

基于 Deform-3D 的汽车差速器壳体模锻工艺改进

郭 静, 李明星

(四川交通职业技术学院 汽车工程系, 四川 成都 611130)

摘要: 以汽车差速器壳体为研究对象, 为改变目前效率低、壳体性能差、材料浪费多、易出现充不满缺陷的生产现状, 开发了一套无飞边模锻工艺, 并基于 Deform-3D 有限元平台进行研究。根据零件的材料和结构拟定了两种不同的成形方案, 并通过 Deform-3D 建立了有限元模型, 完成了热力耦合数值模拟, 分析了两种方案的成形可行性, 并对比了两种方案的优劣。结果表明: 采用大直径坯料方案时, 各工序间的变形量分布更恰当, 材料流动更为合理, 成形的差速器壳体的金属流线连续性更好, 外形成形完整, 无折叠、断裂、空穴等问题, 并且锻后温度分布情况更佳, 而采用小直径坯料方案获得的差速器壳体锻件存在折叠问题。最后, 采用大直径坯料方案进行了锻造试验, 获得了符合要求的差速器壳体, 完成了新工艺的开发。

关键词: 差速器壳体; 无飞边模锻; 大直径坯料; 小直径坯料; 金属流线

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.006

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0038-10

Improvement on die forging process for automobile differential housing based on Deform-3D

Guo Jing, Li Mingxing

(Department of Automotive Engineering, Sichuan Vocational and Technical College of Communications, Chengdu 611130, China)

Abstract: For the automobile differential housing, in order to change the current production status of low efficiency, poor housing performance, excessive material waste, and easy to have insufficient filling defects, a set of flash free die forging process was developed and studied based on Deform-3D finite element platform. Then, two different forming schemes were worked out according to the material and structure of part, and the finite element model was established by Deform-3D to conduct the thermal mechanical coupling numerical simulation. Finally, the forming feasibility of the two schemes was analyzed, and the advantages and disadvantages of the two schemes were compared. The results show that when the large-diameter billet scheme is adopted, the deformation amount distribution between each process is more appropriate, the material flow is more reasonable, the metal streamline continuity of the formed differential housing is better, the shape is complete, there are no problems such as folding, fracture, holes and other problems, and the temperature distribution after forging is better, while the differential housing forgings obtained by the small-diameter billet scheme have folding problem. At last, the forging test is carried out by using the large-diameter billet scheme, and the differential housing meeting the requirements is obtained, and the development of the new process is completed.

Key words: differential housing; flash free die forging; large-diameter billet; small-diameter billet; metal streamline

汽车差速器是汽车底盘传动系统中的重要机构, 主要用于传递动力、分配扭矩、调整转速, 在车辆运转时需要承受很大的冲击载荷, 因此, 其性能是汽车行驶安全性的保证, 差速器壳体作为其中的关

键零件也必须具有较好的强度、刚度、抗冲击性能等。但过去由于差速器壳体的形状复杂、截面各部位尺寸变化较大、材料硬度高, 并且模具技术、锻造设备、材料处理方式、润滑技术等相对比较落后, 因此, 差速器壳体主要采用开式锻造的生产方式。但由于需要切除飞边, 因而比较费材, 同时受切边影响会引起金属纤维外露, 降低差速器壳体的抗腐蚀性能, 且会影响生产效率, 因此, 开式锻造的产品无论从质量、性能、省材还是产速方面均无法与

收稿日期: 2022-06-29; 修订日期: 2022-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61179074)

作者简介: 郭 静 (1986-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: scjyguojing1986@126.com

无飞边模锻相比。故本文以某规格差速器壳体为研究对象, 开发一套效率更快、材料利用率更高、锻件质量更好的无飞边模锻工艺^[1-2]。

在锻造成形方面, 有限元分析法已成为工艺开发的重要手段, 能有效地弥补传统试模法的弊端, 节约大量时间和成本, 利用简单的数学模型还原实际工况, 从而解决实际生产问题, 应用效果极其显著。例如: 张巍^[3]针对铝合金连接锻件使用寿命短的问题, 基于 Deform-3D 有限元平台研究了锻件成形时的材料流动规律, 发现是由于出现了材料折叠导致锻件使用寿命短, 最终通过改进模具结构解决了该问题; 郭艳珺等^[4]针对滑动叉锻造生产中遇到的材料利用率低的问题, 对开式锻造方式进行了改进, 将水平模锻改为立式模锻, 并通过有限元模拟和锻造试验验证了工艺的合理性, 最终将材料利用率提高了 4.13%; 王相钧等^[5]针对连接杆头热锻模磨损失效快、寿命短的问题, 基于磨损模型进行了有限元分析, 掌握了不同工艺参数下锻模磨损的规律, 并通过智能算法进行了参数寻优, 经实际生产证明锻模磨损情况得到了明显改善; 何伟等^[6]为改善齿轮轴内部的锻造折叠缺陷, 通过有限元法找出了缺陷产生的原因, 并发现通过改进预成形模具结构能有效地解决该问题, 最终试模生产也验证了这一结论; 高冲等^[7]采用有限元法, 通过建立断裂模型和响应面理论, 以锻件表面的损伤值为优化对象, 对工艺参数进行了优化, 解决了连杆锻件表面开裂的问题。因此, 本文同样结合有限元法进行研究, 通过建立准确的材料模型还原材料在实际锻造时的变形情况, 以检验差速器壳体无飞边模锻工艺方案的可行性。

1 无飞边模锻工艺的提出

本文研究的差速器壳体零件如图 1 所示, 现有生产工艺流程如图 2a 所示, 坯料材料为 SCr440 合金钢, 锻前需加热, 经过镦粗、预锻、终锻后, 获得如图 2b 所示的带飞边的差速器壳体, 最后再进行切边、加工孔。该工艺在长时间生产过程中出现了以下几个问题:

(1) 镦粗件在预锻模腔中不易定位, 偶尔出现偏心现象, 造成材料两边分配不当, 使得壳体局部充不满, 从而导致壳体质量不稳定, 废品率较高;

(2) 壳体锻件需要切除飞边, 影响生产效率, 同时材料浪费较多, 增加了生产成本;

