

基于计算机模拟的安全阀阀体多向模锻精密成形工艺

裴颖脱

(天津工业职业学院 工业技术系, 天津 300400)

摘要: 以安全阀阀体为研究对象, 根据其结构特征, 提出了多向模锻精密成形工艺方案。通过数值模拟技术, 分析了安全阀阀体的成形过程, 研究了不同凸模结构对安全阀阀体成形的影响。结果发现, 采用复合凸模结构时材料流动更合理, 而采用单一凸模结构容易出现材料折叠缺陷。而后, 基于复合凸模结构, 研究了左右复合凸模的不同加载速度比对多向模锻精密成形过程的影响, 并从安全阀阀体锻后的等效应变分布、温度分布、各凸模最大受力情况以及最小合模力等方面进行了对比分析。结果表明: 当左右复合凸模的加载速度比为 1.76 : 1 时, 安全阀阀体锻后的等效应变及温度分布更为均匀, 安全阀阀体成形效果更好, 同时各凸模最大受力及最小合模力也更小, 更益于延长模具的使用寿命。

关键词: 多向模锻精密成形; 安全阀阀体; 复合凸模; 加载速度比; 最小合模力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.003

中图分类号: TG315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0012-07

Multi-directional die forging precision forming process of safety valve body based on computer simulation

Pei Yingtuo

(Department of Industrial Technology, Tianjin Polytechnic College, Tianjin 300400, China)

Abstract: Taking the safety valve body as the research object, according to its structural characteristics, a multi-directional die forging precision forming process scheme was proposed. The forming process of the safety valve body was analyzed, and the influences of different punch structures on the forming of the safety valve body were studied by the numerical simulation technology. The results show that the compound punch structure makes the material flow more reasonable, while the single punch structure is prone to material folding defects. Then, based on the structure of compound punch, the influences of different loading speed ratios for left and right compound punches on the precision forming process of multi-directional die forging were studied, and the comparative analysis was carried out from the aspects of equivalent strain distribution, temperature distribution, maximum force condition of each punch and minimum clamping force for the safety valve body after forging. The results show that when the loading speed ratio of left and right compound punches is 1.76 : 1, the equivalent strain and temperature distributions of the safety valve body after forging are more uniform, the forming effect of the safety valve body is better, and the maximum force and the minimum clamping force of each punch are also smaller, which is more beneficial to prolong the service life of die.

Key words: multi-directional die forging precision forming; safety valve body; compound punch; loading speed ratio; minimum clamping force

安全阀是通过控制压力从而实现安全防护作用的一种液压元件, 在蒸汽锅炉、管道、压力器件等方面的应用较多^[1-2], 由于经常处于高温、高压或者伴有腐蚀性的恶劣环境中, 因此, 对安全阀阀体

的质量、性能要求比较严格, 传统的铸造工艺以及自由锻工艺已经无法满足要求。传统的铸造工艺虽然成本较低且不受零件外观形状的限制, 但铸件内部组织疏松、金属流线不连续, 通常存在缩孔、裂纹等微小缺陷, 影响铸件的使用性能^[3-5]; 自由锻工艺无法直接成形安全阀阀体, 锻后需要机加工内孔及复杂的外形轮廓, 致使锻件组织被切断, 金属流线不连续, 降低锻件的使用性能^[6-7], 同时成形效率不高。

多向模锻作为一种精密成形技术^[8-9], 集中了

收稿日期: 2021-07-11; 修订日期: 2021-10-12

基金项目: 天津市“十三五”高等职业教育教学改革研究项目 (2018-116); 天津市高等职业技术教育研究会 2019 年度课题 (2020-4040)

作者简介: 裴颖脱 (1982-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: pyt198207@163.com

普通模锻及挤压的优势, 在封闭型腔及三向压应力作用下, 能够一次成形复杂的安全阀阀体外形及安全阀阀体内腔, 且锻件金属流线均匀、连续性好、抗疲劳强度高, 为成形中空安全阀阀体零件的最理想工艺, 得到了普遍的应用。王波等^[10]通过合理控制水平及垂直冲头的锻造速度, 成功地利用多向模锻精密成形工艺生产出了合格的四通安全阀阀体。姜雪鹏等^[11]和孙国柱^[12]利用多向模锻精密成形工

