材料研究与应用　2025,19(3):566-572
Materials Research and Application
http://mra.ijournals.cn
Email:clyjyyy@gdinm.com

DOI:10.20038/j.cnki.mra.2025.000320

基于有限元分析的球形垫片冷锻精密成形工艺研究

史火寿[1],何怀忠[2],陈润华[3,4*],陶惠敏[4]

(1. 宁波兴奉机械制造有限公司,浙江 宁波 315500; 2. 宁波东川游泳池设备有限公司,浙江 宁波 315000; 3. 宁夏大学机械工程学院,宁夏 银川 750021; 4. 浙江水利水电学院机械与汽车工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要: 随着交通运输和航空航天等行业的发展,市场对紧固件的质量和可靠性要求不断提高。球形垫片作为关键紧固件,广泛应用于机械、管道和阀门等设备中,其质量直接关系到设备的安全性和可靠性。冷锻工艺凭借常温成形的显著特性,成为生产球形垫片的理想工艺。通过设计和优化冷锻工艺,并结合有限元模拟技术,解决生产中的潜在问题,从而提高生产效率、降低成本,保证产品质量。通过Deform-3D有限元软件对球形垫片的冷锻成形过程进行模拟分析,发现了金属流动不均、充填不良、表面开裂等潜在问题,为解决这些问题,设计了预锻和终锻两步冷锻形成工艺。预锻阶段形成类筒形结构,为复杂的内花键区域提供金属积聚,确保后续成形顺利进行;终锻阶段通过精确的模具设计控制金属流向,确保锻件的端部和花键的精准成形。模拟结果表明,两步冷锻工艺能够使金属均匀填充模具型腔,避免飞边过多产生,并有效抑制了充不满和折叠等缺陷。该工艺设计显著提高了球形垫片的成形精度,减少了开模和试模费用,降低了研发成本,为实际生产提供了可靠的数据支持。在试制过程中,采用与模拟一致的工艺参数,最终生产出的球形垫片零件质量良好、表面光洁、无裂纹及尺寸精度符合要求,验证了该工艺方案的可行性。基于有限元分析的冷锻成形工艺为球形垫片的高质量生产提供了一种有效的冷锻工艺方案,同时通过有限元模拟技术优化了成形过程,降低了生产成本和研发风险,为其他复杂结构零件的制造提供了重要参考。

关键词: 球形垫片;冷锻;有限元分析;Deform-3D;金属流动规律;工艺设计;模具设计;缺陷控制

中图分类号: TG316.3　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1673-9981(2025)03-0566-07

引文格式: 史火寿,何怀忠,陈润华,等. 基于有限元分析的球形垫片冷锻精密成形工艺研究[J]. 材料研究与应用,2025,19(3):566-572.

SHI Huoshou,HE Huaizhong,CHEN Runhua,et al. Research on the Precision Forming Process of Spherical Washers in Cold Forging Based on Finite Element Analysis[J]. Materials Research and Application,2025,19(3):566-572.

0　引言

随着国内交通运输、航空航天等行业的迅速发展,市场对紧固件的质量和可靠性提出了更高的要求。球形垫片作为紧固件的一种,以其独特的球形表面被广泛应用于机械、管道、法兰连接、阀门等设备中起到密封作用。由于球形垫片的质量和性能直接影响到整个设备的安全性和可靠性,因此对其生产工艺提出了更为严苛的要求。为满足这些要求,作为一种常温金属成形方法的冷锻工艺成为了生产球形垫片的理想选择工艺。

冷锻工艺是通过模具对金属坯料施加外力,使其发生塑性变形,从而成形为所需的产品形状[1]。冷锻工艺是在常温下进行的,相比于传统的热锻工艺,其能够更好地控制金属材料的性能,提高零件的尺寸精度和表面质量,从而极大地提升了产品的质量和可靠性[2]。冷锻工艺在实际应用中通常包括预锻和终锻两个成形阶段。预锻阶段通常为后续成形做好准备,而终锻阶段是确保金属材料最终成形及满足构件的尺寸和性能要求。冷锻工艺具有精度高和材料利用率高的优点,是制造高质量球形垫片的理想选择工艺[3]。在冷锻工艺的实际生产中,尤其是对于具有复杂结构的零件,通常需要采用多个工序来完成成形任务。这种多个工序设计可以确保产品的精度和表面质量,尤其是在对产品结构复杂性要求较高的情况下,能够更好地保证成形精度和一致性[4]。此外,随着自动化技术的发展,在现代冷锻

