

基于有限元分析的汽车用大法兰螺母冷镦成形技术

田亚丁¹, 刘德波²

(1. 新乡职业技术学院 智能制造学院, 河南 新乡 453006; 2. 黄河科技学院 工学部, 河南 郑州 450006)

摘要:以车用大法兰螺母为研究对象,通过结构分析,提出两种冷镦成形工艺方案。首先,研究了40CrNiMoA钢在室温条件下的变形特性,以建立其准确的材料模型;其次,采用Deform-3D软件对两种方案的前4个工位分别进行有限元建模和成形模拟,并对比了模具的填充、材料的变形、等效应力的分布以及各工位的成形载荷情况,确定了更加可行的冷镦成形方案;最后,根据该可行方案对各工位的模具结构进行设计与制造,并装入6工位冷镦机中进行试模。结果显示:该冷镦成形工艺稳定,生产速度快,并且制造的大法兰螺母外形完整、质量好,无折叠和开裂等严重缺陷,使用性能满足厂家的需求。

关键词:大法兰螺母;冷镦成形;模具填充;等效应力;成形载荷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.005

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 10-0031-08

Cold heading technology on automotive large flange nut based on finite element analysis

Tian Yading¹, Liu Debo²

(1. Institute of Intelligent Manufacturing, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453006, China;

2. Engineering Department, Huanghe S & T University, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: For automotive large flange nuts, two cold heading process schemes were proposed by structural analysis. Firstly, the deformation characteristics of 40CrNiMoA steel at room temperature were studied to establish an accurate material model. Secondly, finite element modeling and forming simulation on the first four stations of the two schemes were conducted by software Deform-3D, respectively, and the filling of mold, the deformation of material, the distribution of equivalent stress and the forming load of each station were compared to determine a more feasible cold heading scheme. Finally, according to the feasible scheme, the mold structure of each station was designed and manufactured, and a mold testing was carried out by a 6-station cold heading machine. The results show that the cold heading process is stable, the production speed is fast, and the manufactured large flange nuts have complete shape, good quality and no serious defects such as folding and cracking, and the performance meets the requirements of manufacturer.

Key words: large flange nut; cold heading; mold filling; equivalent stress; forming load

冷镦工艺是一种在室温下进行的压力成形方法,通过模具并利用坯料的塑性特点使金属材料重新分配,从而成形为指定形状^[1],因此,成形零件的精度和材料利用率极高。同时,利用冷作硬化的特点^[2],可将零件的强度大幅提升。另外,考虑到室温下材料有限的变形能力、产品结构的复杂程度以及模具的寿命等要求,可以采用多工位成形工艺^[3-5],并且各工位零件同步成形,能有效地提高生产效率,对制造业的发展有重大意义。因此,冷

镦技术备受关注,尤其是在汽车紧固件领域应用较多,各生产企业纷纷致力于各类紧固件冷镦工艺的开发,以满足庞大的市场需求和严格的品质要求。但是,绝大部分产品的整体结构比较复杂,冷镦成形时需要采用的工位较多,且各工位零件外形的确定难度大,潜在缺陷较多,会产生大量的开模、试模费用,研发周期长,风险大,不利于中小企业发展。有限元仿真能实现零件各阶段成形过程的可视化^[6-8],提前预知缺陷,可根据模拟结果不断改进至最优化,从而有效规避风险。因此,本文以大法兰螺母为研究对象,应用有限元技术辅助冷镦工艺的开发,以提高研究效率和降低开模试模成本,并基于实际原材料在室温条件下的变形特性展开研究,以保证工艺仿真的准确性,最后结合实际生产进行

收稿日期: 2023-04-20; 修订日期: 2023-07-12

基金项目: 2021年度河南省科技厅科技攻关项目(212102210249)

