

金属流速数值模拟技术在消除热模锻锻件折叠缺陷中的应用

王 飞, 金朝晖, 徐宝国, 宋加兵

(安徽安簧机械股份有限公司, 安徽 安庆 246000)

摘要: 通过数值模拟技术分析了坯料在热模锻成形过程中的金属流速变化, 对锻造折叠等缺陷位置的金属流速变化进行了分析和总结, 得到流速倍差与锻造折叠等缺陷之间的联系。利用此联系, 从流速倍差角度分析了热模锻成形过程中所遇到的折叠等缺陷问题, 对圆盘类锻件和转向节锻件等热模锻锻件折叠问题的解决进行了生产验证。结果表明: 通过模具优化、控制模温和润滑等环境因素, 影响热模锻成形过程中的流速倍差变化, 从而可以解决热模锻锻件的折叠等缺陷问题。在热模锻锻件成形过程中, 良好的金属流动性、均匀的流速变化、较小的流速倍差关系, 有益于热模锻成形, 能够避开锻造折叠等缺陷; 反之, 金属流动过于剧烈、紊乱, 流速倍差变化大, 锻件形成折叠等缺陷的可能性变大。

关键词: 热模锻; 折叠; 金属流动; 流速变化; 流速倍差

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.008

中图分类号: TG31

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 09-0045-06

Application of numerical simulation technology for metal flow velocity in eliminating folding defect of hot die forgings

Wang Fei, Jin Zhaohui, Xu Baoguo, Song Jiabing

(Anhui Anhuang Machinery Co., Ltd., Anqing 246000, China)

Abstract: The metal flow velocity change of billet during hot die forging process was analyzed by numerical simulation technology, the metal flow velocity change at the forging folding and other defect positions was analyzed and summarized, and the relationship between multiplied difference of flow velocity and forging folding and other defects was obtained. Then, using this connection, the problems of folding and other defects encountered in the hot die forging process were analyzed from the multiplied difference of flow velocity, and the solution to the folding problems of hot die forgings such as disc forgings, steering knuckle forgings and so on were verified by production. The results show that the folding and other defect problems of hot die forgings can be solved by environmental factors such as mold optimization, control of mold temperatures and lubrication, etc. to affect the change of multiplied difference of flow velocity in the hot die forging process. Thus, in the forming process of hot die forgings, good metal fluidity, uniform flow velocity change and small multiplied difference of flow velocity are beneficial to the hot die forging and avoid forging folding and other defects. On the contrary, if the metal flow is too violent and turbulent, and the multiplied difference of flow velocity changes greatly, the forming possibility of folding and other defects for forgings becomes greater.

Key words: hot die forging; folding; metal flow; change in flow velocity; multiplied difference of flow velocity

热锻成形是在金属再结晶温度以上进行的一种复杂的非线性的弹塑性变形过程^[1]。其中, 热模锻是一种常见的锻造工艺技术, 一般是指将金属坯料加热至高于材料的再结晶温度后, 利用模具型腔将具有较高热塑性的金属坯料镦粗挤压成形, 以实现一定的锻件形状和尺寸的锻造方法^[2-3]。通常, 为实现理想的锻件形状和尺寸, 热

模锻成形的型腔是封闭或半封闭的空间^[4], 加之模具型腔内各种筋板、沟槽和薄壁结构等, 材料在模具内的流动受到极大的限制^[5]。再考虑热模锻较其他锻造方式的工况 (比如润滑、高温等) 更复杂, 以及高温下模具更易磨损的情况, 常规的锻造数值模拟软件对热模锻的模拟并不能做到准确、全面。

在热模锻数值模拟中, 描述材料成形的物理量有等效应变、最大主应力、成形能量、等效应力、速度等^[6-7]。这些物理量中, 速度对折叠分析具有重要的意义。就锻造成形而言, 除了材料

