

角接触球轴承外圈热处理过程中应力演变规律研究

河南科技大学机电工程学院

谷瑞杰, 仝怡, 叶浩天, 王强, 张壮雅, 陈辽原

【摘要】 角接触球轴承外圈是高淬火敏感性薄截面元件, 其在热处理过程中往往会产生较高的残余应力, 进而导致轴承的使用寿命和运行稳定性下降。因此, 本文以 7008C 型角接触球轴承外圈为研究对象, 基于温度-组织-应力应变多场耦合原理, 建立热处理全流程数值仿真模型, 通过数值模拟的方法研究外圈热处理过程中应力演化规律。结果表明, 外圈在淬火结束后不同位置处的残余应力值差异较大, 其中外圈两侧边缘位置与外表面上存在较大残余应力, 最大残余应力约为 103MPa; 经低温回火处理后, 外圈不同位置处残余应力得到有效消减, 最大残余应力降为 74.3MPa。本研究为轴承外圈热处理后残余应力的有效控制提供一定的理论参考。

【关键词】 角接触球轴承; 轴承外圈; 残余应力; 数值模拟;

1. 引言

角接触球轴承作为高精度数控机床主轴系统的主要回转支撑部件, 其通常在高转速、高负荷的工况下运行, 而且随着高速加工技术的不断发展, 对高速主轴系统的输出功率、转速、回转精度等综合性能有了更高的要求。为保证其运行过程中的稳定性, 需要对轴承外圈的加工精度进行严格把控, 从而提高轴承的运行精度。然而, 热处理后轴承外圈残余应力的大小及分布规律对其力学性能和尺寸精度等都有重要的影响, 因此, 探究热处理过程中轴承外圈应力演变规律是十分必要的^[1-5]。

在淬火过程中, 使用不同的淬火冷却方式, 对元件表面的残余应力分布有很大影响, 国外学者 Brunbauer^[6]研究了低合金钢管淬火过程中残余应力的演化机理, 揭示了不连续冷却对残余应力影响规律, 结果表明不连续冷却对

残余应力影响较小,但会导致局部自退火与硬度下降。Fan^[7]研究了空气冷却、喷水冷却和水淬冷却三种不同冷却方式对残余应力和裂纹扩展行为的影响机理。此外,零件经过回火处理后,其残余应力可以得到有效消减,刘春成^[8]。对零件淬火及回火过程中进行了深入研究,并建立有限元模型分析了应力对相变动力学、相变塑性等的影响。陈建坤^[9]。利用有限元数值模拟技术建立了多场耦合模型,分析了回火工艺参数对 Cr5 锻钢支承辊内部应力分布及演化过程的影响。为了揭示相转变塑性函数对残余应力分布的影响规律,Liu^[10]。基于指数修正归一化函数预测了不同直径圆柱体的内应力分布。郑金涛^[11]。采用分段电流密度的感应淬火工艺,研究了轴承内圈感应淬火过程中残余应力的分布。目前所构建的热处理仿真模型,很难确保其准确性,因此,Medina^[13]采用热电偶法测量了热处理过程中工件表面的传热系数,使得热处理模拟中工件表面与淬火介质的热交换更加符合实际,有效提高了数值模拟的准确性。同时,为了验证有限元模拟得到残余应力的准确性,Louhichi^[12]采用层去除法和轮廓法实验对残余应力进行检测,将实验结果与仿真结果进行对比,充分证明了数值仿真的准确性。

尽管国内外学者已对不同元件在热处理过程中的应力演化以及热处理结束后残余应力的分布与消除做了大量的研究,但是由于实验和检测条件的限制,轴承外圈热处理过程中温度-组织-应力应变行为往往难以观测,关于几何尺寸小、淬透性高、壁厚较薄的高精密角接触球轴承外圈的研究鲜有报道。鉴于此,本文拟以 7008C 型角接触球轴承外圈为研究对象,基于温度-组织-应力应变多场耦合原理,建立轴承外圈热处理数值仿真模型;利用 Deform 软件对外圈热处理工艺过程进行模拟研究,探究该过程中应力演变与热处理结束后的残余应力消除规律,为高精密轴承外圈热处理的实际生产提供理论参考。