作者简介: 田亚丁(1976-),男,本科,副教授

E-mail: xixihaha1217@aliyun.com

对比验证。

1 零件结构分析及冷锻方案确定

大法兰螺母的尺寸如图 1 所示, 法兰盘的直径为 $\Phi 50$ mm。其直径大于常规法兰螺母, 能有效增加螺母与锁紧对象之间的接触面积, 从而提升防松防滑的能力, 并且还能降低螺母单位面积受力, 因此, 在汽车上一些重要的防松部位应用较多, 例如汽车车架和发动机总成等。螺母六角结构可通过镦粗一次成形; 大法兰结构与变形前相比尺寸变化较大, 为减小开裂风险, 需分步成形; 贯穿孔结构可先挤出盲孔后冲破成形; 内螺纹可直接攻丝成形。按此思路并结合塑性成形理论, 制定了图 2 和图 3 两种较为合理的冷锻成形工艺方案。方案 1 中坯料的尺寸为 $\Phi 28.0$ mm \times 24.5 mm, 需经减径—挤六角—镦粗及挤孔—挤法兰和内孔—冲连皮—攻螺纹共 6 步成形。方案 2 中坯料的尺寸为 $\Phi 23.5$ mm \times 34.8 mm, 同样为 6 步成形, 后两步与方案 1 相同, 前 4 步依次为挤六角—一次挤法兰—二次挤法兰—挤内孔。两种冷锻工艺采用不同的坯料尺寸是为了方便坯料的定位, 以免出现偏心问题。应用体积

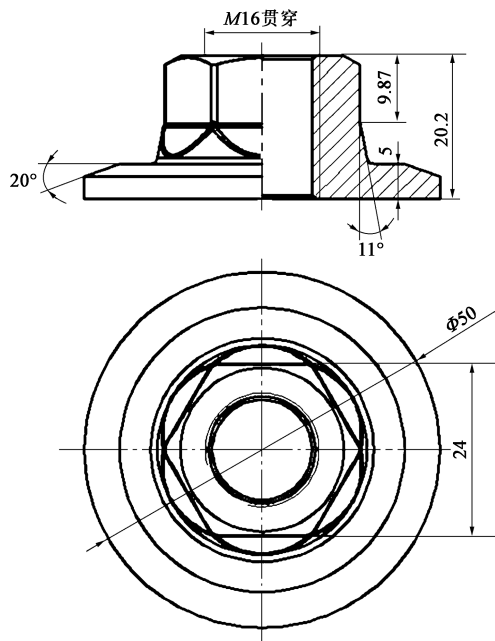


图 1 大法兰螺母尺寸图

Fig. 1 Size diagram of large flange nut

成形软件 Deform-3D 对这两种方案分别进行成形过程仿真, 研究其可行性, 更好地进行模具结构设计和生产试验, 其中, 冲连皮和攻螺纹过程在生产中是比较常规的过程, 因此本文不再深入研究。