收稿日期: 2021-08-13; 修订日期: 2021-11-20

作者简介: 王 飞 (1986-), 男, 学士, 工程师

E-mail: 3408wangfei@163.com

本身的因素,通常影响热模锻的主要外部环境因素为模具的温度和润滑^[8-9],而这些因素的影响结果最终体现在坯料上的物理量变化即为材料中各质点的流速变化。这里的流速为坯料内质点的流动速度,是包含大小和方向的一种矢量。根据金属成形最小阻力原则,坯料中各质点流速的变化,能够直接反映出坯料成形过程中阻力的变化,即热模锻是将金属坯料加热至高于材料再结晶温度后,利用模具型腔将具有较高热塑性的金属坯料镦粗挤压^[10],通过各种外部因素的影响来控制坯料内各区域中各质点的流速(包括大小和方向)变化,以实现锻件成形。这样对热模锻的理解有助于对某些条件下的折叠进行分析,以及为后续某些折叠相关问题的解决和模具优化提供思路。

1 圆盘类模锻件的折叠缺陷形式

厚度较均匀的圆盘类模锻件的成形较为简单,通常的锻造工艺为镦粗拍扁和终锻成形,由两个工位直接完成,效率高、成本低、锻造稳定。但是,对于圆盘厚度差异较大、锻件尺寸精度和轮廓度要求较高、对边角充填要求更严的锻件产品,为了保证分料的稳定均匀、终锻成形质量更高,通常需要增加预锻工位^[11]。

图1为常见的一种内薄外厚的圆盘类锻件,在实际样件生产试制过程中,尺寸精度和轮廓度均控制得很好,但是在R8圆弧处出现肉眼可见的严重

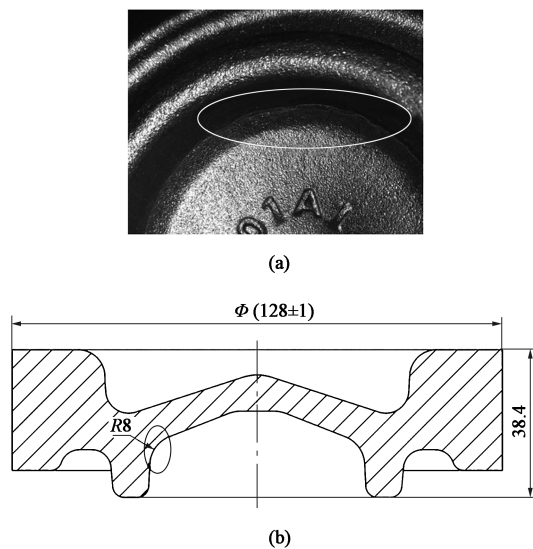


图1 某钢制圆盘类锻件的折叠缺陷位置
(a) 样件实物缺陷位置 (b) 缺陷对应的图纸位置

Fig. 1 Folding defect positions of steel disc forgings
(a) Location of defect on actual sample
(b) Location in drawing corresponding to defect

折叠缺陷。

1.1 圆盘类模锻件折叠缺陷分析

采用此锻模设计方案,通过 Deform 软件分析锻件的成形过程,棒料的成形过程为:加热→镦粗→预锻→终锻成形^[12],如图2所示,预锻型腔简单,终锻最后挤压成形。整个数值模拟过程简单,没有异常产生,也没有折叠现象发生。终锻数值模拟结果显示,通过折叠角和流线分析,终锻无折叠缺陷产生,流线基本正常,如图3所示。

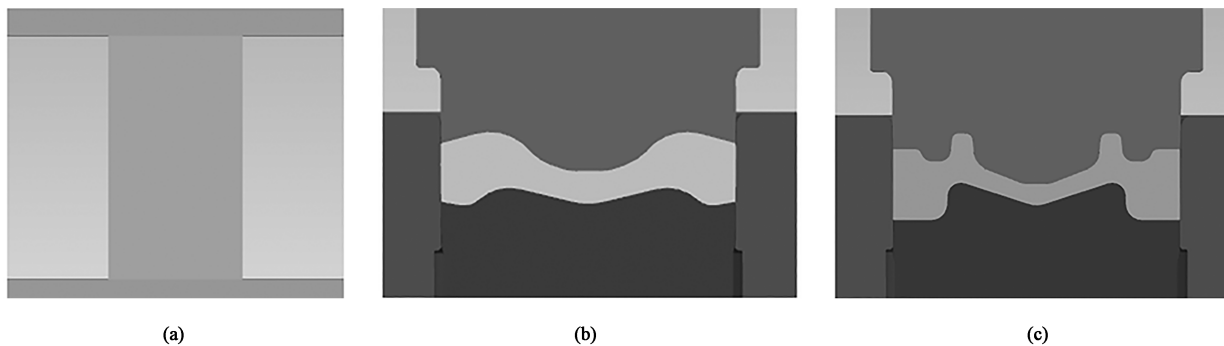


图2 某钢制圆盘类锻件模具设计方案
(a) 镦粗 (b) 预锻 (c) 终锻

Fig. 2 Design schemes of die for steel disc forgings
(a) Upsetting (b) Pre-forging (c) Final forging

