基于数值模拟的轮毂锻造工艺优化设计

赵焕玲[1]，吴景超[1]，杨宁[2]
1.贵州职业技术学院　贵州贵阳　550023
2.贵州大学机械工程学院　贵州贵阳　550000

摘要：基于数值模拟的金属加工在提高加工效率和成品质量方面具有重要作用。以41Cr4合金钢轮毂锻造工艺为研究对象，采用QForm仿真软件进行数值模拟，分析并优化锻造工艺。通过建立三维建模和锻造仿真模型，预测锻造过程中的金属流动、温度场分布和应力变化，为锻件的缺陷预测、晶粒控制和组织优化提供依据。针对41Cr4轮毂生产过程中常见的缺陷问题，如充型不良、折叠和缩松，通过模拟分析和工艺参数优化，有效避免这些缺陷，提升成品质量和材料利用率。此外，结合国际奥林匹克竞赛要求，提出多工序的锻造工艺方案，优化模具设计、工序安排和温度控制，确保锻造过程的高效性和可操作性。仿真验证结果表明：优化后的工艺能够满足零件图样技术条件和加工余量要求，具有较高的实践意义和推广价值。同时，通过研究，职业教育和普通高等教育可通过参与国际奥林匹克竞赛项目，提升人才培养的国际化视野，并发挥示范作用。

关键词：热锻；等体积加工；轮毂；QForm软件仿真；国际化人才培养

Optimization design of wheel hub forging process based on numerical simulation

ZHAO Huanling[1], WU Jingchao[1], YANG Ning[2]
1.Guizhou Vocational and Technical College, Guiyang 550023, Guizhou, China
2.School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550000, Guizhou, China

Abstract: Metal processing based on numerical simulation plays an important role in improving processing efficiency and finished product quality. This paper takes the forging process of 41Cr4 alloy steel wheel hub as the research object, and uses QForm simulation software for numerical simulation to analyze and optimize the forging process. The study first establishes a three-dimensional modeling and forging simulation model to predict the metal flow, temperature field distribution, and stress changes during the forging process, providing a basis for defect prediction, grain control, and microstructure optimization of forgings. In response to common defects in the production process of 41Cr4 wheels, such as poor filling, folding, and shrinkage, this article effectively avoids these defects through simulation analysis and process parameter optimization, improving the quality of finished products and material utilization. In addition, this papar proposes a multi-stage forging process plan based on the requirements of international Olympic competitions, optimizing mold design, process arrangement, and temperature control to ensure the efficiency and operability of the forging process. The simulation and verification results show that the optimized process can meet the requirements of the part drawing and the customer's machining allowance, and

基金项目：2024年校级青年项目——低空经济高质量发展背景下贵州机务维修专业人才培养路径研究（2024QN09）；贵州开放大学（贵州职业技术学院）教育基金。
第一作者：赵焕玲，研究生学历，工学硕士，副教授，主要研究方向为塑性成形技术，E-mail：zhao_zhl@163.com。
通信作者：杨宁，工程硕士，副教授，主要从事汽车零部件轻量化设计研究等，E-mail：1552293@qq.com。

has high practical significance and promotion value. Meanwhile, vocational education and general high education can enhance the international perspective of talent cultivation through this study and play a demonstrative role by participating in international Olympic competition projects.

Keywords: hot forging; equal volume processing; wheel hub; QForm software simulation; international talent cultivation

1 序言

锻造是一种利用模具和压力使金属塑性成形的工艺[1]，可生产高精度、高性能锻件。在汽车领域，41Cr4合金钢锻造轮毂能减轻重量、提升性能，但传统工艺存在不足。数值模拟技术（如QForm软件）能优化工艺参数、预测缺陷并提高材料利用率。国外在锻造仿真方面经验丰富，而国内对复杂零件多工序锻造的研究也在深入。本文以俄罗斯组织国际奥林匹克锻造竞赛任务为题材，针对41Cr4合金钢轮毂成形问题，设计多工序锻造工艺，通过QForm仿真分析金属流动、缺陷预测及参数优化，验证工艺合理性，为轮毂高效制造提供理论依据与实践参考，展示数值模拟在复杂零件成形中的应用价值。

2 41Cr4轮毂锻造成形工艺分析

41Cr4合金钢因其优异的力学性能和热加工特性，成为制造高性能轮毂的重要选择。依据ISO 683-2：2016《热处理钢、合金钢和易切削钢 第2部分：淬火和回火合金钢》要求，41Cr4合金钢的化学成分[2]见表1。这些成分赋予了材料良好的强度、韧性、耐磨性和耐蚀性，使其适用于高负荷和高应力的汽车轮毂制造。本设计使用QForm仿真软件表格函数类型材料进行仿真，为轮毂成形工艺优化提供了重要理论支撑。