艺成形了T形三通安全阀阀体。江荣忠等^[13]通过对模具的研究与改进, 完成了石油安全阀阀体的多向模锻生产。通过上述文献可知, 其研究对象高度对称、结构相对简单, 而本文研究的安全阀阀体如图1所示, 外观比较复杂, 仅横向对称, 因此, 锻造难度相对较大, 成形不确定性较大, 故采用数值模拟技术对安全阀阀体的成形过程进行研究与分析, 根据模拟结果指导模具设计及参数确定。

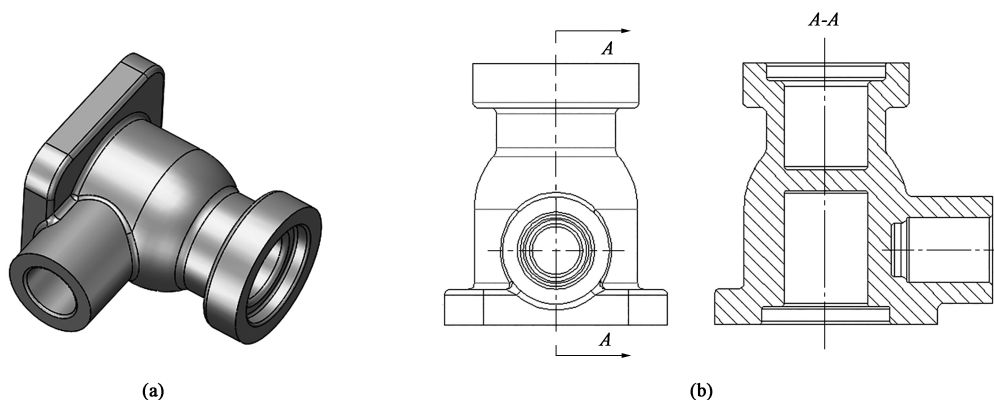


图1 安全阀阀体结构图

(a) 三维模型图 (b) 二维模型图

Fig. 1 Structure diagrams of safety valve body

(a) 3D model diagram (b) 2D model diagram

1 多向模锻结构设计

根据图1所示的安全阀阀体结构图可知, 为了方便锻前坯料放置以及确保锻后成形锻件的顺利取出, 采用水平分模; 其次, 安全阀阀体存在3个内孔, 因此采用3个凸模成形。基于以上分析, 设计了两种多向模锻结构(图2), 坯料沿安全阀阀体主通道型腔水平放置, 选用与主通道最小直径尺寸相等的柱状坯料, 能够避免坯料过长而造成弯曲失稳。具体成形流程为: 坯料下料→加热→置于预热后的模具中→上、下模合模→3个凸模按要求由外向内进行三向加载→成形。

单一凸模结构中(图2a), 优先预成形内孔, 3个凸模分别定义为左凸模、右凸模及后凸模, 其加载方式及行程-时间曲线如图3a所示, 整个模锻过程在6 s内结束。左凸模在0~6 s内以 $24.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度稳定加载, 直至147 mm后停止; 右凸模在0~3 s内以 $43 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度稳定加载至129 mm, 3 s后停止加载; 后凸模在0~2 s内未加载, 2 s后以 $17 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度稳定加载至成形结束。复合凸模

结构中(图2b), 优先预成形安全阀阀体外轮廓, 3个凸模分别定义为左复合凸模、右复合凸模以及后凸模, 左复合凸模由左1复合凸模(负责成形外轮廓)和左2复合凸模(负责成形内孔)组成, 右复合凸模由右1复合凸模(负责成形外轮廓)和右2复合凸模(负责成形内孔)组成, 其加载方式及行程-时间曲线如图3b所示, 整个模锻过程同样在6 s内结束。左复合凸模以 $24.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度稳定加载至69 mm后, 左1复合凸模停止加载, 而左2复合凸模继续稳定加载, 直至成形结束; 右复合凸模以 $43 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度稳定加载至69 mm后, 右1复合凸模停止加载, 而右2复合凸模继续稳定加载, 直至成形结束; 后凸模在0~2 s内未加载, 2 s后以 $17 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度稳定加载至成形结束。

