

三通阀体多向模锻工艺研究及有限元分析

王 耀¹, 顾小燕²

(1. 山西机电职业技术学院 材料工程系, 山西 长治 046000; 2. 江苏科技大学 材料与工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对 40Cr 合金钢阀体生产效率低、材料利用率低、性能差、寿命短等问题, 提出了采用多向模锻工艺来成形阀体。首先, 根据阀体结构特征设计了 3 种成形工艺方案, 并分析了各方案冲头的加载方式; 其次, 通过 CAE 分析软件 Deform-3D 完成了各方案的有限元建模, 并进行了数值仿真, 分析比较了各方案的锻件成形过程、锻件成形质量、锻件温度分布、成形载荷等。结果表明: 采用方案 3 的锻件成形过程更为合理, 温度分布更为均匀, 载荷较小, 锻件质量更好。最后, 以方案 3 为参考, 进行了多向模锻工艺试验, 获得了质量较好的阀体锻件。经检验, 与仿真结果的一致性较高, 表明有限元技术可对实际模锻工艺提供一定的理论指导, 提高设计效率。

关键词: 合金钢阀体; 多向模锻; 温度分布; 成形载荷; CAE 分析

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.004

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 03-0028-06

Study on multi-directional die forging technology for tee valve body and finite element analysis

Wang Yao¹, Gu Xiaoyan²

(1. Department of Material Engineering, Shanxi Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Changzhi 046000, China;

2. School of Materials and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: For the problems of low production efficiency, low material utilization, poor performance and short service life of 40Cr alloy steel valve body, a multi-directional die forging process was proposed to form the valve body. Firstly, three forming process schemes were designed according to the structural characteristics of the valve body, and the loading modes of punch for each scheme were analyzed. Secondly, the finite element model of each scheme was completed by CAE analysis software Deform-3D, and the numerical simulation was carried out. Furthermore, the forging process, forging quality, forging temperature distribution and forming load of each scheme were analyzed and compared. The results show that the forging process of scheme 3 is more reasonable, the temperature distribution is more uniform, the load is smaller, and the forging quality is better. Finally, taking scheme 3 as a reference, the multi-directional die forging process test was carried out, and the valve body forgings with good quality were obtained. After inspection, the consistency with the simulation results is high, which shows that the finite element technology can provide some theoretical guidance for the actual die forging process and improve the design efficiency.

Key words: alloy steel valve body; multi-directional die forging; temperature distribution; forming load; CAE analysis

三通阀体常用于高温、高压环境中的管道连接, 因此, 其对抗压、抗腐蚀性能等的要求较高^[1], 而阀体结构复杂, 成形困难, 传统的生产方式主要有铸造、焊接、开式模锻等, 但是都存在一些问题, 例如: 工序复杂、生产效率低、材料利用率低、产品机械性能差、废品率高等^[2-4]。国外对于阀体零件的生产多采用多向模锻工艺, 涵盖了钢、钛合金、

高温合金等材料, 生产的零件性能好、精度高; 而国内虽然对多向模锻工艺也有研究, 但应用较少。因此, 为提高生产效率、提升阀体力学性能, 提出采用多向模锻工艺成形阀体, 锻后零件具有组织致密均匀、流线好、成形精度高等优点^[5]。而多向模锻工艺的影响因素众多, 不同模具结构、不同模具加载方式、不同加载速度等均能影响最终锻件的成形质量^[6-7], 因此, 本文依据三通阀体的结构特征及多向模锻工艺, 设计了 3 种成形方案, 并应用有限元软件 Deform-3D 对 3 种方案的模锻成形过程分别进行了建模仿真, 分析并确定了各方案冲头的加

收稿日期: 2021-02-23; 修订日期: 2021-05-15

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20140509)

作者简介: 王 耀 (1984-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: wangyao841025@163.com

载方式,对比分析了各方案下锻件成形过程、锻件成形质量、锻件温度分布、成形载荷等,最终确定了最佳成形方案,并通过实际模锻试验获得了符合要求的阀体锻件,验证了方案的可行性。

