

汽车转向节差压铸造及淬火过程应力应变场数值模拟

田运灿, 何 博, 潘宇飞

(上海工程技术大学高温合金精密成型研究中心, 材料工程学院, 上海 201600)

摘要: 针对汽车转向节结构复杂、制造困难以及实际生产工艺设计过程中很难做到对应力应变的定量分析的问题, 采用ProCAST软件进行数值模拟, 并通过实测温度与数值模拟结果对比, 验证了温度场计算的准确性。采用热力耦合的数值模拟方法, 对汽车转向节差压铸造-空冷-淬火过程进行动态数值模拟, 得到了铸件的温度/应力/应变的动态变化及分布规律。采用蓝光扫描仪对汽车转向节铸件的轮廓进行测定, 利用Geomagic Control拟合软件对铸件实际变形进行分析。数值模拟与实测得到铸件的最大变形量分别为2.85 mm和3.25 mm, 铸件变形分布规律基本一致。本研究为避免汽车转向节铸件出现大的残余应力区、预设反变形量、改善铸造工艺提供了量化参考依据。

关键词: 差压铸造; 淬火; 应力应变; 数值模拟; 蓝光扫描

作者简介:

田运灿(1993-), 男, 硕士生, 主要从事高温合金精密铸造成形的研究。

E-mail: tianyc@sues.edu.cn

通讯作者:

何 博, 男, 博士, 副教授。E-mail: hebo_sues@foxmail.com

中图分类号: TG249.9-39

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)12-1374-08

基金项目:

上海市科委“创新行动计划”基础研究项目(17JC1400600, 17JC1400603); 上海工程技术大学特聘教授岗位计划资助项目, 工信部绿色再制造项目“先进涡轮增压发动机热端部件绿色关键工艺系统集成”

收稿日期:

2019-08-15 收到初稿,

2019-09-24 收到修订稿。

转向节是汽车转向桥上的主要零件之一, 转向节的功用是承受汽车前部载荷, 支承并带动前轮绕主销转动而使汽车转向^[1-2]。在汽车行驶状态下, 它承受着多变的冲击载荷, 因此, 要求其具有很高的强度。汽车转向节铸造过程中的残余应力和变形对其强度和寿命有着至关重要的影响^[3]。为提高汽车使用的安全性, 对转向节铸造过程的控制显得尤为重要; 但是由于汽车转向节本身结构的复杂性、制造的困难性, 实际生产工艺设计过程中很难做到对应力应变的定量分析。随着计算机仿真技术的发展, 为铸件应力应变的定量分析提供了可能性^[1, 4-6]。

近年来, 国内外针对构件的应力应变问题, 进行了大量的数值模拟, 并在控制铸件尺寸精度、优化工艺参数方面起到了较大的作用。2006年, 英国诺丁汉大学的A. Yaghi^[7]等利用SOLVIA和ABAQUS软件对不同管径和管厚的不锈钢焊管的残余应力进行了数值模拟; 2007年, 来自美国伍斯特理工学院的Lei Zhang^[8]等采用基于有限点集法(FPM)的无网格凝固模型和基于弹性分析模型的无网格局部Petrov-Galerkin(MLPG)方法, 建立了一套完整的无网格热机械分析系统, 并应用该系统对结晶器内连铸坯的凝固过程和热应力进行了数值模拟; 2008年, 来自芬兰国家技术研究中心(VTT)的Kenneth Holmberg^[9]等利用有限元模型描述了包含涂层的锡基材料表面在金刚石球体作用下的弹性和塑性行为的应力和应变。在铸造领域, 1996年, 清华大学的柳百成^[10]等利用有限元软件对机床床身铸件的残余应力进行了数值模拟; 2000年, 东北大学的金珠梅^[11]等建立了熔池和轧辊混合区域的整体数学模型, 并利用该模型揭示了双辊法连续铸轧过程熔池内流场、凝固温度场及铸辊内温度场、热应力场的特点; 2012年, 瑞典延雪平大学的Jakob Olofsson^[12]等建立了基于微观组织的力学模型, 揭示了局部组织变化对铸铁构件力学性能的影响; 2016年, 哈尔滨工业大学的程卫鑫^[13]等利用ProCAST软件研究了ZL205A应力框不加控制条件的应力分布及变形规律。

虽然在铸件的应力应变方面进行了大量研究, 但由于铸造过程的影响因素较多, 对于复杂构件无法做到完整的定量分析。本研究针对差压铸造的铝合金汽车

转向节残余应力大、产生的变形大等问题, 尝试采用ProCAST铸造仿真软件, 对铸件铸造过程的应力应变场进行了数值模拟, 得到了其冷却过程中温度/应力/应变的动态变化及分布规律。同时采用热电偶测温的方法测定了模具特征位置的温度变化, 采用蓝光扫描仪对汽车转向节铸件的轮廓进行测定, 利用Geomagic Control拟合软件对铸件实际变形进行分析, 从而验证数值模拟结果, 为避免汽车转向节铸件出现大的残余应力区、改善铸造工艺提供了量化参考依据。