2. 热处理的数值模拟

热处理是一个温度-组织-应力应变多场耦合相互作用的过程（如图 1 所示），温度是相变的必要条件，温度升高或降低会使钢奥氏体化和过冷奥氏体分解，而在组织转变的同时，由于各相组织的热焓值不同，会使温度升高或降低。温度变化同样会引起工件体积的膨胀或收缩，由于工件表层到心部受热不均匀，温度变化不一致而引起变形不同，最终导致热应力的产生。而热应力会引起材料的塑性变形，同时会释放少量的热量，使温度有略微增高。由于受到降温速率的影响，工件各部位组织转化不能同时进行，因而在相变过程中也会引起体积膨胀。相变量不同，膨胀量也不同，导致组织应力也会有很大差别。反过来，在应力作用下会引起等温转变曲线的微小变化和相变塑性改变。

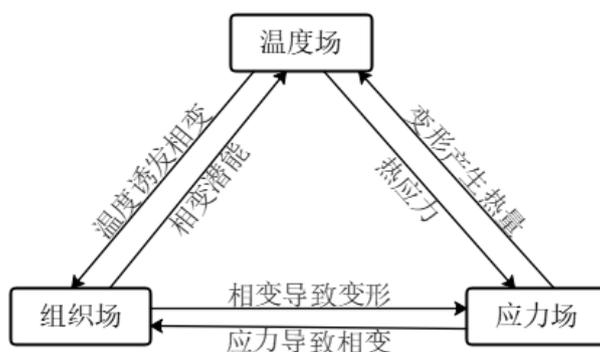
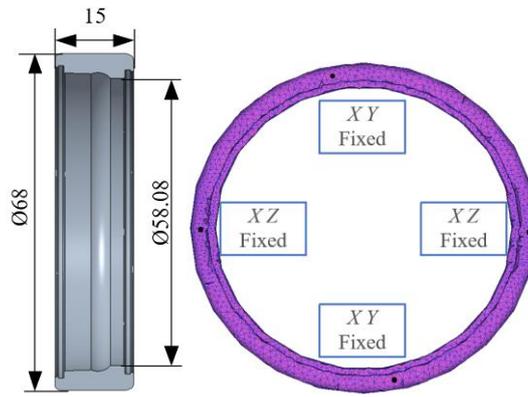


图 1 温度-组织-应力耦合作用关系

Fig.1 The coupling relation of temperature, microstructure and stress

轴承外圈的几何模型和仿真模型如图 2 所示：其外径为 68mm，内径为 58.08mm，宽度为 15mm，仿真模型划分采用四面体网格，划分单元数量为 56768，其最小与最大单元尺寸分别为 0.74mm 与 1.48mm，由于外圈定义为弹塑性体，在热处理过程中会发生弹塑性变形，因此需要定义固定节点边界条件，在外圈的 X 方向上固定 4 个节点，Y、Z 方向上分别固定两个节点。



(a) 几何模型 (b) 仿真模型

图 2 外圈几何模型与仿真模型

Fig.2 Geometric model and simulation model of outer ring

热处理数值模拟过程如图 3 所示，详细流程为：淬火加热及保温温度为 830 °C，加热及保温时间为 1 h，采用 70 °C 淬火油进行冷却，冷却结束后需要将套圈进行清洗；之后采用回火温度 160 °C，时间 3 h 进行回火处理，之后进行空冷。