1 锻件结构分析及模锻工艺设计

1.1 锻件结构分析

三通阀体的锻件模型图及零件图如图1所示,材

料为40Cr合金钢,其强度高、塑性好,阀体左右对称,横向由柱体和两个大法兰组成,两端各有一个直径为 $\Phi 110\text{ mm}$ 的盲孔,纵向伸出一柱体结构及小法兰,并带有直径为 $\Phi 150\text{ mm}$ 的盲孔,整体结构较为复杂。通过分析可知,该零件成形两端大法兰困难,易出现填充不满现象,采用柱形坯料水平放置,通过封闭多向卧式模锻成形最为合适。多向模锻主要成形过程为:坯料加热、模具预热→放入坯料→合模→横向及纵向冲头施压→冲头卸压退出→分模→锻件脱模取出。

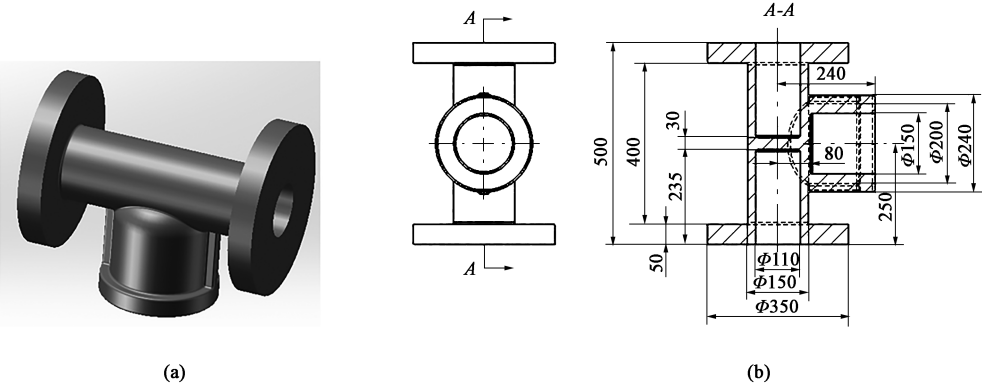


图1 三通阀体锻件图
(a) 模型图 (b) 零件图
Fig. 1 Drawings of tee valve body forgings
(a) Model drawing (b) Part drawing

1.2 多向模锻成形工艺设计

本文根据不同的模具结构,设计了3种模锻成形工艺方案,各方案的模具结构如图2所示,其中各冲头的动作顺序及施压速度是影响锻件成形的关键^[8],如纵向冲头速度过慢而横向冲头速度过快会造成材料快速进入纵向冲头孔道,引起材料流失,影响锻件质量。方案1和方案2中的横向冲头与纵向冲头同时加载,盲孔及法兰同时成形,方案1存

在锻粗失稳的风险,而方案2由于凹模型腔的约束作用,更利于大法兰的成形,但横向冲头与坯料的接触面积较小,在成形大法兰时需要的成形力较大。方案3中的横向冲头3和横向冲头4的头部齐平后同时加载,进行预锻,到达指定位置后,纵向冲头开始加载,横向冲头3达到最终位置后停止加载,横向冲头4及纵向冲头继续加载成形盲孔,直至锻件成形。

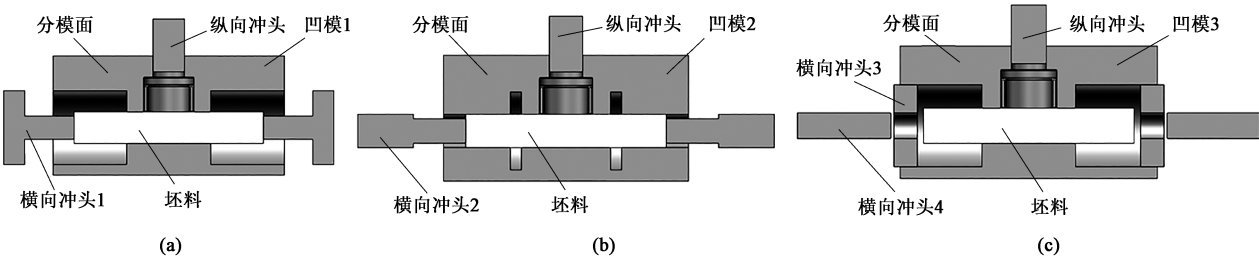


图2 锻造模具结构图
(a) 方案1 (b) 方案2 (c) 方案3
Fig. 2 Structure drawings of forging die
(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3