表1 41Cr4合金钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	S	P
0.38～0.45	0.10～0.40	0.60～0.90	0.90～1.20	≤0.035	≤0.035

轮毂锻造需合理设计多工序工艺（下料、镦粗、预锻、终锻），图1所示为拟定轮毂锻造工艺规程[3]。下料确保毛坯质量；镦粗提高致密性并优化流线；预锻调整形状并减少缺陷；终锻精密成形以保证尺寸精度和组织性能。通过逐步优化，该工艺在满足高性能要求的同时减少材料浪费和缺陷。

轮毂锻造的关键在于缺陷控制，常见问题包括充型不良（坯料加热不足、模具设计缺陷或变形速度低）、折叠（金属流线紊乱）和缩松（冷却过快或应力未释放）。工艺优化可通过形变热处理和中温热处理改善材料性能。现代仿真技术（如QForm软件）结合CAD/SOLIDWORKS建模（见图2、图3），可精确模拟41Cr4轮毂锻造的金属流动、温度

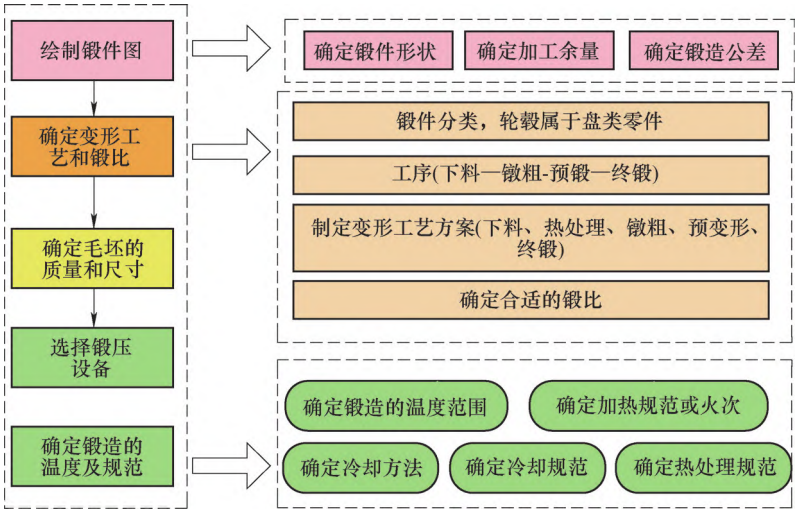


图1 拟定轮毂锻造工艺规程

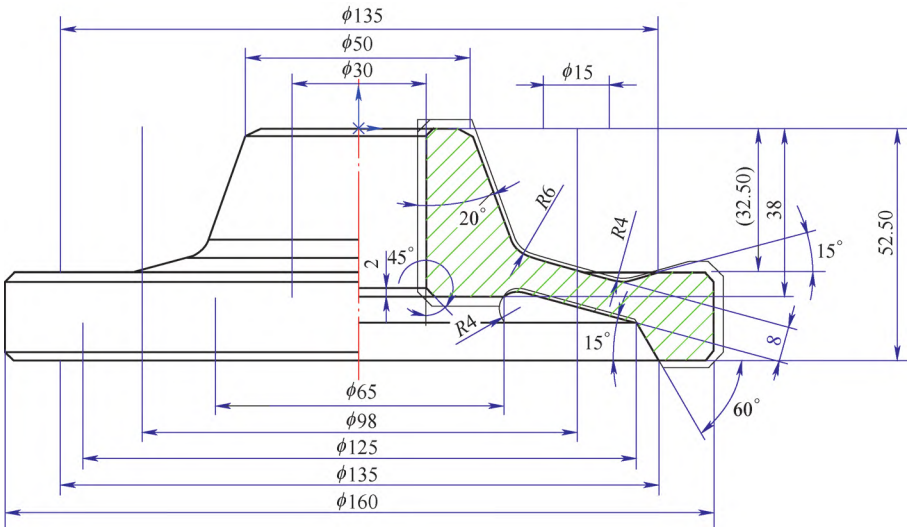


图2　CAD设计的轮毂零件结构

图3　SOLIDWORKS建模的三维零件模型

场及应力分布，识别缺陷风险并优化变形温度、应变速率等参数，从而提升锻件的力学性能和尺寸精度。

综合而言，41Cr4合金钢轮毂锻造工艺的优化能显著提升锻件性能和使用寿命，为批量化生产提供技术支撑。通过明确关键控制点并采取改进措施，结合数值仿真技术优化工艺参数，有效提高了制造精度与效率，不仅可以提升轮毂锻件的综合性能和使用寿命，同时为高性能锻件的批量化生产提供了技术保障。该研究推动了轮毂锻造工艺向高精度、高效化方向发展，具有重要的工程应用价值。