收稿日期: 2025-03-27
基金项目: 2020年度浙江省重点研发计划项目(2020C01062)
作者简介: 史火寿,本科,工程师,研究方向为机械制造。E-mail: m182606356251@163.com。
通信作者: 陈润华,硕士研究生,研究方向为机械制造。E-mail: 852962370@qq.com。

工艺中已广泛应用机器人技术和自动化设备,实现了多工位连续自动成形,这不仅显著提高了生产效率,还有效降低了人工成本,并减少了人为操作带来的误差[5-6]。

尽管冷锻工艺在提高生产效率和产品质量方面具有显著优势,但在面对某些复杂结构产品时仍然存在一定的挑战。对于复杂的零件结构,冷锻工艺往往需要经过多个工序才能完成成形,而在每个工序中确保零件外形的准确性也是一个困难的任务,这可能导致潜在的缺陷出现,进而影响到最终产品的质量和性能。此外,由于冷锻工艺的复杂性,往往需要大量的开模和试模费用,这不仅增加了产品研发周期,也显著提高了研发成本,并带来一定的生产风险。对于中小企业而言,这些问题尤为突出,可能影响其在市场中的竞争力[7-8]。因此,在确保产品质量的前提下,减少生产工艺的复杂性,降低研发和生产成本,针对特定复杂结构产品设计合理的冷锻成形工艺方案显得尤为重要。通过优化工艺步骤、减少不必要的工序,不仅能够提升生产效率,还可以降低产品的生产成本和研发风险。冷锻工艺的应用常集中于常规零件的成形,缺乏针对特殊结构如球形垫片的具体工艺创新[9]。现有的冷锻工艺方案大多未能有效解决复杂结构中的金属流动和表面缺陷的问题,特别是在内花键等复杂区域的精确成形方面。

本文提出了一种预锻和终锻两步冷锻成形工艺,针对球形垫片这一特殊零件,重点优化了金属流动路径和模具设计,以确保金属能够均匀流动并完全填充模具型腔,从而有效避免表面缺陷和成形不良的问题。为进一步缩短开发周期并提升产品质量,还采用了体积成形有限元软件Deform-3D对所设计的工艺路线进行成形模拟分析。通过模拟分析,可以实时发现并解决潜在的工艺缺陷,及时调整工艺设计,从而避免生产过程中的潜在风险,这不仅能够有效提高成形精度,还能减少开模和试模的费用,显著降低产品的研发成本。此外,利用Deform-3D模拟分析技术,可以在生产前进行详细的工艺验证,为实际生产提供可靠的数据支持。本研究的创新之处在于,结合球形垫片的特殊结构,通过设计优化两步冷锻成形工艺,解决了复杂零件成形中的金属流动控制和表面缺陷问题,推动了冷锻工艺在高精度球形垫片生产中的应用。通过技术创新,不仅提高了生产效率,还为其他复杂结构零件的冷锻成形提供了重要的参考。

1 球形垫片结构分析及冷锻方案确定

1.1 球形垫片结构

球形垫片拥有特殊的球体几何结构。在机械结构里,球形垫片多用于两个部件存在相对运动时,或在部件间不平整接触面上保持支撑。在现实应用里,球形垫片多用于矿山巷道和汽车悬挂中,其可以使部件在受力不均匀或者车辆在转向、颠簸时依旧保持较好的接触关系。图1为球形垫片锻件示意图。从图1可见,球形垫片顶部最大外径为80 mm、最小内径为45.6 mm、高度为48 mm,其外形较为复杂,内部均匀分布8个内花键槽。该零件材料为45号钢,主要用于制造中等强度的零件[10],其材料的化学成分和力学性能分别列于表1和表2。由表2可知,该材料屈强比(屈服强度与抗拉强度的比值)较低。表明,材料塑性较好,适合进行冷锻加工[11-12]。因此,可尝试采用冷锻工艺进行成形。

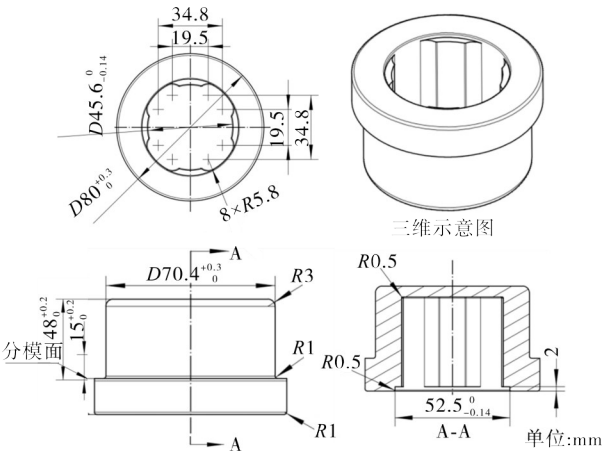


图1 球形垫片锻件图

Figure 1 Spherical washer forging drawing

表1 45号钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 45# steel

成份	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
含量w/%	0.420—0.500	≤0.350	0.600—0.900	≤0.035	≤0.035	≤0.250	≤0.300	≤0.250	≤0.100