为获得最佳的工艺方案,利用塑性成形软件Deform-3D对各方案阀体的成形过程进行数值分析。

将各方案装配模型导入Deform-3D中,模式选择热力耦合分析^[9],坯料材质选择材料库中与40Cr合金

钢性能相同的 AISI-5140 材料, 并将其设置为塑性体, 冲头及凹模设置为刚体, 各冲头设置对应的加载速度及运动方向, 分别对坯料、冲头、凹模等进行网格划分, 以便模拟中考虑到接触传热因素, 传热系数设置为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。为提高模拟精度、节省模拟时间, 根据阀体的对称性, 采用 1/2 模型进行仿真^[10], 并设置对称边界条件, 热模锻的摩擦因数设置为 0.3^[11], 依据实际情况设置柱形坯料的加热温度为 1100°C , 模具的预热温度为 280°C 。以方案 1 为例, 最终建立的有限元模型如图 3 所示。

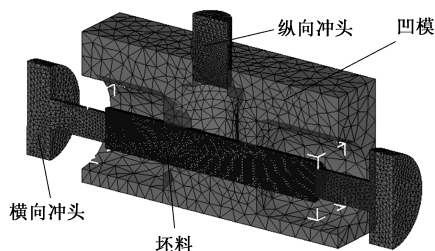


图 3 方案 1 的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of scheme 1

2 仿真结果分析

2.1 各方案成形过程分析

方案 1 的阀体锻件的成形过程如图 4 所示。成形初期, 柱形坯料受横向冲头的作用, 坯料被镦粗的同时, 部分材料沿着冲头反向流动, 坯料未出现镦粗失稳现象; 但是, 锻件在成形中期由于受到横向冲头后部大端面的挤压作用, 材料流动受阻后逐渐形成如图 4b 所示的空腔缺陷, 并随着挤压的进行及受到凹模型腔的限制, 成形到后期空腔被压紧, 出现材料折叠现象, 两端大法兰成形及盲孔成形, 同时在纵向冲头的挤压作用下, 纵向盲孔成形。最终获得的锻件如图 4d 所示, 法兰成形完整, 锻件质量看似良好, 但法兰内部存在材料折叠现象, 易出现疲劳失效, 寿命短。

方案 2 的阀体锻件的成形过程如图 5 所示。冲头加载方式与方案 1 类似, 初期在横向冲头的作用下, 水平盲孔开始成形, 并且部分材料流入法兰型

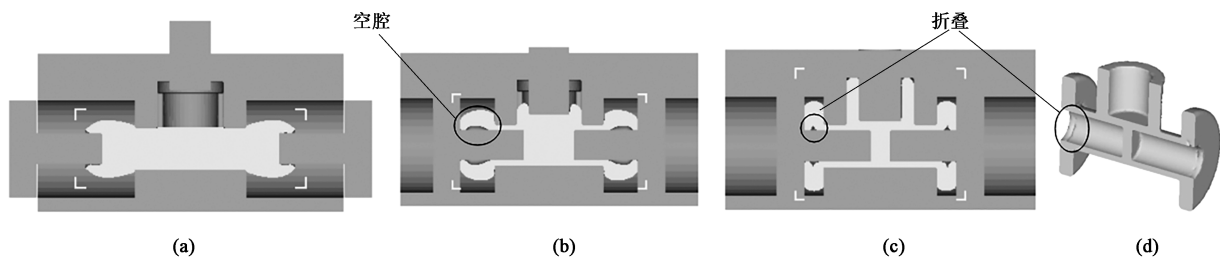


图 4 方案 1 的阀体锻件成形过程

(a) 初期 (b) 中期 (c) 后期 (d) 最终锻件

Fig. 4 Forming process of valve body forgings for scheme 1

(a) Early stage (b) Middle stage (c) Later stage (d) Final forgings

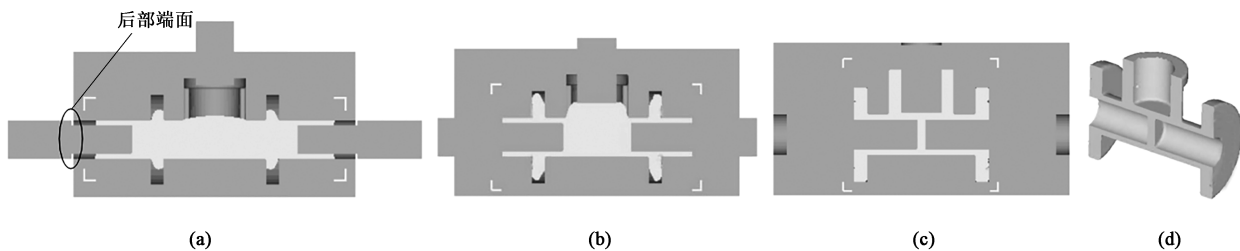


图 5 方案 2 的阀体锻件成形过程

(a) 初期 (b) 中期 (c) 后期 (d) 最终锻件

Fig. 5 Forming process of valve body forgings for scheme 2

(a) Early stage (b) Middle stage (c) Later stage (d) Final forgings

腔; 与方案 1 不同的是, 流动的材料受到横向冲头后部端面挤压后, 由于受到凹模型腔的限制, 成形中期不会出现方案 1 中的空腔缺陷, 如图 5b 所示; 在横向冲头及纵向冲头的共同作用及凹模型腔的约

