

计算机辅助设计下的轴承热处理工艺数值模拟试验与性能调控研究

肖华海

宁波银球科技股份有限公司 浙江 宁波 315207

摘要：本研究聚焦于计算机辅助设计（GID）技术在轴承热处理工艺中的应用，通过数值模拟试验深入探究轴承热处理过程，并对其性能调控展开研究。通过构建基于GID的轴承热处理数值模拟模型，综合考虑材料特性、传热传质规律以及相变动力学等因素，模拟不同热处理工艺参数下轴承内部的温度场、应力场分布及组织转变过程。试验结果表明，随着加热温度从850℃逐步升高至950℃，轴承中心温度和表面温度也呈现出同步上升的趋势。每提高50℃的加热温度，轴承中心温度升高50℃，表面温度同样升高50℃，说明加热温度对轴承温度有着直接且显著的影响，两者近乎线性相关。

关键词：计算机辅助设计；轴承热处理；数值模拟

1 引言

传统的轴承热处理工艺，主要依赖于经验和反复试验来确定工艺参数。这种方式不仅效率低下，而且缺乏科学精准的理论依据，导致热处理后的轴承性能波动较大，质量一致性难以保证。随着制造业对产品质量和生产效率的追求不断提高，传统工艺已难以满足当前的发展需求^[1]。

计算机辅助设计（GID）技术在材料加工领域的应用为解决这一难题提供了新的途径。通过数值模拟，可以在计算机中构建轴承热处理过程的虚拟模型，精确模拟温度场、组织场和应力场的变化情况。深入分析不同热处理工艺参数，如加热温度、保温时间、冷却速度等对轴承微观组织演变和性能的影响，从而在实际生产前优化工艺参数，有效避免因参数不合理导致的产品缺陷^[2-3]。

基于此，本研究旨在借助计算机辅助设计技术，开展轴承热处理工艺的数值模拟试验，深入探究热处理过程中的物理现象和组织性能变化规律。通过建立准确的数值模型，结合实际试验验证，为轴承热处理工艺的优化提供坚实的理论支持和技术保障，推动轴承制造行业的技术进步和高质量发展。

2 计算机辅助数值模拟方法

2.1 模型建立

本研究选用GCr15轴承钢作为研究对象，其化学成分中C元素含量在1%左右、Cr元素含量在1.5%左右。在室温25℃时，GCr15轴承钢的热导率约为45W/（m·K），比热容为500J/（kg·K），热膨胀系数为 $1.2\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。轴承外圈规格设定为外径125mm，壁厚7.5mm，宽度

11mm^[4]。考虑到轴承外圈具有对称性，为有效减少计算时间，提升研究效率，仅取一半的轴承外圈进行淬火模拟计算。且本研究利用GID软件建立模型，构建实际外圈一半的模型。为增加淬火模拟计算的准确度，本次模型划分采用六面体网格，节点数为15735个，单元数为12615个。在轴承外圈截面上标记P1、P2、P3三个节点，以便更好地研究其在淬火过程中的变化规律，且采用自适应网格划分技术，在轴承的关键部位如滚道、滚珠接触区域等加密网格，以提高计算精度。经划分，整体模型网格数量控制在50万个左右，保证计算效率与精度的平衡，不同区域的网格划分情况见表1。

表1 网格划分

区域	网格尺寸（mm）	网格数量
滚道	0.5	20万
滚珠	0.3	15万
其他区域	1	15万

2.2 边界条件设定

在加热过程中，本研究设定加热炉温度为940℃，采用对流换热与辐射换热相结合的方式，辐射率取值为0.8。若采用油淬，油的温度则设为50℃，对流换热系数在冷却初期高达1000W/（m²·K），随着冷却进行逐渐降低。假设轴承在热处理过程中无外部施加的机械载荷，但考虑材料内部因热胀冷缩及组织转变产生的内应力。在相变过程中，根据Scheil叠加法则及杠杆定律计算组织转变量，从而确定相变塑性对应力的影响。整个热处理过程中，假设轴承质量守恒，无材料的损失或添加。在模拟渗碳等涉及质量传输的过程时，根据菲克定