(3) 飞边切断部位的金属组织连续性遭到破坏^[8-9], 影响了壳体的强度, 缩短了壳体寿命。

该工艺无法保证产品质量的稳定性, 同时给企业带来了较大的风险和成本, 因此, 有必要对差速器壳体成形工艺进行改进, 最终根据零件的材料和结构提出了如图 3 所示的两种无飞边模锻工艺方案, 分别为大直径坯料方案和小直径坯料方案, 均分为缩径、预锻、终锻 3 道工序。与原有工艺相比, 两种新工艺的各工序均能较好地对坯料进行定位, 缩径工序通过坯料外圆定位, 预锻、终锻工序通过锻件杆部定位, 同时解决了因飞边引起的各种问题。以下对两种新工艺分别通过 Deform-3D 进行模拟分析, 并从锻件充填效果、锻件金属流线变化、锻造成形力、终锻温度场等方面进行对比。

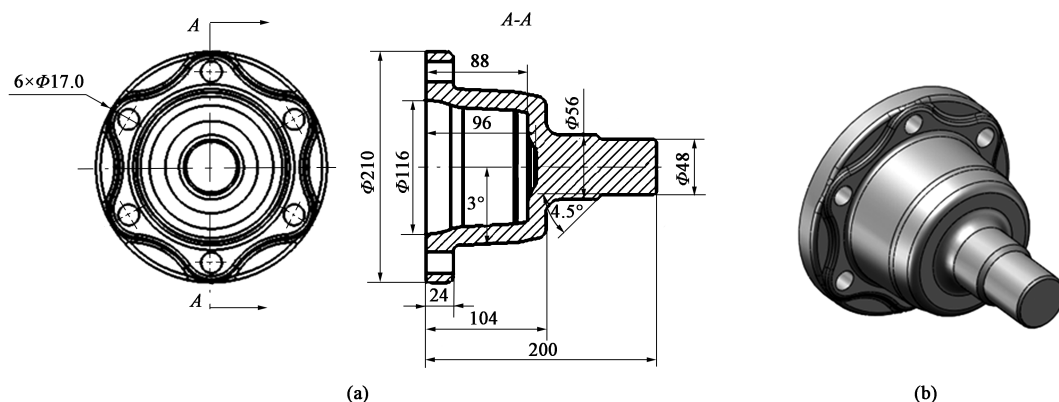


图1 差速器壳体零件图

(a) 尺寸图 (b) 三维图

Fig. 1 Part drawings of differential housing

(a) Dimensional drawing (b) 3D drawing

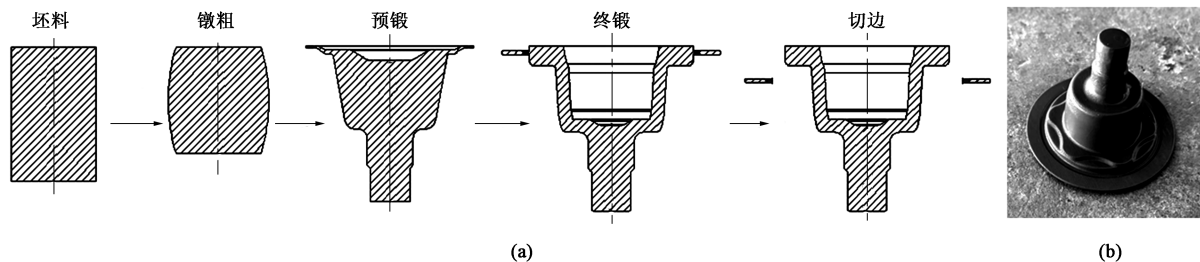


图 2 差速器壳体的现有生产工艺

(a) 工艺流程 (b) 带飞边的差速器壳体

Fig. 2 Current production process of differential housing

(a) Technological process (b) Differential housing with flash

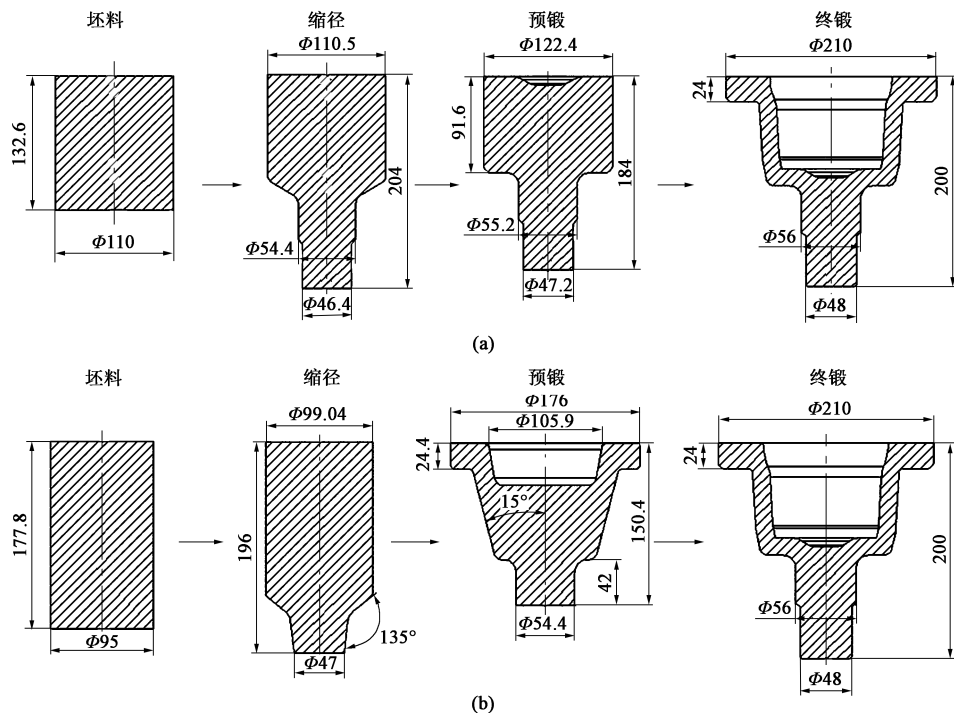


图 3 差速器壳体的无飞边模锻工艺

(a) 方案 1 (大直径坯料) (b) 方案 2 (小直径坯料)