束下, 两端大法兰、水平盲孔及纵向盲孔成形, 如图 5c 所示。最终获得的锻件如图 5d 所示, 法兰成形完整, 锻件表面质量良好, 内部无缺陷。

方案 3 的阀体锻件的成形过程如图 6 所示, 其

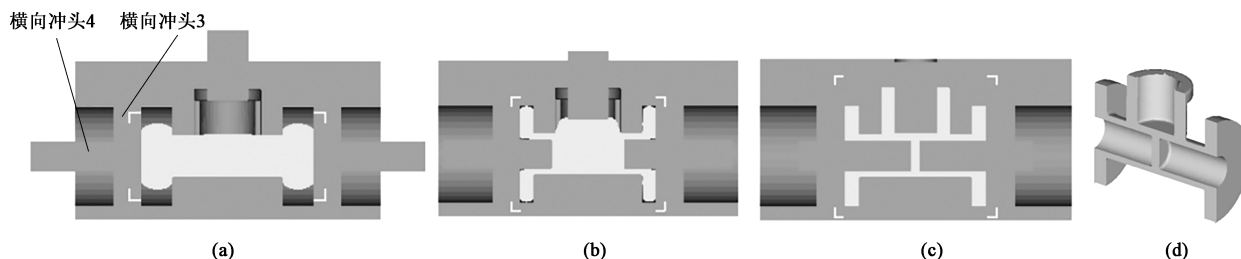


图6 方案3的阀体锻件成形过程

(a) 初期 (b) 中期 (c) 后期 (d) 最终锻件

Fig. 6 Forming process of valve body forgings for scheme 3

(a) Early stage (b) Middle stage (c) Later stage (d) Final forgings

冲头结构及加载方式与方案1、方案2不同, 横向冲头采用双冲头结构。成形初期, 横向冲头3及横向冲头4等速加载, 坯料预锻开始成形两端大法兰, 如图6a所示; 成形中期, 横向冲头3达到最终位置后停止加载, 横向冲头4及纵向冲头继续加载, 开始成形水平及纵向盲孔, 同时两端大法兰进一步成形, 整个成形过程中材料流动合理。最终获得的锻件如图6d所示, 法兰成形完整, 锻件表面质量好, 内部无缺陷。与方案2相比, 方案3模具结构的设计以及冲头加载方式的设置较为复杂, 但是能更好地掌握法兰及盲孔的成形质量。

2.2 锻件温度分布及成形载荷比较

热锻过程中, 由于坯料外表面率先与模具接触, 热传递最多, 同时由于受到冲头的挤压, 坯料心部

变形严重, 会产生大量热量, 因此, 锻后阀体的温度分布会出现表面温度较低而心部温度较高的现象^[12]。而锻件内、外温差越大, 冷却后锻造应力越大, 易出现裂纹, 影响锻件质量。图7为方案2和方案3的阀体锻件温度分布图, 通过点追踪可知, 方案2中 $P_1 \sim P_4$ 各点的温度依次为581、788、866和1020℃, 方案3中 P_{11} 、 P_{22} 、 P_{33} 、 P_{44} 各点的温度依次为754、798、889和1013℃, 均符合由外至内逐渐递增的规律。方案2的锻件内外温差约为439℃, 方案3的锻件内外温差约为259℃, 方案3的温差明显更小, 更有利于提高锻件质量。同时, 由图7可知, 方案2和方案3的锻件最高、最低温度的温差分别为553和319℃, 方案3中锻件的整体温度分布更为均匀。