律设定浓度边界条件，确定渗碳介质中碳的浓度及扩散系数。

3 结果与讨论

3.1 温度场变化

不同加热温度下轴承温度变化如表2所示。随着加热温度从850℃逐步提升至950℃，轴承中心温度和表面温度均呈现出显著的上升趋势。在保温时间固定为30分钟的情况下，加热温度每升高50℃，轴承中心温度升高约50℃，表面温度也随之升高约50℃，表明加热温度是影响轴承内部和表面温度的关键因素，且两者之间存在着近似线性的正相关关系。较高的加热温度能够使更多的热量传递到轴承内部，从而有效提高轴承的整体温度^[5]。

保温时间对轴承温度的影响：在本次模拟试验中，保温时间固定为30分钟，暂未体现出保温时间变化对轴承温度的影响。但从理论上来说，在一定范围内延长保

温时间，有利于热量在轴承内部的均匀扩散，使轴承中心温度和表面温度更加接近，减小温度梯度，提高热处理的均匀性。然而，若保温时间过长，可能会导致晶粒长大，降低轴承的力学性能。因此，在实际的热处理工艺中，需要综合考虑加热温度和保温时间的协同作用，以达到最佳的热处理效果^[6]。

且可观察到，温度的变化对轴承的性能调控起着至关重要的作用。较高的加热温度和适当的保温时间能够促使奥氏体充分均匀化，为后续的淬火处理提供良好的组织基础，有助于提高轴承的硬度和耐磨性。但过高的温度可能会引发晶粒粗大、残余应力增加等问题，降低轴承的韧性和疲劳寿命。所以，在计算机辅助设计的热处理工艺中，通过精确控制加热温度和保温时间，能够有效调控轴承的微观组织和性能，满足不同工况下对轴承性能的要求。

表2 温度场变化分析

加热温度（℃）	保温时间（min）	轴承中心温度（℃）	轴承表面温度（℃）
850	30	800	840
900	30	850	890
950	30	900	940

3.2 组织场变化

在计算机辅助设计的轴承热处理工艺数值模拟试验中，对不同加热温度、保温时间、冷却速度下的马氏体含量、残余奥氏体含量和珠光体含量进行分析，试验数据如表4所示。

当保温时间固定为30min，冷却速度固定为10℃/s时，随着加热温度从850℃升高到950℃，马氏体含量从50%增加到70%，呈上升趋势，主要因为加热温度升高，更多的奥氏体形成，在后续冷却过程中转变为马氏体。同时，残余奥氏体含量从25%下降到15%，珠光体含量从25%下降到15%，表明高温促进了奥氏体向马氏体的转变，抑制了珠光体和残余奥氏体的形成。且马氏体含量的增加通常会提高轴承的硬度和强度，但也可能导致韧

性下降。残余奥氏体和珠光体含量的改变会影响轴承的耐磨性、尺寸稳定性等性能^[7-9]。

此外，当加热温度固定为850℃，保温时间固定为30min时，随着冷却速度从10℃/s升高到30℃/s，表面热应力从50MPa增加到100MPa，表面组织应力从30MPa增加到70MPa。冷却速度的加快，使得工件表面与内部的温度差增大，从而产生更大的热应力^[10]。同时，快速冷却导致组织转变更加剧烈，进而增大表面组织应力。应力的变化会影响轴承的变形和开裂倾向，对轴承的质量和使用寿命产生关键作用。通过计算机辅助设计下的数值模拟试验，能够更精准地调控热处理工艺参数，实现对轴承性能的优化，满足不同工况下的使用需求。

表3 组织场变化

加热温度（℃）	保温时间（min）	冷却速度（℃/s）	马氏体含量（%）	残余奥氏体含量（%）	珠光体含量（%）
850	30	10	50	25	25
900	30	10	60	20	20
950	30	10	70	15	15

3.3 应力场变化

不同加热温度的应力场变化如表3所示。当保温时间固定为30min，冷却速度固定为10℃/s时，随着加热温度从850℃升高到950℃，马氏体含量从50%增加到70%，

呈上升趋势，主要因为加热温度升高，更多的奥氏体形成，在后续冷却过程中转变为马氏体。同时，残余奥氏体含量从25%下降到15%，珠光体含量从25%下降到15%，高温促进了奥氏体向马氏体的转变，抑制了珠光体