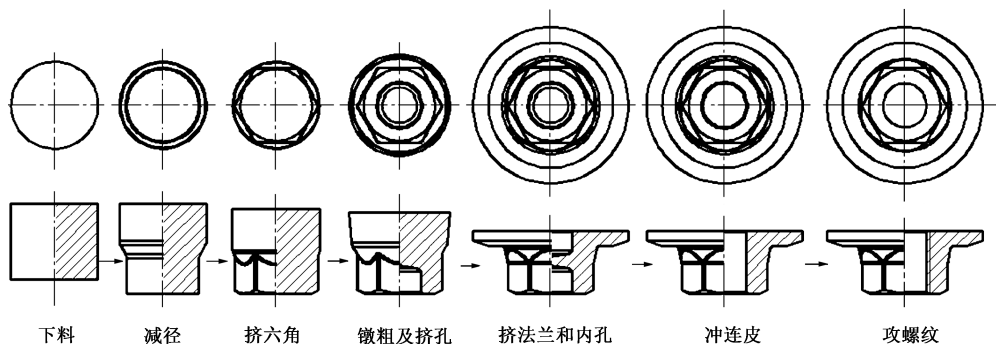


图 2 大法兰螺母的冷锻成形方案 1

Fig. 2 Cold heading scheme 1 of large flange nut

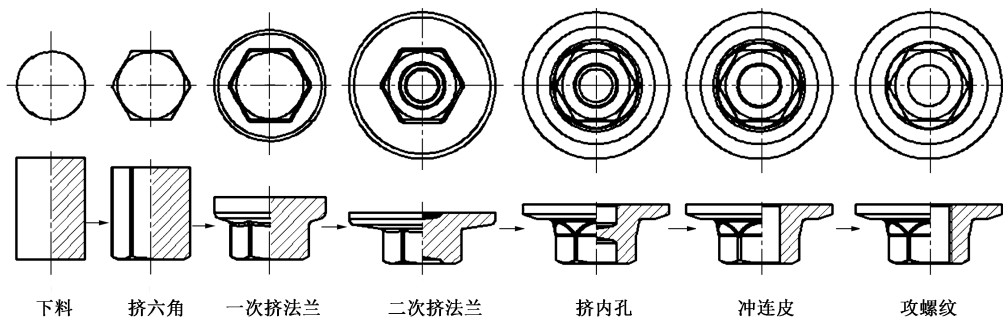


图 3 大法兰螺母的冷锻成形方案 2

Fig. 3 Cold heading scheme 2 of large flange nut

2 建模及准备工作

大法兰螺母的材料为 40CrNiMoA 钢, 其室温下的塑性较差, 球化退火后硬度可降至 160 ~ 190 HB^[9], 从而提高冷塑性能力。为了使仿真过程具备参考价值, 必须基于 40CrNiMoA 钢在实际条件下的变形特性展开研究。因此, 首先在 Deform-3D 软件中建立准确的 40CrNiMoA 钢材料模型, 并利用室温压缩试验获得工程应力-工程应变曲线, 再计算并拟合出真实应力-真实应变曲线, 如图 4 所示, 将其导入软件材料库。然后, 利用三维软件 Solidworks 建立两种方案的坯料以及各工位凸、凹模的简易模型, 并以 STL 格式导入 Deform-3D 软件中。最后, 进行仿真前的条件设定, 如坯料的材料及属性、冷镦环境温度、模具材料及属性、动模及定模、网格划分及边界条件、接触条件 (包括摩擦类型、摩擦因数、热传导系数和接触容差等) 以及模拟控制条件等^[10]。

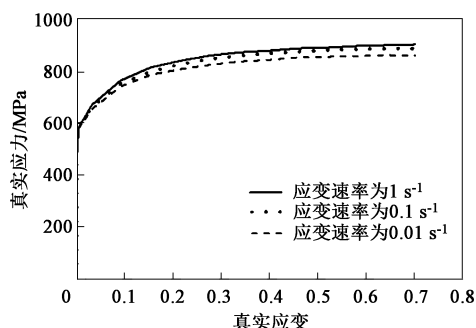


图 4 40CrNiMoA 钢的真实应力-真实应变曲线

Fig. 4 True stress-true strain curves of 40CrNiMoA steel

3 模拟结果分析与比较

3.1 模具填充情况

由于两种方案的前 4 个工位的冷镦过程均是在封闭模腔中进行的, 因此, 对模具填充情况进行分析可以较好地了解各工位零件的成形状况, 观察是否有毛刺或空穴等缺陷, 从而检验工艺是否满足成形的要求^[11]。在 Deform-3D 软件后处理中, 接触节点功能可以直接反映各工位模具的填充情况, 如图 5 所示, 零件表面节点的部位表示已与模具内腔接触, 因此, 为使成形的零件满足尺寸需求, 就必须充满模腔, 与模具完全接触, 即节点全部覆盖零件。从图 5 中可以看出: 两种方案均满足这一要求, 未出现空穴缺陷, 并且各成形零件的边、角部位也未发现明显的毛刺缺陷。

3.2 材料变形情况

对材料变形情况进行分析, 可以直观地了解各工位零件的成形过程, 检查成形中金属是否存在因局部不合理流动而导致的内部缺陷^[12]。方案 1 中各工位冷镦成形过程如图 6 所示。减径工位 (图 6a) 为正挤压过程, 金属流向与凸模挤压方向一致, 始终沿着凹模内壁向下流动, 因此, 不会出现不合理的流动现象, 零件内部不会产生缺陷; 挤六角工位 (图 6b) 为纵向压缩过程, 变形区域主要在零件下端, 零件底部金属向四周流动直至成形结束, 流向固定, 因此, 成形后零件内部也不会出现缺陷; 镦粗及挤孔工位 (图 6c) 类似于复合挤压过程, 金属有两个流向, 一部分金属向下流动以填充成形盲孔, 另一部分金属向四周流动以填充镦粗零件上端, 虽然金属流向不一致, 但两者互不影响, 不会出现汇流或者交叉流动的现象, 无缺陷产生; 挤法兰和内孔工位 (图 6d) 的变形过程比较复杂, 金属先向四周流动, 再沿着凸模反向流动, 最后又转向四周流动, 直至大法兰螺母成形, 虽然金属流向是多次变化的, 但流动合理, 未出现汇流现象, 无缺陷产生。方案 2 的各工位冷镦成形过程如图 7 所示。挤六角工位 (图 7a) 和一次挤法兰工位 (图 7b) 的成形规律与图 6b 类似, 为纵向压缩过程, 变形简单, 金属流向固定, 零件内部不会产生缺陷; 在二次挤法兰工位 (图 7c), 金属先迅速向下流动完成凹模底部空腔的填充, 再统一转向四周流动, 成形大法兰螺母, 变形合理, 金属流动正常, 不会形成缺陷; 在挤孔工位, 从图 7d 中可以看出, 成形时金属基本呈向下流动的趋势, 流向单一, 最终零件内部同样不会出现缺陷。经上述分析认为, 两种冷镦工艺成形的零件, 其内部质量均较好, 不存在材料折叠等问题, 能有效避免产品在实际使用过程中内部产生裂纹而影响使用寿命的问题。