如图4所示,再次对锻件进行数值模拟,增加速度场流速分析,发现在L形结构中的圆弧拐角处,其中A边上贴合模具表面的那部分坯料形成的

流体,流速很小或几乎没有流动;B边的坯料形成的流体的流速过大,随着设备施加的成形载荷逐渐增大,两边流速的差值越来越大。超过某一限定值

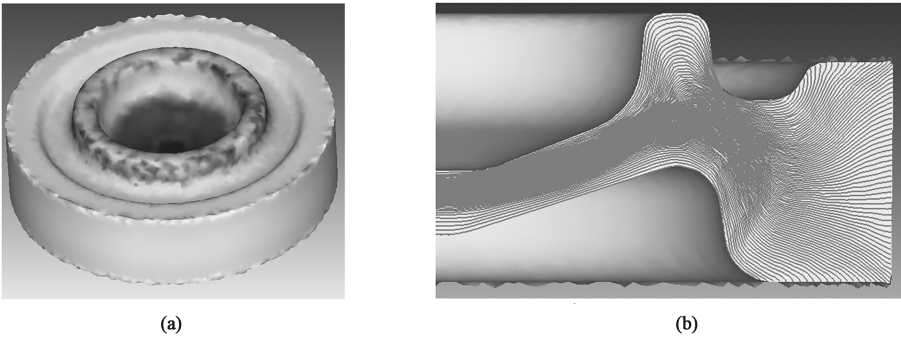


图 3 某钢制圆盘类锻件终锻数值模拟结果

(a) 锻件最终成形状态 (b) 锻件剖面金属流线情况

Fig. 3 Numerical simulation results of final forging for steel disc forgings

(a) Final forming state of forgings (b) Metal streamline situation in section of forgings

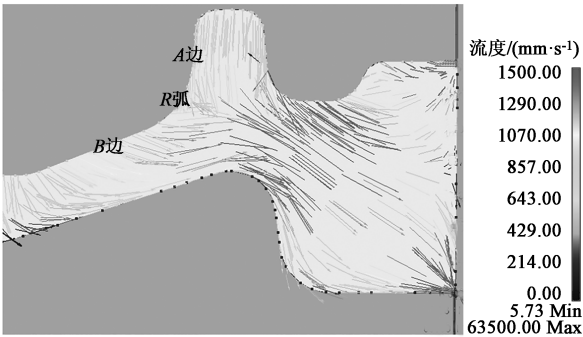


图 4 某钢制圆盘类锻件终锻的流速分析结果

Fig. 4 Flow velocity analysis results of final forging for steel disc forgings

时，会导致 *B* 边的材料在流动过程中，经过 *R* 弧处时有几率出现脱离模具表面的现象，由于塑性流体的特性，此时会带动 *A* 边附近的材料向 *B* 边汇入，产生流体交汇，并与 *B* 边同向流动，直至最终锻件成形。此时，*R* 弧处产生了折叠缺陷。

经过数值模拟分析发现，这种拐角处 *R* 弧上的折叠缺陷通常均形成于终锻将近成形结束阶段。在这个阶段中，由于模具表面摩擦阻力的影响，坯料

中间部分的质点与边沿质点的流速差值逐渐增加至最大，最后随成形结束而快速停止，差值缩减至零。结合塑性流体的力学特征得出，这种不断增大的流速差值的变化，直接导致了锻件拐角处 *R* 弧上的折叠缺陷。

