

主减速从动齿轮内孔的感应退火模型研究

王彩

株洲齿轮有限责任公司 湖南株洲 412000

摘要：为轻量化设计某新能源主减-差速器总成，对主减速从动齿轮（简称主减齿轮）采用新的工艺路线，即滚齿→渗碳淬火→内孔感应退火→精车内孔→激光焊接（与差壳）→磨齿。主要研究了该产品内孔局部感应退火工艺，采用COMSOL有限元软件进行了磁热耦合数值模拟仿真计算，并与试验结果进行对比分析，为热处理工艺提供了一种新的简洁高效、可靠的工艺模型估算方法。

关键词：主减齿轮；感应退火；COMSOL

Study on induction annealing model of inner hole of main reduction driven gear

WANG Cai

Zhuzhou Gear Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China

Abstract: In order to lightweight design a new energy main reducer assembly, we have adopted a new process route for the main reducer gear, that is, hobbing → carburizing quenching → induction annealing of the inner hole → fine inner hole → laser welding (and differential shell) → main reducer teeth. In this paper, the local induction annealing process of the inner hole of the product was studied, and the magnetic thermal coupling numerical simulation calculation was carried out by COMSOL finite element software, and the comparison and analysis were made with the test results, providing a new simple, efficient and reliable process model estimation method.

Keywords: main reducing gear; induction annealing; COMSOL

1 序言

为了实现新能源减速器的高效传动，采用轻量化设计方案，即该减速器的差速器壳和主减齿轮采用激光焊接工艺代替螺栓联接。原工艺为：当渗碳淬火后表层硬度达到58HRC以上时，通过热处理后硬车CBN刀片加工内孔，车掉表层约2mm增碳层，加工效率低、刀具消耗成本高。为此，开发了热处理后内孔感应退火工艺，既降低了表层硬度又控制好热影响区域。经过检测，内孔感应退火后再车加工除去渗碳层，激光焊接性能可靠稳定，满足工艺要求。

2 问题的提出

某新能源减速器主减-差速器壳体组件由主减齿轮和差速器壳焊接件组成，组件三维模型如图1所示。

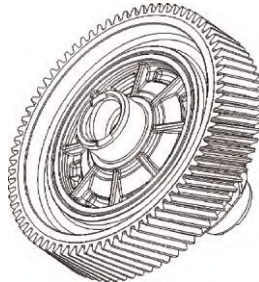


图1 某主减齿轮-差速器壳体焊接件

其中主减齿轮模数为2.25mm，齿数为70齿，压力角为 20° ，齿顶圆直径为170mm、齿厚为38mm，腹板内孔直径约为110mm，厚20mm，主减齿轮结构及内孔感应退火区域如图2所示。

该主减齿轮由外齿、腹板及内孔组成，相对于内孔轴向中心线对称。材料为8620RH钢。齿部渗碳淬火要求表面硬度 $\geq 680\text{HV1}$ 、心部硬度 $320\sim 450\text{HV1}$ ，有效硬化层 $0.55\sim 0.85\text{mm}$ 。