3　多工序锻造工艺方案设计

多工序锻造工艺方案设计的关键在于合理规划锻造过程的各个环节，以确保锻件的成形质量和生产效率。本设计从工艺分析、工序设计、分模面设计、飞边槽设计、拔模斜度与圆角设计，以及加热温度控制等方面进行了详细阐述[4]。

3.1　工艺路线设计

工艺路线的设计是锻造过程中的重要步骤，其合理性直接影响产品质量和生产成本。本设计选择近净成形工艺，旨在提高生产效率并减少材料浪费。考虑到轮毂上下不对称的特征，ϕ15mm孔的加工将在后续步骤中完成，而毂缘设计采用飞边槽形式，以排除多余废料和缺陷。

具体工艺路线如下。

1）查询材料的力学性能（屈服强度、抗拉强度等），为成形工艺设计提供依据。

2）绘制零件的二维平面图（见图2）并进行三维建模（见图3），作为模具设计与工艺参数设定的基础。

3）根据材料特性和零件形状选择合适的锻造成形工艺（见图1）。

4）确定毛坯的尺寸和形状（见图4），确保在锻造过程中充分变形。

5）选择合理的工艺参数，如锻造温度、变形速度等（QForm仿真软件材料库中可查到）。

6）利用计算机模拟技术确定锻件成形所需的压力，并选择合适的锻造设备。

7）通过有限元仿真技术分析模具型腔内金属流动的状态，预测可能产生的缺陷并优化设计。

8）使用有限元分析软件模拟模具的应力场和应变场，优化模具设计。

这些步骤的精确设计和计算为锻造过程的高效进行和锻件质量的稳定提供保障。

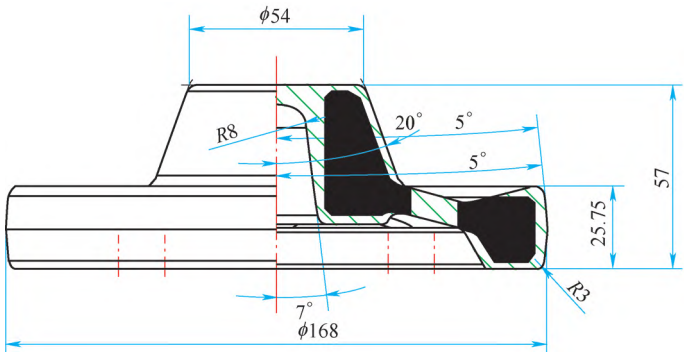


图4　锻件毛坯外形尺寸（黑色部分为零件）

3.2　锻件复杂程度分析

锻件的复杂程度直接影响模具设计的难易程度和生产过程的稳定性。锻件形状的复杂程度通常通过形状复杂系数来衡量，该系数定义为锻件体积与其外轮廓包容体积之比。复杂系数越大，说明锻件的形状越复杂，对模具的要求也就越高。通过计算得到的复杂系数表明，轮毂锻件属于“二级复杂”类别[1]，即形状较为简单，模具设计相对容易，金属流动较为顺畅。因此，能够通过标准模具和常规的锻造工艺进行高效生产。

具体的复杂系数计算公式为

$$s=\frac{V_{锻件}}{V_{包容体}}$$

式中　s——锻件复杂系数；

$V_{锻件}$——锻件的体积（cm^3）；

$V_{包容体}$——外轮廓包容体的体积（cm^3）。

通过复杂系数计算公式计算得出的复杂系数为锻件形状设计提供了理论依据，也为模具设计提供了参考。

3.3　分模面设计

分模面设计是模锻工艺中关键的环节。理想的分模面应平行于零件的主要流动方向，以减少金属流动的复杂性，并便于脱模。设计选择最大投影面作为分模面，采用径向分模方式（见图5），可减少模具复杂性，确保金属流动平稳。

