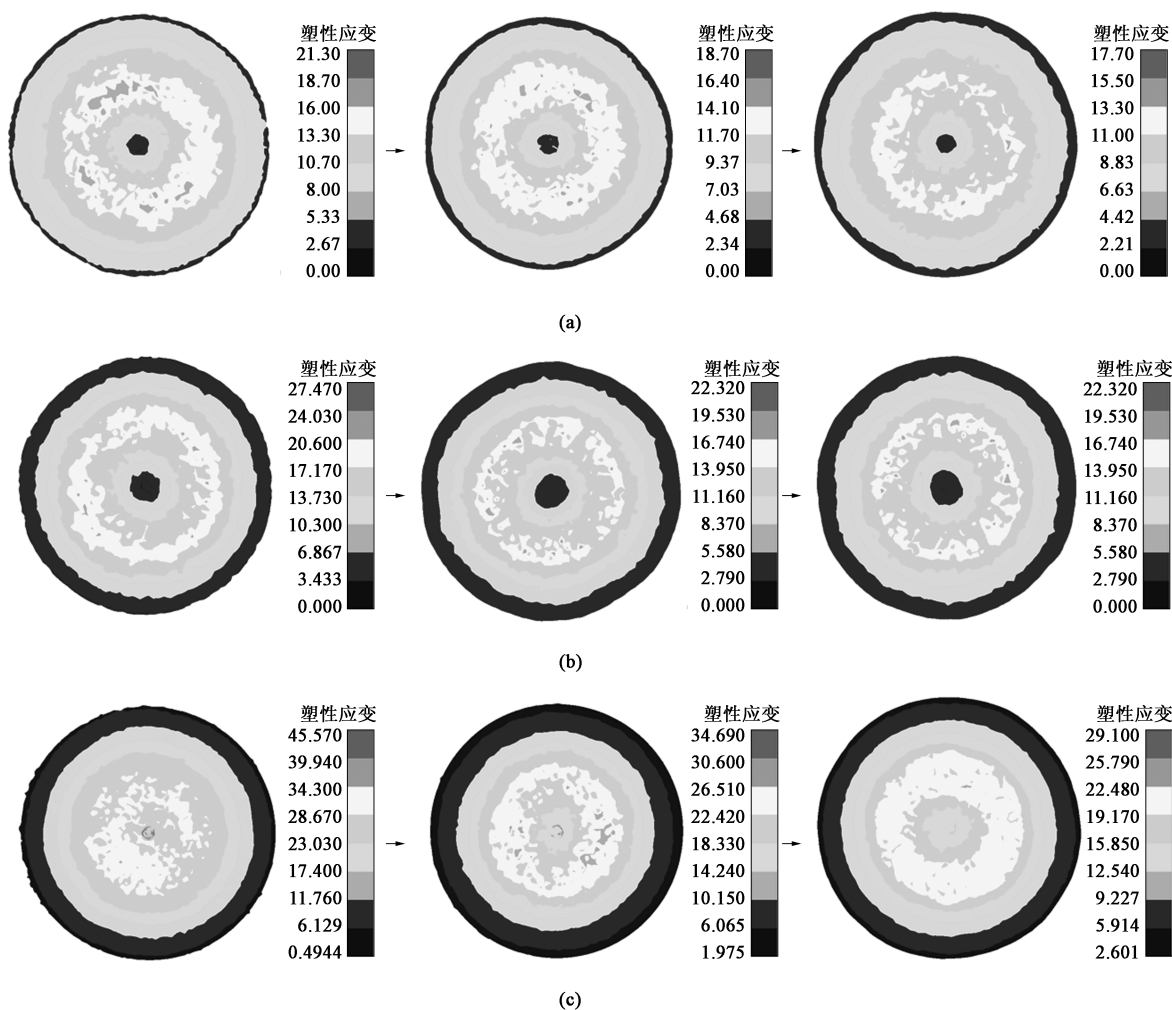


图11 不同缩比率对塑性变形的影响

(a) 1:20 (b) 1:10 (c) 1:5

Fig. 11 Effects of different reduction ratios on plastic deformation

11 可以看出,随着缩比率的增大,边缘区域的低塑性应变逐渐变大,中心区域的塑性应变逐渐增大。从力能参数的变化可以看出,随着缩比率的增大,力能参数增长迅速,说明随着缩比率的增加,金属变形所受到的阻力增大,使得塑性变形区域向外部扩展更加困难,并且进给速度的增加将加重此现象,最终造成离中心一定距离的区域出现较大的塑性应变,边缘处小塑性应变层逐渐加厚。

在金属成形过程中,工件的不均匀变形程度对最终产品的质量有重要影响。本文采用塑性应变的最大值 ε_{\max} 与最小值 ε_{\min} 之差来表示工件的非均匀变形程度 ϕ_{id} , 即 $\phi_{\text{id}} = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ 。图 12 为不同缩比率对非均匀变形程度的影响曲线图,与缩比率对力能参数的影响相似,随着缩比率的增大,非均匀变形程度逐渐增加,其增长率也逐渐增大。可以看出,由于缩比率的增大使得塑性变形抗力增加,金属向外扩展更加困难,造成一定区域获得更多的变形能量,形成更大的塑性应变,而小塑性应变区的塑性应变值变化不大,导致非均匀变形程度增加。

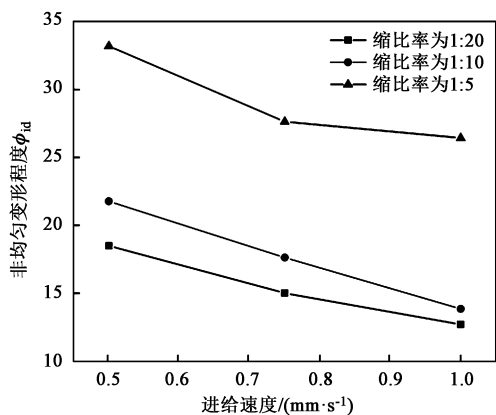


图 12 不同缩比率对非均匀变化程度的影响

Fig. 12 Influences of different reduction ratios on degree for inhomogeneous defosrmation