1 建立物理模型

1.1 生产过程分析

汽车转向节采用差压铸造技术制造, 具有致密度高、缺陷少、表面质量好、生产效率高等特点。铸件材料选用包头铝业生产的A356铝合金。

在汽车转向节的差压铸造过程中, 先将A356铝合金在坩埚中熔化并加热到700℃, 对熔融金属进行除气除杂, 700℃下静置一段时间后, 坩埚移置铸造机下方, 并上升与铸机形成完全封闭的系统。通过对熔体上表面施加一定的压力, 熔体沿着升液管充进模具腔体, 充型完毕后, 水冷系统开启, 铸件即开始凝固。系统将会保压一段时间, 以确保铸件在压力下凝固成形完毕, 随后卸压开模, 取出铸件, 铸件在空气中静置10s左右, 随后放入25℃冷水中淬火。铸造过程中下压室与上压室压差曲线见图1。

1.2 有限元模型

以中心孔类汽车转向节为研究对象, 针对实际生产过程, 建立了差压铸造模型。首先建立CAD三维模型, 然后对模型进行网格划分, 模型均采用四面体网格。

考虑到金属型模具的复杂性, 对模型中的排气孔、水冷管道以及分流锥等部位采用长度为0.2~

0.5 mm的网格, 其余部位采用1.5 mm的网格。铸造模具及铸件的有限元模型见图2。

1.3 材料热物性参数确定

汽车转向节实际生产过程中采用A356铝合金材料, ProCAST的材料库已给出了材料的各项热物性, 但由于这些性能数据库通常通过相图计算及拟合所得, 与材料的实际性能会有一定的差距。因此, 我们对材料的各项热物性进行了测试, 实际的测试过程参见文献[14]。根据测试结果, 实验用A356材料的液相线温度为608℃, 固相线温度为545℃, 其余各项热物性(包括密度、比热容、线膨胀系数、固相分数、热扩散系数、热导率等)均随温度的变化而变化。

1.4 边界条件处理

汽车转向节差压铸造模型的主要边界条件包括压力曲线、散热条件、以及开模后的淬火。本研究主要对这些边界条件做了如下处理:

(1) 以实际生产过程的压力曲线作为数值模拟用压力曲线, 见图1;

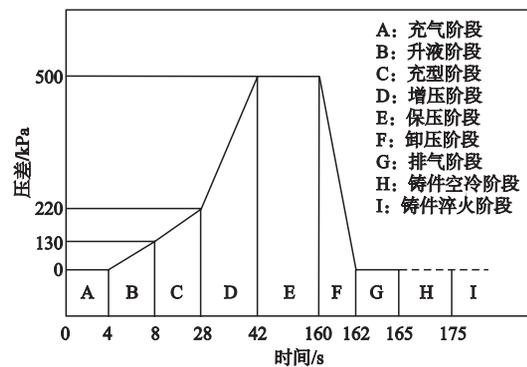


图1 差压铸造过程压差曲线

Fig. 1 Differential pressure curve in counter-pressure casting process

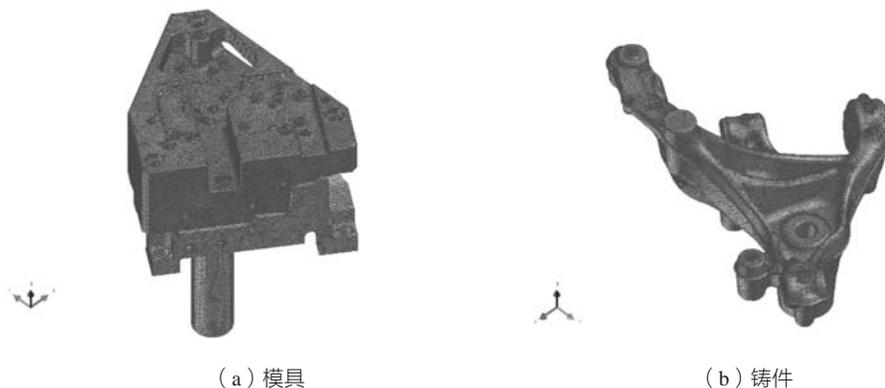


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element models

(2) 模具中设定了16条冷却管道的参数,并不定时开启,根据水流强度设置了不同的换热系数;

(3) 实际铸造过程中,模具在175 s时开模,铸件在空气中静置10 s左右后淬火,为了结合实际生产情况,利用ProCAST软件的mapping(映像)功能将铸造模型的温度场及应力应变场导入铸件淬火模型。

