

基于 DEFORM 数值仿真的钢质活塞塑性成形过程缺陷预测及模具优化

赵玉琳¹, 王培吉², 闫利军¹, 金广山¹, 许 胜¹, 张小磊¹, 冯金龙¹

(1. 内蒙古一机集团富成锻造有限责任公司 技术部, 内蒙古 包头 014030;

2. 内蒙古科技大学 理学院, 内蒙古 包头 014030)

摘要: 针对钢质活塞成形质量难题, 在毛坯研制阶段采用 CAE 的 DEFORM 软件开展仿真研究, 模拟活塞锻造的金属塑性成形过程, 预测模具的填充效果、锻造负荷、锻造过程中产生的缺陷。在模具制造前, 预测产品的整个成形过程, 可帮助研判潜在的缺陷问题, 优化模具设计。提供了从产品设计到生产的完整解决方案, 极大地缩短了研发周期, 降低了研发及生产成本, 改变了以往设计人员凭借主观设计模具、然后多次试制及改进的研发模式, 达到了预期效果。通过工业试制一次成功, 并且图纸尺寸、表面质量、力学性能等各项技术指标均满足设计要求。目前, 富成锻造有限责任公司已全面在研发新产品上推广使用 CAD/CAE/CAM 数字化设计、制造技术, 取得了显著的经济效益。

关键词: 金属塑性成形; 模具设计; 缺陷预测; 钢质活塞; DEFORM 软件

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.012

中图分类号: TG312

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 06-0087-07

Defect prediction and die optimization on steel piston plastic forming process based on DEFORM numerical simulation

Zhao Yulin¹, Wang Peiji², Yan Lijun¹, Jin Guangshan¹, Xu Sheng¹, Zhang Xiaolei¹, Feng Jinlong¹

(1. Technology Department, Inner Mongolia First Machinery Group Fucheng Forging Co., Ltd., Baotou 014030, China;

2. School of Science, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014030, China)

Abstract: For the forming quality problem of steel piston, the simulation research was conducted in the blank development stage by DEFORM software of CAE, and the metal plastic forming process of piston forging was simulated to predict the filling effect of mold, the forging load and the defects produced in forging process. Before the mold manufacturing, the prediction of the whole forming process for product could help to judge the potential defect problem and optimize the mold design. The complete solution scheme from product design to production was provided, the research and development cycle was greatly shortened, the cost of research and development and production was reduced, this research and development mode that the designers subjectively designed the mold, and then tried many times to improve was changed, and achieved the expected results. The first trial production was successful by industrial trial production, and various technical indicators such as drawing size, surface quality and mechanical properties met the design requirements. At present, Fucheng Forging Co., Ltd. has comprehensively promoted the use of CAD/CAE/CAM digital design and manufacturing technology in the research and development of new products, and has achieved significant economic benefits.

Key words: metal plastic forming; mold design; defect prediction; steel piston; DEFORM software

随着新一代航空航天飞行器、高铁和新能源汽车向大型化、轻量化、高性能化、长寿命和高可靠性方向发展, 对高性能复杂整体薄壁构件的需求更为迫切。这类构件突出的制造难题是材料难变形、形状复杂、性能要求高。这些难题互相耦合, 使得

此类构件的制造难度极大, 超出了现有技术的成形极限, 给传统成形技术带来巨大的挑战。针对以上技术难题, 面向这类结构的成形新技术, 主要有异形截面管件低压充液成形技术、深腔曲面薄壁构件可控多向加压流体压力成形技术和难变形材料薄壁构件热介质压力成形技术^[1]。