表2 45号钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 45# steel

参数	抗拉强度σ_b/MPa	屈服强度σ_s/MPa	伸长率δ/%	断面收缩率Ψ/%	冲击韧性/(J·cm^{-2})
数值	785—980	≥490	14	40	≥55

1.2　冷锻方案的确定

图2为球形垫片成形过程示意图。由于球形垫片的内花键轮廓较为复杂，具有多个凸起和凹槽，金属流入时会遭遇较大的流动阻力（见图2红色箭头所示），导致型腔的填充变得困难[13]。同时，垫片的端部也需要进行锻造成形，以确保整体形状的准确性。若采用单工序冷锻成形，内花键的型腔很难完全充满，并且在垫片外表面容易产生径向拉应力和轴向拉应力，这可能会导致表面出现开裂[14-15]。此外，由于内花键的几何形状，金属流动无法同时向垫片端部填充，容易在端部形成折叠缺陷[16]。因此，针对其结构特点，设计了预锻和终锻两工序的冷锻成形方案。

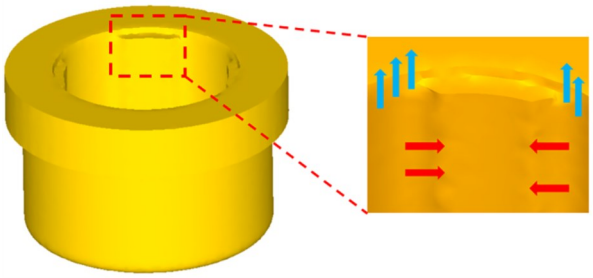
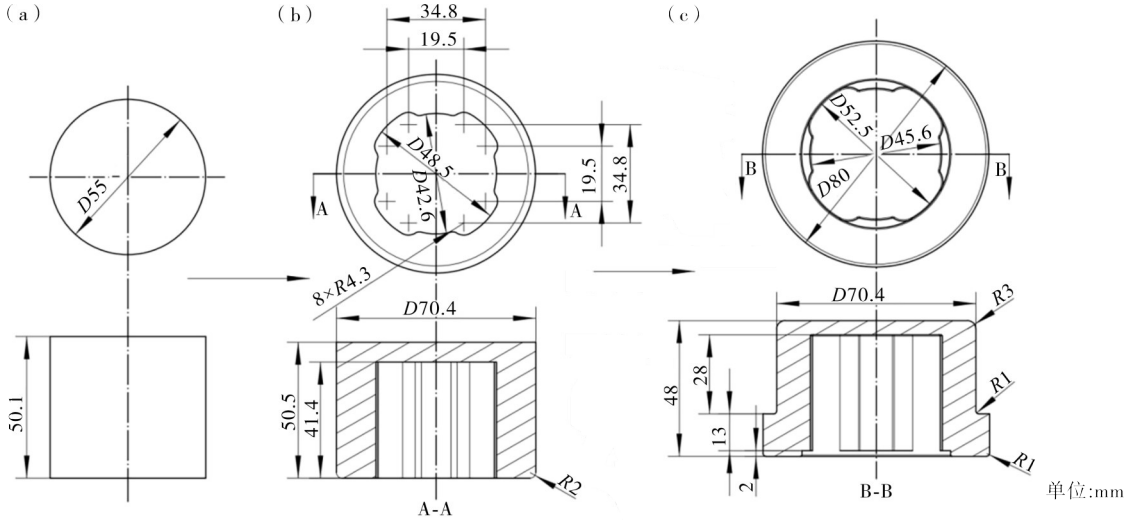


图2　球形垫片成形过程1/4剖面图

Figure 2　1/4 sectional view of the spherical washer forming process

图3为球形垫片冷锻成形过程。首先，通过预锻制坯，使金属流入内花键区域，形成类筒形结构件，为后续成形复杂花键结构提供必要的金属聚集。接着，在终锻成形阶段，对锻件的端部进行锻造成形，确保锻件的端部得到精确成形，同时又可有效降低工件表面的拉应力。本研究选用了直径70 mm、高50.1 mm的棒料作为坯料，通过预锻将棒料毛坯成形为类筒形结构件，便于后续金属的聚集并为复杂花键结构的成形打下基础，通过终锻锻造顶部端台，并形成内壁花键结构，最终实现球形垫片的精密成形。



(a)—原始坯料；(b)—预成形件；(c)—终成形件。

(a)—original billet；(b)—pre-formed state；(c)—final formed state.