3.3 等效应力分布情况

应力是零件受外力挤压后产生的内力, 应力值越大, 零件内部产生裂纹的风险越大, 因此, 对等效应力的分布情况进行分析可以了解零件成形过程中容易产生缺陷的部位, 从而有效指导工艺改进和模具设计^[13]。方案 1 中各工位零件的等效应力分布情况如图 8 所示。在减径工位和挤六角工位, 剧烈变形均发生在零件下端, 因此, 零件下端的等效应力较大, 最大等效应力值分别达到 921 和 925 MPa; 在镦粗及挤孔工位, 整个零件的变形量较大, 因此, 等效应力分布相较于其他工位均匀, 但在填充凹模

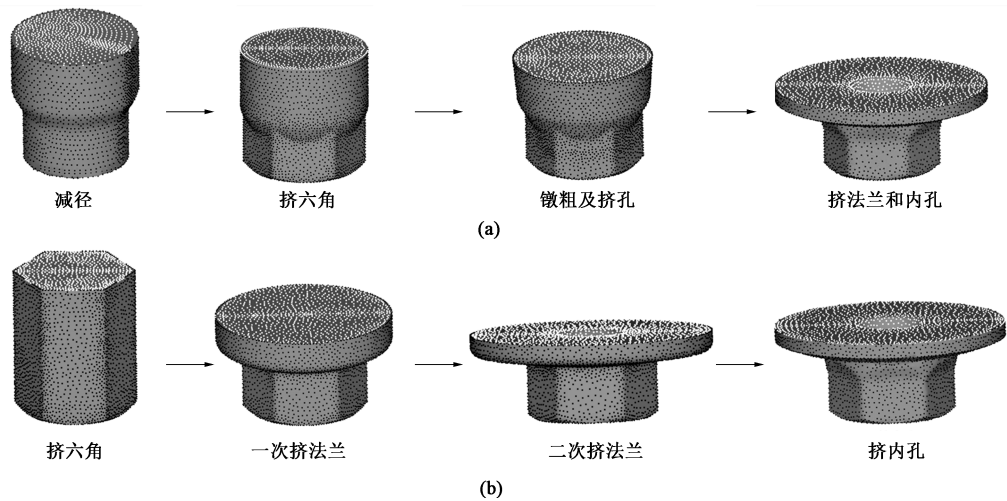


图 5 各工位模具填充情况

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 5 Filling status of dies at each station