在发动机行业, 随着重型柴油机的发展, 发动机的功率日益提高, 传统的铝活塞已经不能满足重型柴油机高强度指标的性能要求, 为此, 国内外已

收稿日期: 2021-05-31; 修订日期: 2021-09-10

作者简介: 赵玉琳 (1968-), 男, 学士, 研究员级高级工程师

E-mail: zhaoyulin86@sohu.com

经开始对钢质活塞展开研究。内蒙古一机集团富成锻造有限责任公司在接到钢质活塞锻件毛坯的研制任务后,首先对其进行了工艺性分析。

FCDD 发动机钢质活塞是一种重型柴油机发动机的关键零件,如图 1 所示,属于复杂整体薄壁构件。

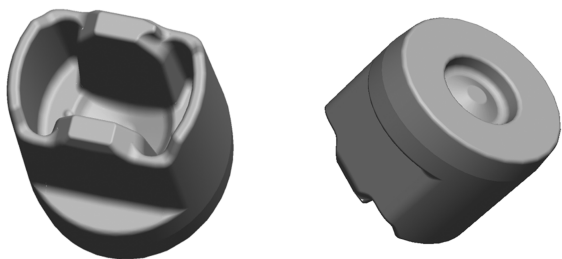


图 1 FCDD 发动机钢质活塞
Fig. 1 Steel piston for FCDD engine

1 钢质活塞工艺难点分析

1.1 锻件形状复杂,成形困难

根据 FCDD 钢质活塞产品图分析,该钢质活塞为活塞顶、裙一体式锻件,其内腔深,裙臂深度为 65 mm,并且裙臂薄,壁厚为 7.5 mm,深度和壁厚比值为 8.6 : 1,该比值在锻件结构中极为罕见,产品拔模斜度为 1.5°,属于深孔薄壁型结构复杂类锻件,从成形方面来说,锻件不易充满^[2]。由于活塞裙臂的壁厚薄,裙臂薄处的热能散失快,温度下降速度快,因此,金属流动相应变差,对裙臂的充填性能更加不利^[3]。

1.2 脱模困难

拔模斜度小,活塞裙的裙臂处的拔模斜度仅为 1.5°。此处温降速度快,容易使锻件抱紧冲头,因

此导致锻件出模困难。因此,FCDD 发动机钢质活塞的生产对锻造设备有较高的要求,锻造设备必须具有顶出装置,模具制造比较困难,对锻造工艺、模具制造、模具寿命和生产稳定性均提出了很高的要求。

1.3 模具制造困难

由于 FCDD 发动机钢质活塞的结构复杂,锻件薄而高,相应的模具模膛窄而深。刀具直径为 $\Phi 8$ mm 的圆柱铣刀的刀杆长度满足要求,但在加工模膛根部圆角半径 $R3$ mm 时又不能满足加工要求;刀具直径为 $\Phi 6$ mm 的圆柱铣刀能够满足加工模膛根部圆角半径 $R3$ mm 的要求,但刀杆长度又不满足要求,不足以加工到模膛底部。这给加工带来很大的困难,效率降低,周期加长。

1.4 外观质量要求高

非加工面较多、表面光洁度的质量要求高,不允许有氧化皮残留痕迹。

1.5 热处理性能要求高

钢质活塞结构复杂,属于深坑式锻件,在锻件淬火冷却时,其在深坑处的气膜不易扩散,降低了淬火效果;锻件不同部位的壁厚差大,冷却时易产生应力集中,产生裂纹。42CrMoA 钢材料具有油淬不硬、水淬易裂的属性,此锻件的性能要求高,需合理选择淬火介质^[4]。