1.2 圆盘类模锻件模具优化方案

经过上述分析，解决这种内薄外厚圆盘类模锻件在拐角处圆弧上的折叠缺陷可以从减小模具拐角附近的流速差方面来优化方案，比如：减少预锻件中间部分的预留坯料，以减小终锻成形最后阶段的 *R* 弧附近的流速差值；增加预锻件外圆部分的预留坯料，使终锻外缘充填提前几步完成；在预锻件对应的终锻 *A* 边附近的位置适当减少预留坯料，使终锻充填时 *A* 边附近坯料的流速方向始终保持与 *B* 边同向，保证充填结束没有明显的回流现象；通过控制模温和润滑等环境因素来影响模具表面接触的坯料流速，以控制坯料的流动。如图 5 所示，本文采用了第 1 种模具优化方案，即减少预锻件中间部分的预留坯料。

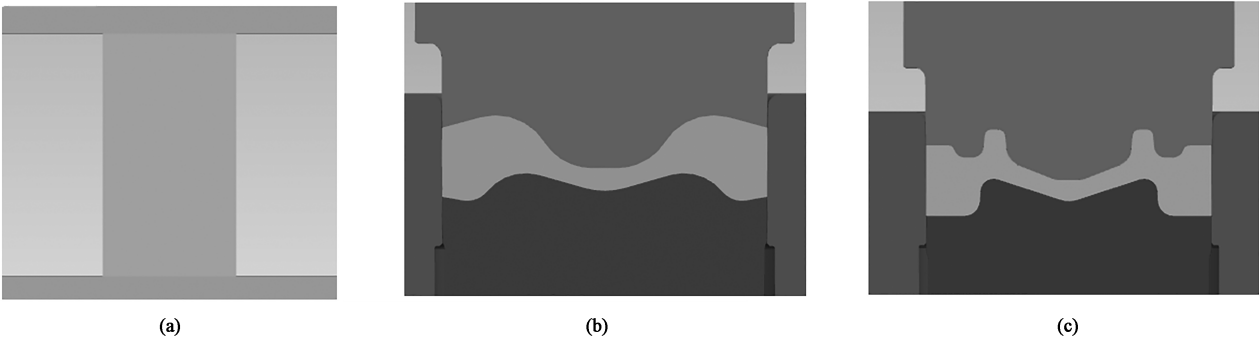


图 5 模具优化后某钢制圆盘类锻件的成形方案

(a) 镦粗 (b) 预锻 (c) 终锻

Fig. 5 Forming schemes of steel disc forgings after die optimization

(a) Upsetting (b) Pre-forging (c) Final forging

通过数值模拟分析，如图 6 所示，对比了优化前后锻件在终锻成形前几步的流速。同一步骤的终锻成形中，优化前， R 弧附件的 A 边与 B 边的瞬时流速的最大值和最小值之间相差 4~7 倍；优化后，两边瞬时流速的最大值和最小值之间相差 2~4 倍。流速最大值和最小值的倍数关系称为流速倍差。流

速方向基本不变，流速倍差越小，流速的差异明显就越小。这种差异的缩小，有益于解决锻造折叠等缺陷问题。通过理论模拟分析和实际生产，验证了流速倍差的减小对于拐角 R 弧上折叠缺陷的消失具有重要作用。如图 7 所示，实际生产验证时，发现锻件拐角处 R 弧上的折叠缺陷消失。