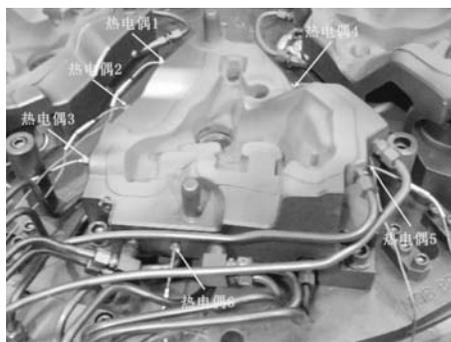
2 试验过程

2.1 温度场实测

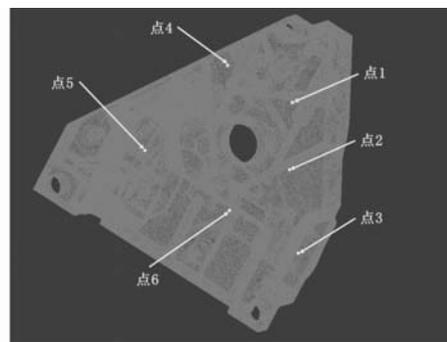
由于金属模具的局限性,很难对铸件内部的温度场进行测量,因此在模具的特征部位开设了六个热电偶孔,在保证模具不被破坏的情况下孔深尽量深,并

根据孔深定制了六根不同尺寸的热电偶,使之与模具上的热电偶孔最大程度配合。六根热电偶均进行了校核,误差范围均保证在1.5 °C以内。模具中六组热电偶的分布以及对应模型中测温点的分布如图3所示。

铸造过程中用热电偶每隔0.1 s测量一次模具温度,所有热电偶通过电缆连接到数据采集系统,数据采集系统由OM-DAQ-USB-2400测温模块和计算机组成。通过对数值模拟温度与实测温度进行对比后发现,实测温度比数值模拟温度要低7~26 °C,误差均控制在26 °C以内,主要是因为铠装热电偶与模具内部的测温表面间的接触热阻以及实际测量过程热电偶与测温模块间的铜制补偿线传输至测温模块存在的热阻所



(a) 模具热电偶分布



(b) 有限元模型测温点分布

图3 热电偶(测温点)分布

Fig. 3 Distribution of thermocouples (temperature measuring points)

致。温度曲线在数值和形状上的吻合度均已经能达到工程上定量预测的目的。

2.2 高温力学性能

材料的高温力学性能是验证工件变形和断裂的重要依据。当工件所受应力大于其屈服强度时铸件即可能发生形变,超过其抗拉强度时即可能产生断裂。本研究采用Zwick拉力试验机对试验所用母合金的屈服强度和抗拉强度进行测试。测试温度为25~350 °C,每个温度点测试三个数据。

2.3 蓝光扫描测试

采用蓝光扫描仪对铸件进行扫描,扫描仪镜头精度为17 μm,图4为蓝光扫描过程的示意图。通过机器人的摆动和工作台的转动调节扫描位置,利用蓝光扫描仪投射光线进行扫描,并将相邻位置上的扫描片体逐步拟合成一个完整的模型,最后利用Geomagic Control拟合软件将扫描模型与设计模型进行拟合,获得铸件的变形分布云图。

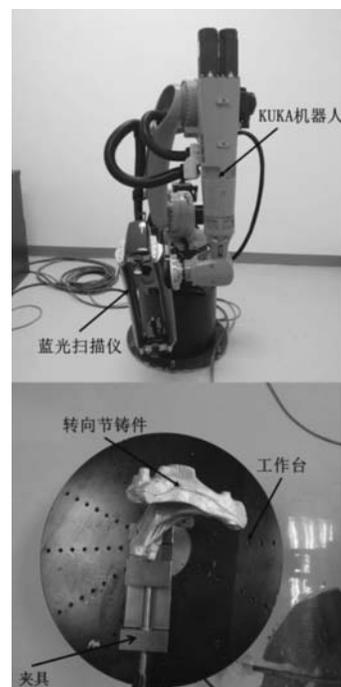


图4 蓝光扫描装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of blue light scanning device

3 应力应变仿真结果与分析

汽车转向节的应力应变主要发生如下两个阶段：

(1) 铸件在模具内的凝固过程中，水冷管道的不定时开启以及铸件及模具的结构特点，导致铸件各部位冷却收缩不均匀，从而产生了内应力及变形；

(2) 铸件从模具内取出后在空气中静置一段时间后进行水冷淬火，淬火过程中铸件表面温度急剧下降，内外温差大，热应力和组织应力都会增大，进而产生大量变形。

结合实际生产过程，以汽车转向节差压铸造工艺CAE为基础，在保证材料物性参数、边界条件及温度场准确的条件下，采用热-力耦合的热弹塑性模型，利用ProCAST软件分阶段对铸件铸造及淬火过程的应力应变进行了数值模拟。并利用蓝光扫描法测得铸件各部位最终的变形情况，与数值模拟结果进行了对比。

3.1 铸件应力场数值模拟与分析

3.1.1 残余应力分布

汽车转向节铸件结构复杂，由多处拉臂、侧耳、凸台和加强筋组成，造成了其应力场的复杂性。利用传统的试验方法很难对铸件应力场进行整体分析，这也就突出了数值模拟的重要性。图5为采用ProCAST软件计算得到的转向节铸件等效残余应力分布图。从图中可以看出，铸件的最大变形产生在薄壁加强筋部位，对应左侧色标可以发现，铸件残余应力值已经达到了140 MPa。图6为试验测得的本研究中所使用的A356铝合金的高温力学性能，铸件最大残余应力接近A356材料的抗拉强度，可能会在淬火过程中产生脆性断裂^[15]或在使用过程中产生疲劳断裂^[16]，因而需要采取去应力退火等有效措施消除残余应力。