2 解决措施

2.1 初定工艺方案

设备决定工艺,结合富成锻造有限公司设备情况,确定了活塞裙的初步工艺方案为镦粗→打扁→预锻→终锻,各工步的模拟结果如图 2 所示。

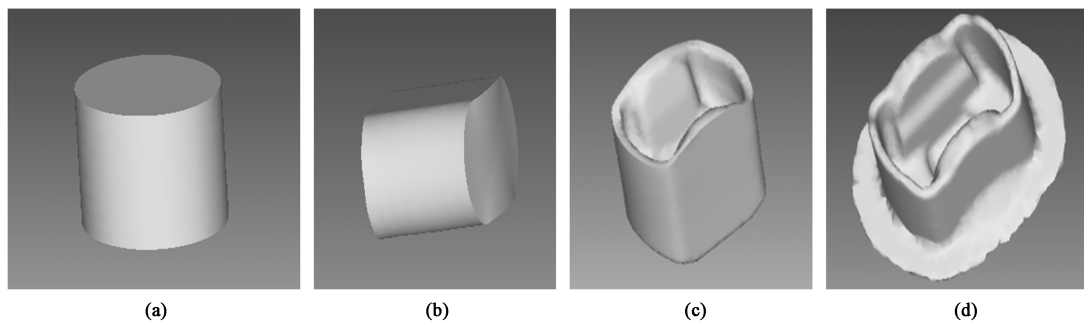


图 2 初步工艺方案
(a) 镦粗 (b) 打扁 (c) 预锻 (d) 终锻

Fig. 2 Preliminary process scheme
(a) Upsetting (b) Flatting (c) Pre-forging (d) Final forging

2.2 模具设计

模具设计主要是对模具的结构和生产过程进行

研究^[5-7]。本文利用计算机辅助工程分析 (Computer Aided Engineering, CAE) 的 DEFORM 软件对锻

造塑性成形过程进行模拟，通过软件模拟锻造塑性成形过程来代替试模，帮助预判潜在的问题，提前优化模具设计，从而有效地防止问题发生，提供了从产品设计到生产的完整解决方案，大大缩短了研发周期，降低了研发及生产成本。CAE 的 DEFORM 软件在金属成形领域发挥了重要作用^[8]。由于模拟和实际生产还是存在一定的差距，生产过程中还是会产生很多的问题，因此，需要通过实际试制跟踪进行完善。

2. 2. 1 模拟情况

(1) 模拟参数的设置

DEFORM 软件在模拟运行前需要对毛坯材料、坯料加热温度、模具温度、上模滑块运行速度、打击次数、摩擦因数等参数进行设置，参数设置的合理性与准确性直接关系到模拟的准确性。例如摩擦因数的大小反映了金属在模具中流动时与模具之间的摩擦力大小，在模拟过程中反映出产品充填效果的好坏。而影响摩擦因数的因素与模具模膛的表面光洁度和生产中使用的润滑剂有关。根据 DEFORM 软件使用手册和查阅有关文献，确定了上述参数的取值^[9-14]，见表 1。

表 1 模拟相关参数的设置

Table 1 Setting of related parameters in simulation

参数	数值
毛坯材料	美标 AISI-4140 (国标 42CrMoA 钢)
坯料加热温度/℃	1210
模具温度/℃	180
上模滑块运行速度/(mm·s ⁻¹)	520
打击次数	1
摩擦因数 (石墨润滑)	0.4

(2) 预锻模拟结果

预锻过程中的模拟打击力曲线和温度的状态如图 3 所示。在预锻行程为 93.2 mm 时，预锻打击力为 3360 kN；预锻结束时，由于裙臂较薄，散热快，裙臂与模具的接触面有明显的温降，从始锻温度 1210 ℃降至 1000 ℃左右。

(3) 终锻模拟结果

终锻过程中的模拟打击力曲线和温度的状态如图 4 所示，终锻打靠时的打击力为 12500 kN，裙臂与模具的接触面有明显的温降，从始锻温度 1210 ℃降至 920 ℃左右。