2 数值模拟建模及仿真分析

2.1 建模及参数设置

将建模完成后的两组多向模锻装配结构导入Deform-3D软件中, 通过数值模拟技术对安全阀阀体的成形过程依次进行直观分析。考虑到多向模锻

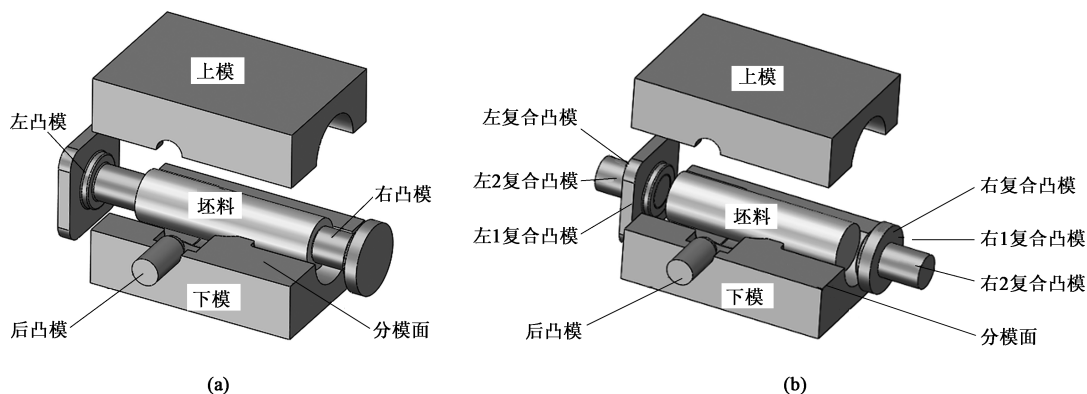


图 2 多向模锻结构图

(a) 单一凸模 (b) 复合凸模

Fig. 2 Structure diagrams of multi-directional die forging

(a) Single punch (b) Compound punch

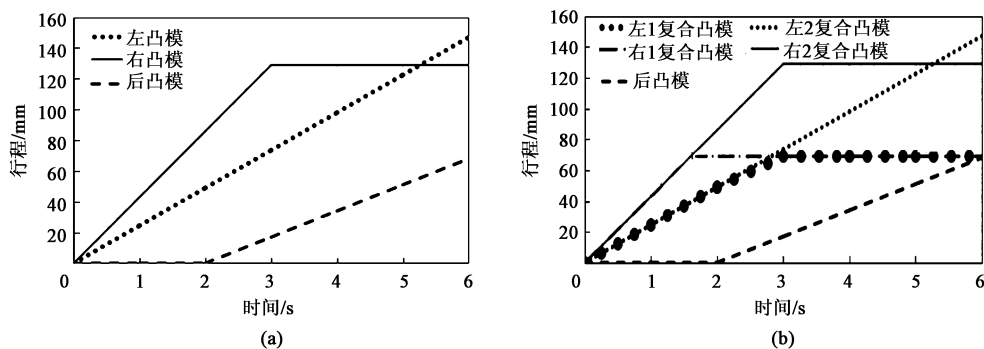


图 3 不同凸模结构的行程-时间曲线

(a) 单一凸模 (b) 复合凸模

Fig. 3 Curves of stroke-time with different punch structures

(a) Single punch (b) Compound punch

结构关于分模面完全对称,为了减小数值分析的计算量,可采用 1/2 的多向模锻结构作为分析对象。安全阀阀体材料在软件材料库中选择 AISI4120 合金钢,坯料按模拟需求定义为塑性体,坯料的始锻温度依照实际生产设置为 1180 °C,模具材料选择 H13 模具钢,定义为刚体,经预热后温度设置为 380 °C。热锻摩擦因数为 0.3,考虑到坯料与热锻模之间的接触传热,对坯料及刚性模具进行网格处理。将分模面所在平面定义为对称面,两组方案各凸模运动方式及加载时间分别按图 3a 和 3b 进行设置。

2.2 两种凸模结构下安全阀阀体成形过程对比

图 4 为单一凸模结构下安全阀阀体的成形过程变化图,根据安全阀阀体结构可知,左边材料较右边材料多,成形时需要使材料较多地偏向左边聚集,因此,右凸模的加载速度大于左凸模的加载速度。坯料在左、右凸模相向挤压下开始墩粗并开始成形