图3　球形垫片冷锻成形过程

Figure 3　Cold forging process of the spherical washer

2　模拟及分析

2.1　冷锻成形有限元建模及参数设置

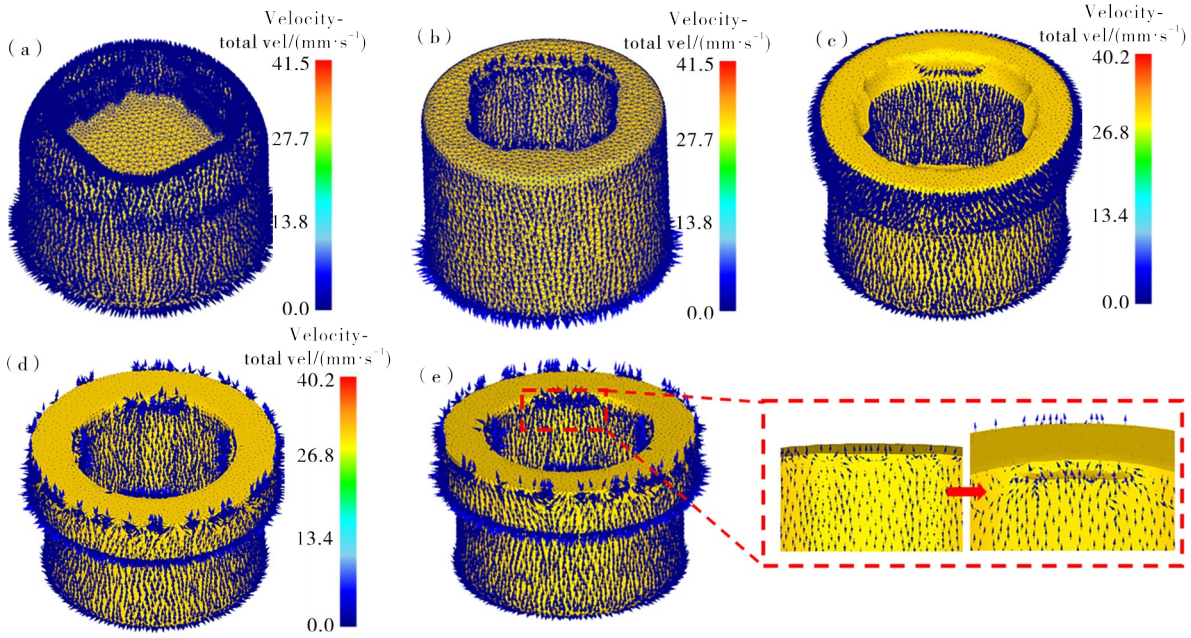
为了探究冷锻成形过程中的金属流动规律并预测成形缺陷，利用有限元软件Deform-3D，采用刚塑性有限元法对球形垫片锻件的冷锻成形进行了模拟分析。坯料、模具等三维模型通过Solidworks软件设计预成形和终成形模具，将构建的模型导出为STL格式，输入至Deform-3D的前处理模块，毛坯选用45号钢，在Deform中的对应牌号为AISI-1045，COLD[70F(20C)]，网格数量为100 000个，摩擦力为剪切摩擦，摩擦系数为0.12，每工步长设定为0.3 mm，模具选择为刚性体，并根据运动参数设置下冲头行进速度为2 mm·s^{-1}。

2.2　冷锻成形分析

2.2.1　金属流动规律分析

球形垫片的成形过程中的金属流动速度如图4所示。从图4(a—b)可见，在预成形阶段，随着上模下压，锻件的壁面出现了反挤压成形现象。在这一过程中，坯料的外圈和内圈部位的金属流动速度较为均匀，二者之间的差距不大。内壁的金属在反挤

压作用下向上流动的同时,局部区域开始向花键部位流动,为后续的终锻成形花键预先聚集金属。从图4(c)和图4(d)可见,在成形的中期,金属材料开始从坯料的上部向周围扩散。流动的方向主要从顶部向侧壁延展,材料在轴向压力的作用下不仅向外侧流动,同时也开始逐步填充模具型腔,表明成形压力已经成功引导金属材料向模具内部扩展,确保了形状的完整性。从图4(e)可见,在成形中期,内花键两侧的金属受到了模具的挤压作用,开始向内花键的凹槽区域流动,当金属接触到内壁后,由于凹槽的填充阻力增加,金属的流动变得更加困难,导致凹槽中心部位的金属开始回流,并填充凹槽两侧的区域,随着预成形花键凹槽几乎充满,内圈区域的金属流动速度变得更加均匀。在终成形阶段的末期,金属的流动速率整体上显著增大,流动的方向变得更加复杂,材料的流动不仅向外部扩展,侧壁区域的金属也开始向下流动,最终形成零件的肩部和底部结构,与此同时顶部区域的金属流动较为缓慢且流速均匀,说明材料已经完全填充了模具型腔。