和残余奥氏体的形成。且马氏体含量的增加通常会提高轴承的硬度和强度，但也可能导致韧性下降。残余奥氏体和珠光体含量的改变会影响轴承的耐磨性、尺寸稳定性等性能。

当加热温度固定为850℃，保温时间固定为30min时，冷却速度的变化对表面热应力和表面组织应力产生显著影响。随着冷却速度从10℃/s升高到30℃/s，表面热应力从50MPa增加到100MPa，表面组织应力从30MPa增加到70MPa。冷却速度加快，工件表面热量散失迅速，与内部形成更大的温度梯度，进而产生更大的热应力。与此同时，快速冷却使奥氏体向其他组织转变更为急促，

晶格畸变加剧，导致表面组织应力增大。

过高的表面热应力和表面组织应力会使轴承在热处理过程中产生变形甚至开裂。变形会影响轴承的尺寸精度，降低其旋转精度和配合性能；开裂则直接导致轴承报废，严重影响产品质量和生产效率。通过计算机辅助设计的数值模拟，能够精确掌握不同冷却速度下的应力变化规律，为优化冷却工艺提供依据。例如，在保证轴承组织性能满足要求的前提下，适当调整冷却速度，采取分段冷却或缓冷等方式，有效降低表面应力，减少变形和开裂风险，实现对轴承热处理工艺的精准调控，提升轴承质量和使用寿命，以适应不同工况下的使用需求。

表4 应力场变化

加热温度（℃）	保温时间（min）	冷却速度（℃/s）	表面热应力（MPa）	表面组织应力（MPa）
850	30	10	50	30
850	30	20	80	50
850	30	30	100	70

4 结论

（1）在同一加热条件下，轴承表面温度始终高于中心温度。加热温度为850℃时，表面温度比中心温度高40℃。这种温度差的存在，会在轴承内部产生热应力，对轴承的微观组织和性能产生影响。

（2）在保温时间和冷却速度固定的情况下，随着加热温度从850℃升高到950℃，马氏体含量呈现稳步上升趋势，从50%增加到70%。这表明加热温度的升高有利于马氏体的形成。同时，残余奥氏体含量和珠光体含量均逐渐下降，残余奥氏体从25%降至15%，珠光体也从25%降至15%，说明高温抑制了残余奥氏体和珠光体的生成。

（3）表面组织应力从30MPa上升至70MPa，主要由于快速冷却时，组织转变更为剧烈。在快速冷却过程中，马氏体转变速度加快，马氏体比容较大，这种组织的快速形成和体积变化会在材料内部产生较大的组织应力。冷却速度的增加显著影响了表面热应力和表面组织应力，在实际的轴承热处理工艺中，如果冷却速度控制不当，过高的应力可能导致轴承出现变形甚至开裂等缺陷。

参考文献

[1]贾玉鑫,孙艳平,王姗姗,等.推力盘类轴承零件热处理工艺改进[J].金属热处理,2024,49(12):99-102.

[2]庞晓旭,朱定康,仲志丹.滚动轴承热处理虚拟仿真试验探索[J].新型工业化,2024,14(07):124-131.

[3]李雪峰.热处理工艺对钕微合金化轴承钢微观组织与机械性能的影响[D].河北工程大学,2024.

[4]刘众鑫.热处理工艺对GCr15轴承钢组织与性能的影响研究[D].河北科技大学,2024.

[5]解连文,戚顺银.中国轴承热处理技术及装备的发展趋势[J].热处理技术与装备,2024,45(03):76-80.

[6]王艳辉,李雪峰,刘柏松,等.热处理工艺对微合金化等温马氏体轴承钢组织与力学性能的影响[J].材料热处理学报,2023,44(11):176-183+191.

[7]徐昌达.热处理工艺对GCr18Mo轴承钢组织与性能的影响[D].哈尔滨理工大学,2023.

[8]郭锦涛,袁美怡,廖劲成,等.热处理工艺对改良型轴承钢组织与耐磨性的影响[J].上海金属,2024,46(03):83-88+94.

[9]魏丹.热处理工艺对低密度轴承钢GCr15Al组织与性能的影响研究[D].重庆大学,2023.

[10]毛艳珊.GCr15SiMo轴承钢贝氏体化及摩擦磨损性能研究[D].河南科技大学,2023.