内孔,50 步时,沿右凸模逆向流动的材料与右凸模底部端面接触后受到阻碍,逐渐造成材料内凹,产生空穴,如图 4a 中圈 I 所示;102 步时,在两端凸模的继续挤压下,空穴被迫压合,随即形成图 4b 中圈 II 所示的材料折叠现象;224 步时,圈 II 中的折叠缺陷完全压合消失,但仍会影响安全阀阀体的强度,同时,沿左凸模逆向流动的材料与左凸模底部端面接触后受到阻碍,形成与圈 I 类似的空穴,如图 4c 中圈 III 所示,随后出现与圈 II 类似的折叠现象,如图 4d 中圈 IV 所示。出现这种现象的原因:模具结构设计不合理,致使材料在模腔内产生了对流的情况,从而产生折叠。

图 5 为复合凸模结构下安全阀阀体的成形过程变化图。坯料在左、右复合凸模相向挤压下开始墩粗并形成安全阀阀体外轮廓,由于右复合凸模的加载速度大于左复合凸模的加载速度,60 步时,安全

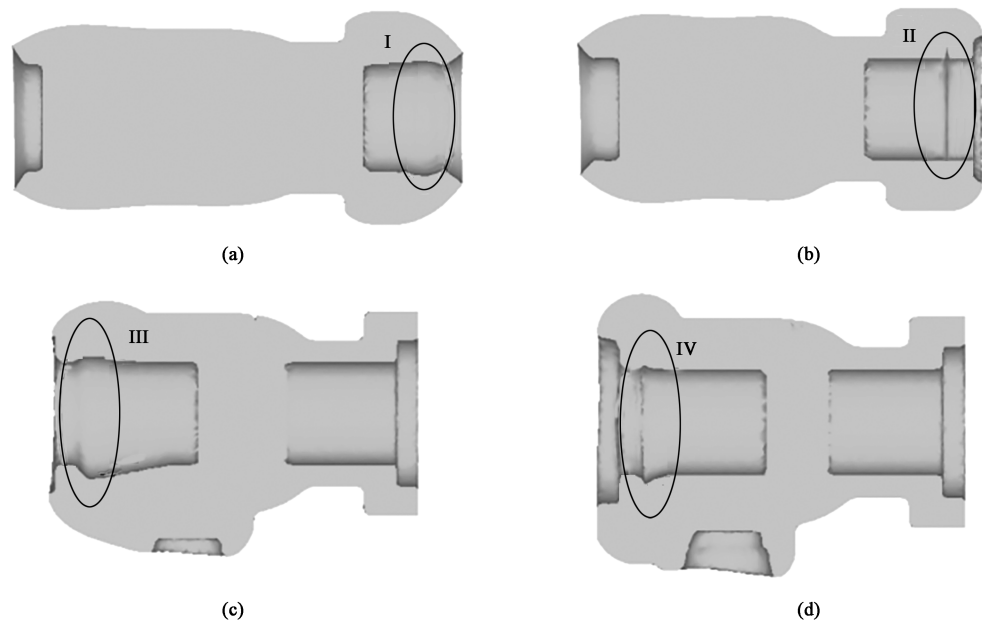


图 4 单一凸模结构下安全阀阀体的成形过程
(a) 50 步 (b) 102 步 (c) 224 步 (d) 292 步
Fig. 4 Forming process of safty valve body with single punch structure
(a) Step 50 (b) Step 102 (c) Step 224 (d) Step 292