3.1.2 应力产生规律分析

汽车转向节结构复杂且不规则，此处我们主要是对局部特征部位剖分后进行分析，以进一步分析铸造过程中铸件应力产生规律。图7为转向节拉臂XY剖面各点的应力变化情况，其中图7a为取点位置，图7b为整体应力变化，图7c、d、e为各阶段应力变化。

前文中提到，转向节的实际生产过程中共分为铸造（0~165 s）、空冷（165~175 s）和水冷淬火（175 s后）三个阶段，此处我们同样对三个阶段分段进行分析，三个阶段的应力变化曲线分别如图7c-e所示。从图中可以看出，在铸造阶段，铸件各点所受应力与保压压力、模具束缚及铸件各点的温度分布有关，数值模拟过程中铸件固相率为0.5时开始产生应力^[17]，由于保压压力的存在，初始阶段铸件各点均产生压应力并随着固相率的增大而逐渐增大；当固相率增加到1.0时，铸件的流动性减小，保压压力不能及时向上传输，铸

件内部热应力释放，各点压应力开始逐渐减小，应力的改变主要受冷却速度的影响，最终铸件表面D、E点表现为拉应力，内部A、B、C点表现为压应力。在开模阶段，失去了模具的束缚，各点应力均有所降低，空冷时由于冷却缓慢，应力无明显变化。在水冷淬火阶段，铸件表面表现为拉应力，中心位置表现为压应力，应力值均为先增大后减小。造成这种现象的主要原因是淬火过程中，铸件表面温度急剧下降，由于温度下降导致铸件收缩受到周围相对温度高的区域约束，导致拉应力增大；温度降低到一定程度后收缩倾向减小，拉应力降低。

为了进一步验证转向节生产过程中铸件应力的变化规律，本研究对铸件的不同部位进行剖分取点。考虑到铸件的厚度分布不均，上述图5中拉臂为转向节的厚大部位，接下来我们对拉臂附近的加强筋部位进行剖分。

由图8可知，在铸造及空冷阶段，铸件的应力与厚大的拉臂部位相似。在淬火阶段，虽然在刚开始时加强筋表面应力略有减小，但之后各点均呈现先增大后减小的趋势，这主要是因为加强筋表面除受其旁边各