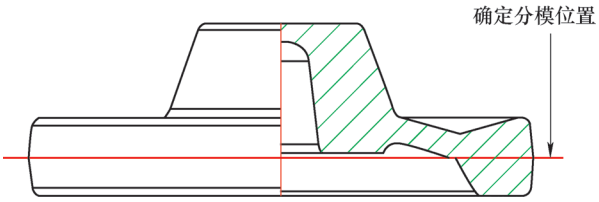


图5　锻件分模面设计

3.4　模锻工序设计

模锻工序的合理安排对锻件质量至关重要。模锻工序分为制坯工序和模锻工序。制坯工序通过镦粗处理初步形成锻件的基本形状，模锻工序包括预锻和终锻，确保零件达到最终的形状和尺寸要求。锻件的模锻工序流程如图6所示。

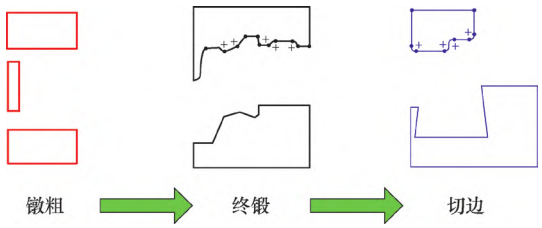


图6　锻件的模锻工序流程

3.5　脱模斜度与圆角设计

脱模斜度和圆角设计对锻件的脱模效果和模具寿命起着重要作用。合理的脱模斜度设计能够降低模具磨损，减少锻件成形缺陷。首先，确定机械加工余量和锻件公差范围，依据标准查询得知本设计锻件总质量为3.448kg。锻件的表面粗糙度要求为Ra=6.3μm，形状复杂系数为s_2。锻件长度尺寸公差选取为－0.8～1.7mm（见图7），脱模斜度和圆角半

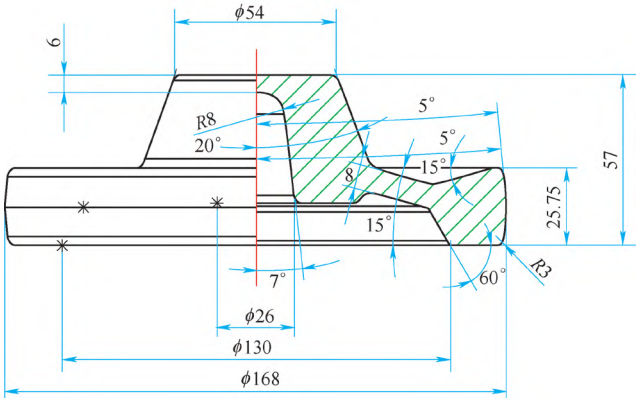


图7　锻件拔模斜度和圆角设计

径均依据形状复杂程度以及模具受力特点设计。本设计依据标准规划脱模斜度和圆角半径，确保锻件顺利脱模，并提高模具使用寿命。

3.6 飞边槽设计

飞边槽作用主要是造成足够大的阻力，使得型腔得以充满，容纳多余金属及缓冲锤打击。目前飞边槽设计有3种结构尺寸，根据轮毂形状的不对称性，本设计采用桥部和仓部结构的飞边槽结构形式（见图8），桥部设在上模块，因受热小，不易磨损或压坍，可减少锻造过程中金属的积聚和模具受热的影响。

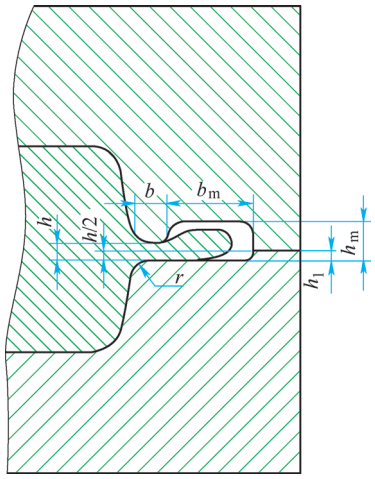


图8 锻件终锻飞边槽设计

3.7 加热温度设计

加热温度直接影响锻件的塑性和变形性能。选用41Cr4合金钢，初段锻造温度设置为1250℃，终锻温度为700℃。在此温度范围内材料具有最佳塑性，可降低变形阻力，提高锻件成形质量。