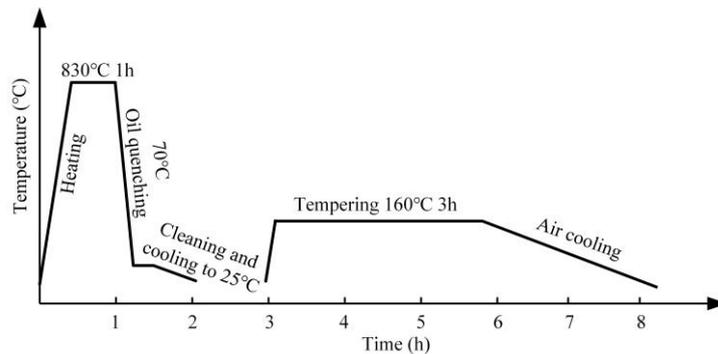


图 3 热处理工艺流程

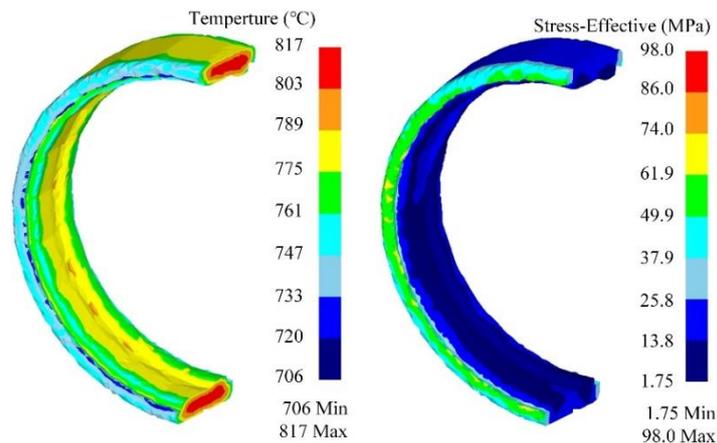
Fig.3 The process of heat treatment

3. 应力模拟结果分析

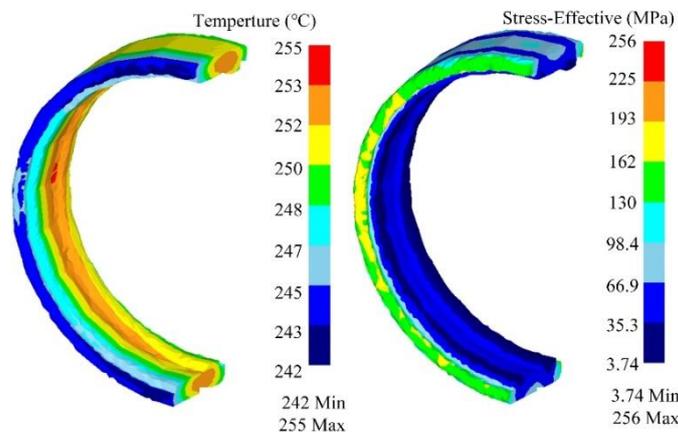
3.1 淬火冷却过程中的应力演化

由于外圈壁厚较小，淬火加热速率慢，导致加热过程中应力变化不明显，而淬火冷却速率快，应力变化大。因此，采用图 3 中热处理工艺，研究淬火冷却过程中应力演变机理。如图 4 所示为不同淬火冷却时刻外圈应力分布云图。

由图 4 (a) 可知, 冷却 0.3 s 后, 外圈的最大应力为 98 MPa 且主要集中于外圈两侧端面位置, 这是由于冷却初期, 外圈两侧端面位置与淬火油率先进行热交换, 温度快速下降, 导致应力增大。图 4 (b) 所示为冷却 10 s 后外圈应力分布云图, 此时外圈两侧端面与外表面上的应力较高, 而内表面应力相对较低。这是由于两侧端面温度先达到马氏体转变温度, 发生组织转变, 在组织应力与热应力共同作用下应力水平增大。由图 4 (c) 可知, 冷却 61 s 后外圈两侧端面上的应力逐渐向外表面处集中, 导致内表面上的应力低于外表面上的应力。淬火冷却结束后外圈应力分布云图如图 4 (d) 所示, 与图 4 (c) 相比应力分布区域大致相同, 只是残余应力水平稍有降低, 淬火后残余应力最大值为 103MPa。