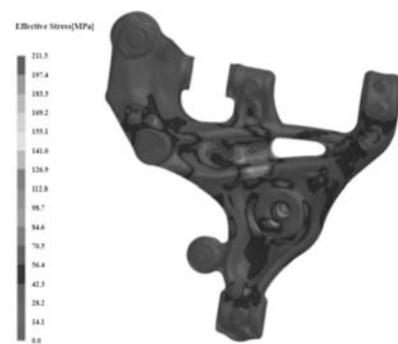


图5 铸件等效残余应力分布

Fig. 5 Equivalent residual stress distribution of casting

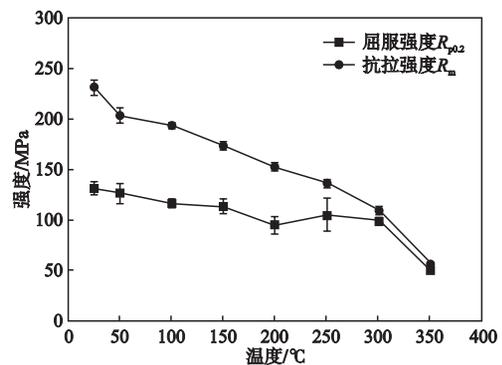


图6 A356铝合金高温力学性能

Fig. 6 High temperature mechanical properties of A356 aluminum alloy

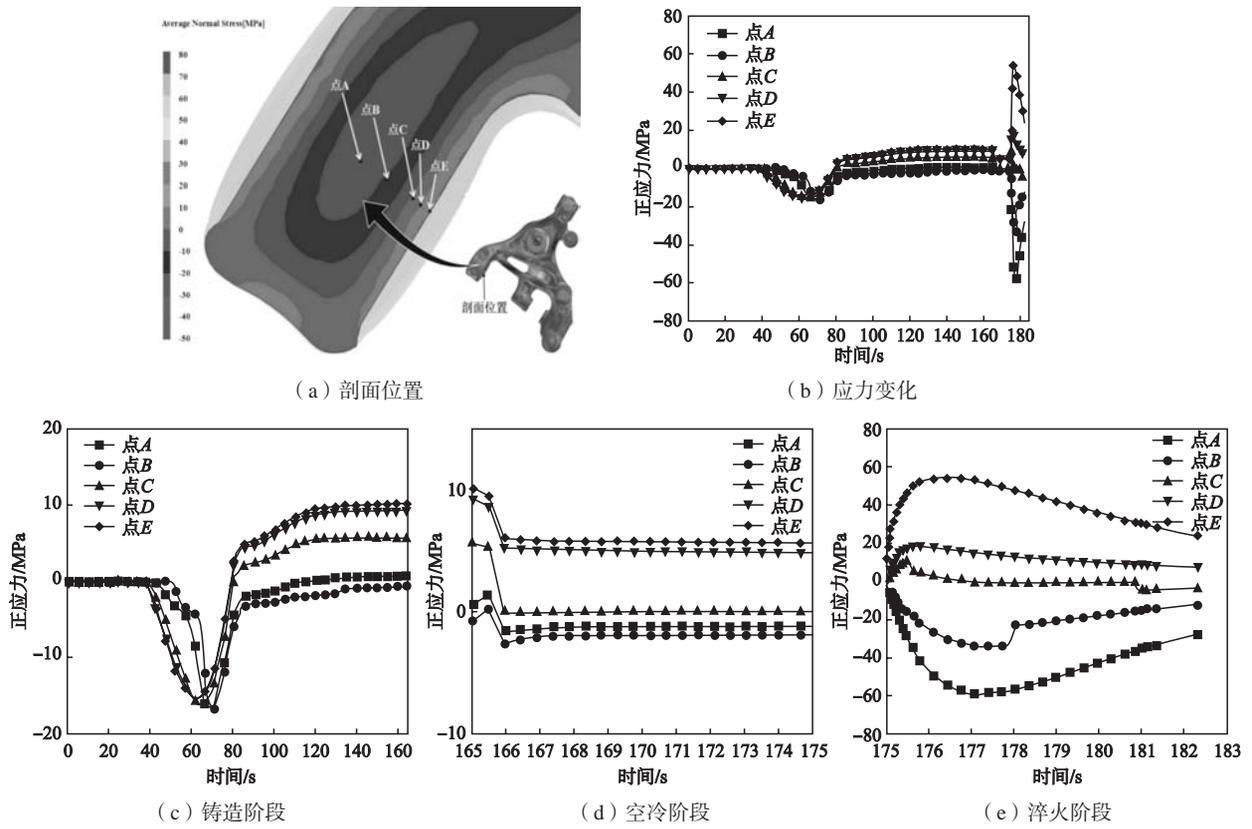


图7 拉臂部位正应力变化

Fig. 7 Normal stress changes at pull arm region

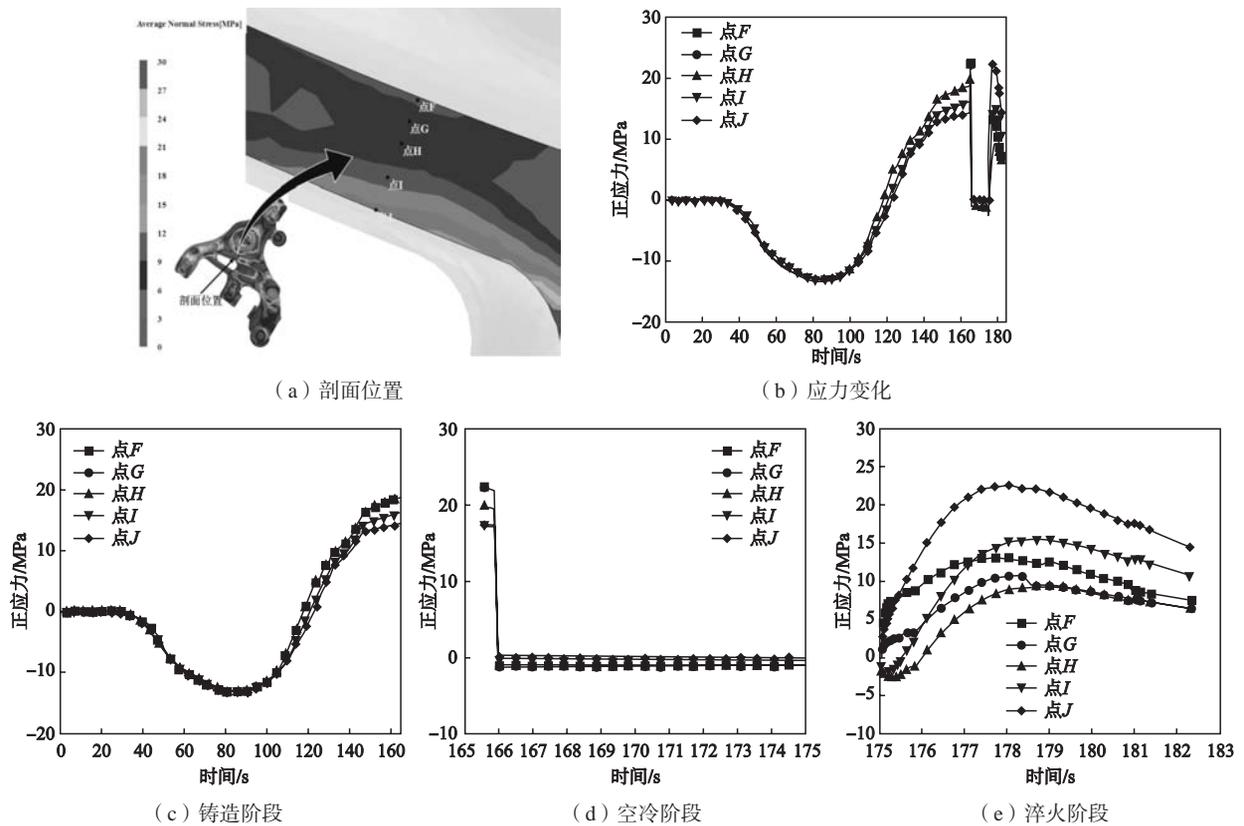


图8 加强筋部位正应力变化

Fig. 8 Normal stress changes at rib reinforcement region

点的束缚外，还受到临近位置厚大部位的影响，厚大部位冷却速度慢，温度相对较高，给予加强筋位置一定的拘束，导致加强筋各点应力逐渐增大。

3.2 铸件变形分析

铸造及淬火过程中的应力是铸件产生变形的主要原因。数值模拟软件主要是利用正交各向异性材料结构 EFG 法，在热应力分析过程中，首先要得到其温度场，然后计算热应变并结合机械力载荷进行应力分析^[18-19]。从图9铸件的最终应变分布情况可以看出，汽车转向节的最大变形量在3.25 mm左右，最大变形区域在转向节拉臂位置。