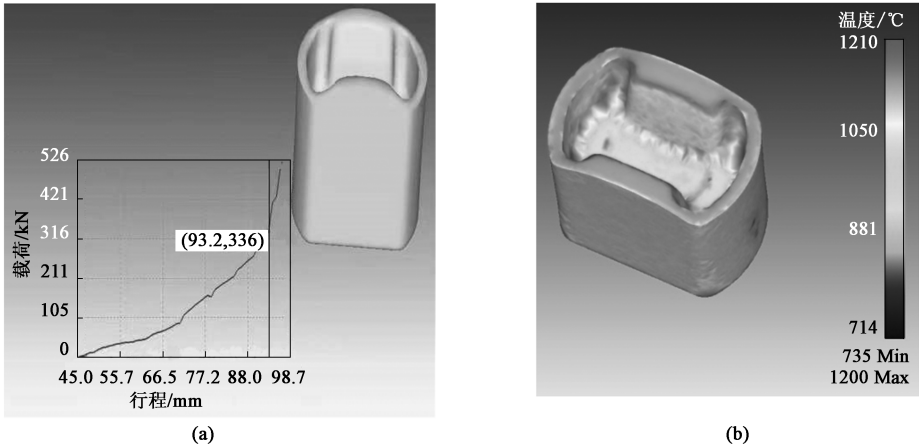


图 3 预锻的模拟打击力曲线 (a) 和预锻后的温度状态 (b)

Fig. 3 Simulated striking force curve of pre-forging (a) and temperature state after pre-forging (b)

(4) 终锻模拟问题

通过分析发现终锻塑性成形模拟过程中有以下两个可能产生的缺陷：①折叠，如图 5a 所示；②充填不满，如图 5b 所示。针对这两种缺陷，提前对模具进行优化设计。

2. 2. 2 优化方案

(1) 应用排气孔及阻尼墙

通过上述 DEFORM 软件的模拟分析，钢质活塞裙臂的顶部空气不易排出，造成充型困难，经过分

析，确定在模具此处设计 4 个 $\Phi 5$ mm 的排气孔^[15]，如图 6 所示。同时，在毛边桥部增设阻尼墙，减缓材料流向毛边的速度，保证金属材料完全充满型腔后，再使多余的材料流向毛边仓部。

(2) 优化上模冲头

通过上述 DEFORM 软件的模拟分析，上模冲头处存在产生折叠的倾向，其原因为：钢质活塞的产品结构中深度和壁厚的比值为 8.6 : 1，该比值在锻件结构中极为罕见，导致金属在快速流动时会产生

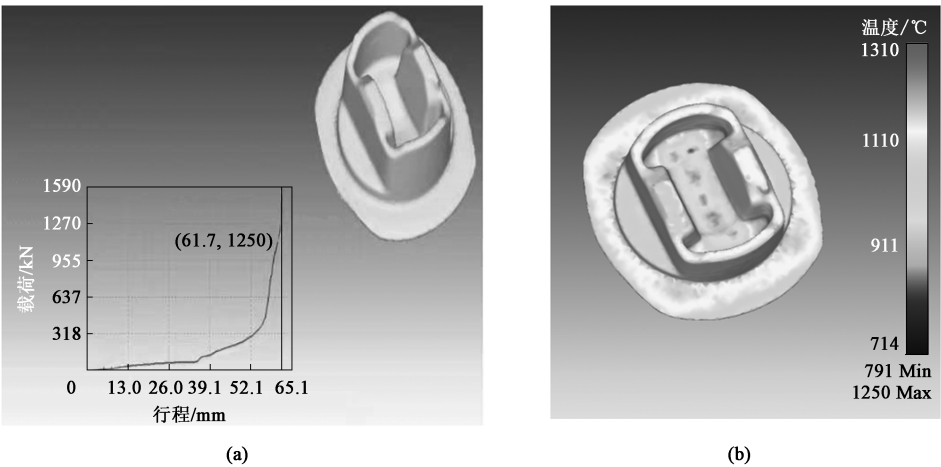


图 4 终锻的模拟打击力曲线 (a) 和终锻后的温度状态 (b)

Fig. 4 Simulated striking force curve of final forging (a) and temperature state after final forging (b)