(a) 0.3s



(b) 10s

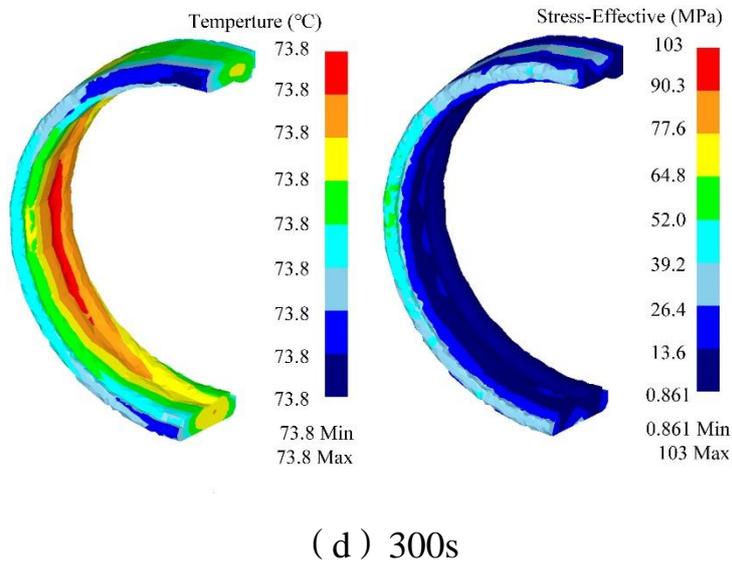
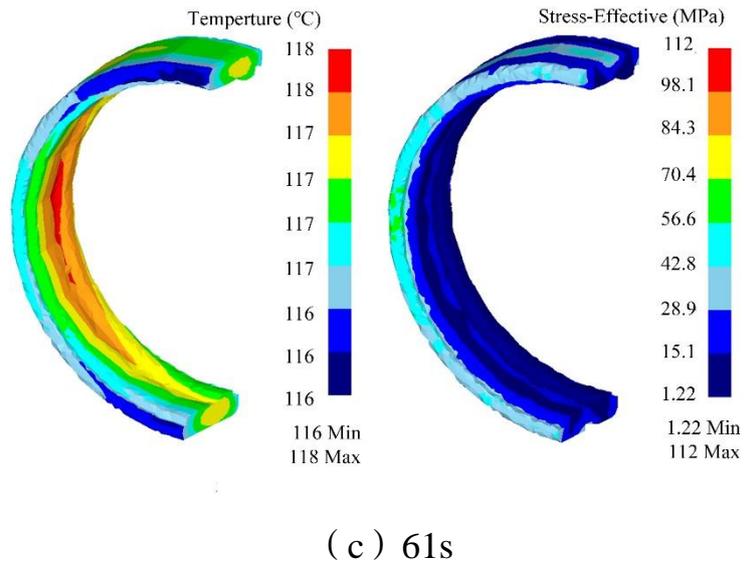
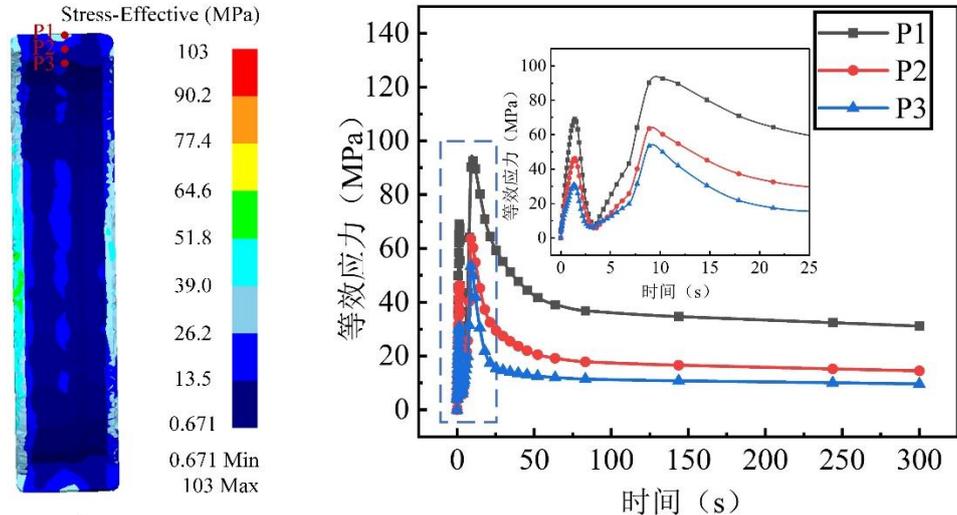


图 4 不同冷却时刻外圈温度与应力分布云图

Fig.4 Cloud map of outer ring temperature and stress distribution at different quenching and cooling times

为了更详细分析轴承外圈滚道处应力演变规律，在外圈滚道处选择如图 5 (a) 所示 3 个特征点 (P1、P2、P3)，揭示其应力演变规律。由图 5 (b) 可知，外圈外表面 P1 位置的应力值始终比其他位置大，在淬火冷却初始阶段，由于表面与心部冷却速率不一致，外圈表面温度先降低，应力增大，而心部在表面压应力作用下应力也开始上升；之后应力突然减小，是由于心部温度开始降低，与表面产生相反的作用力。随着冷却过程进行，外表面首先开始