图10为蓝光扫描获得的铸件的变形分布云图。由图可知，蓝光扫描下铸件的变形位置同样在转向

节的拉臂位置，最大变形量在2.85 mm左右。

为了进一步验证数值模拟的准确性，本研究对沿Z轴上不同位置的XY剖面进行对比，如图11-12所示。其中图12i为剖面位置的分布，图12j为数值模拟云图对应色标，图11a-h为不同位置蓝光扫描下的XY剖面图，其中深色实线为设计模型的轮廓，黑色点迹为蓝光扫描模型的轮廓。为了更加直观的展示变形量，对铸件变形量进行5倍放大处理，图中绿色线为放大后蓝光扫描模型的轮廓线，图12k为根据轮廓测量X方向变形量的示意图，图12a-h为图11a-h对应XY剖面上X方向变形量数值模拟结果，图中往左为X正方向。对比数值模拟结果和实测结果可以发现，各剖面上铸件变形规律基本一致。因此，后续可根据各剖面的数值模拟结果对模具设置反变形量，改善铸件质量。

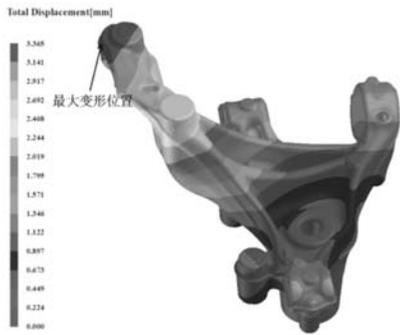


图9 汽车转向节变形分布云图（数值模拟）

Fig. 9 Cloud map of automobile steering knuckle deformation distribution (simulated)



图10 汽车转向节变形分布云图（实测）

Fig. 10 Cloud map of automobile steering knuckle deformation distribution (measured)