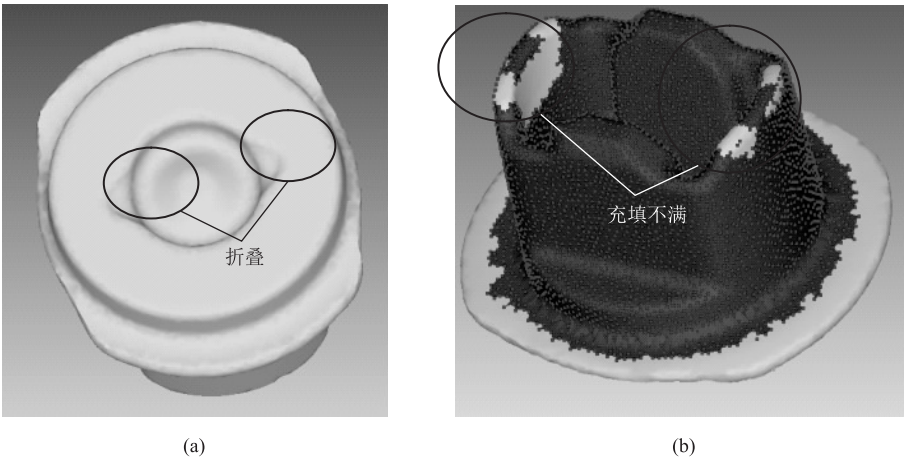


图 5 终锻塑性成形模拟过程的缺陷
(a) 折叠倾向 (b) 充满不满

Fig. 5 Defects in plastic forming simulation process of final forging
(a) Folding tendency (b) Insufficient filling

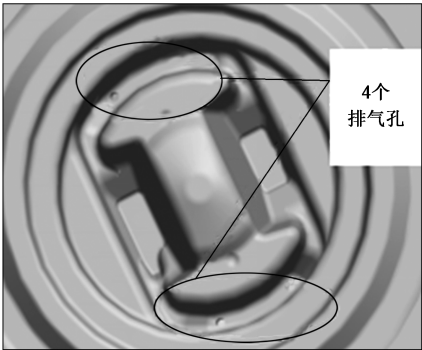


图 6 4 个排气孔位置
Fig. 6 Locations of four vents

缺口、回流从而形成折叠缺陷。通过在公差允许范围内将冲头的高度降低，同时增加冲头圆角半径，来降低此处形成折叠缺陷的倾向。

2. 2. 3 优化方案实施

(1) 模具优化设计

模具的加工周期长，为了提高模具的加工效率，采用镶块模组合的新工艺，只加工有模膛部分的镶块模，加工好后与基体模进行装配，加工周期明显提升，尤其在大批量生产时更能体现出镶块模的优势。

因锻件顶出部位的限制，顶杆直径受到局限，设计顶杆直径为 $\Phi 9.6\text{ mm}$ 。为防止材料流入顶出孔内，设计顶杆与孔的间隙为 0.2 mm ，但在每次顶出的过程中，因顶杆和顶出孔的间隙小，存在顶杆不能回位的可能，会导致在进行下次锻打时顶杆扎入锻件中。解决这一问题的关键是让顶杆顶出锻件后及时复位，因此，对工装进行优化改进，在下模增