马氏体转变导致外表面体积膨胀，此时应力升高，当心部同样开始发生马氏体转变时，应力开始减小。马氏体转变完成后，外圈温度接近淬火油温度，应力变化趋于平缓。



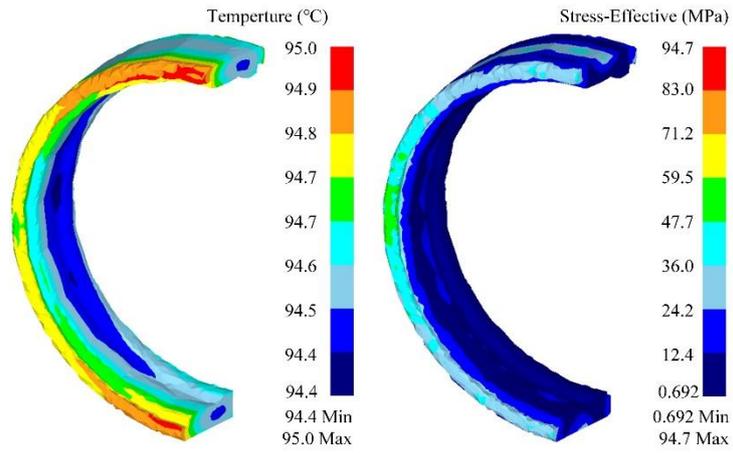
(a) 特征点位置选取 (b) 应力随时间变化规律

图 5 滚道上应力演变规律

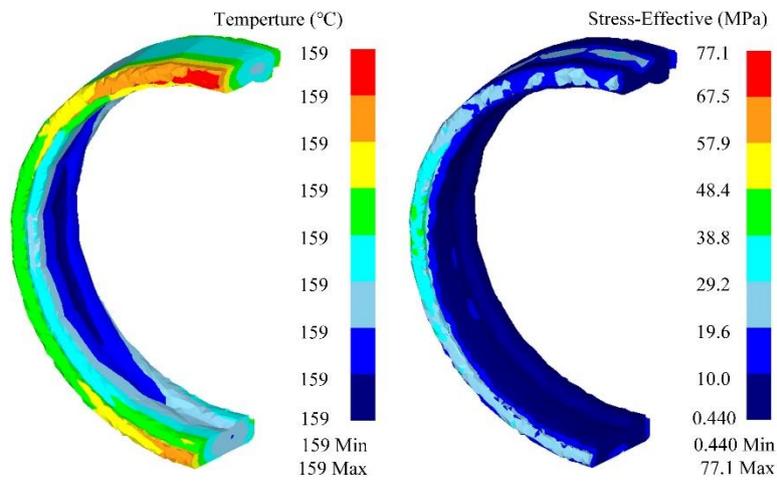
Fig.5 The evolution process of stress on the raceway

3.2 回火过程中的应力演化

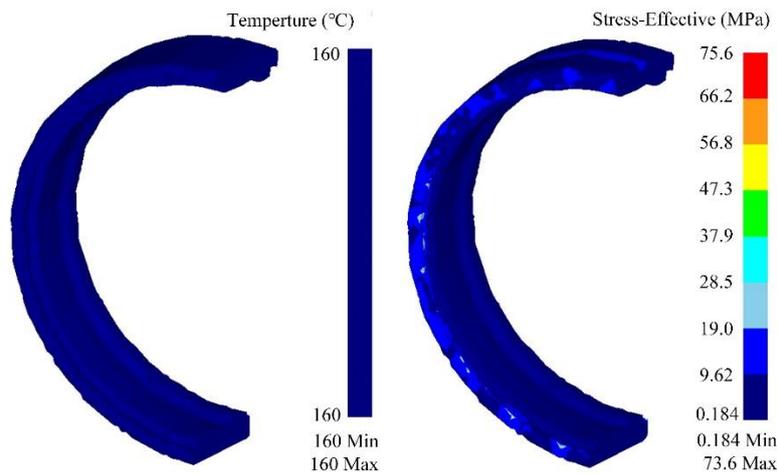
如图 6 所示为回火过程中外圈应力分布云图，由图 6(a)可知，回火 320s 后，外圈上的残余应力开始减小，最大残余应力减小至 94.7 MPa，外圈两侧端面与外表面上的应力较高。如图 6 (b) 所示，当回火 936 s 后，最大残余应力减小至 77.1 MPa，外圈两侧端面与外表面上的残余应力相较于 320 s 时有消减的趋势。如图 6 (c) 所示，回火至 1836 s 时，最大残余应力减小至 75.6 MPa，相较于 936 s 时的应力云图，虽然最大残余应力值减少较小，但外圈两侧端面与外表面上的残余应力大幅减少。如图 6 (d) 所示，回火结束后外圈残余应力最大值约为 74.3 MPa，且两侧端面与外表面应力处于较高水平。