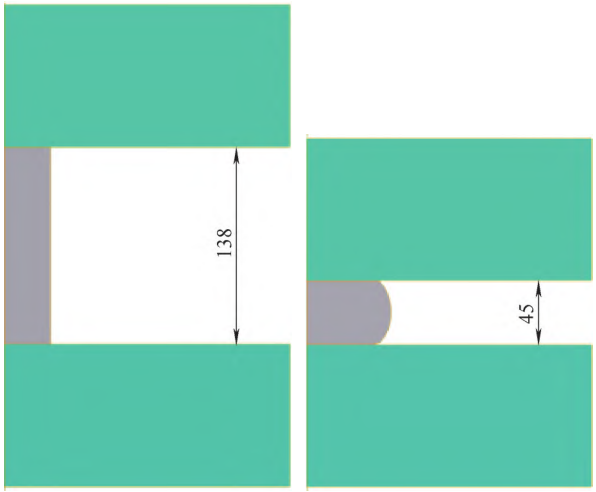
以上设计步骤和公式来源自参考文献[1]。通过上述多工序锻造工艺方案设计的分析，可以看出，合理的工艺路线设计、精准的模具设计及严格的工艺参数控制是确保锻件成形质量的关键。

4 模拟与仿真过程

在锻造工艺的模拟与仿真过程中，QForm软件可提供详细的金属成形过程分析和优化设计的解决方案。

4.1 几何模型输入与前处理

QForm软件不具备三维建模功能，用户可通过兼容CAD系统生成三维模型并导入IGES或STEP文件，进行表面封闭的输入。进行有限元网格划分和精确定位，确保凸模、毛坯和凹模的正确位置。尤其在轮毂锻造工艺中，模型的准确性对模拟结果至关重要。通过合理命名各部分并保存为SHL格式，用户可以确保模拟的准确性[5]，图9所示为自由锻阶段镦粗模拟前后的高度对比，可反映不同工艺设置对工件尺寸的影响。

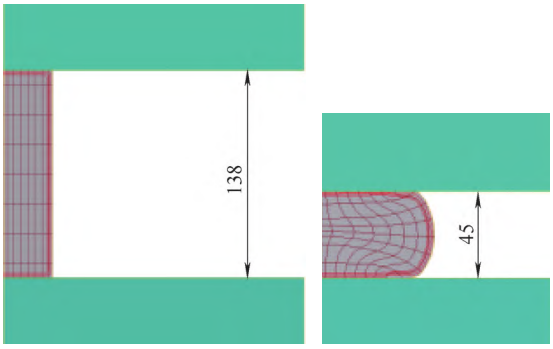


a）镦粗前高度　　b）镦粗后高度

图9 自由锻阶段镦粗前后高度对比

4.2 模拟参数设置

在模拟参数设置阶段，需要选择合适的工艺类型（如冷锻、热锻或温锻等），并根据工艺要求设定设备类型、工艺参数、材料选择、温度设定及润滑剂类型[6]。在轮毂锻造过程中，适当的模拟温度和润滑剂类型至关重要，因为这直接影响到金属流动和成形质量。模具材料的选择和模具温度设定也是确保工件质量的关键[7]。图10所示为自由锻镦粗前后流线分布情况，以帮助分析不同参数设置对金属流动的影响。

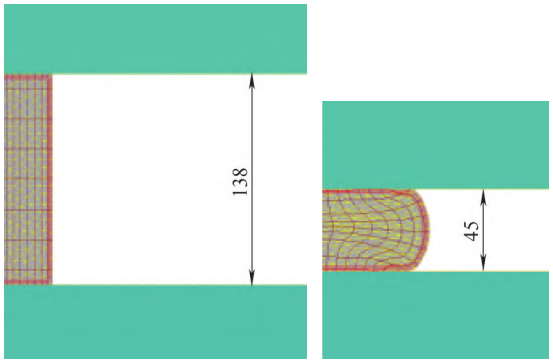


a）镦粗前流线分布　　b）镦粗后流线分布

图10 自由锻阶段镦粗前后流线分布情况对比

4.3 模拟运行

模拟运行阶段是QForm软件的核心功能之一。在这一阶段，QForm软件利用有限元法进行计算，模拟时间根据模型和问题的复杂而异。模拟完成后，软件自动输出多个关键参数包括有限元网格划分、应力、温度场和金属流动等[8]。这些输出数据对于进一步优化轮毂锻造工艺至关重要，特别是分析模具与工件的接触、金属填充型腔以及变形温度分布方面。图11所示为自由锻镦粗阶段的有限元网格分布，可帮助分析在镦粗过程中不同区域的应力分布与温度场变化，从而为工艺改进提供数据支持。



a）镦粗前有限元网格分布　　b）镦粗后有限元网格分布

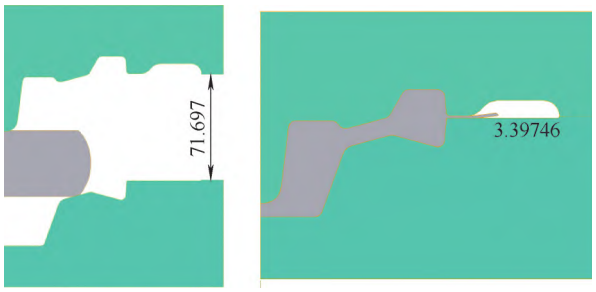
图11　自由锻阶段镦粗前后有限元网格分布情况对比

4.4 后处理与结果分析

模拟完成后，QForm软件提供丰富的后处理分析工具，可以查看模拟并深入分析模拟结果。通过分析工件的变形形状、有效应变、流动应力及速度大小等数据，能够深入了解金属在锻造过程中流动与变形，从而为优化工艺提供依据。