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

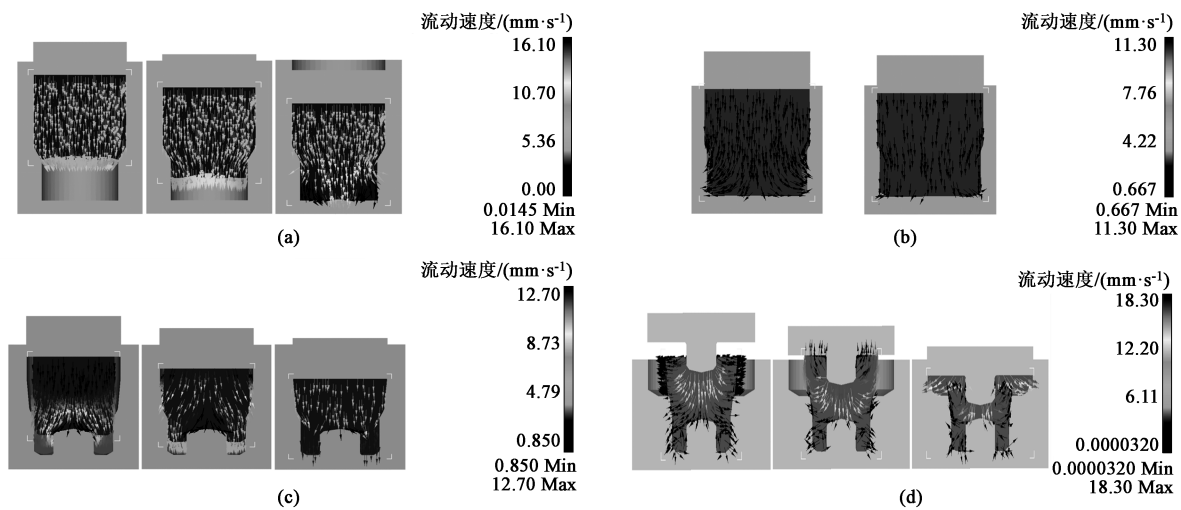


图 6 方案 1 的冷锻成形过程

(a) 减径 (b) 挤六角 (c) 镦粗及挤孔 (d) 挤法兰和内孔

Fig. 6 Cold heading process of scheme 1

(a) Diameter reduction (b) Hexagon extrusion (c) Upsetting and hole extrusion (d) Extrusion of flange and inner hole

底部空腔成形底部盲孔时受到的摩擦阻力较大, 因此, 零件中间部位的等效应力较大, 最大等效应力值为 931 MPa; 在挤法兰和内孔工位, 剧烈变形发生在零件上端和内孔位置, 因此, 零件上端的等效应力较大, 最大等效应力值为 927 MPa。方案 2 中各工位零件的等效应力分布情况如图 9 所示。在挤六角工位, 零件的变形程度较小, 等效应力整体分布均匀, 应力集中出现在底部圆角及棱处, 最大等效应力值为 919 MPa; 在一次挤法兰和二次挤法兰工位, 主要为镦粗变形, 最大变形区在零件法兰处, 最大等效应力值分别为 946 和 937 MPa; 在挤内孔

工位, 零件中间部位材料受到挤压, 变形大, 并且流动时受到的阻力较大, 因此, 零件中间部位的等效应力较大, 最大等效应力达到 941 MPa。对比两种方案可知, 除了第 1 个工位, 两种方案的最大等效应力值比较接近, 其余各工位的对比中, 方案 1 的最大等效应力值均更小, 更不易产生疲劳裂纹, 有利于提升大法兰螺母的质量和性能。