Fig. 3 Flash free die forging processes of differential housing

(a) Scheme 1 (Large-diameter billet) (b) Scheme 2 (Small-diameter billet)

2 有限元及材料模型建立

根据图 1 所示的零件图, 取差速器壳体的 1/6 模型作为模拟对象, 不仅能够保证模拟精度, 也能简化计算过程^[10], 因此, 利用 Solidworks 分别对两种方案各 3 道工序的模具结构进行 1/6 模型的建模, 并在后续按需要导入 Deform-3D 中完成各工序的有限元建模工作。差速器壳体材料为 SCr440 合金钢, 为真实还原实际锻造时材料的变形行为, 利用热模拟试验机对 SCr440 合金钢进

行了不同条件下的单向压缩试验, 变形温度为 800~1200 ℃, 应变速率为 0.01~10 s⁻¹, 得到的真应力-真应变曲线如图 4 所示, 随后导入 Deform-3D 中生成新的材料模型。以方案 1 为例, 需要模拟的整个过程如图 5 所示, 分别为: (1) 加热坯料进入缩径模前与空气间的传热过程; (2) 缩径过程, 其中传热过程分为坯料与缩径上模接触前后两个不同阶段; (3) 预锻过程, 其中传热过程分为缩径件与预锻上模接触前后两个不同阶段; (4) 终锻过程, 其中传热过程分为预锻件与终锻上模接触前后两个不同阶段。模

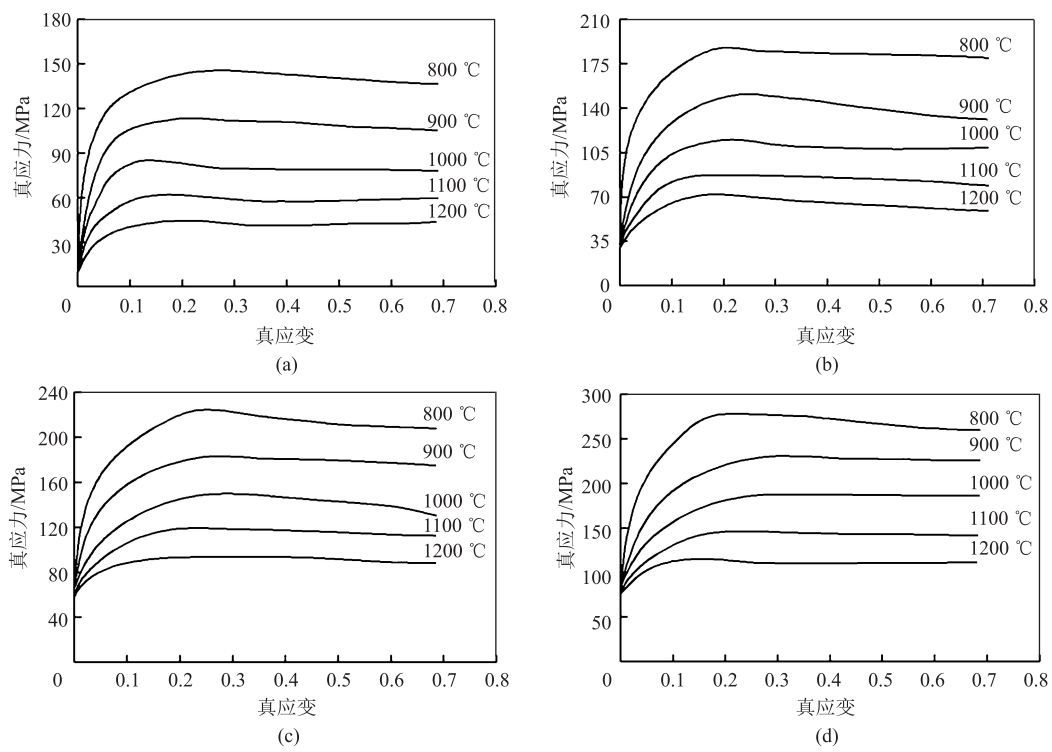


图 4 不同应变速率下 SCr440 合金钢的真应力-真应变曲线

(a) 应变率为 0.01 s^{-1} (b) 应变率为 0.1 s^{-1} (c) 应变率为 1 s^{-1} (d) 应变率为 10 s^{-1}

Fig. 4 True stress-true strain curves of SCr440 alloy steel under different strain rates

(a) Strain rate of 0.01 s^{-1} (b) Strain rate of 0.1 s^{-1} (c) Strain rate of 1 s^{-1} (d) Strain rate of 10 s^{-1}

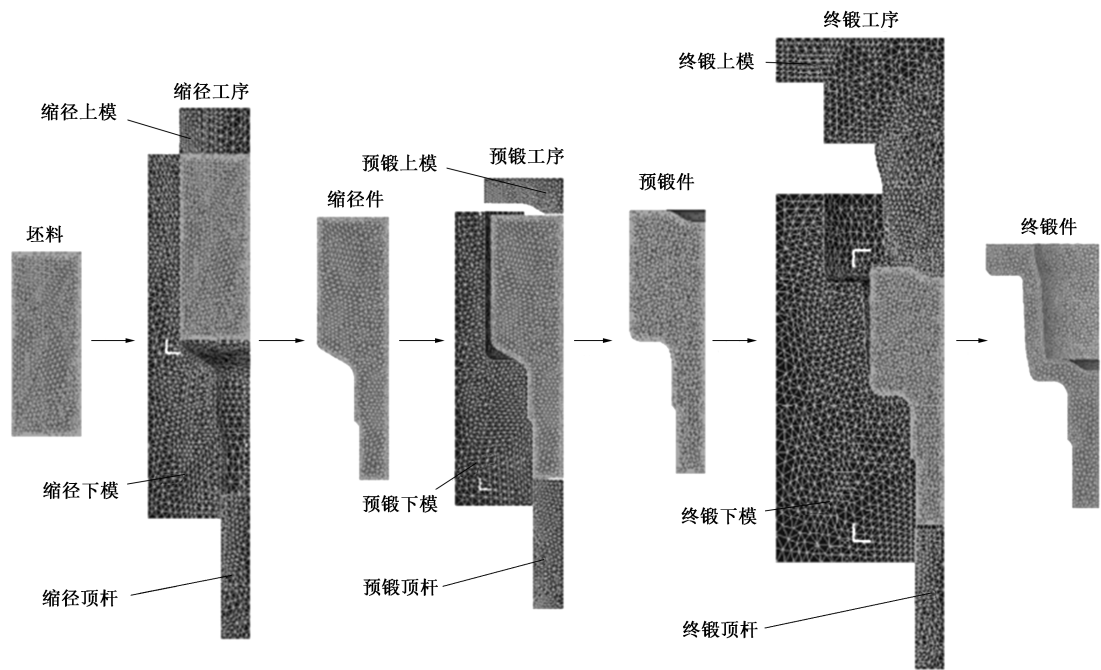


图 5 方案 1 各工序的有限元建模及模拟过程示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of finite element modeling and simulation process in each process under scheme 1