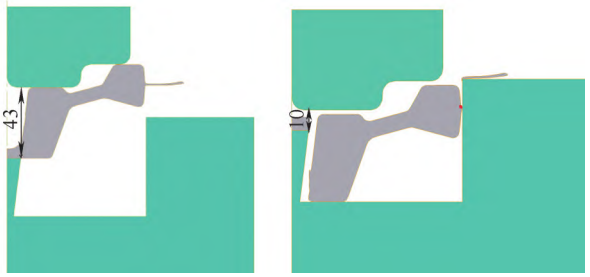
4.5 模具与工件比对分析

QForm软件通过模拟与实际工件的比对，可帮助识别模具设计中的不对称性及填充过程中出现的理想与非理想状态。在轮毂锻造过程中，模具设计的优化对于确保理想充型至关重要。图12所示为工件模锻预锻与终锻结果对比，图13所示为工件中心冲孔与飞边剪切模拟结果，为优化模具设计和工艺参数提供宝贵的数据支持。从图13可看出，工件外边缘有折叠迹象。这是因为41Cr4合金钢在950～1100℃区间存在动态再结晶临界应变（约0.6），应变分布不均时易引发流动失稳及氧化皮残留，使表层摩擦系数增加40%～60%，从而促进折叠萌生。



a）预锻　　b）终锻

图12　工件模锻预锻与终锻结果对比



a）中心冲孔　　b）飞边剪切

图13　工件中心冲孔与飞边剪切模拟结果

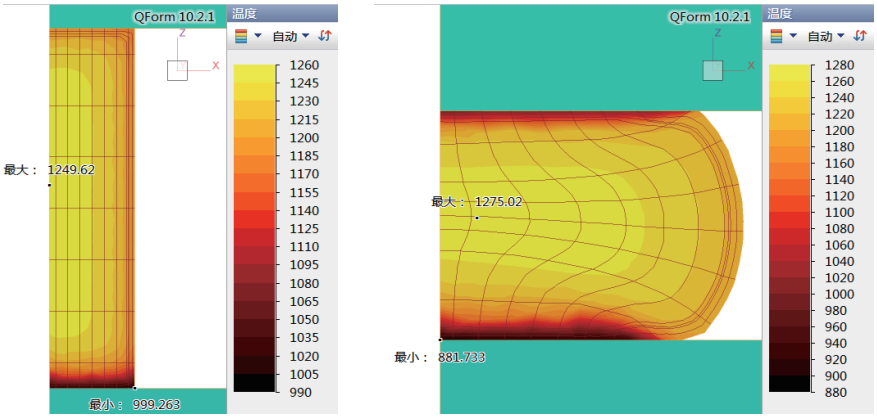
4.6 温度场、流线与应力应变分析

温度场分析对锻造过程至关重要，直接影响金属的流动性和力学性能。QForm的温度场模拟可优化锻造温度，避免金属过热或过冷。在轮毂锻造中，监控温度场和应力场变化对保证材料性能尤为关键[9]。图14所示为自由锻镦粗阶段的温度场模拟对比。成形后工件温度大多维持在1240～1280℃，为评估金属变形特性提供了重要参考依据。

图15所示为模锻工序始锻与终锻的温度场分布对比。终锻后工件内部温度稳定在1200℃左右，确保了成形质量。图16所示为终锻工件中心冲孔与飞边剪切工序的温度分布。从图16可看出，加工区域温度均保持在1050℃左右，为后续成形工序创造了有利条件。