(a)—预成形中期;(b)—预成形末期;(c)—终成形中期;(d)—终成形末期;(e)—花键处金属流动情况。

(a)—mid-stage of pre-forming;(b)—end of pre-forming;(c)—mid-stage of final forming;(d)—end of final forming;(e)—metal flow at the spline.

图4 球形垫片冷锻成形各工位金属流动状态图及花键处金属流动情况

Figure 4 Metal flow state diagrams at each forming stage of the spherical washer and metal flow at the spline

2.2.2 模具填充情况分析

通过分析模具的填充情况,可以直观地了解每个工序中锻件的成形状态,从而有效判断锻件是否存在空穴、毛刺等常见缺陷[17]。在Deform-3D软件的后处理中,通过显示节点功能,可以清晰地反映各工位模具的填充情况,为成形过程的优化提供有力支持。图5为预成形及终成形模具填充情况。从图5可见,锻件的表面与模具内腔完全接触,且节点分布均匀,无任何损失现象。此外,图中并未发现空穴、毛刺等缺陷,说明锻件在模具内的填充是完整的。表明,冷锻工艺的成形效果良好,最终成形锻件符合设计图纸的尺寸要求,验证了该冷锻方案的可行性和优越性。该冷锻方案不仅可以确保锻件的质量,而且还为后续工艺改进及优化提供了数据支持,确保生产效率和产品精度的提升。

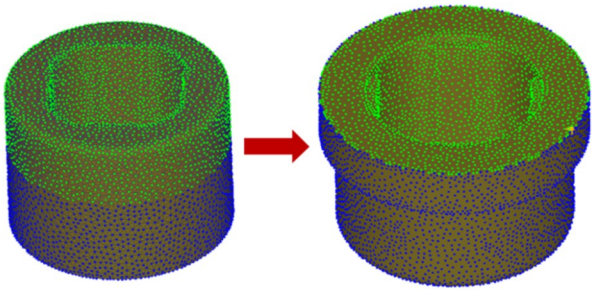


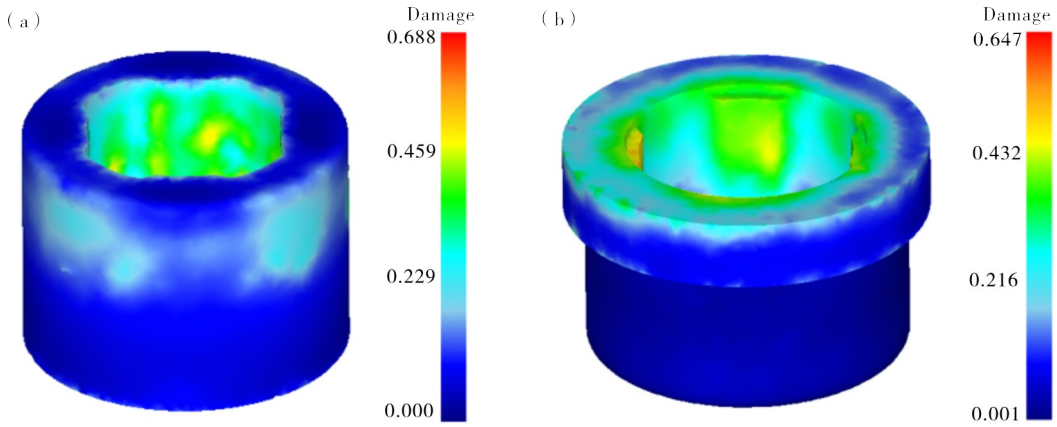
图5 预成形及终成形模具填充情况

Figure 5 Filling status of the dies at each stage

2.2.3 断裂趋势分析

球形垫片锻件在成形过程中会受到不均匀的塑性变形,若零件的局部损伤超过材料的承受极限,就可能导致材料断裂,从而影响锻件的质量。在Deform-3D中,通过分析损伤因子,可以评估材料在

成形过程中所承受的损伤程度。材料在各工位的损伤因子分布(见图6),揭示了损伤的区域与金属流动的关系。由于材料与模具内腔之间的摩擦作用,损伤因子较大的区域通常是金属流动较为活跃的区域。在预成形阶段,金属主要通过反挤压成形,内壁的金属向花键处聚集,导致材料的塑性变形量较大。在这一过程中,局部的损伤因子最高,位于内壁的花键部位达到了0.46。进入终成形阶段时,金属主要集中在顶部和花键部位进行成形,这两个部位的塑性变形量较大,局部最高损伤因子约为0.44。值得注意的是,在两次冷锻过程中的损伤因子均未超过45号钢的极限损伤因子,这表明锻件在整个成形过程中未超过材料的承受极限[18]。



(a)—预成形;(b)—终成形。
(a)—pre-forming; (b)—final forming.