拟试验中，坯料为变形件，定义为塑性体，而模具在锻造时产生的变形量相对于坯料的变形量可忽略不计，故定义为刚体，模具材料为 SKD61 模具钢，坯料网格单元划分为 50000 个，模具网格单元划分为 32000 个，其余模拟参数设置如表 1 所示。

表 1 模拟参数设置
Table 1 Setting of simulation parameters

| 参数 | 坯料初始 温度/℃ | 模具预热 温度/℃ | 环境温度/ ℃ | 工件与模具的 摩擦类型 | 摩擦因数 | 工件与空气的传热系数/ ($N \cdot (s \cdot mm \cdot ^\circ C)^{-1}$) | 工件与模具的传热系数/ ($N \cdot (s \cdot mm \cdot ^\circ C)^{-1}$) | 上模下压速度/ ($mm \cdot s^{-1}$) |
|----|--------------|--------------|------------|----------------|------|---|---|----------------------------------|
| 数值 | 1100 | 320 | 20 | 剪切摩擦 | 0.3 | 0.02 | 11 | 30 |

3 壳体锻造模拟分析

3.1 充填效果分析

方案 1 中各道工序的充填结果如图 6a 所示，各工序锻件均在上、下模以及顶杆组成的封闭空间内发生变形，上模达到最终位置后，锻件表面与各模具工作面充分接触，紧紧贴合，锻件杆部和过渡部

位的结构均充填完整，无空穴产生，说明成形的锻件能达到基本的外形要求；同时，由图 6a 的成形结果可知，各工序锻件无明显纵向毛刺，说明坯料尺寸的选择比较准确。方案 2 中各道工序的充填结果如图 6b 所示，锻件充填效果与方案 1 一致，成形良好，无空穴产生，无明显纵向毛刺，锻件最终外形能满足要求。结果表明，采用改进后两方案均可以得到不带飞边且外形完整的差速器壳体锻件。

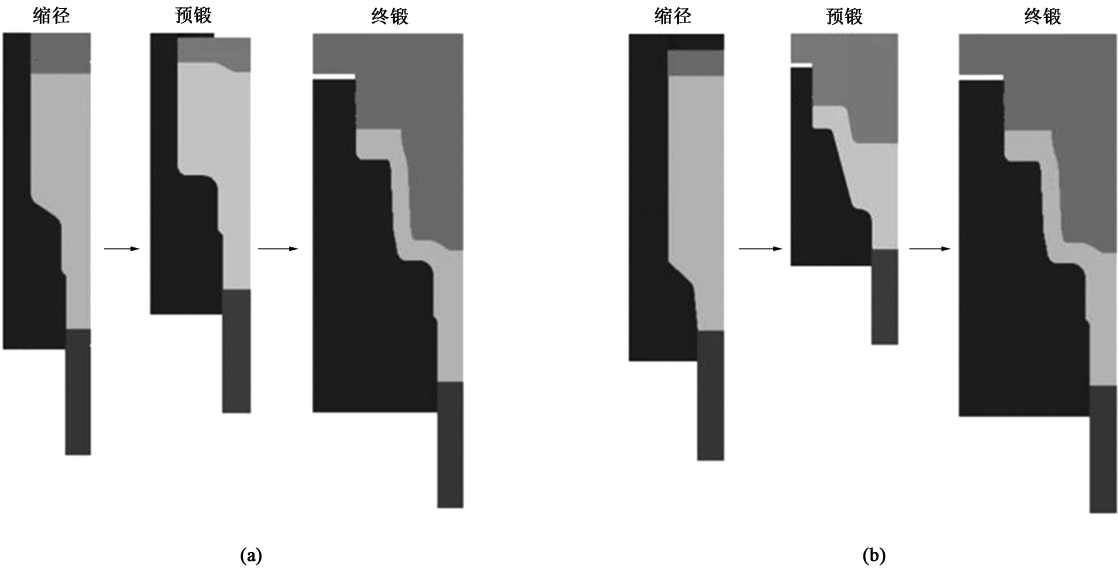


图 6 两种方案下各工序锻件的充填结果
(a) 方案 1 (b) 方案 2
Fig. 6 Filling results of forgings in each process under different schemes
(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

3.2 锻件金属流线分析

方案 1 中各工序锻件的金属流线变化过程如图 7 所示。由图 7a 可知，缩径工序中坯料上端金属基本不发生变形，剧烈变形区处于坯料下端，最终锻件心部网格形状近似为矩形，而外围网格形状近似为平行四边形，说明外围金属变形更大，变形不均匀程度更高。剧烈变形区的水平网格线向下弯曲，且弯曲幅度由上而下不断增大，这是因为外围金属向下流动时受到下模壁的摩擦阻力作用^[11]，引起了流动滞后。缩径过程中，金属流动规律，金属网格虽变形大，但连续性较好，无折叠、断裂等问题。由图 7b 可知，预锻工序是对锻件上端进行镦粗，因

此，杆部金属基本不发生变形，锻件上端金属网格受轴向压缩、径向延伸，但变形量极小，且无折叠、断裂等问题，变形合理。由图 7c 可知，终锻工序主要是对锻件进行反挤压以成形壳体内腔，然后镦粗成形端面法兰，因此，变形区处于锻件上端，而杆部金属仍基本不发生变形，壳体内腔周围网格变形最为剧烈，同时受上模表面和下模壁摩擦力的作用，壳体内腔周围金属和外围金属向上流动的速度慢于中间金属，因此，壳体薄壁水平网格线呈拱形。镦粗端面法兰时，由于金属优先与上模接触，受摩擦力作用，金属径向流动时法兰上部金属流速要慢于下部，因此，法兰上部网格变形更大，且更密集。