加一套顶杆弹性复位装置, 如图 7b 中椭圆框所示^[16]。同时, 在毛边桥部增设阻尼墙, 如图 7b 中

方框所示, 减缓材料流向毛边的速度, 保证金属材料完全充满型腔后, 再使多余的材料流向毛边仓部。

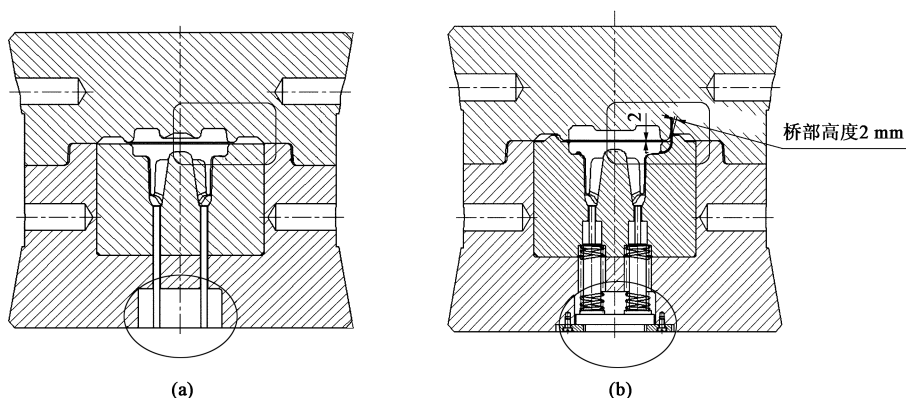


图7 工装优化设计前后对比图

(a) 工装优化设计前 (b) 工装优化设计后

Fig. 7 Comparison diagrams before and after optimization design of tooling

(a) Before optimization design of tooling (b) After optimization design of tooling

(2) 模具制造

采用 Pro-E 软件建立全部模具的三维实体模型, 生成加工程序, 完成计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing, CAM), 用菲迪亚 DI65 数控加工中心进行整体数控加工, 保证了模具的精度和一致性。

模具的型腔无法选用现有的加工刀具, 通过使用加长杆与直径为 $\Phi 6$ mm 的刀具进行对接, 满足了长度与直径的要求。

(3) 淬火介质选取

采用 PAG 淬火介质, 有效保证淬火硬度满足要求。

(4) 模具交付检测

为了保证在模具交付时检验的准确性, 设计了模具二维检测样板。

(5) 钢质活塞产品交付检测

FCDD 发动机钢质活塞产品的内腔结构复杂, 检测困难, 针对内腔的检测制作了通止规样板, 用于试制时快速验证内腔是否合格。

3 工艺流程确定

制定钢质活塞的工艺流程为: 下料—加热 (中频炉)—镦粗—打扁—预锻—终锻 (带有上、下顶出结构的螺旋压力机)—切边 (500~630 t 压力机)—调质处理—表面清理—探伤 (全部产品)—锻件终检。

4 再次模拟

模具优化后, 利用 DEFORM 软件再次进行终锻

过程模拟分析, 终锻的模拟打击力曲线及成形效果如图 8 所示。因在模具毛边桥部增加了阻尼墙, 终锻打击力由之前的 12500 kN 增大至 18800 kN, 锻件的充填率得到提升; 降低了钢质活塞裙头部冲头高度, 终锻产生的空腔平缓, 后续变形不会产生折叠缺陷。

5 生产试制

2020 年 6 月份完成了 100 件钢质活塞的锻造及热处理生产试制, 最终经过探伤和检验, 试制结果如下:

(1) 原材料的复验结果满足供需双方所签的技术协议要求。

(2) 通过对钢质活塞锻件进行检测, 锻件尺寸满足供需双方会签的图纸要求, 且表面质量良好, 锻件检测合格, 满足批量生产要求, 试制钢质活塞产品如 9 所示。

锻件在热处理后经中国兵器工业金属材料理化检测中心进行了检测, 各项力学性能检测指标符合供需双方所签的技术协议要求。

6 结语

目前, 金属塑性成形工艺及模具的设计不但要采用 CAD 技术, 而且还要采用 CAE 技术, DEFORM 软件极大地推动了 CAE 在锻造领域的发展, CAM 又使模具制造的精度和效率有了飞跃式的提高。