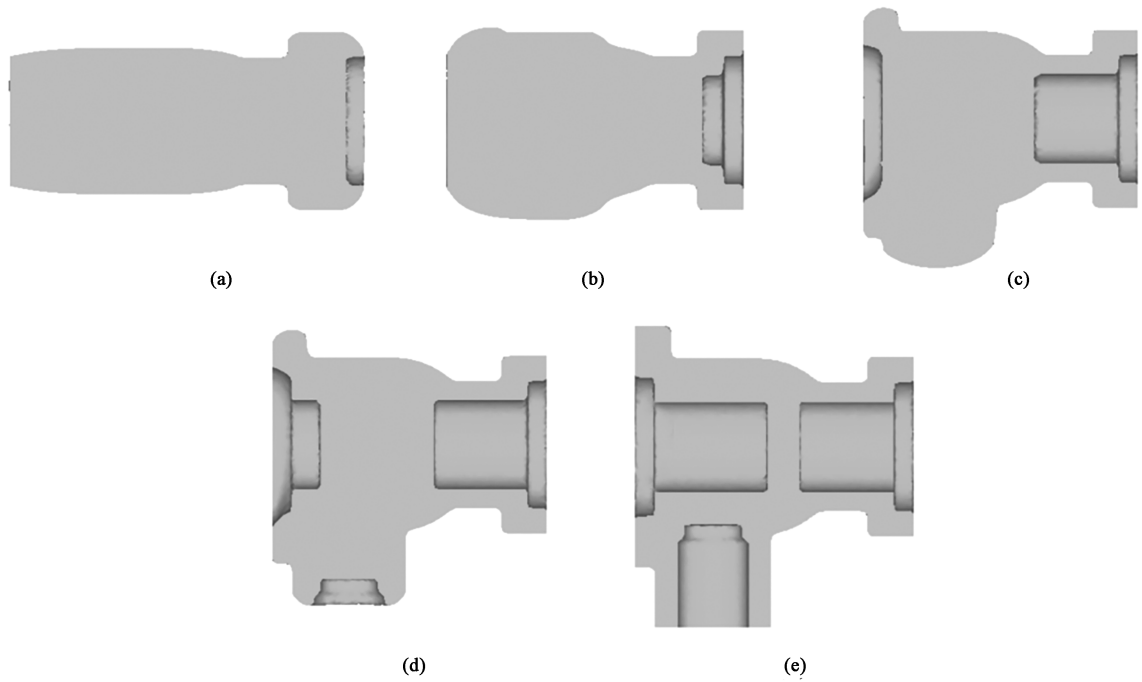


图 5 复合凸模结构下安全阀阀体的成形过程
(a) 60 步 (b) 118 步 (c) 186 步 (d) 238 步 (e) 362 步
Fig. 5 Forming process of safty valve body with compound punch structure
(a) Step 60 (b) Step 118 (c) Step 186 (d) Step 238 (e) Step 362

阀阀体右边圆形法兰基本成形完成；118 步时，右 1 复合凸模到达终点，右 2 复合凸模继续加载成形右端内孔；186 步时，右端内孔基本成形，同时左 1 复合凸模到达终点，左边方形法兰初步成形，左 2 复合凸模继续加载成形左端内孔；238 步时，后凸模开始加载成形后端内孔；362 步时，成形结束。

材料流动自始至终比较顺利, 成形流畅, 凸模动作合理, 有效地避免了材料出现对流, 因此, 未出现单一凸模结构下的空穴、折叠等缺陷, 同时由最终安全阀阀体成形件可知, 两端法兰填充充分, 3 个内孔成形完整, 整体成形质量较佳。

2.3 左右复合凸模不同加载速度比下安全阀阀体质量分析

多向模锻中, 各凸模加载速度的配合非常重要, 直接决定着成形过程中材料的流动状况以及各凸模的受载情况, 因此, 根据安全阀阀体的模锻工艺以及初步仿真结果, 确定采用 3 种不同的左右复合凸模加载速度比进行更深入的研究, 分别为 1.51 : 1、

1.76 : 1 以及 2.11 : 1 (左复合凸模加载速度不变)。

图 6 为不同左右复合凸模加载速度比下安全阀阀体锻件的等效应变分布图, 等效应变值越大表示材料质点流动越活跃。图 6 中安全阀阀体锻件右边的等效应变均大于左边, 其分布规律与左右复合凸模存在加载速度差相符; 同时, 不同左右复合凸模加载速度比的安全阀阀体锻件的最大等效应变值顺序为: 2.11 : 1 > 1.76 : 1 > 1.51 : 1, 也与加载速度比大小顺序相符。但从均匀性分布来说, 左右复合凸模的加载速度比为 1.76 : 1 时更均匀, 安全阀阀体锻件质量更好, 左右复合凸模的加载速度比为 2.11 : 1 时, 不均匀程度最大。