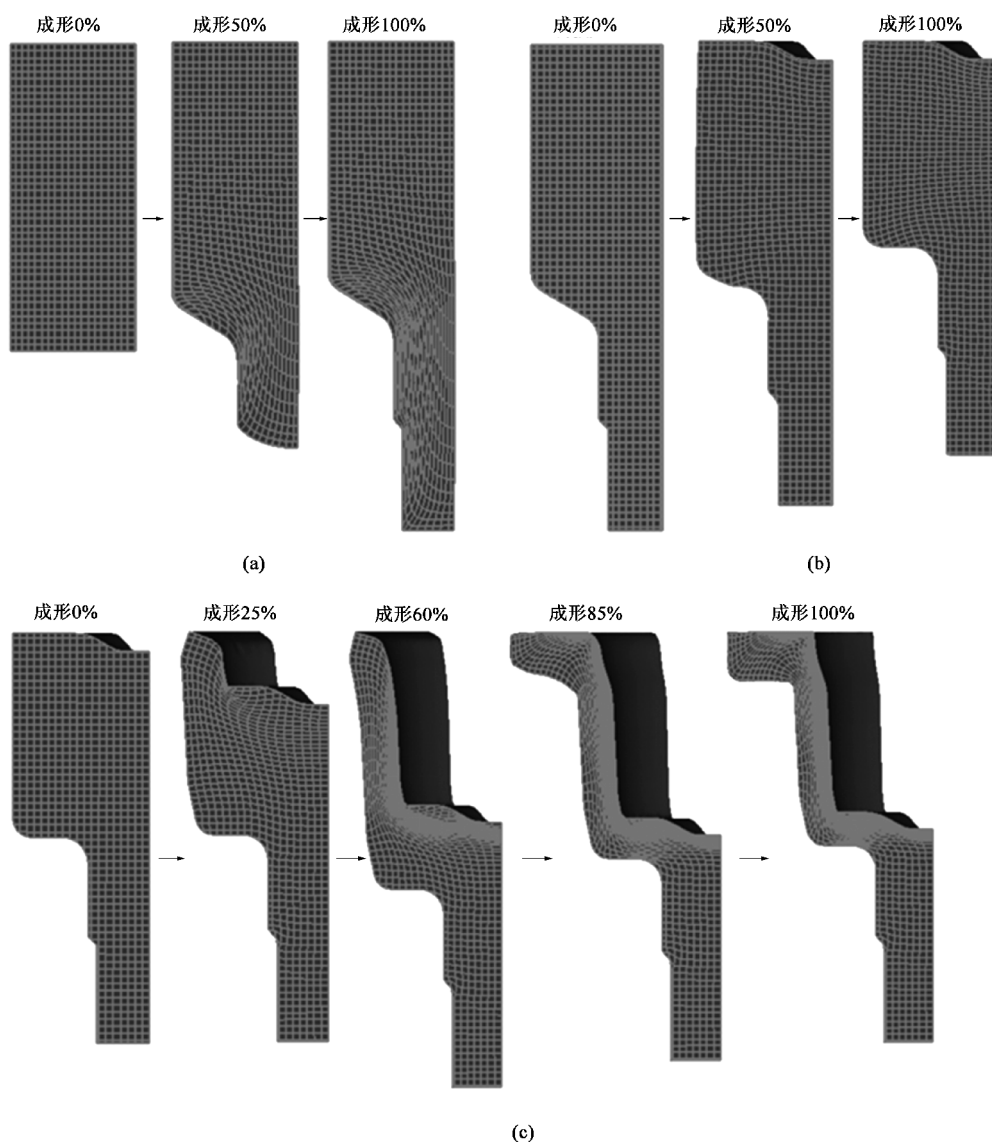


图7 方案1各工序锻件的金属流线变化

(a) 缩径 (b) 预锻 (c) 终锻

Fig. 7 Metal streamline change in each process of forgings under scheme 1

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

终锻过程中也未出现折叠、断裂等问题，最终壳体锻件的金属流线连续性较好，说明采用方案1能满足成形要求。

方案2各工序锻件的金属流线变化过程如图8所示。由图8a可知，与方案1相比，缩径工序下的材料流动规律相似，变形更为简单，成形锻件金属流线分布合理，无折叠、断裂等问题。由图8b可知，预锻前期主要以镦粗为主，金属径向流动，金属网格被轴向压缩，变形正常。成形至55%时，部分金属开始逆向流动成形壳体内腔。而成形至75%时，逆向流动的金属与上模底部端面接触引起回流，图8b中圈出部位出现折叠趋势。成形至90%时，金属折叠产生，缺陷形成。成形至100%时，折叠

消失，被压入锻件。由图8c可知，终锻工序主要是进一步成形壳体内腔以及杆部结构，因此，锻件上、下两端金属均参与变形，壳体内腔周围金属变形剧烈，而杆部外围金属变形剧烈，网格变形极不均匀，金属流线疏密分布不均，但连续性好，未出现折叠、断裂问题。整体分析可知，虽然终锻过程中的材料流动合理，不会产生缺陷，但由于在预锻结束时锻件内部已经形成了折叠缺陷，并始终保留在锻件内部，使得最终获得的壳体锻件存在较大的质量问题，后续使用中极易产生开裂，因此，采用方案2无法满足成形要求。