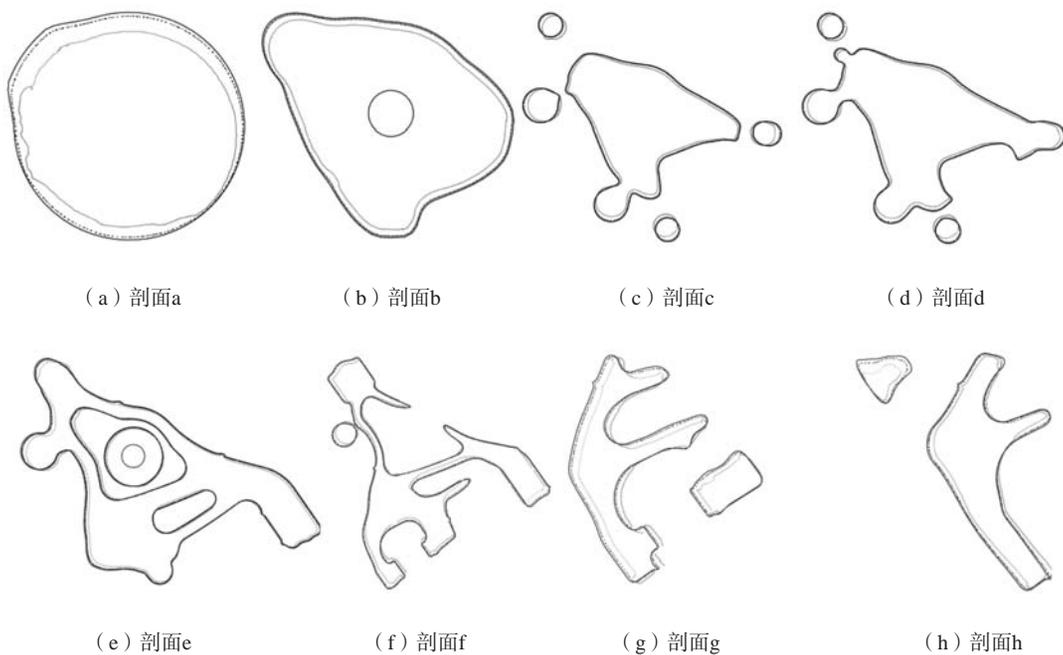


图11 XY剖面X方向变形量实测结果

Fig. 11 The measured results of deformation in X direction on X-Y section

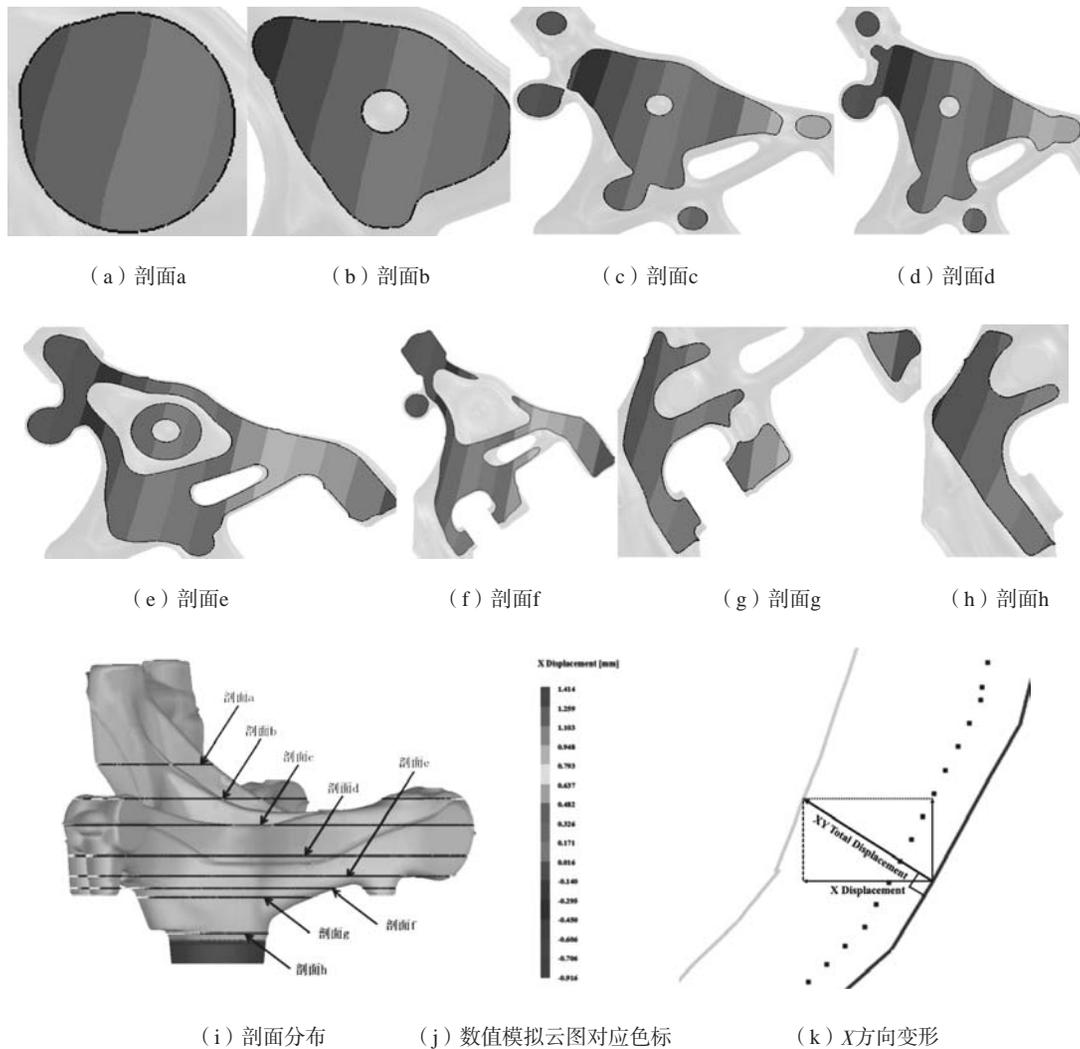


图12 XY剖面X方向变形量模拟结果

Fig. 12 The simulated results of deformation in X direction on X-Y section

4 结论

(1) 淬火后铸件表面的最大残余应力超过140 MPa, 接近铸件的屈服强度值, 应采取有效措施消除。

(2) 铸件厚大部位表面表现为拉应力, 自表面向内部拉应力逐渐降低, 直至表现为压应力, 铸件的应力分布主要受生产过程中铸件各部位温度变化不均的

影响。

(3) 铸件薄壁位置均表现为拉应力, 主要受淬火过程中周围厚大部位温度场的影响。

(4) 数值模拟与实测铸件的最大变形量分别为2.85 mm和3.25 mm, 变形分布规律基本一致。

(5) 数值模拟结果可为模具设计中的反变形量设置提供量化参考。

参考文献:

- [1] ZHOU J, LIN L, LUO Y. The multi-objective optimization design of a new closed extrusion forging technology for a steering knuckle with long rod and fork [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72 (9-12): 1219-1225.
- [2] 涂卫军, 王刚. 铝合金汽车转向节挤压铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (08): 740-743.
- [3] LIU Jinhai, XIONG Peng, FU Binguo, et al. Effects of austempering temperature on microstructure and surface residual stress of carbidic austempered ductile iron (CADI) grinding balls [J]. China Foundry, 2018, 15 (3): 173-181.
- [4] 赵会彬, 周同金, 冯微. K403镍基高温合金圆形平板铸件热裂倾向分析及解决措施 [J]. 铸造, 2017, 66 (6): 554-558.
- [5] 陈瑞, 许庆彦, 郭会廷, 等. Al-7Si-Mg铸造铝合金拉伸过程应力-应变曲线和力学性能的模拟 [J]. 铸造, 2016, 65 (8): 737-743.
- [6] JENÍK I, KUBÍK P, SEBEK F, et al. Sequential simulation and neural network in the stress-strain curve identification over the large

- strains using tensile test [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2017, 87 (6) : 1-17.
- [7] YAGHI A, HYDE T H, BECKER A A, et al. Residual stress simulation in thin and thick-walled stainless steel pipe welds including pipe diameter effects [J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2006, 83 (11) : 864-874.
- [8] ZHANG Lei, SHEN Houfa, RONG Yiming et al. Numerical simulation on solidification and thermal stress of continuous casting billet in mold based on meshless methods [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2007, 466 (1) : 71-78.
- [9] HOLMBERG K, RONKAINEN H, LAUKKANEN A, et al. Tribological analysis of TiN and DLC coated contacts by 3D FEM modelling and stress simulation [J]. *Wear*, 2008, 264 (9) : 877-884.
- [10] XIONG Shoumei, LIU Baicheng, ZHU Riming, et al. Numerical simulation and analysis of residual stress in machine tool bed casting [J]. *Tsinghua Science & Technology*, 1996, 1 (2) : 176-180.
- [11] 金珠梅, 赫冀成, 徐广. 双辊连续铸轧工艺中流场、温度场和热应力场的数值计算[J]. *金属学报*, 2000, 36 (4) : 391-394.
- [12] OLOFSSON J, SVENSSON I L. Casting and stress-strain simulations of a cast ductile iron component using microstructure based mechanical behavior [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2012.
- [13] 程卫鑫. ZL205A薄壁筒形件铸造过程变形及控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [14] 田运灿, 杨冬野, 何博. 汽车转向节差压铸造过程温度场精确建模和计算 [J]. *计算机辅助工程IOU*, 2019, 28 (2) : 48-55.
- [15] 张兵, 刘昌奎, 孔志强, 等. 汽车转向节断裂分析 [J]. *失效分析与预防*, 2018, 13 (6) : 59-62, 72.
- [16] 杨苍禄, 朱传敏, 刘素, 等. 汽车转向节疲劳寿命分析和试验研究 [J]. *机电工程*, 2015, 32 (7) : 950-953.
- [17] 赵杰. 镁合金气钉枪枪体压铸热裂纹仿真与实验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [18] ZHANG J, ZHOU G, GONG S, et al. Transient heat transfer analysis of anisotropic material by using Element-Free Galerkin method [J]. *International Communications in Heat & Mass Transfer*, 2017, 84: 134-143.
- [19] 张建平, 王树森, 龚曙光, 等. 正交各向异性材料结构热变形和热应力分析的无网格法计算模型及应用 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36 (6) : 1558-1567.

Simulation of Stress and Strain Field in Counter-Pressure Casting-Quenching Process of Automotive Steering Knuckle

TIAN Yun-can, HE Bo, PAN Yu-fei

(Research Center for Superalloy Precision Molding, School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

Abstract:

Due to the complexity of the structure of the steering knuckle and its difficulty in manufacturing, it is difficult to quantify the stress and strain during the design and production. In this study, the ProCAST software was applied to simulate the residual stress distribution of castings, and the accuracy of the temperature field calculation was verified by comparing the measured data with the numerical simulated results. The dynamic simulation of casting-air cooling-quenching process of automobile steering knuckle was carried out by thermo-mechanical coupling. The dynamic variation and distribution of temperature/stress/strain in the whole production process were obtained. The profile of automobile steering knuckle castings was measured by blue-light scanner. The actual deformation of the castings was analyzed by Geomagic Control fitting software. Results show that both the simulated and measured deformation basically follows the same rule and their maximum deformation are 2.85 mm and 3.25 mm, respectively. This study provides quantitative reference for avoiding large residual stress zone, presupposing reverse deformation and improving casting technology of automobile steering knuckles.

Key words:

counter-pressure casting; quenching; stress and strain; numerical simulation; blue light scanning