图6　成形过程损伤因子分布图

Figure 6　Distribution of damage factors during the forming process

2.2.4　载荷情况分析

图7为冷锻方案的载荷-行程变化曲线。从图7可以看出,随着冷锻成形的进行,载荷持续增加。这一变化趋势源于冷锻成形与自由锻工艺的本质区别。冷锻成形过程中,金属流动会受到模具的限制,最终金属会充填在模具型腔内。成形初期,模腔内空间较大,金属材料的流动相对容易,载荷较低。然而,随着成形过程的推进,模腔的空间逐渐被压缩,材料与模具内壁之间的摩擦力迅速增大,金属流动的难度也随之加大。由于摩擦力的增加,载荷逐步上升,直到最终成形阶段,材料与模具内壁完全贴合,此时载荷达到所需的成形载荷。从图7可以看到,预成形阶段的最大载荷为580 T,而终成形阶段的最大载荷为600 T。根据这些载荷数据,结合安全裕度,可以预测实际的成形力,并为设备选型提供依据。根据本研究中涉及的球形垫片锻件的要求,建议选择700 T以上的设备,以确保成形过程的顺利进行并保障生产的稳定性。此外,根据模具的受力面积,可以计算出模具的单位压力,这一数据对于模具材料的选择和结构设计至关重要,可以为后续的模具设计提供重要参考。

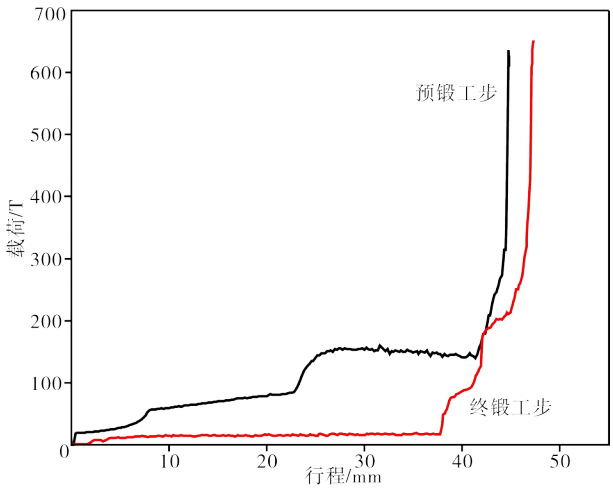


图7　载荷-行程变化曲线

Figure 7　Load-displacement curves

3　模具总体结构设计

图8及图9分别为各单工序模具示意图和冷挤压成形模具装配图。根据球形垫片的模拟结果,预成形时的反挤压变形量较小,而终成形时正挤的变形量较大,整个冷挤压成形可采用正挤压模具。为使模具上下对中,需使用导向套进行导向。下凹模采用上下层分体结构,各层均使用两层组合凹模,并通过下凹模压板(同时作为导向圈)将其紧固在下模座上。上模座也采用两层组合凹模设计。当挤压到下死点时,上下凹模之间会留有间隙,使多余的材料形成飞边。当挤压结束后,借助压力机的顶出装置,顶杆和顶料杆将挤压件从凹模中顶出[19-20]。根据零件的图纸和技术要求,确定了合适的成形工艺与方案,并针对零件的锻造过程,最终设计出了零件的冷挤压成形模具。