3.4 各工位成形载荷情况

对成形载荷进行分析能够较好地了解模具的受力情况, 帮助技术人员选择合适的模具结构和模具材料, 同时模具受力越小, 表示对模具造成的损伤

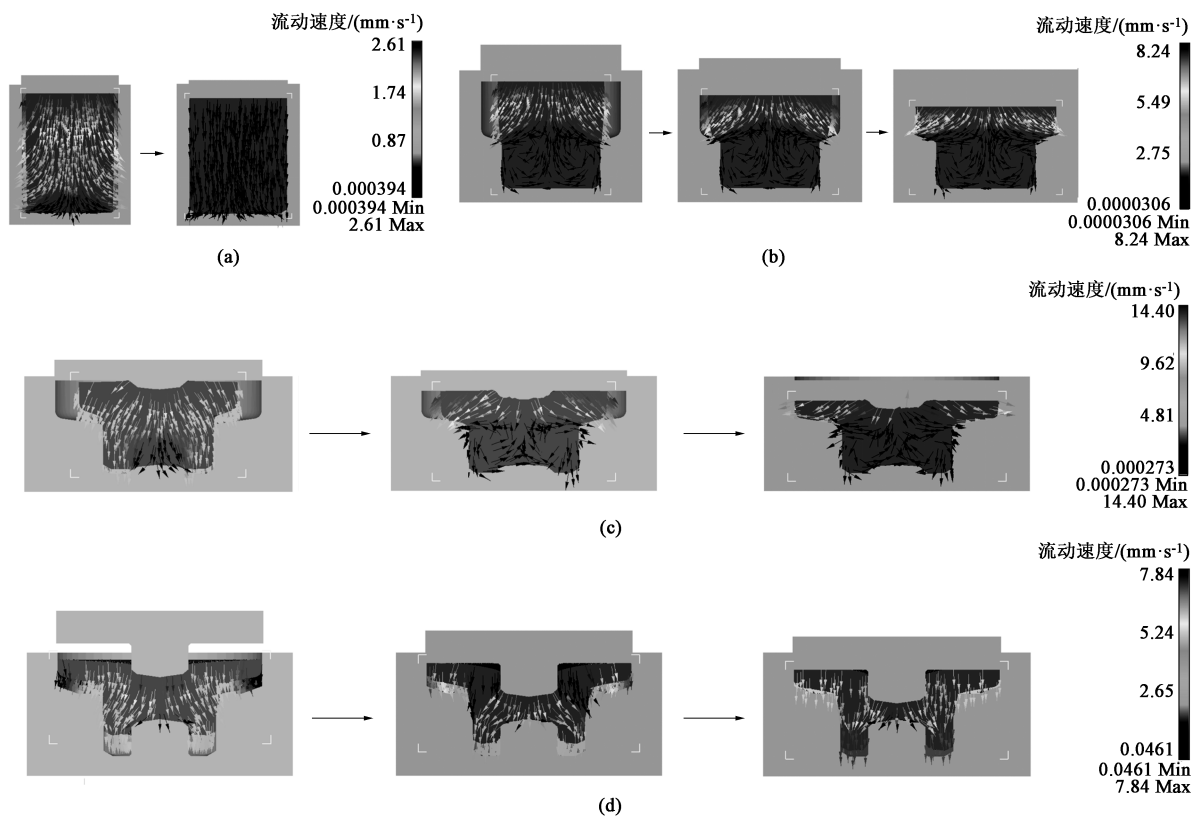


图 7 方案 2 的冷镦成形过程

(a) 挤六角 (b) 一次挤法兰 (c) 二次挤法兰 (d) 挤内孔

Fig. 7 Cold heading process of scheme 2

(a) Hexagon extrusion (b) Primary flange extrusion (c) Secondary flange extrusion (d) Inner hole extrusion

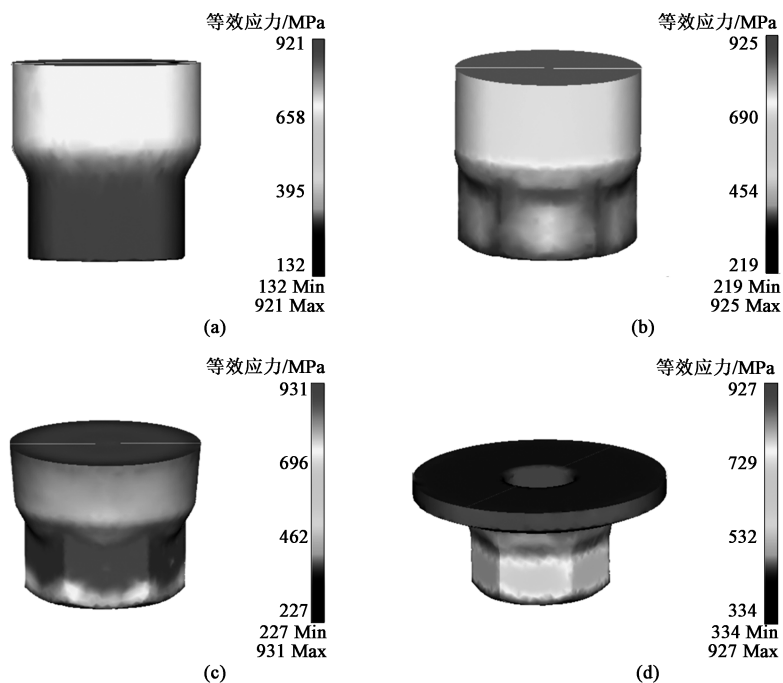


图 8 方案 1 中各工位零件的等效应力分布

(a) 减径 (b) 挤六角 (c) 镦粗及挤孔 (d) 挤法兰和内孔

Fig. 8 Equivalent stress distribution of part at each station in scheme 1

(a) Diameter reduction (b) Hexagon extrusion (c) Upsetting and hole extrusion (d) Extrusion of flange and inner hole