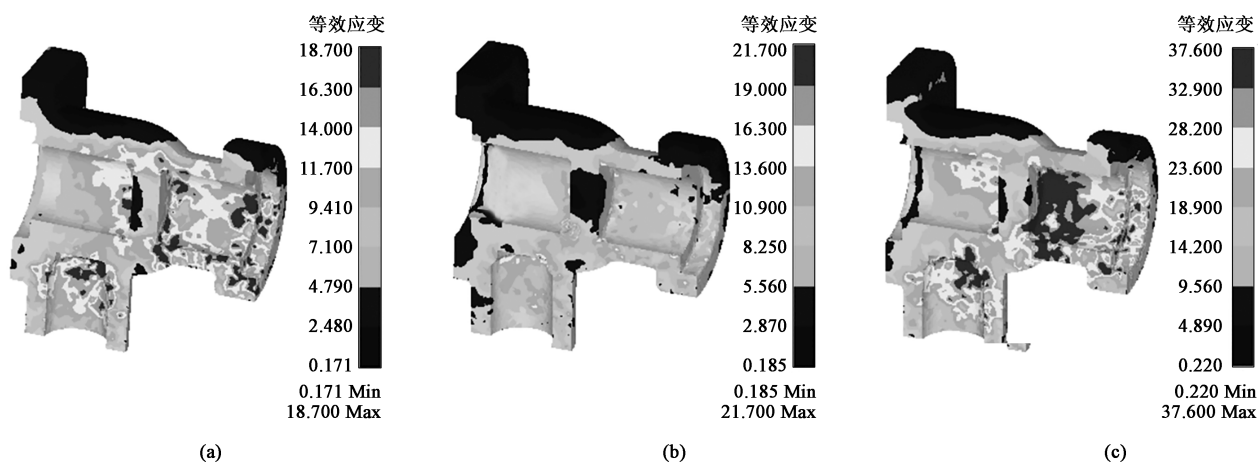


图 6 不同加载速度比下安全阀阀体锻件的等效应变分布图

(a) 1.51 : 1 (b) 1.76 : 1 (c) 2.11 : 1

Fig. 6 Distribution diagrams of equivalent strain for safety valve body forgings under different loading speed ratios

锻件冷却时, 由于表层温度与心部温度冷却速率不同会产生温度应力, 初期锻件表层受拉应力作用、心部受压应力作用, 而末期锻件表层受压应力作用、心部受拉应力作用, 从而可能导致出现裂纹, 因此, 对安全阀阀体锻后温度的观察极为重要。图 7 为不同左右复合凸模加载速度比下安全阀阀体的锻后温度分布图, 从图 7 可以直观地看出, 安全阀阀体锻后左边温度高于右边, 这是因为: 为了偏向左边聚料, 右复合凸模的加载速度大, 右边优先完成成形, 与腔体接触时间长, 热量流失更多。从分模面所处平面的温度分布来看, 由于锻件处于三向挤压状态, 锻件心部材料时刻发生剧烈变形, 因此, 锻件锻后温度由外围向中心呈不断上升趋势。通过数据分析可知: 加载速度比为 1.51 : 1 时, 安全阀阀体锻后最高温度为 1070 ℃, 最低温度为 531 ℃, 最大温差为 539 ℃; 加载速度比为 1.76 : 1 时, 安

全阀阀体锻后最高温度为 1080 ℃, 最低温度为 712 ℃, 最大温差为 368 ℃; 加载速度比为 2.11 : 1 时, 安全阀阀体锻后最高温度为 1100 ℃, 最低温度为 628 ℃, 最大温差为 472 ℃。因此, 对安全阀阀体整体而言, 加载速度比为 1.76 : 1 时, 全局温度分布更为均衡, 更有利于防止冷却裂纹的产生, 提高了安全阀阀体的质量。

表 1 为不同加载速度比下安全阀阀体成形时各凸模承受的最大载荷对比情况, 通过表 1 中各组数据可知, 当加载速度比为 1.76 : 1 时, 各凸模最大受力及最小合模力均小于另外两种加载速度比。各凸模受力越小, 表示安全阀阀体在成形时材料的流动越流畅, 受到的变形抗力和摩擦阻力越小, 有助于降低凸模断裂的风险, 同时也利于减缓磨损失效的进程。合模力是维持上、下模闭合的力, 是保证安全阀阀体质量的关键因素, 合模力太小则无法成