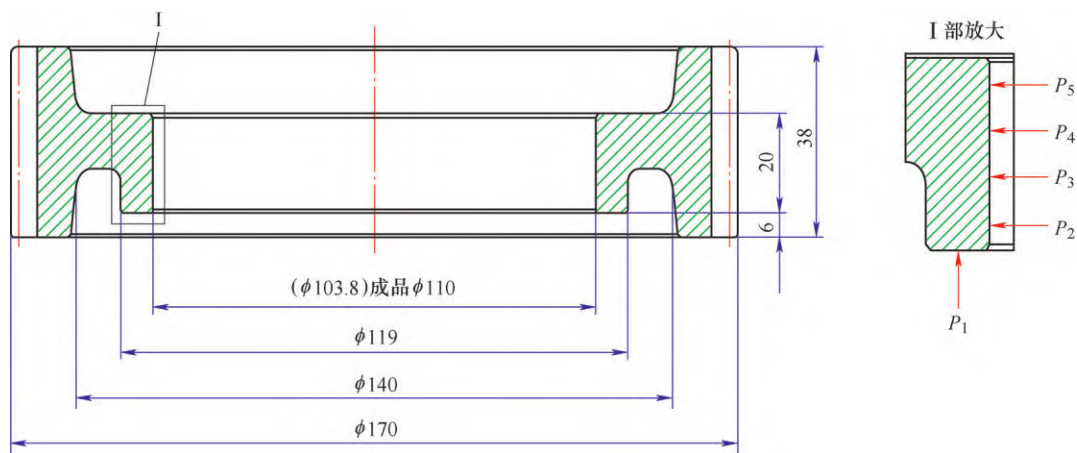


图2 内孔感应退火区域

3 内孔感应退火工艺要求设计

为了降低内孔及相连台面的表层硬度，便于热处理后精车加工去除渗碳层且不影响腹板及齿部硬度，对感应退火工艺设定了如下要求。

- 1) 退火后表层硬度为 $32\sim 40\text{HRC}$ （或 $320\sim 390\text{HV1}$ ）。
- 2) 退火层深度 $\leq 1.0\text{mm}$ （以齿轮心部硬度下限值 320HV1 评判）。
- 3) 退火热影响区深度 $\leq 2.5\text{mm}$ （约3倍原渗碳层深度，心部平均硬度 $+30\text{HV1}$ 评判）。
- 4) 退火后内孔圆度、两端平行度增量均 $\leq 0.05\text{mm}$ 。

5) 为了精准地分析和测量内孔硬度变化，在内孔及相连端面设置了检测点，焊接面 P_1 点、内孔 P_2 、 P_3 、 P_4 及 P_5 四点沿内孔圆柱面轴向均匀分布（见图2）。

4 建模与仿真计算

4.1 仿真模型

用Creo软件建立主减齿轮模型（见图3），以STL格式文件导入COMSOL软件构建零件几何模型（见图4）。以主减齿轮几何中心为中心点，内孔位置放置感应线圈（红色区域），灰色感应加热零件（灰色区域），外层为空气域（ ≥ 10 倍零件大径和高度的空气圆柱区域）。

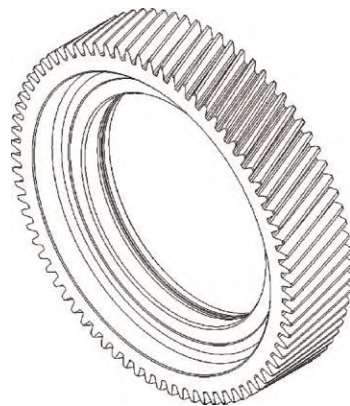


图3 主减齿轮三维模型

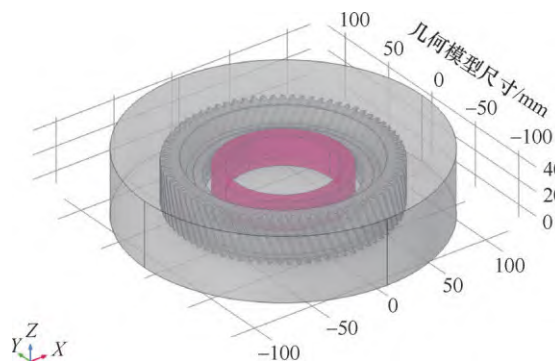


图4 构建主减齿轮COMSOL几何模型

基于多物理场有限元分析软件COMSOL Multiphysics，根据材料属性和热边界条件，建立主减齿轮感应加热的三维电磁-热-结构耦合模型^[1]。因工艺设定到达退火温度后，保持小段时间均温以减

少温差（此时温度场近似稳态），故磁场与传热耦合求解方案选择频域-稳态，计算内孔温度场的分布规律^[2]。

1) 磁场通过固体中的安培定律计算空间磁矢势(A)及产生的感应涡流，即

$$j\omega\sigma(T)A + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A) = 0$$