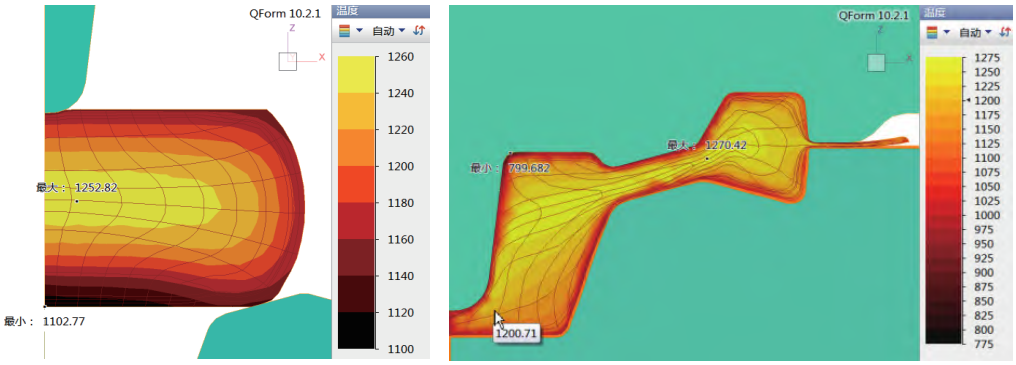
图17所示为工件金属流线和表面流线的分布特征，通过数值仿真可准确预测成形过程中金属流动情况。从图17可看出，金属完全充满模具型腔，流线分布均匀连续，未出现异常流动或折叠缺陷。

图18所示为终锻工件成形的应力、应变场的分布。从图18可看出，应力分布整体均匀，内孔底部出现1225MPa最大应力值，处于模具材料的许用应力范围内。工件锻造的有效应变分布均匀，但在飞边靠近工件最大外圆处材料变形流动加剧，易引发



a）镦粗前温度场分布　　b）镦粗后温度场分布

图14　自由锻镦粗阶段温度场模拟对比



a）始锻　　b）终锻

图15　工件始锻与终锻温度场模拟对比

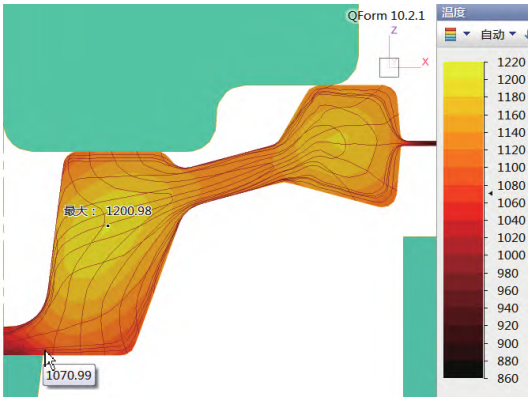
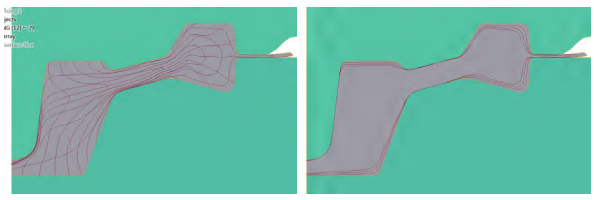
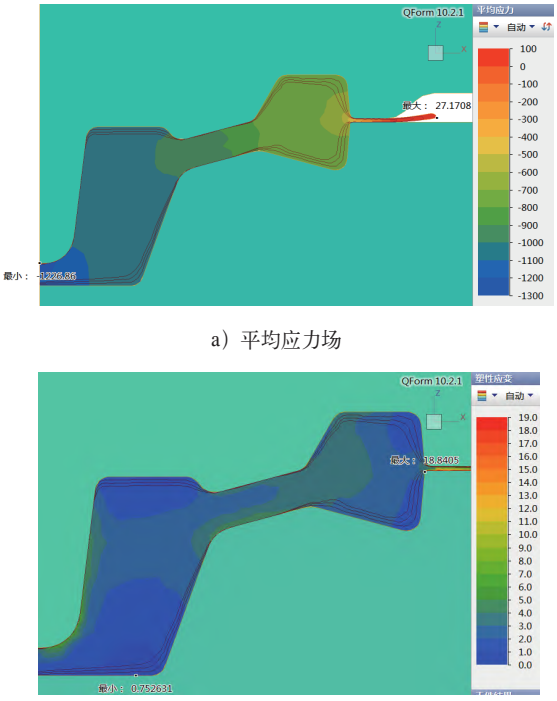