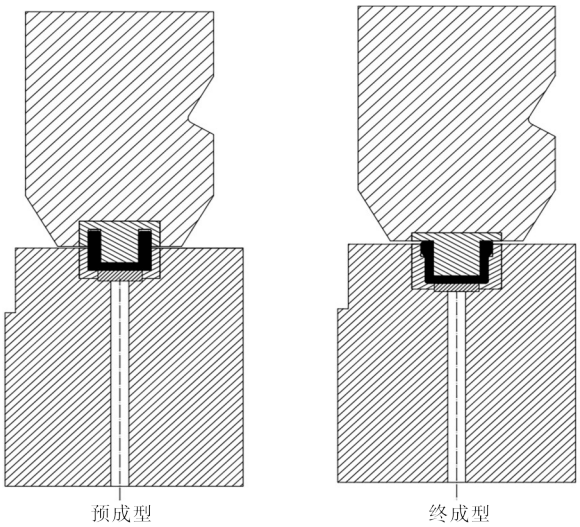


图8 各单工序模具示意图

Figure 8 Schematic diagram of each single station

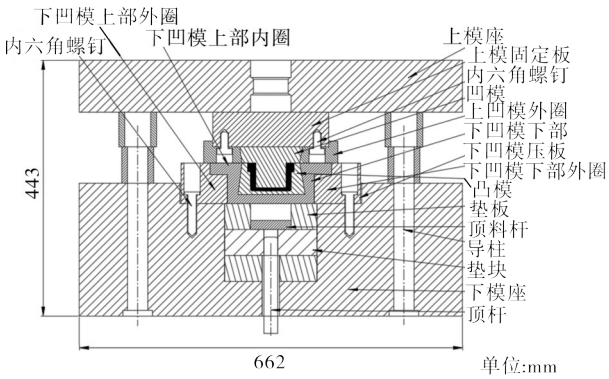


图9 冷锻成形模具装配示意图

Figure 9 Cold forging die assembly diagram

4 球形垫片锻件试制

通过上述模拟分析可知,该冷锻成形方案零件的成形质量良好,可用于实际生产验证。图10为冷锻制备的球形垫片。其中,锻件材料为45号钢,其经过调质处理至HRC28-32,且表面经过磷皂化处理。最终制备的球形垫片锻件成形完整,外观及内花键质量较好,符合仿真分析的结果,经过检测未发现裂纹、划伤等缺陷,且尺寸精度高,性能满足使用要求。试制件的具体性能表现:力学方面,抗拉强度(σ_b)≥600 MPa、屈服强度(σ_s)≥355 MPa,未热处理状态下硬度≤229 HB,退火状态下硬度≤197 HB,调质处理后硬度可根据需求调整至200—250 HB;塑性方面,延伸率(δ)≥16%,断面收缩率(ψ)≥40%,冲击功≥39 J,冲击韧性值≥49 J·cm^{-2}。该试验验证了工艺的可靠性,并表明通过该工艺的应用可以有效减少成形工序,在抑制充不满、开裂和折叠等缺陷的同时,提升球形垫片的生产效率和质量稳定性。

图10 球形垫片锻件

Figure 10 Spherical washer forging

5 结论

本研究针对球形垫片的结构复杂性,以缺陷抑制和减少工序为研究导向,设计了预锻和终锻两工序冷锻成形方案。

(1)在预成形过程中,采用了预锻成形类筒形件结构,内壁在花键处提前聚料,为后续成形提供了良好的金属流动基础。在终成形阶段,通过精确设计模具结构,控制了金属流向,保证了成形端部平台和花键结构的成形质量。该设计有效避免了由于金属流动不均匀导致的充填不良问题,确保了锻件各部分的完整性和结构稳定性。

(2)通过有限元模拟分析,验证了该冷锻成形方案在金属流动过程中的优势。模拟结果表明,金属流动能够精确地填满模腔,并有效避免了飞边过多产生。在复杂形状的成形过程中,能够抑制由于形状复杂而导致的表面开裂、充不满和折叠等缺陷的出现。该方案为球形垫片的成形工艺提供了设计思路。

(3)根据模拟分析结果,进行了球形垫片的试制工作。试制过程中,采用了与模拟相一致的工艺参数,试制结果表明,所生产的零件质量良好,表面光洁,尺寸精度控制在公差范围内。通过对试制件的检测与分析,进一步验证了该冷锻工艺的可靠性与可行性,证明了该工艺在实际生产中的适用性。

参考文献:

[1] 田亚丁,刘德波.基于有限元分析的汽车用大法兰螺母冷镦成形技术[J].锻压技术,2023,48(10):31-37.

[2] 陈凌翔,李月超.汽车六角球头冷锻工艺优化与数值仿真[J].材料科学与工艺,2020,28(5):75-82.

[3] 徐祥龙.冷、温锻造在中国的发展(上)[J].锻造与冲压,2020(9):20-30.

[4] 丛兵兵,孔明,张弘斌,等.马车螺栓冷镦成形有限元模拟及模具设计[J].塑性工程学报,2022,29(2):76-81.

[5] 张志,武波涛,张国新,等.基于Deform-3D的汽车发动机十二角轴套多工位冷镦技术[J].锻压技术,2024,49(6):52-60.

[6] 郑鹏辉,关悦,许吉星,等.A286高温合金十二角法兰面螺栓多工位冷镦成形工艺[J].制造技术与机床,2022(7):45-50.