式中 A ——磁矢势 (T·m)；

j ——涡流密度 (A/m²)；

ω ——角频率 (rad/s)；

T ——温度 (K)；

∇ ——梯度算子；

σ ——零件介质电导率 (S/m)；

μ ——介质磁导率 (H/m)。

2) 固体传热方程，即

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T = Q(T, A)$$

式中 ρ ——零件材质密度 (kg/m³)；

C_p ——比定压热容 [J/(kg·K)]；

t ——时间 (s)；

∇T ——温度梯度；

Q ——传递热量 (J)；

k ——传热系数^[2]。

3) 多物理场-电磁热耦合，即

$$Q = \frac{1}{2} \sigma |E|^2$$

涡流电磁损耗作为热源项，与固体传热方程进行耦合。参数化扫描和迭代运算，直至温度达到设定范围，并对此时的磁通密度、感应电流、温度云图分布进行分析。

4.2 边界条件及初始设定

(1) 感应器尺寸的选取 该产品内孔高度≤20mm，半成品内径约103.8mm，满足同时加热用的单匝感应器的高度^[3]，选取截面为矩形的线圈，采用宽10mm、高20mm、厚1.5mm的T2纯铜矩形管绕制，加热时感应器通水冷却，确保感应器处于室温状态。故COMSOL软件中感应器的模型尺寸按此创建。内孔加热感应器，其外壁与零件的间隙为2.0~3.0mm^[4]。

(2) 电流频率范围的初选 平均硬度由60HRC降至40HRC以下时，感应加热温度≥550℃^[3]。因该加热温度范围低于磁性转变温度，所以冷态电流的透入深度较小。当电流频率为1~4kHz时，冷态电

流透入深度为0.5~1.0mm^[5]，与退火深度相近。为了避免表层过热并减少感应加热对腹板强度的影响（即降低现有硬化层，同时减少热传导深度），故电流频率选择4kHz进行估算。

(3) 功率的估算 参考感应加热回火至425~705℃，使用电源频率1~10kHz时需要的功率密度为1.2~1.9kW/cm²，尺寸较大的工件(>φ50mm)用较低的输入，故选取较小的比功率 $P_0 = 1.2 \text{ kW/cm}^2$ ^[6]，再根据工件加热面积，计算和选择后续验证的电源功率。工件内孔加热面积： $A = \pi DH = 3.14 \times 10.38 \times 2 \approx 65.2 \text{ (cm}^2)$ ；电源功率为

$$P = AP_0 / (\eta_1 \eta_2) = 65.2 \times 1.2 / 0.8 / 0.8 \approx 122.25 \text{ (kW)}$$

式中 D ——加热外圆直径 (cm)；

H ——同时加热高度 (cm)；

A ——加热面积 (cm²)；

η_1 ——感应器效率，常取0.8；

η_2 ——淬火变压器效率，常取0.8^[7]。

4.3 COMSOL模拟结果分析

COMSOL软件按照上述边界条件进行模拟计算。电流频率设定为4kHz，感应器与零件内壁间隙为2~3mm，输出电流为150~300A（现有感应电源电流输出范围），感应器初始位置Z在0~10mm（相对产品下端面），内孔出口倒角为C1~C5，进行参数化扫描计算。所得模拟计算的最优解必须同时满足：退火温度在600~680℃，温度均匀性控制在±25℃^[8]。

通过调整感应线圈与零件内孔相对位置，观察磁通密度分布，优化感应线圈Z轴的加热位置^[9]。图5所示为内孔感应区域处于感应线圈中上部，磁通密度轴向对称分布，此时感应电流主要集中于内孔及相连的表层。