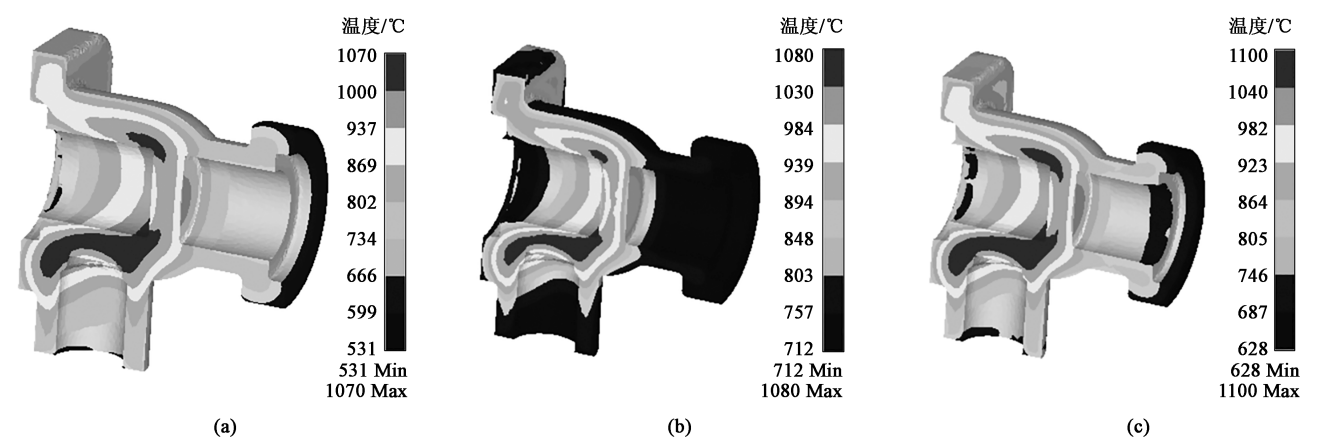


图 7 不同加载速比下安全阀阀体的锻后温度分布图
(a) 1.51 : 1 (b) 1.76 : 1 (c) 2.11 : 1

Fig. 7 Temperature distribution diagrams of safty valve body after forging under different loading speed ratios

表 1 不同加载速度比下各凸模的受载情况对比 (MN)

| Table 1 Comparison of loading conditions for various punches under different loading speed ratios (MN) | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|-------|-------|
| 加载速度比 | 左 1 复合凸模 | 左 2 复合凸模 | 右 1 复合凸模 | 右 2 复合凸模 | 后凸模 | 最小合模力 |
| 1.51 : 1 | 10.76 | 1.762 | 4.22 | 1.618 | 0.912 | 21.23 |
| 1.76 : 1 | 7.94 | 1.560 | 2.74 | 1.556 | 0.846 | 16.86 |
| 2.11 : 1 | 8.88 | 1.756 | 3.48 | 1.606 | 0.886 | 19.78 |

形模腔，致使材料流失，合模力太大则会加速模具开裂失效，因此，在能够确保安全阀阀体成形的前提下，合模力越小越好。根据表 1 中数据计算可知，加载速度比为 1.76 : 1 时，其最小合模力比加载速度比为 1.51 : 1 时的小 20.6%，比加载速度比为 2.11 : 1 时的小 14.8%，同等情况下，凸模完成锻造次数更多。

3 安全阀阀体锻造试验

根据上述分析通过多向模锻液压机展开了安全阀阀体锻造试验，试验材料为 AISI4120 合金钢，下料直径为 $\Phi 80$ mm，长度为 292 mm，采用复合凸模结构进行设计。依次经坯料加热→模具预热→入坯→合模形成模腔→调整各凸模加载方向及速度→锻造→模具卸压→取件等步骤，试验结果如图 8 所示。安全阀阀体两端法兰填充充分，3 个内孔成形完整，与上述模拟分析结果一致，且安全阀阀体表面及过渡区域平滑、无折叠，截面金属流线连续完整，锻件尺寸符合设计需求，证明了该多向模锻工

艺方案的可行性。

4 结论

- (1) 采用数值模拟技术对安全阀阀体的多向模锻精密成形工艺进行了研究，比较了单一凸模结构和复合凸模结构对材料流动的影响，结果显示，采用复合凸模结构时材料流动更合理，而采用单一凸模结构时容易出现材料折叠缺陷。
- (2) 采用复合凸模结构的基础上，研究了左右复合凸模不同加载速度比对模锻成形过程的影响，结果表明：当左右复合凸模加载速度比为 1.76 : 1 时，安全阀阀体锻后等效应变及温度分布更为均匀，安全阀阀体成形效果更好，同时各凸模受力及最小合模力也更小。
- (3) 通过实际安全阀阀体锻造试验对模拟结果进行了验证，获得的安全阀阀体成形充分、流线完整无缺陷，证明了多向模锻精密成形工艺的可靠性和有效性，为多向模锻精密成形工艺的研究提供了一种新的设计思路。