3.3 锻造成形力分析

方案1、方案2各工序的锻造成形力的变化过

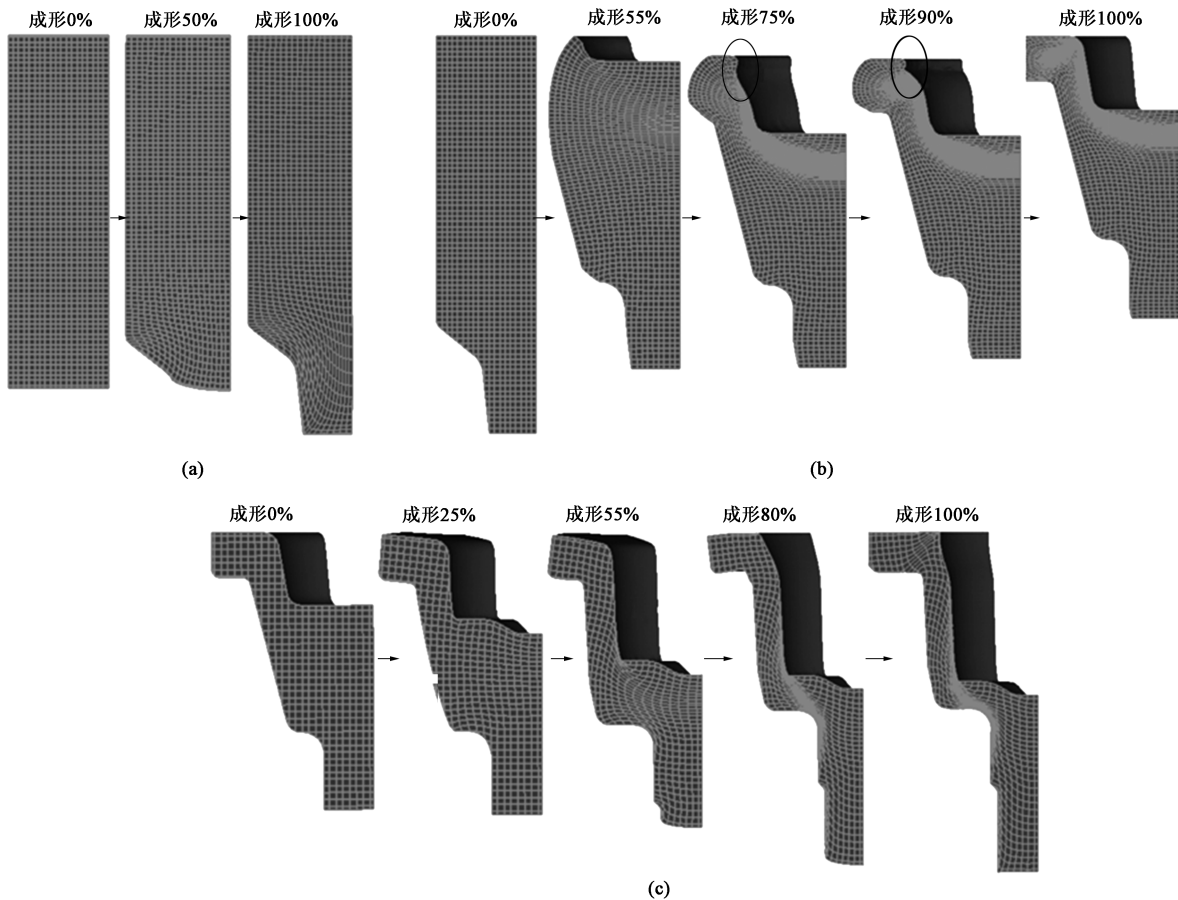


图 8 方案 2 各工序锻件金属流线变化

(a) 缩径 (b) 预锻 (c) 终锻

Fig. 8 Metal streamline change in each process of forgings under scheme 2

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

程分别如图 9 和图 10 所示, 方案 1、方案 2 中坯料形状及中间过渡零件形状不同, 会直接影响各工序成形时的金属流动情况, 受到的流动阻力不同, 锻造成形力自然也不同。锻造成形力是促使金属产生塑性变形的外力, 因此在锻件成形时, 锻造成形力需要克服锻件与模具之间的摩擦力作用以及金属材料自身的变形抗力作用, 其中摩擦力大小与接触面积呈正相关关系, 变形抗力大小与材料变形程度呈正相关关系。而随着锻造的进行, 材料的变形程度会不断增大, 锻件与模具间的接触面积也会不断增大, 到成形结束时完全接触, 因此, 各工序的锻造成形力始终呈增长趋势, 也符合实际锻造情况。从图 9 可知, 方案 1 下, 缩径、预锻、终锻工序的最大锻造成形力分别为 1829、2030 和 3295 kN。从图 10 可知, 方案 2 下, 缩径、预锻、终锻工序的最大锻造成形力分别为 1411、2666 和 3839 kN。两方案中的终锻工序的锻件变形量最大, 因此, 所需锻造成形力也更大些, 方案 1 中缩径工序的最大锻造成

形力大于方案 2, 但预锻和终锻工序的要小一些, 锻造成形力越小, 模具受力就越小, 不仅能够降低磨损, 出现开裂的风险也会更低, 锻模寿命就越长, 因此, 采用方案 1 更适合。同时, 对比两方案各工序间最大锻造成形力差值可知, 方案 1 各工序间的变形量分配更为恰当。

3.4 终锻温度场分析

方案 1、方案 2 的终锻成形温度场分布云图如图 11 所示, 两方案的温度分布规律大体相同, 壳体内部温度高于表面, 上部温度要高于杆部, 这是由于壳体表面最先与模具面接触, 热量通过热传递流失, 壳体内部不与模具接触, 同时受挤压后产生了大量的变形热, 而壳体杆部最先完成成形, 与模具接触时间最长, 热量流失最多, 壳体上部最后成形, 与模具接触时间短, 热量流失少。锻件冷却时, 若出现冷却不均现象, 不仅会影响锻件内部组织的均匀性, 也会引起较大的温度应力, 使壳体产生冷却裂纹^[12], 因此, 壳体锻后的整体温差和温度分布情况非