其内孔及相连端面的外表面温度分布如图6所示，对外表面局部高温区域进行模拟计算。

零件轴向截面温度分布如图7所示。经过模拟分

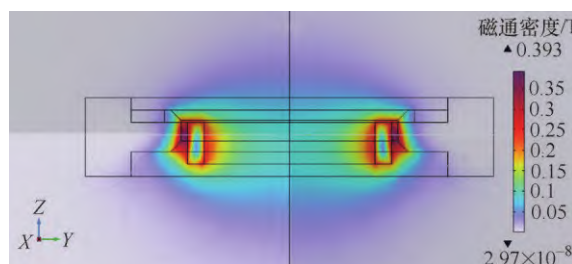


图5 感应加热磁通密度分布

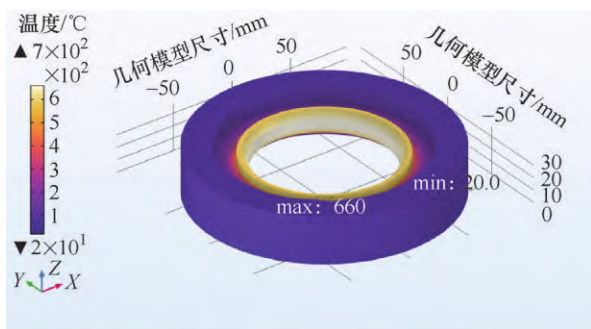


图6 零件表面温度分布



图7 零件轴向截面温度分布

析,发现内孔下端温度偏低、而上端温度过高。为了减弱尖角效应,对产品内孔倒角进行参数化扫描计算。

COMSOL模拟结果显示,在电流频率4kHz条件下,当倒角C5、感应线圈输出电流260A、 $Z=6\text{mm}$ (相对产品下端面),以及内孔间距3mm时,所得温度均匀性好。得出 $P_1\sim P_5$ 点在稳态时温度分别为 612°C 、 645°C 、 656°C 、 653°C 及 615°C ,符合最优解要求。为此,对该最优解进一步进行工艺验证。

5 感应退火工艺的调试验证

5.1 工艺调试

因该产品为环形结构,所以设计专用的托盘工装,定位方式为平放、齿顶圆大径定位,产品与托盘工装一同旋转,产品旋转时的摆差 $\leq 0.05\text{mm}$,以保证周向温度的均匀性。根据模拟计算,感应器位置处于内孔下端时最佳,在托盘工装中央设计了内径152mm、深10mm的沉孔,便于感应器位置下移调节,并适当增加了与工装的距离。

感应器和工装准备好后,在额定功率为160kW、输入电压 $(380\pm 10\%)\text{V}$ 、振荡电流频率为1~10kHz的感应加热电源及淬火机床上进行感应退火工艺试验。

零件加热温度随感应器电流的增大或加热时间的延长而升高,零件对加热温度极为敏感,且每只感应器的制作存在差异,因此需逐一进行工艺调试,以确定加热保温时间、输出电流值等^[9]。经过数轮加热试验和产品检测,感应加热频率为 $(3.1\pm 1)\text{kHz}$ 、倒角为C5、输出电流257~268A、 $Z=6\text{mm}$,以及与内孔间距2.8mm时,用红外测温仪实测 P_1 、 P_2 点表面温度(其他3点在内孔里测量困难),分别为 620°C 、 650°C 。

5.2 退火前后硬度梯度分布

渗碳淬火后(退火前),对上述5个典型位置进行硬度梯度检测,抽检一件渗碳淬火后产品中间 P_3 位置的硬度梯度曲线,如图8所示。从图8可知,退火前表面硬度为709HV1,硬化层深(550HV1处)