[7] 姜天亮,龚红英,赵小云,等. 基于DEFORM-3D的花键轴坯料结构尺寸优化设计[J]. 塑性工程学报,2020,27(6):111-115.
[8] 于玲,刘清文.基于有限元的法兰轴结构件塑性成形工艺分析[J].精密成形工程,2023,15(2):218-223.
[9] 杜昱青,陈学文,连婷婷,等.基于数值模拟的钢珠套螺杆多工位冷锻工艺优化[J].锻压技术,2020,45(9):22-28.
[10] 蔡铭泽.45号钢表面制备n-Al2O3/Ni-Co纳米复合电刷镀镀层及其性能研究[D].大连:大连交通大学,2024.
[11] 杜林,王堤鹤,庞启航,等.显微组织特征对20万立方米LNG储罐用9Ni钢屈强比的影响[J].金属热处理,2024,49(12):198-205.
[12] 辛选荣,刘汀,周滨.特深孔钢件冷挤压工艺[J].锻压技术,2005,30(1):51-53.
[13] 王涛,刘丹,刘百宣,等.摆线液压马达内花键输出轴冷锻成形工艺与模具研究[J].精密成形工程,2022,14(5):42-47.
[14] 毛建兴,咸志帆,王欣,等.孔挤压强化对GH4169孔结构高温疲劳裂纹扩展行为影响研究[J].推进技术,2024,45(9):184-193.
[15] 李洪伟,雷学林,张成成,等.GH4169高温合金孔结构的多级凸包旋转冷扩孔挤压强化工艺参数优化[J].航空学报,2024,45(16):282-293.
[16] 陈小梅,黄惠.基于浮动下模的车用小型套管冷挤压工艺[J].锻压技术,2023,48(10):116-122.
[17] 王晓伟.基于有限元分析的汽车十二角半轴螺母冷镦工艺开发与应用[J].塑性工程学报,2023,30(7):62-70.
[18] LANDRE J,PERTENCE A,CETLIN P R,et al. On the utilisation of ductile fracture criteria in cold forging [J]. Finite Elements in Analysis and Design,2003,39(3):175-186.
[19] 王团辉,王凤仁.套筒件冷挤压成形工艺分析及模具设计[J].模具制造,2024,24(11):219-221.
[20] 黄山谷捷股份有限公司.模具及基于该模具的冷锻工艺:CN202311060650.0[P]. 2023-11-07.

Research on the Precision Forming Process of Spherical Washers in Cold Forging Based on Finite Element Analysis

SHI Huoshou[1],HE Huaizhong[2],CHEN Runhua[3,4*],TAO Huimin[4]

(1. Ningbo Xingfeng Machinery Manufacturing Co., Ltd., Ningbo 315500, China; 2. Ningbo Dongchuan Swimming Pool Equipment Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 3. School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. College of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

Abstract: With the development of industries such as transportation and aerospace, the demand for higher quality and reliability of fasteners has increased. Spherical washers, as key fasteners, are widely used in machinery, pipelines, and valve equipment, where their quality directly affects the safety and reliability of the equipment. Cold forging, due to its room temperature forming characteristics, has become the ideal method for producing spherical washers. This paper aims to design and optimize the cold forging process by using finite element simulation techniques to predict and resolve potential defects in production, thereby improving production efficiency, reducing costs, and ensuring product quality. This paper first employs Deform-3D finite element software to simulate the cold forging process of spherical washers. Through simulations, potential issues such as uneven metal flow, poor filling, and surface cracking are identified and addressed. To ensure product quality, a two-stage cold forging process consisting of pre-forging and final forging is designed. In the pre-forging stage, a cylindrical structure is formed to provide metal accumulation for the complex internal spline areas, ensuring smooth subsequent forming. The final forging stage uses precise die design to control metal flow, ensuring accurate formation of the end surfaces and splines of the forged part. Simulation results show that the metal can uniformly fill the die cavity, effectively preventing excessive flash and mitigating defects such as insufficient filling and folding. This process design significantly improves the forming precision of spherical washers, reduces mold development and testing costs, and lowers R&D expenses, providing reliable data support for actual production. In the trial production, the process parameters consistent with the simulation were applied, and the produced spherical washer components were of good quality, with smooth surfaces, no cracks, and dimensional accuracy within tolerance, confirming the feasibility of the process design. This paper offers an effective cold forging process for high-quality production of spherical washers, while optimizing the forming process through finite element simulation, reducing production costs and R&D risks. The methodology provides important references for the manufacture of other complex structural parts.

Keywords: spherical washer; cold forging; finite element analysis; Deform-3D; metal flow law; process design; mold design; defect control