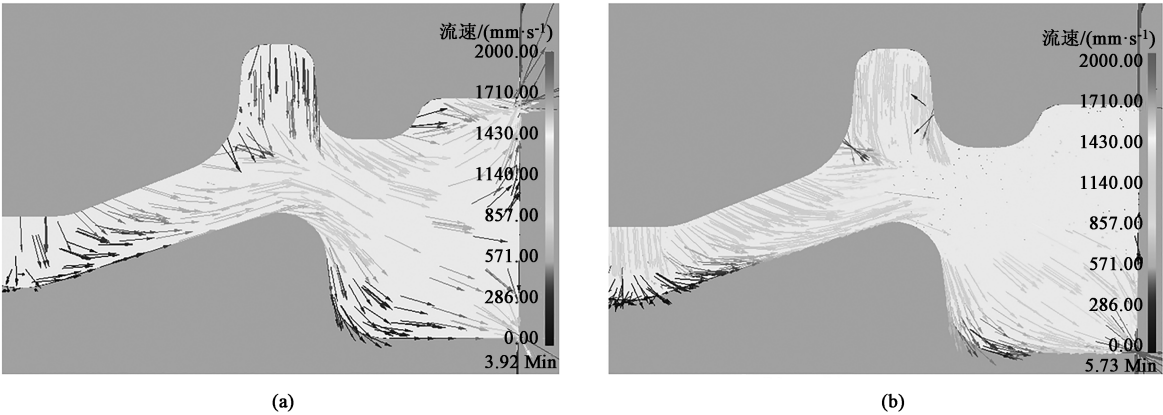


图 6 数值模拟中圆盘类锻件模具优化前后终锻成形时刻流速对比

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 6 Comparison of flow velocity at moment of formation in final forging before and after die optimization of disc forgings in numerical simulation

(a) Before optimization (b) After optimization



图 7 模具优化后生产的圆盘类锻件

Fig. 7 Disc forgings produced after die optimization

2 转向节锻件折叠缺陷形式

汽车转向节锻件是一种典型的复杂的叉形锻件，结构复杂、特征多^[13]，这类锻件在锻造成形过程中，坯料各部分区域的质点流速变化对成形的影响更直接。图 8 为某一种常见的盘类转向节锻件，在样件试制生产过程中发现，法兰至减震器的过渡区

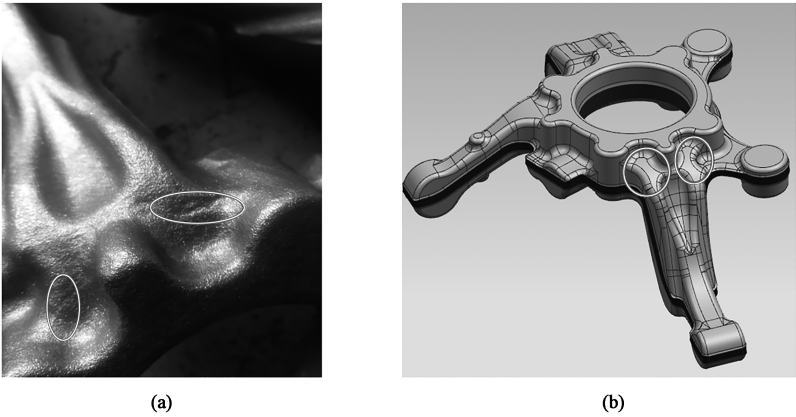


图 8 某转向节锻件折叠缺陷位置

(a) 样件实物折叠缺陷位置 (b) 缺陷对应的三维数模位置

Fig. 8 Folding defect positions of steering knuckle forgings

(a) Location of folding defect for actual sample (b) 3D mathematical modeling position corresponding to defect

域有部分折叠缺陷。

2.1 转向节锻件折叠缺陷分析

结合前文圆盘类锻件的折叠解析，利用 Deform 软件进行转向节锻造过程模拟，对数值模拟后的模型进行逐步分析。通过观察该转向节在预锻和终锻工序中该折叠区域的整个成形过程，发现两块相关封闭区

域在锻件成形过程中的流速变化剧烈，如图 9 中圆圈处所示，同一封闭区域内，流速最大值与最小值相差 7 倍左右。这种较大的流速倍差意味着这块区域内的坯料流动非常剧烈、杂乱以及不稳定，导致产生折叠缺陷的可能性增大，事实也证明了这种可能性的存在。