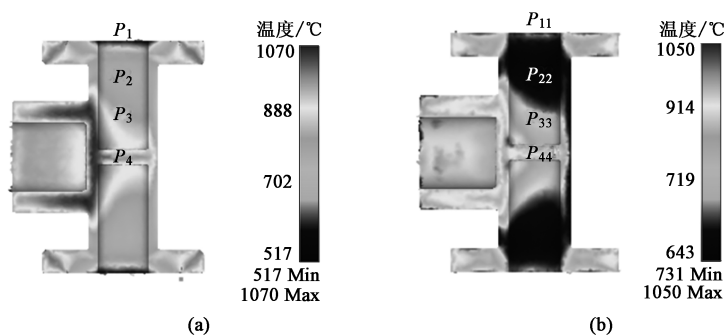


图7 阀体锻件温度分布图

(a) 方案2 (b) 方案3

Fig. 7 Distribution diagrams of temperatures for valve body forgings

(a) Scheme 2 (b) Scheme 3

多向模锻工艺中, 成形力和合模力大小是判断工艺好坏的因素之一, 载荷越小, 对锻压机的要求就越低; 其次, 模具受载越小, 一定程度上意味着模具的使用寿命越长。表1为方案2和方案3中各冲头、凹模的最大受载情况。由表1可知: 成形两端法兰所需的成形力较大, 横向冲头受载明显高于

纵向冲头; 方案2中由于横向冲头与坯料的接触面积较小, 在成形法兰时需要的成形力较大, 而采用方案3时横向冲头得到降载, 双冲头载荷较小, 与上述工艺分析一致; 方案2的凹模最大受载, 即最大合模力为 98.27×10^6 N, 而方案3仅为 87.56×10^6 N, 对设备要求更低。综合上述分析可知, 采用方案3成

形阀体锻件，锻后零件的温度分布更为均匀，质量更好，且所需成形载荷更小，方案 3 各模具受载变化曲线如图 8 所示。

表 1 模具最大受载情况 ($\times 10^6$ N)
Table 1 Maximum loads of dies ($\times 10^6$ N)

方案	模具		
	横向冲头	纵向冲头	凹模
2	65.25	15.62	98.27
3	冲头 3: 42.27	15.36	87.56
	冲头 4: 11.22		

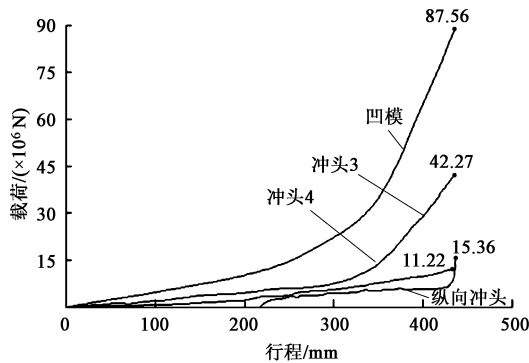


图 8 方案 3 各模具受载变化曲线

Fig. 8 Changing curves of loads for each die by scheme 3

3 多向模锻试验

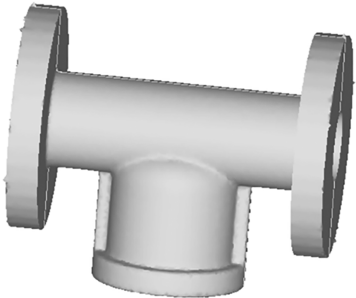
采用方案 3，并选用 $\Phi 150$ mm 的柱形坯料，通过卧式锻压机进行模锻试验。锻压前，将坯料加热至 1100 $^{\circ}\text{C}$ ，将模具预热至 280 $^{\circ}\text{C}$ 。锻压时，双冲头加载方式如下：在横向冲头 3 与横向冲头 4 接触坯料并加载 200 mm 后，纵向冲头开始加载，横向冲头 3 停止加载；横向冲头 4 继续加载 235 mm 后停止，纵向冲头加载 185 mm 后停止。最终获得的三通阀体锻件如图 9a 所示，与模拟件的一致性较高；如图 9b 所示，横向两端大法兰成形饱满，纵向伸出柱体结构及小法兰结构完整，无明显缺陷，经检验符合质量要求，表明该多向模锻工艺可以有效地替换铸造成形及开式模锻工艺。

4 结论

(1) 应用 Deform-3D 有限元软件，研究了三通阀体锻件的 3 种模锻成形工艺方案，结果表明：采用方案 1 会产生折叠缺陷，影响锻件的寿命；采用



(a)



(b)