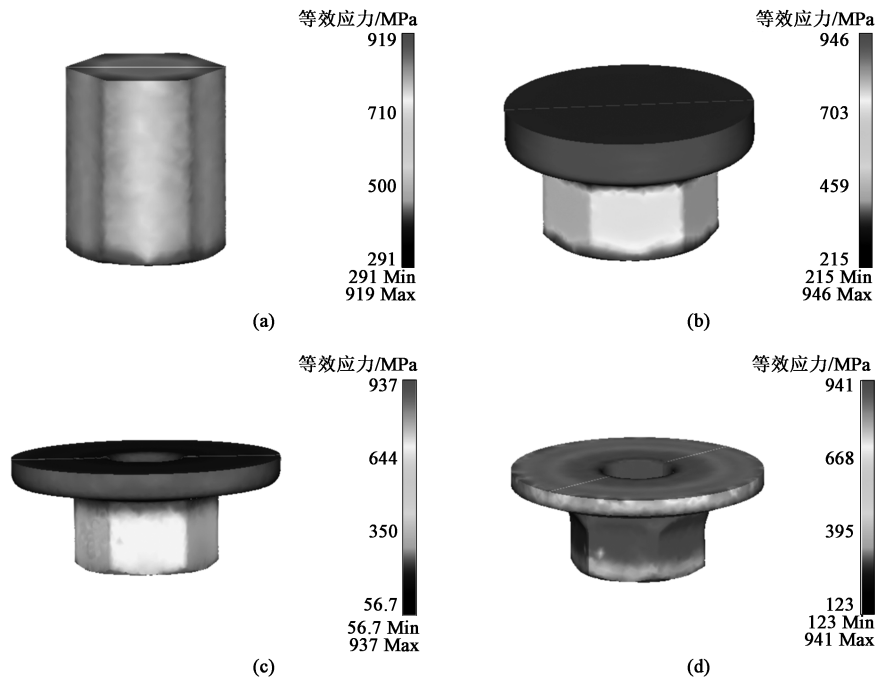


图9 方案2中各工位零件的等效应力分布

(a) 挤六角 (b) 一次挤法兰 (c) 二次挤法兰 (d) 挤内孔

Fig.9 Equivalent stress distribution of parts at each station in scheme 2

(a) Hexagon extrusion (b) Primary flange extrusion (c) Secondary flange extrusion (d) Inner hole extrusion

越低,通过比较能正确地进行工艺选择。另外,根据成形载荷分析可以预测锻压力,从而帮助冷锻设备选型。两种方案中各工位的成形载荷变化图如图10所示,各工位的变化规律完全一致:变形开始时,由于材料的流动空间大,并且受阻力小,因此成形载荷较小;随着变形逐渐增大,材料的流动空间

越来越有限,成形阻力也越来越大,导致成形载荷快速增长。从图10中可知,除第1个工位中两种方案的最大成形载荷值比较接近,对于其余工位,方案1的最大成形载荷值均小于方案2的,这表明在相同条件下方案1中各工位模具的工作寿命更长,有利于减少模具费用,更能满足企业需求。

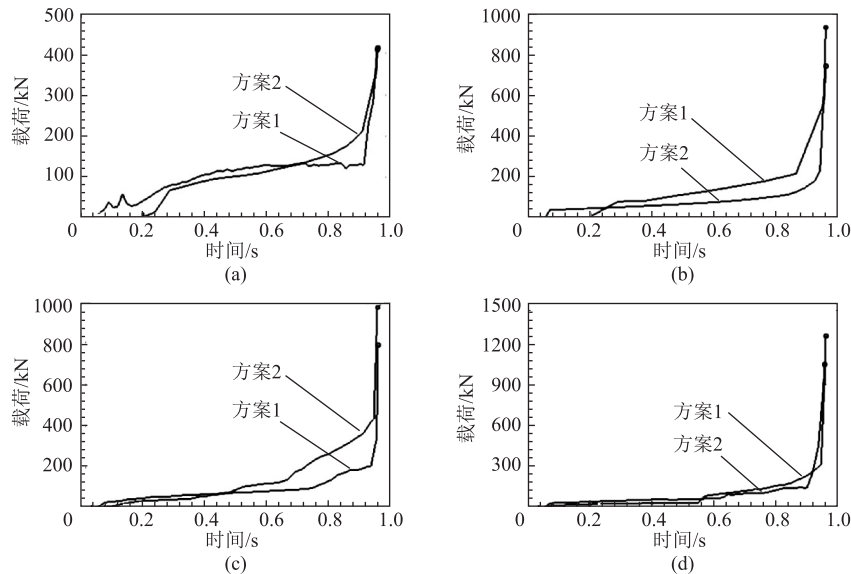


图10 两种方案各工位的成形载荷对比

(a) 第1工位 (b) 第2工位 (c) 第3工位 (d) 第4工位

Fig.10 Comparison of forming loads for each station in two schemes

(a) The first station (b) The second station (c) The third station (d) The fourth station 4

4 冷镦模具设计及冷镦结果

通过以上分析最终确定方案 1 为更加可靠的冷镦方案，成形过程依次为减径—挤六角—镦粗及挤孔—挤法兰和内孔—冲连皮—攻螺纹，再分别进行模具结构设计，结果如图 11 所示。制作完成后