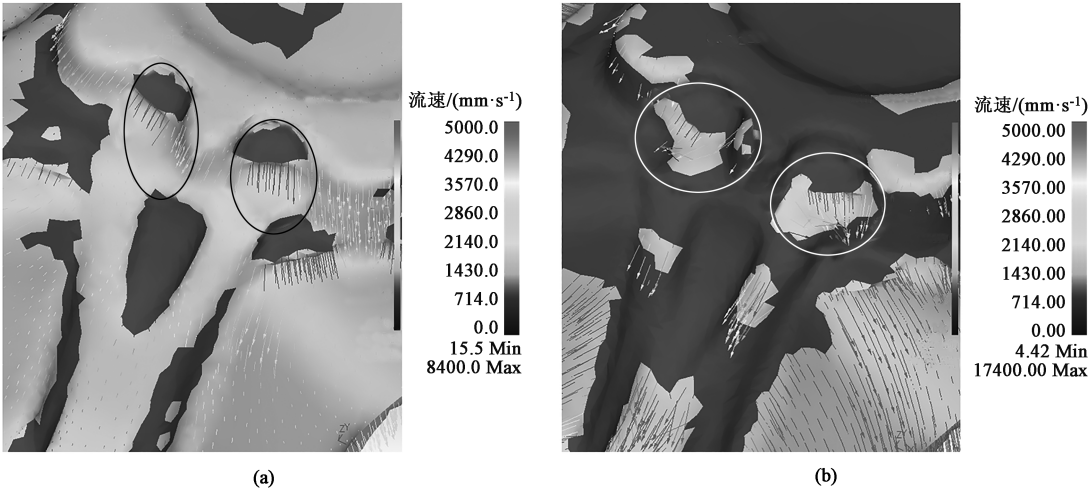


图 9 转向节锻件折叠区域终锻成形时流速分析
(a) 起始阶段 (b) 接近结束阶段

Fig. 9 Analysis of flow velocity during final forging in folding area for steering knuckle forgings
(a) Initial stage (b) Near end stage

2.2 转向节模锻件模具优化方案

结合前文的实例分析，为了消除转向节锻件上的折叠缺陷，可以适当调整该区域的预锻型腔形状，调整预留的坯料量，可以实现成形时对终锻部分区域的流速控制，确保产生折叠的区域及其附近材料

的流速均匀性，减少流速倍差变化，使坯料在该区域的流动不会过于剧烈，最大程度地避免了折叠缺陷的产生。

图 10 为转向节模具优化前后两种数值模拟中的流速对比。优化后两块相关封闭区域在锻件成形过

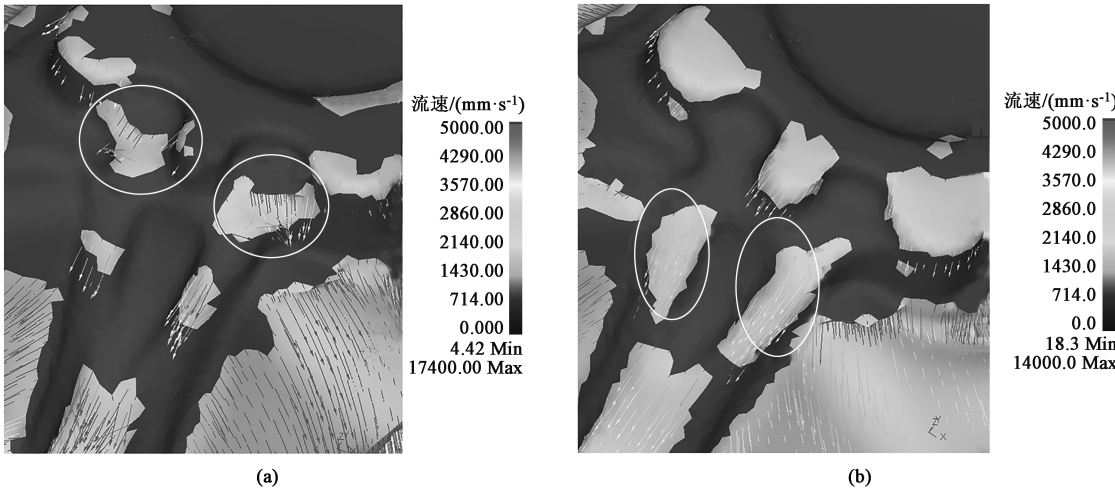


图 10 数值模拟中转向节锻件模具优化前后终锻成形时流速对比
(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 10 Comparison of flow velocity in final forging before and after die optimization of steering knuckle forgings in numerical simulation
(a) Before optimization (b) After optimization

程中的流速变化均匀,同一封闭区域内的最大值与最小值的倍差在 3 倍以内,相对来说成形更稳定,这种流速倍差较小的平稳成形过程意味着该区域在终锻成形中产生折叠缺陷的可能性大大降低。如图 11 所示,实际生产验证时,转向节锻件该区域的折叠缺陷消除。