图 9 三通阀体锻件

(a) 锻件实物 (b) 模拟件

Fig. 9 Forgings of tee valve body

(a) Physical forgings (b) Simulated part

方案 2 和方案 3 能够获得质量良好的阀体锻件，可以为实际模锻工艺试验提供很好的理论参考。

(2) 方案 3 与方案 2 相比，模具结构及双冲头加载方式在设计上更为复杂，但成形过程中材料流动更为合理，锻件温度分布更为均匀，成形载荷也相对较小，因此，对于阀体锻件的质量更容易把控。

(3) 实际试模时的工艺为：坯料加热温度为 1100 $^{\circ}\text{C}$ ，模具预热温度为 280 $^{\circ}\text{C}$ 。冲头加载方式为：在横向冲头 3 与横向冲头 4 接触坯料并加载 200 mm 后，纵向冲头开始加载，横向冲头 3 停止加载；横向冲头 4 继续加载 235 mm 后停止，纵向冲头加载 185 mm 后停止，锻件成形。

参考文献：

[1] 刘东帅. 冲头速率对多向模锻液压阀体质量的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (9): 92-94, 102.
Liu D S. Effect of punch rate on quality of hydraulic valve body formed by multi-direction die forging [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (9): 92-94, 102.

[2] 任运来, 李明权, 任杰, 等. 高温高压阀体的多向模锻技术研究 [J]. 重型机械, 2015, (5): 1-5.
Ren Y L, Li M Q, Ren J, et al. Study on multi-ram forging technology of high temperature high pressure valve body [J]. Heavy

Machinery, 2015, (5): 1-5.

[3] 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.

[4] 郑彬彬, 董传勇, 薛克敏, 等. 三通阀体多向模锻工艺研究 [J]. 精密成形工程, 2010, 2 (5): 61-63.
Zheng B B, Dong C Y, Xue K M, et al. Study on multi-ram forging process of triple-valve body [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2 (5): 61-63.

[5] 胡洋. 汽车转向节多向模锻精密成形数值模拟研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2013.
Hu Y. Multi-directional Forging Forming Steering Knuckle Which is Studied by Simulation [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2013.

[6] 张卫卫. 模具加载方式对齿轮轴温锻成形性能的影响分析 [J]. 煤矿机械, 2019, 40 (1): 138-140.
Zhang W W. Analysis of influence of mold loading method on warm forging performance of gear shaft [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40 (1): 138-140.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 胡建军. 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. DEFORM-3D Plastic Forming CAE Application Course [M]. Peking: Peking University Press, 2011.

[10] 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.

[11] 马世登, 奚建清. 基于 Deform 的齿轮支架锻造成形仿真分析 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (7): 148-149, 152.
Ma S D, Xi J Q. Simulation analysis for forging forming of gear bracket based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (7): 148-149, 152.

[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 of multi-direction die forging for tee pipe joint based on finite element method [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 28-33.

3 项锻压领域国家标准外文版获批发布

为贯彻、落实《标准联通“一带一路”行动计划》精神，推动我国的锻压产品和技术“走出去”，全国锻压标准化技术委员会（以下简称“锻压标委会”）积极开展推荐性国家标准外文版的翻译工作，并于 2016 年锻压标委会年会上专题讨论此项工作。经与会委员讨论决定，于 2016 年启动国家标准外文版项目申请工作。

根据国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会于 2021 年 12 月 31 日发布的“2021 年第 18 号”公告，3 项由锻压标委会组织翻译的国家标准外文版发布实施，见表 1。

表 1 3 项锻压领域国家标准外文版发布信息

序号	标准中文名称（标准英文名称）	标准编号	翻译承担单位
1	钢质楔横轧件 工艺编制原则 (Steel cross wedge rollings —Technological design principle)	GB/T 33878-2017 (EN)	河北东安精工股份有限公司、北京科技大学、北京机电研究所有限公司、湖北三环锻造有限公司、东风锻造有限公司
2	钢质精密热模锻件 通用技术条件 (General specification for steel precision hot die forgings)	GB/T 29532-2013 (EN)	江苏太平洋精锻科技股份有限公司、江苏森威精锻有限公司、北京机电研究所有限公司
3	GH141 合金锻件 通用技术条件 (GH141 alloy forgings—General specification)	GB/T 32246-2015 (EN)	贵州安大航空锻造有限责任公司、北京机电研究所有限公司

对于已发布的国家标准外文版，希望锻压行业内相关进出口业务较多的企业或相关检测机构能够积极推广、使用，助推我国标准“走出去”，提高我国标准的国际化水平，从而带动我国产品、技术、装备、服务“走出去”。

全国锻压标准化技术委员会秘书处