传统的金属成形方法是在正式生产前, 由设计人员凭借主观设计模具、设定成形工艺, 模具加工

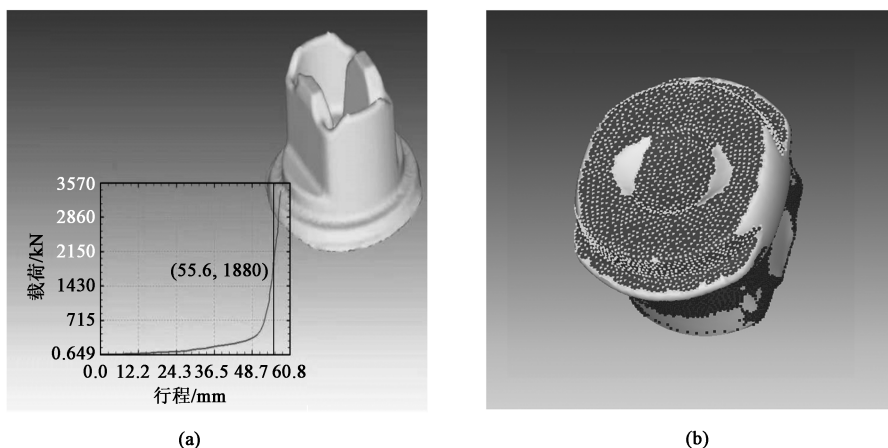


图 8 优化设计后终锻的模拟打击力曲线 (a) 及终锻成形效果 (b)

Fig. 8 Simulated striking force curve (a) and forming effect (b) of final forging after optimization design

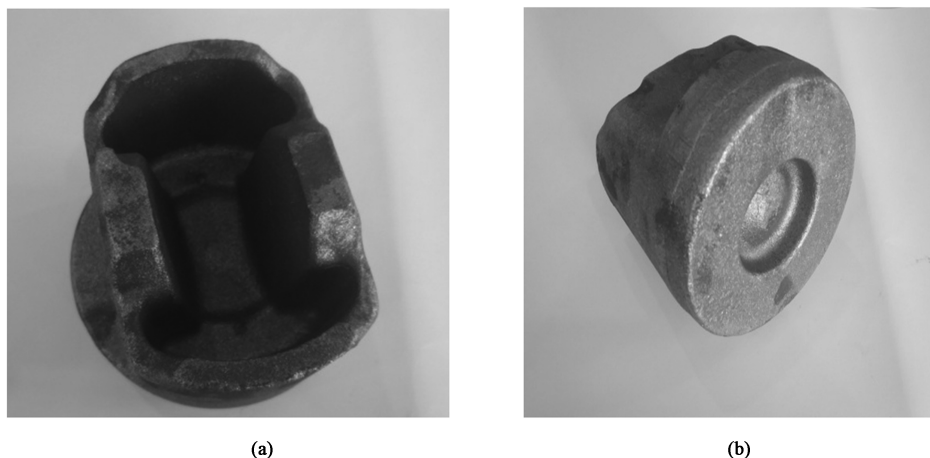


图 9 钢质活塞锻件实物

(a) 活塞顶部 (b) 活塞底部

Fig. 9 Material object of steel piston forgings

(a) Top of piston (b) Bottom of piston

成形后, 需要多次通过设备验证设计模具的正确性, 发现问题后不仅需要修改模具并重新制造模具, 而且还需要重新设计成形工艺、工艺参数, 这种试错的研发模式势必增加生产成本, 延长产品开发周期。采用 CAE 的 DEFORM 软件, 通过 DEFORM 软件模拟代替试模, 在模具制造前预测产品整个成形过程, 帮助研判潜在的问题, 有效地防止了问题发生, 提供了从产品设计到生产的完整解决方案, 大大地缩短了研发周期, 降低了研发及生产成本, 在金属成形领域发挥了越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 苑世剑, 刘伟, 王国峰, 等. 轻合金复杂薄壁构件流体压力成形技术新进展 [J]. 上海航天, 2019, 36 (2): 31-37.
Yuan S J, Liu W, Wang G F, et al. New development of fluid pressure forming technology for light alloy complex thin walled components [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36 (2): 31-37.
- [2] 王仲仁. 工程塑性理论及其在金属成形中的应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
Wang Z R. Engineering Plasticity Theory and Its Application in Metal Forming [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- [3] 张志文. 锻造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
Zhang Z W. Forging Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1985.
- [4] GB/T 3077—2015, 合金结构钢 [S].
GB/T 3077—2015, Alloy structural steels [S].
- [5] 中国机械工程学会塑性工程锻压学会. 锻压手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
China Society For Technology of Plasticity, CMES. Forging Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1993.
- [6] 贾俐俐. 挤压工艺与模具 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(下转第 106 页)