图 11 模具优化后生产的转向节锻件

Fig. 11 Steering knuckle forgings produced after die optimization

3 结论

(1) 在热模锻生产过程中,可以把各种工艺因素对锻造成形过程的影响归结为过程中的一个表现形式:流速。在排除材料本身的相关因素(化学成分、金属组织等)的影响外,主要的工艺影响因素是通过坯料中各质点流速的变化来表现的。

(2) 在模锻件成形过程中,只有良好的金属流动、坯料中各区域的流速变化均匀、流速倍差变化较小,才能保证锻件不会出现折叠缺陷;反之,金属流动过于剧烈、紊乱,流速倍差变化大,锻件形成折叠缺陷的可能性变大。

(3) 当模锻件在某一点产生折叠时,可以通过数值模拟中的速度场分析该点及其附近各区域中各质点的流速变化,对比各部分区域中质点之间的速度倍差变化来判断折叠缺陷的形成过程。

(4) 通过流速分析方法,找到折叠缺陷产生的原因,优化模具结构,解决了模锻件的折叠缺陷问题,达到了设计要求,并实现批量生产。

参考文献:

- [1] 胡亚民. 材料成形技术基础 [M]. 重庆:重庆大学出版社, 2008.
- Hu Y M. Fundamental of Materials Forming [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2008.
- [2] 吕炎. 锻造工艺学 [M]. 北京:机械工业出版社, 1988.
- Lyu Y. Forging Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [3] 夏巨湛,王新云. 闭式模锻 [M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- Xia J C, Wang X Y. Closed Die Forging [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [4] 金敏伟. 汽车零部件温冷复合成形加工工艺及布局研究 [D]. 杭州:浙江工业大学, 2014.
- Jin M W. Research on Processing Technology and Layout of Warm-cold Composite Forming for Automobile Parts [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [5] 张世均,丘宏扬,阮锋,等. 金属分配与流动理论在锻造中的应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2000, (6): 24-25.
- Zhang S J, Qiu H Y, Ruan F, et al. Application of metal distribution and flow theory in forging [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2000, (6): 24-25.
- [6] 张丽,李升军. Deform 在金属塑性成形中的应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- Zhang L, Li S J. Application of Deform in Metal Plastic Forming [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2009.
- [7] 周敏,张艳芳. 基于 Deform 的煤机刮板锻造折叠缺陷研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (21): 125-127.
- Zhou M, Zhang Y F. Research on forging folding defects of coal machine scraper based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (21): 125-127.
- [8] 赵德颖. 枝杈类锻件成形工艺参数对折叠缺陷的影响分析 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (23): 119-121.
- Zhao D Y. Analysis of the influence of forming process parameters on the folding defects [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (23): 119-121.
- [9] 赵明鑫. 复杂枝杈类锻件折叠缺陷形成机理研究 [D]. 秦皇岛:燕山大学, 2016.
- Zhao M X. Study on the Folding Defects Formation Mechanism for Forging the Part with Branch [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [10] 边翊,杨秀清,马晓晖,等. 厚壁无缝钢管垂直挤压模具及润滑工艺研究 [J]. 模具技术, 2011, (1): 6-9.
- Bian Y, Yang X Q, Ma X H, et al. Research on vertical extrusion die and lubrication process of thick-walled seamless steel pipe [J]. Die Technology, 2011, (1): 6-9.
- [11] 孙朝远,刘德建,赵博,等. 高强度高窄筋类锻件的锻造工艺优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (12): 27-35.
- Sun C Y, Liu D J, Zhao B, et al. Forging technology optimization on high-strength steel forgings with high and narrow ribs [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (12): 27-35.
- [12] 张铁锁. 同步器齿圈类零件的闭式锻造工艺探讨 [J]. 金属加工: 热加工, 2017, (7): 49-51.
- Zhang T S. Discussion on closed forging process of synchronizer ring gear parts [J]. MW Metal Forming, 2017, (7): 49-51.
- [13] 邓春萍,杨慎华,何东野. 汽车左转向节臂锻件复合锻造工艺及模具设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2006, (3): 42-44.
- Deng C P, Yang S H, He D Y. Composite forging process and die design of automobile left steering knuckle arm forgings [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2006, (3): 42-44.