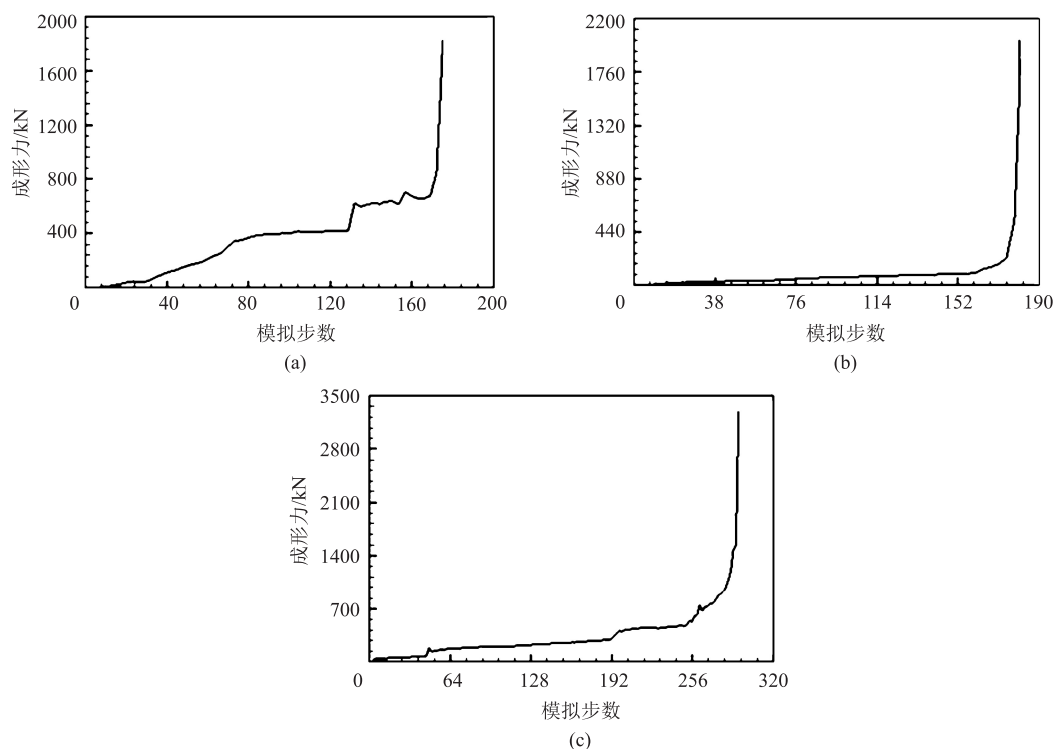


图9 方案1各工序锻造成形力变化过程

(a) 缩径 (b) 预锻 (c) 终锻

Fig. 9 Change process of forging force in each process under scheme 1

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

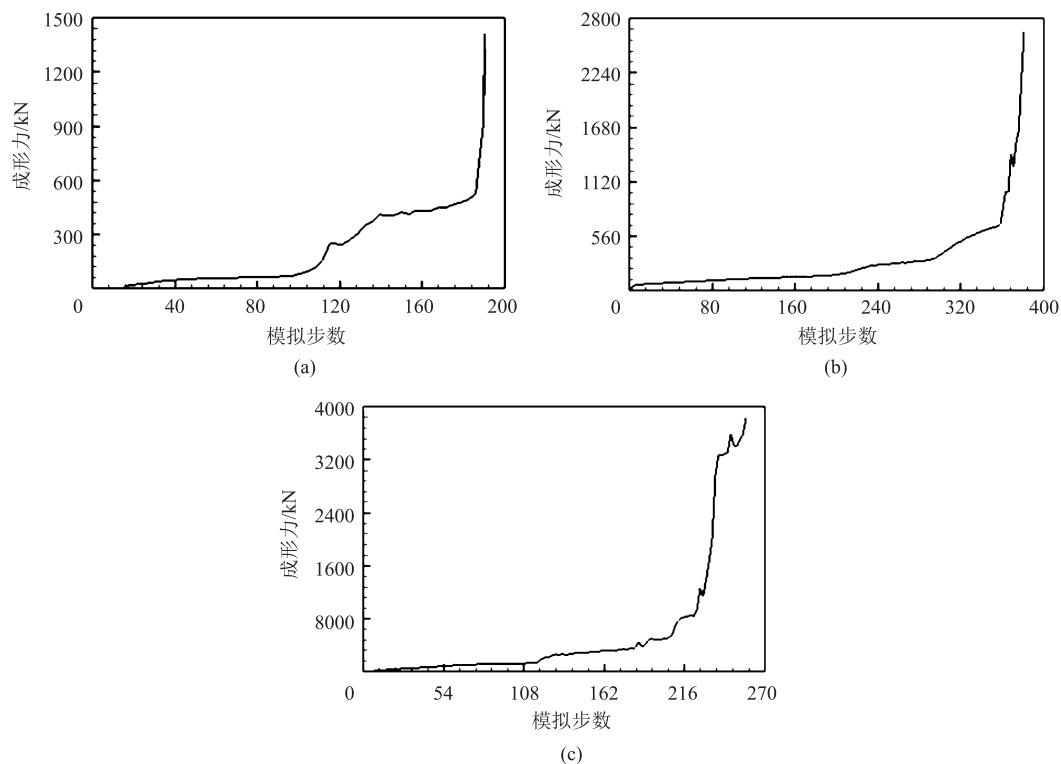


图10 方案2各工序锻造成形力变化过程

(a) 缩径 (b) 预锻 (c) 终锻

Fig. 10 Change process of forging force in each process under scheme 2

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

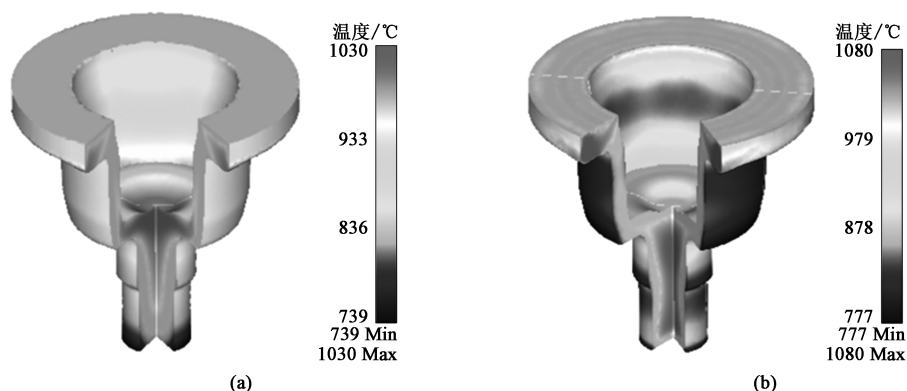


图 11 不同方案下差速器壳体终锻成形温度场分布云图

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 11 Nephograms of temperature field distribution in final forging of differential housing under different schemes