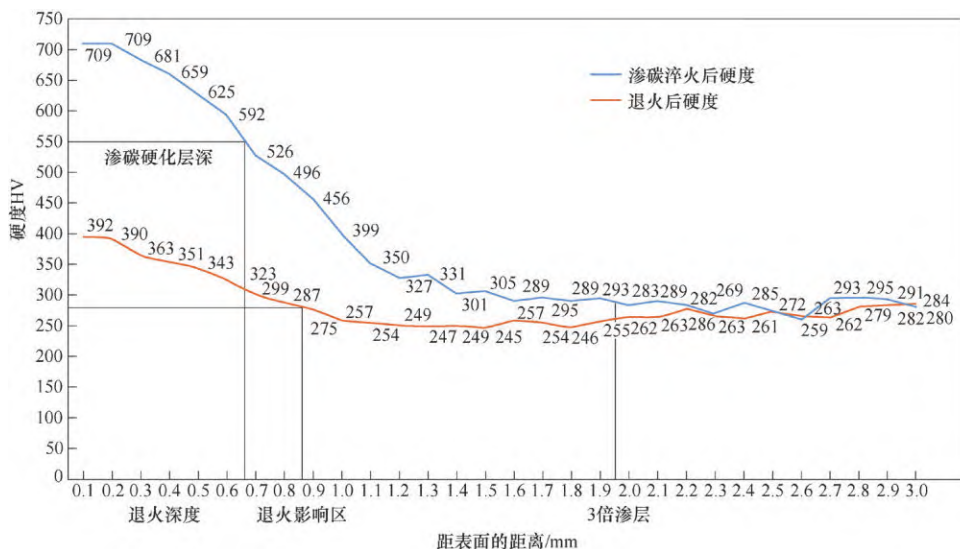


图8 内孔 P_3 位置退火前后的硬度梯度曲线

约为0.65mm；大于3倍硬化层（见图8中虚线位置）往里再取10点（各点相隔0.1mm），其心部平均硬度约为（281±18）HV1。

感应退火后，对同一件产品上述5点进行硬度梯度检测，以中间 P_3 位置硬度梯度分布曲线进行对比分析（见图8）。从图8可知，退火后表面硬度为393HV1，退火深度约为0.65mm；退火影响区（总深度）约为0.85mm，过渡区的宽度不超过1/4。感应退火后，原硬化层的硬度整体下降约300HV；退火热影响区的硬度下降约200HV；而大于3倍渗层的心部区域，硬度变化甚微，很好地控制了退火区域。

6 结束语

对于新能源减速器而言，主减齿轮渗碳淬火后，对其内孔需焊接部位进行局部感应退火工艺，可满足工艺技术要求。

1) 内孔感应退火工艺采用同时加热方式，COMSOL有限元软件模拟分析可优化感应线圈与零件的间隙及相对位置，并参数化扫描求解选取合适的电热参数，为工艺调试提供了依据。本例求解参数是：在电流频率4kHz条件下，当倒角为C5、感应线圈输出电流260A、 $Z=6\text{mm}$ 、间距3mm时，所得表面温度在612~656℃。实际验证中，电流频率（3.1±1）kHz，输出电流257~268A，实测表面温度620~650℃，理论计算与实测值一致性好。

2) 对于渗碳淬火件，当感应退火表面温度控制在（635±25）℃时，能很好地控制内孔退火硬度≤40HRC，退火层深度≤1.0mm。

参考文献：

- [1] 李星辰, 田野, 姚雯. COMSOL传热与多物理场耦合仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023.
- [2] 杨澍. 高频电磁感应加热成形热源模型建立及数值模拟研究[J]. 材料开发与应用, 2015, 30 (4): 20-23.
- [3] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册: 工艺基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [4] 林信智. 汽车零部件用感应器的结构设计[J]. 金属加工 (热加工), 2008 (21): 16-20.
- [5] 林信智, 齐松涛, 赵文龙. 感应淬火的频率选择[J]. 金属热处理, 2015, 40 (3): 209-211.
- [6] 沈庆通, 黄志. 感应热处理技术300问[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [7] 魏文婷, 赵天翼, 柯锦哲, 等. 汽车轮毂轴承内圈感应回火温度均匀性的数值模拟[J]. 金属热处理, 2023, 48 (5): 129-137.
- [8] 樊东黎. 热加工工艺规范[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [9] 刘震涛, 潘俊, 尹旭, 等. 感应加热线圈参数对被试件温度场的影响分析[J]. 机电工程, 2015, 32 (3): 317-323.

(收稿日期: 20250107)

(上接第116页)

- [14] 李勇, 王秋林, 门正兴, 等. 磁场辅助TA15钛合金表面热浸铝镀层的组织性能[J]. 金属热处理, 2023, 48 (8): 254-259.
- [15] 王振, 孙连北, 范孜耘, 等. 基于JMatPro软件的GH4169合金高温力学性能研究[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (4): 96-99.
- [16] 孙晓敏, 刘栋, 汤海波, 等. TC17钛合金构件激光直接成形固态相变行为及显微组织[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42 (4): 724-729.
- [17] 曾菁, 王晓巍, 余胜峰, 等. 退火对高Mo当量大型TA15钛合金锻件组织与拉伸性能的影响[J]. 钛工业进展, 2022, 39 (6): 24-27.

- [18] 杨光, 冯志国, 钦兰云, 等. 成形气氛中氧含量对激光沉积TA15钛合金组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46 (6): 1650-1655.
- [19] 李明兵, 王新南, 商国强, 等. 近 α 型、($\alpha+\beta$)型和近 β 型钛合金的高温力学性能[J]. 金属热处理, 2022, 47 (11): 199-205.
- [20] 韩培培, 焦清洋, 赵栋, 等. 激光冲击强化对TA15钛合金小孔结构残余应力和疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (14): 76-79, 84.

(收稿日期: 20241228)