5 生产验证

为了验证数值模型的正确性,在双锥辊摆辗压力机上对双锥辊进行改造,进行了多锥辊摆辗实验。图 13 为双锥辊摆辗压力机,图 14 为成形一段时间的圆盘件,可以看出明显的蘑菇头形状,与模拟实验中一致。图 15 为成形后的圆盘件,盘件质量好。仿真结果与实验结果吻合较好,证实了模拟结果的可靠性。

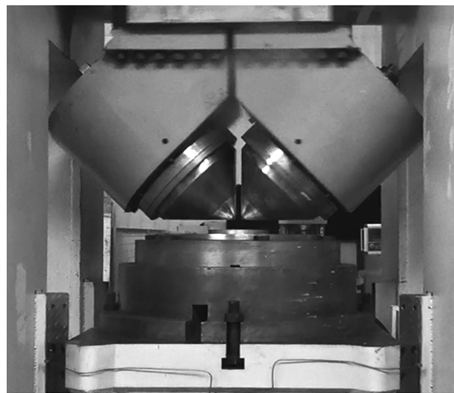


图 13 双锥辊摆辗压力机

Fig. 13 Rotary forging press with double-tapered rollers

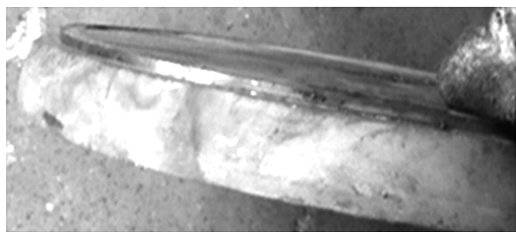


图 14 蘑菇头形状的圆盘件

Fig. 14 Disc part with mushroom shape

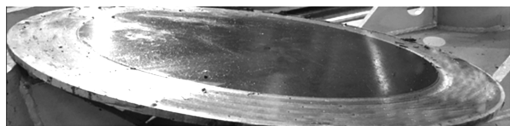


图 15 成形后的圆盘件

Fig. 15 Deformed disc part

6 结论

(1) 同轴多锥辊摆辗成形过程中,成形过程较为平稳,容易出现失稳翘曲现象。轴向成形载荷先增加后减小,锥辊 1 的轴向成形载荷大于锥辊 2 的轴向成形载荷。

(2) 工件在距离中心一定距离处的温度最高,中心温度最低。金属流动速度从中心至边缘逐渐增大。随着成形时间的增加,金属流动速度不断增大。

(3) 90°同轴多锥辊摆辗成形中的缩比率越高,变形抗力越大,导致其力能参数和非均匀变形程度逐渐升高,同时也将增大其中心缺陷。因此,在缩比率逐渐增大时,要逐步调节其工艺参数。

参考文献:

- [1] 周德成,苑世剑,王仲仁. 摆动辗压件成形过程中产生的缺

- 陷及防止办法 [J]. 热加工工艺, 1992, (1): 35-37.
- Zhou D C, Yuan S J, Wang Z R. Defects of workpieces producing in forming process of rotary forging and methods for preventing them [J]. Hot Working Technology, 1992, (1): 35-37.
- [2] Oh H K, Choi S. A study on center thinning in the rotary forging of a circular plate [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 66 (1-3): 101-106.
- [3] Zheng Y, Liu D, Yang Y, et al. Investigation on metal flow during the hot axial closed die rolling process for titanium alloy discs [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87 (9-12): 2445-2458.
- [4] Wang G C, Guan J, Zhao G Q. A photo-plastic experimental study on deformation of rotary forging a ring workpiece [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169: 108-114.
- [5] Wang G C, Zhao G Q. Simulation and analysis of rotary forging a ring workpiece using finite element method [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2002, 38: 1151-1164.
- [6] Loyda A, Reyes L A, Hernandez-Munoz G M, et al. Influence of the incremental deformation during rotary forging on the microstructure behaviour of a nickel-based superalloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97 (5-8): 2383-2396.
- [7] Gey N, Bocher P, Uta E, et al. Texture and microtexture variations in a near- α titanium forged disk of bimodal microstructure [J]. Acta Materialia, 2012, 60 (6-7): 2647-2655.
- [8] 张金龙, 路婉丽, 王智民. 大型盘类件成形工艺及模具设计 [J]. 模具技术, 2008, (4): 28-31.
- Zhang J L, Lu W L, Wang Z M. Forming process and die design of large disk parts [J]. Die and Mould Technology, 2008, (4): 28-31.
- [9] Liu G, Yuan S J, Wang Z R, et al. Explanation of the mushroom effect in the rotary forging of a cylinder [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151 (1-3): 178-182.
- [10] Liu G, Yuan S J, Wang Z R, et al. Finite element model and simulation of rotary forging of a disc [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2000, (2): 470-475.
- [11] Han X H, Hua L. Comparison between cold rotary forging and conventional forging [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23 (10): 2668-2678.
- [12] Han X H, Hua L. Prediction of contact pressure, slip distance and wear in cold rotary forging using finite element methods [J]. Tribology International, 2011, 44 (12): 1742-1753.

欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发售, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管, 北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

主要栏目: 综述、锻造、板料成形、管材成形、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

读者对象: 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本(上册)(包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本(下册)(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

邮局汇款信息:

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

收款人: 《锻压技术》编辑部

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-801

邮编: 100083

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

E-mail: fst_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部