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

常重要。从图 11 可以看出：采用方案 1 时，壳体的最大温差为 291 ℃，采用方案 2 时，壳体的最大温差为 303 ℃，虽相差不多，但方案 1 更小；其次，采用方案 1 获得的壳体锻件的温度分布均匀程度明显要好于方案 2，壳体冷却后产生裂纹的可能性更低、质量更好。

4 壳体锻造试验

由上述模拟试验结果可知，采用方案 1 不仅能充填外形完整的差速器壳体锻件，并且在材料流动情况、金属流线、锻造成形力以及锻后温度分布等方面均存在一定优势，因此，根据方案 1 完成锻模设计生产后进行实际锻造试验。流程为：进料检验→下料（高速锯床）→加热（中频感应炉）→缩径、预锻、终锻（螺旋压力机）→锻件检验→抛丸→热处理→抛丸→检验。模锻过程中，必须喷涂

润滑剂，能起到较好的润滑和冷却效果，缓解模具磨损。现场试验获得的各工序产品如图 12a 所示，充型效果较好，且表面质量良好，与模拟结果一致，最终差速器壳体的剖切结果如图 12b 所示，内部流线完整连续，无折叠、断裂问题，不会出现内部质量问题，经检验，壳体尺寸性能合格。经过一段时间考察，生产较为稳定，无重大质量问题，壳体性能与原产品相比有了较大提升，完成了新工艺的开发，解决了现有工艺效率低、壳体性能差、材料浪费多等问题。

5 结论

(1) 针对差速器壳体现有生产工艺存在的效率低、壳体性能差、材料浪费多、易出现充不满缺陷等问题，设计了两种无飞边模锻工艺方案，并利用



图 12 现场试验产品

(a) 各工序产品 (b) 成形件剖切截面

Fig. 12 Field test products

(a) Products of each process (b) Section of formed part

Deform-3D 有限元分析对两方案的成形可行性进行了研究。

(2) 为真实还原实际锻造时材料的变形行为, 确保模拟的可靠性, 对 SCr440 合金钢进行了高温压缩试验, 并在 Deform-3D 软件中建立了准确的材料模型。最终模拟试验表明: 采用大直径坯料方案能获得外形完整、无质量问题的差速器壳体, 而采用小直径坯料方案获得的差速器壳体存在折叠风险。

(3) 进行了差速器壳体锻件的生产试制, 生产情况良好、产品充型完整、质量良好, 与模拟结果一致, 验证了有限元模拟分析结果的准确性, 也验证了新工艺的可行性。将开式锻造改为无飞边模锻后, 实践证明, 不仅能提高产品的生产效率, 而且减少了材料浪费, 对产品性能也有了明显的提升作用。

参考文献:

- [1] 夏巨湛, 余国林, 詹金辉, 等. 可分式无飞边模锻的研发与应用 [J]. 模具工业, 2019, 45 (5): 52-57.
Xia J C, Yu G L, Zhan J H, et al. Development and application of flashless assembled forging die [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (5): 52-57.
- [2] 葛新锋, 郭艳珺, 秦涛, 等. 传动轴中间凸缘无飞边锻造工艺 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (5): 108-110.
Ge X F, Guo Y J, Qin T, et al. Flashless forging process for intermediate flange of drive shaft [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (5): 108-110.
- [3] 张巍. 车用 2A12 铝合金连接锻件变形规律分析与工艺设计 [J]. 材料科学与工艺, 2022, 30 (1): 90-96.
Zhang W. Deformation analysis and process design of 2A12 aluminum alloy connecting forgings for vehicles [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30 (1): 90-96.
- [4] 郭艳珺, 程俊伟, 常世超, 等. 短轴滑动叉模锻工艺 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (4): 45-50.
Guo Y J, Cheng J W, Chang S C, et al. Die forging process of short shaft slid fork [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (4): 45-50.
- [5] 王相钧, 王大勇, 王培涛, 等. 连接杆头模锻工艺参数优化研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (6): 36-41.
Wang X J, Wang D Y, Wang P T, et al. Process parameters optimization of die forging for connecting rod head [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (6): 36-41.
- [6] 何伟, 董万鹏, 孙礼宾, 等. 基于 Deform-3D 的发动机齿轮轴热锻成形结构优化模拟 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (6): 42-49.
He W, Dong W P, Sun L B, et al. Optimization simulation of hot forging structure of engine gear shaft based on Deform-3D [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (6): 42-49.
- [7] 高冲, 刘淑梅, 霍文军. 基于响应面法的铝合金连杆锻造工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (11): 97-100.
Gao C, Liu S M, Huo W J. Optimization of forging process for aluminum alloy connecting rods based on response surface method [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (11): 97-100.
- [8] 冯文杰, 杨创创, 陈莹莹, 等. 基于数值模拟的汽车差速器齿轮冷挤压工艺方案 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2018, 32 (4): 75-80.
Feng W J, Yang C C, Chen Y Y, et al. Study on cold extrusion process of automobile differential gears based on numerical simulation [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2018, 32 (4): 75-80.
- [9] 张东民, 盛育东, 张金玉, 等. 六角开槽螺母的冷锻工艺优化及数值模拟 [J]. 机械设计与制造, 2018, (3): 191-194.
Zhang D M, Sheng Y D, Zhang J Y, et al. Numerical simulation and optimization for cold heading of hexagonal slot nut [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018, (3): 191-194.
- [10] 胡建军, 李小平. Deform-3D 塑性成形 CAE 应用教程 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
Hu J J, Li X P. Deform-3D Plastic Forming CAE Application Tutorial [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [11] 李天兴, 张迅雷, 傅建中, 等. 轿车用齿坯精锻工艺参数与模具结构对金属流线的影响 [J]. 机械传动, 2015, 39 (10): 154-157, 175.
Li T X, Zhang X L, Fu J Z, et al. Influence of the technological parameter and die structure on metal flow line for precision forging car gear blank [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39 (10): 154-157, 175.
- [12] 王耀, 顾小燕. 三通阀体多向模锻工艺研究及有限元分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (3): 28-33.
Wang Y, Gu X Y. Study on multi-directional die forging technology for tee valve body and finite element analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (3): 28-33.