装入 6 工位冷镦机进行大法兰螺母的镦制生产，结果如图 12 所示，各工位零件表面光滑，没有麻点、毛刺等缺陷，与仿真预测结果一致。企业验收结果显示，该冷镦成形工艺稳定，生产速度快，并且制造的大法兰螺母外形完整、成形尺寸精度高、使用性能完全满足需求，出现不良品的几率极低。

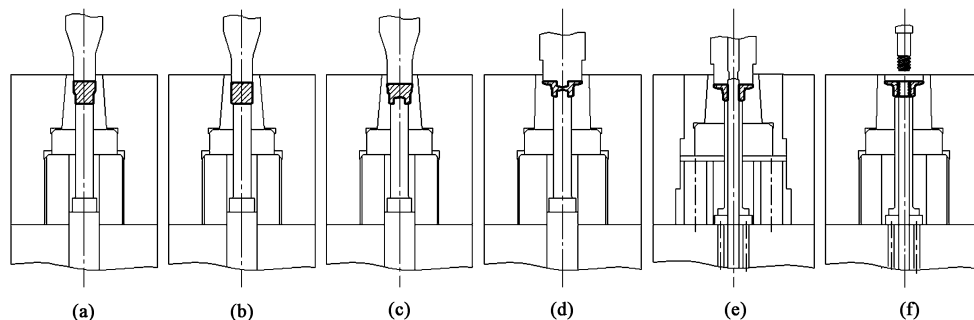


图 11 大法兰螺母 6 工位冷镦模具图

(a) 减径 (b) 挤六角 (c) 镦粗及挤孔 (d) 挤法兰和内孔 (e) 冲连皮 (f) 攻螺纹

Fig. 11 Six-station cold heading die drawing of large flange nut

(a) Diameter reduction (b) Hexagon extrusion (c) Upsetting and hole extrusion (d) Extrusion of flange and inner hole
(e) Punching (f) Thread tapping

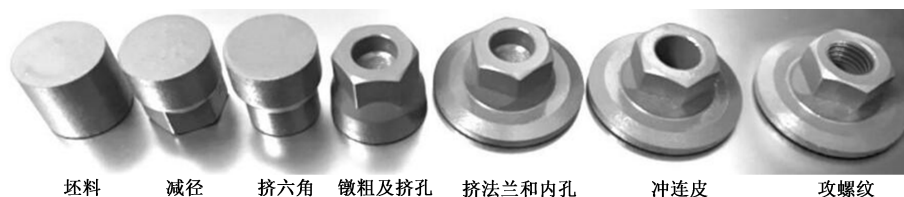


图 12 大法兰螺母镦制结果

Fig. 12 Upsetting results of large flange nut

5 结论

(1) 通过对大法兰螺母的结构进行分析，制定了两种 6 工位冷镦成形方案，并应用有限元技术对两种方案的前 4 个工位分别进行了有限元建模和成形模拟，以提高研究效率和降低开模试模成本。

(2) 基于 40CrNiMoA 钢在实际条件下的变形特性展开了仿真研究，比较了两种方案中各工位的模具填充和材料变形情况、等效应力分布情况以及各工位成形载荷情况，完成了工艺择优。

(3) 设计了一套用于镦制大法兰螺母的 6 工位冷镦模具，并通过冷镦机进行了镦制试验，结果显示该冷镦成形工艺稳定，生产速度快，并且制造的大法兰螺母外形完整、成形尺寸精度高、使用性能完全满足需求。

参考文献：

- [1] 陈剑, 张东民, 周伟民, 等. 球头销多工位冷镦挤工艺研究及模具设计 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (11): 153-156.
Chen J, Zhang D M, Zhou W M, et al. Process research and die design of multi-station cold upsetting-extrusion of ball head pin [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (11): 153-156.
- [2] 赵志繁, 侯怀书, 钱瑞福, 等. 六角法兰面锁紧螺母冷镦挤成型数值模拟及优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (17): 101-104, 107.
Zhao Z F, Hou H S, Qian R F, et al. Numerical simulation and optimization of cold heading-extrusion of hexagon flange face locking nuts [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (17): 101-104, 107.
- [3] 肖志玲, 刘百宣, 孙红星, 等. 高强钢 20MnTiB 多工位冷镦变形行为 [J]. 材料工程, 2016, 44 (3): 77-83.
Xiao Z L, Liu B X, Sun H X, et al. Multi-stage cold forging behavior of high strength steel 20MnTiB [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44 (3): 77-83.

(下转第 52 页)