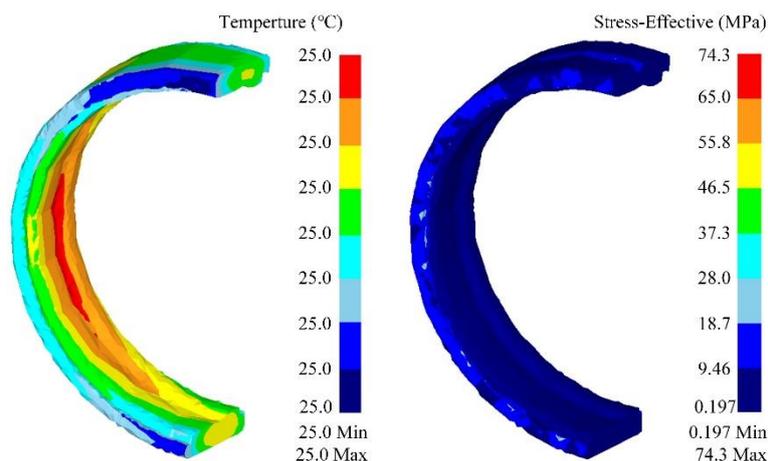
(a) 320s



(b) 936s



(c) 1836s



(d) 14400s

图 6 回火过程中外圈温度与应力分布云图

Fig.6 Cloud map of outer ring temperature and stress distribution during the tempering process

4. 结论

本文基于温度-组织-应力应变多场耦合原理，通过建立 7008C 角接触球轴承外圈全流程热处理数值仿真模型，对其淬火和回火热处理过程中的应力演变规律进行了研究。研究结果显示，在淬火冷却初始阶段，外圈表面率先开始冷却，而心部在表面压应力作用下应力开始上升；之后应力突然减小，是由于心部冷却与表面产生相反的作用力，随着冷却过程进行，外表面首先开始马氏体转变导致应力升高，当心部同样开始发生马氏体转变时，应力减小，马氏体转变完成后，应力变化趋于平缓。淬火结束后，外圈不同位置的残余应力差异显著，特别是在外圈两侧边缘和外表面，最大残余应力可达到 103 MPa。经过低温回火处理后，各位置的残余应力得到有效降低，最大值降至 74.3 MPa。本文的研究结果可为高精密角接触球轴承外圈的热处理生产工艺提供理论指导。

【参考文献】

- [1] Samuel A, Prabhu K. Residual Stress and Distortion during

Quench Hardening of Steels: A Review [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(7): 1-28.

[2] Wang R, Jiang H, Shao W, et al. Quenching Induced Residue Stress in M50 Steel Ring: a FEM simulation [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 5298-5308.

[3] 李克, 龚森, 仝大明, 等. 0Cr16Ni5Mo1 马氏体不锈钢静子叶片热处理工艺模拟[J]. 热处理, 2023, 38(06): 7-13.

[4] 张莹, 王德祥, 郭峰, 等. 轴承内圈沟道磨削热应力场有限元仿真分析[J]. 轴承, 2024, (06): 31-37.

[5] Lozano D, Totten G, Bedolla-Gil Y, et al. X-ray Determination of Compressive Residual Stresses in Spring Steel Generated by High-Speed Water Quenching [J]. Materials, 2019, 12(7): 1154-1154.

[6] Brunbauer S, Winter G, Antretter T, et al. Residual Stress and Microstructure Evolution in Steel Tubes for Different Cooling Conditions-Simulation and Verification [J]. Materials Science & Engineering, 2019, 747: 73-79.

[7] Fan M, Chen C, Xuan H, et al. Effect of Residual Stress Induced by Different Cooling Methods in Heat Treatment on the Fatigue Crack Propagation Behaviour of GH4169 Disc [J]. Materials. 2022, 15(15): 5228

[8] 刘春成, 姚可夫, 高国峰. 应力应变对马氏体相变动力学及相变塑性影响的研究[J]. 金属学报, 1999, 35(11): 1125-1129.

[9] 陈建坤. Cr5 锻钢支承辊最终热处理过程数值模拟[D]. 河北: 燕山大学, 2014: 7-21.

[10] Liu Y, Qin S, Hao Q, et al. Finite Element Simulation and Experimental Verification of Internal Stress of Quenched AISI 4140 Cylinders [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(03): 1402-1413.

[11] 郑金涛, 张文虎, 邓四二, 等. 调心滚子轴承感应淬火工艺与组织性能数值模拟[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(02): 133-141.

[12] Medina-Juarez, Oliveira, Moat, et al. On the Accuracy of Finite Element Models Predicting Residual Stresses in Quenched Stainless Steel [J]. Metals, 2019, 9(12): 1308.

[13] Louhichi M, Poulachon G, Lorong P, et al. Modeling and Validation of Residual Stresses Induced by Heat Treatment of AA 7075-T6 Samples Toward the Prediction of Part Distortion [J]. Machining Science and Technology, 2023, 27(03): 247-267.