图16　工件准备中心冲孔与飞边剪切工序的温度分布



a）金属流线　　b）表面流线

图17　工件金属流线与表面流线分布



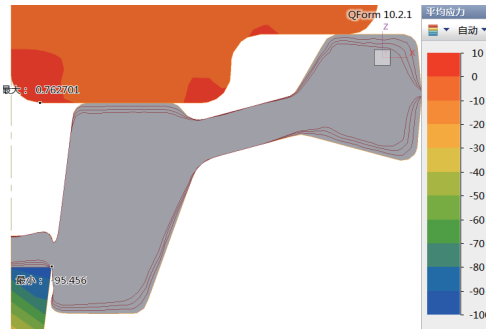
a）平均应力场

b）塑形应变场

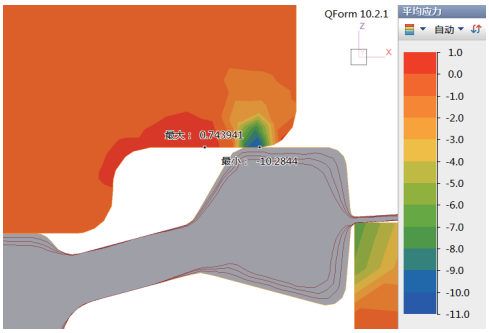
图18　终锻工件成形应力、应变场

表面拉裂缺陷，因此表面该区域凹模倒圆角设计需优化。

图19所示为模具中心冲孔修边应力场前后对比，其最大值约为 95MPa，在模具材料的许用应力范围内，坯料形状对尺寸有重要的影响（坯料直径/截面匹配度、高径比优化等）。



a）中心冲孔过程应力图



b）零件切边前应力图

图19　模具中心冲孔修边应力场前后对比

4.7　预期优化展望

QForm软件的数值模拟功能为锻造工艺提供了有效手段，可显著提升产品质量并降低生产成本。在轮毂锻造中，QForm通过对温度、应力-应变场的精确模拟，能够准确预测成形缺陷，并指导工艺参数调整和模具结构改进。数值模拟不仅优化了材料利用率，还提高了生产效率和产品一致性。分析表明，模具圆角半径、中心孔结构及飞边体积仍存在进一步优化的空间。

5　结束语

本文基于对41Cr4合金钢轮毂锻造工艺的数值模拟和优化设计，通过QForm软件建立完整的锻造过程仿真模型，重点分析了金属流动特性、温度场演变规律和应力应变分布特征，解决传统锻造工件中存在充型不良、折叠和缩松等缺陷等。通过对工艺流程的详细分析与仿真验证，本研究优化了锻造工艺的各项参数，包括变形温度、应变速率、模具设计等，确保锻造过程的高效性和锻件的高质量。研究表明，采用QForm软件对轮毂锻造过程进行数值仿真，不仅能够准确预测金属流动和成形过程中的潜在缺陷，还能通过优化工艺参数来显著提高金属材料的利用率，减少材料浪费，并有效延长模具的使用寿命。通过合理选择预锻与终锻的二次成形工艺方案，成功优化了锻造过程，确保充型完整、金属流线顺畅，并最终获得满足设计要求的轮毂成品。此外，本文还通过竞赛平台提供的软件，对相关教师和学生进行实践培训，使其熟练掌握SOLIDWORKS建模技术和QForm软件的使用，提升锻造工艺与模具设计的实际操作能力。本研究可为特种合金轮毂的精密锻造提供技术支持和应用上的借鉴，助力锻压技术进步和应用型人才培养。

参考文献：

[1] 夏巨谌. 金属塑性成形工艺及模具设计[M]. 北京：机械工业出版社，2017.

[2] 张永裕，李维钺，李军. 中外钢牌号速查手册[M]. 北京：机械工业出版社，2019.

[3] 于文强，陈宗民. 金属材料及工艺[M]. 北京：北京大学出版社，2020.

[4] 薛克敏，孙风成，张容，等. 多楔轮轮毂冲锻成形工艺及影响因素研究[J]. 塑性工程学报，2023，30（5）：12-20.

[5] 杨宁. QForm自定义材料库的建立及冷成形三维建模方法研究[D]. 贵州：贵州大学，2008.

[6] 陈勇良. 某型号轮毂热锻成形工艺有限元分析[J]. 锻压装备与制造技术，2023，58（5）：111-114.

[7] 唐婷，张頔，王立新，等. 基于数值模拟的灰铸铁上转盘砂型铸造工艺优化[J]. 金属加工（热加工），2024（11）：119-123，127.

[8] 余永新，肖代红，周鹏飞，等. 等温复合锻造工艺对2A14铝合金轮毂组织与力学性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程，2019，24（1）：45-51.

[9] 王晓伟，李洪光，孙谱，等. 一种盘式铝合金汽车轮毂锻造工艺设计及锻件组织力学性能分析[J]. 塑性工程学报，2023，30（7）：55-61.

（收稿日期：20250207）