图 8 安全阀阀体锻件试验结果

(a) 外观图 (b) 剖面图

Fig. 8 Test results of safety valve body forgings

(a) Appearance drawing (b) Section drawing

参考文献:

- [1] 翟启超, 刘殿坤, 段森森, 等. 液体安全阀排量性能研究及其工程应用 [J]. 流体机械, 2017, 45 (9): 11-15.
Zhai Q C, Liu D K, Duan M M, et al. The pressure relief valve discharge capacity research and engineering application [J]. Fluid Machinery, 2017, 45 (9): 11-15.
- [2] 林建东, 乔光谱. 安全阀 RBI 结果在石化行业的应用与经济性分析 [J]. 压力容器, 2020, 37 (9): 68-72.
Lin J D, Qiao G P. Application of RBI assessment and economic analysis of relief valve in petrochemical industry [J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37 (9): 68-72.
- [3] 张殿杰, 刘建芳, 聂奎胜, 等. 薄壁轮辐铝合金轮毂低压铸造工艺仿真及试验 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (7): 753-758.
Zhang D J, Liu J F, Nie K S, et al. Simulation and test of die casting process for aluminum alloy wheel hub with thin-walled spoke [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40 (7): 753-758.
- [4] 韩志强, 赵忠兴. 气动元件阀体低压铸造充型过程的数值模拟 [J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38 (6): 39-42, 46.
Han Z Q, Zhao Z X. Numerical simulation of low pressure casting for pneumatic valve body [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2019, 38 (6): 39-42, 46.
- [5] 宁兆生, 包有宇, 郑松翔, 等. 复杂钛合金阀体的铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (12): 1110-1114.
Ning Z S, Bao Y Y, Zheng S X, et al. Study on casting process of complex titanium alloy valve body [J]. Foundry, 2018, 67 (12): 1110-1114.
- [6] 顾文俊, 李俊杰, 赵坤民. 空排止回阀阀体多向模锻工艺分析 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (11): 81-85.
Gu W J, Li J J, Zhao K M. Analysis of multi-directional die forging process for valve body of air vent check valve [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (11): 81-85.
- [7] 罗剑. 一种阀座的胎模锻成形工艺 [J]. 机械工程与自动化, 2013, (6): 99-100.
Luo J. An air-hammer forging process of a valve seat [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013, (6): 99-100.
- [8] 刘光辉, 刘华, 王涛, 等. 仪表阀体多向可控精密成形工艺 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (3): 8-13.
Liu G H, Liu H, Wang T, et al. Multi-directional controllable precision forming for instrument valve body [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (3): 8-13.
- [9] 刘航, 李伟, 张镜斌. 7075 铝合金三通阀多向加载成形过程模拟 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (9): 101-104.
Liu H, Li W, Zhang J B. Simulation of multi-directional loading forming process of 7075 aluminum alloy tee valve [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (9): 101-104.
- [10] 王波, 张加正. 四通阀体热锻成形 CAE 分析及工艺优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 7-11.
Wang B, Zhang J Z. CAE analysis and process optimization on hot forging for four-way valve body [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 7-11.
- [11] 姜雪鹏, 潘晴, 李毅波, 等. T 型三通多向模锻过程变形力预测方法 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (5): 113-125.
Jiang X P, Pan Q, Li Y B, et al. Deformation force prediction method of tee valve in multi-directional die forging process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (5): 113-125.
- [12] 孙国柱. 基于有限元法的三通管接头多向模锻成形仿真与优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 28-33.
Sun G Z. Simulation and optimization on multi-directional die forging for tee pipe joint based on finite element method [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 28-33.
- [13] 江荣忠, 王志录, 张元东, 等. 石油阀体锻造工艺与模具设计 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (9): 128-130, 134.
Jiang R Z, Wang Z L, Zhang Y D, et al. Forging process and die design of petroleum valve bodies [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (9): 128-130, 134.