

新一代航空高强钢螺旋锥齿轮渗碳淬火分析与工艺参数优化

刘黎阳¹,王广超²,张法¹,周长江^{1†}

(1. 湖南大学 国家高效磨削工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082;

2. 中国航发中传机械有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要:针对新一代航空高强钢螺旋锥齿轮渗碳淬火过程中微观组织演变与变形控制问题,结合数值模拟与响应曲面试验分析方法,揭示 15Cr14Co12Mo5Ni 航空高强钢螺旋锥齿轮渗碳淬火的微观组织与性能演变规律.以齿面硬度和变形量为响应指标,进行工艺参数优化,为该材料在航空齿轮领域的精密热处理提供理论依据与工艺指导.结果表明,渗碳后齿顶、齿面与齿根表面碳含量分别为 1.93%、1.795% 和 1.69%,对应有效渗层深度分别为 2.011、1.373 和 1.065 mm.淬火后组织以马氏体为主,齿面残余奥氏体体积分数最高达 93.2%,经回火后降至 8.26%,齿面硬度达 63.87 HRC,心部硬度达 49.09 HRC,有效渗层深度和硬度仿真结果与试验结果误差小于 5%.齿轮整体呈膨胀变形,最大变形量为 359.4 μm ,齿面变形量为 152.5 μm .渗碳温度对硬度影响最为显著,渗碳时间对变形量影响最大.优化后的工艺参数为:渗碳温度 995 $^{\circ}\text{C}$,渗碳时间 16 h,淬火油温 72 $^{\circ}\text{C}$;预测齿面硬度为 64.036 HRC,变形量为 168.5 μm .对该工艺参数进行试验验证,模型预测精度大于 90%.

关键词:航空高强钢;螺旋锥齿轮;渗碳;淬火;参数优化

中图分类号: TG162.73

文献标志码: A

Analysis and optimization of process parameters on carburizing and quenching of new-generation aviation high-strength steel spiral bevel gears

LIU Liyang¹, WANG Guangchao², ZHANG Fa¹, ZHOU Changjiang^{1†}

(1. National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. AECC Zhongchuan Transmission Machinery Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: Addressing the challenges of microstructural evolution and distortion control during the carburizing and quenching of next-generation aviation high-strength steel spiral bevel gears, this study combines numerical simulation with response surface testing analysis methodology to investigate the microstructural and property evolution of 15Cr14Co12Mo5Ni aviation high-strength steel gears. Using tooth surface hardness and distortion as response indicators, process parameters were optimized to provide a theoretical basis and technical guidance for the precision heat treatment of this material in aviation gear applications. The results indicate that after carburizing, the

* 收稿日期: 2025-12-12

基金项目: 中国航空发动机集团自主创新专项基金资助项目(ZZCX-2022-024, CXPT-2023-042), AECC Science and Technology Innovation Platform Project(ZZCX-2022-024, CXPT-2023-042)

作者简介: 刘黎阳(2001—), 男, 贵州毕节人, 湖南大学硕士研究生

† 通信联系人, E-mail: yangtsezhou@hnu.edu.cn

surface carbon concentrations at the tooth tip, tooth flank, and tooth root are 1.93 %, 1.795 %, and 1.69 %, with corresponding effective case depths of 2.011, 1.373 and 1.065 mm, respectively. The post-quenching microstructure is primarily martensitic, with the maximum retained austenite volume fraction at the tooth surface reaching 93.2 %, which decreases to 8.26 % after tempering. The tooth surface hardness reaches 63.87 HRC, and the core hardness is 49.09 HRC. The error between the simulated results and the experimental results of case depth and hardness is less than 5%. The gear exhibits overall expansion deformation, with maximum distortion of 359.4 μm and tooth flank distortion of 152.5 μm . Carburizing temperature has the most significant impact on hardness, while carburizing time is the dominant factor influencing distortion. The optimized process parameters are as follows: carburizing temperature of 995 °C and time of 16 h, and quenching medium temperature of 72 °C. The predicted tooth surface hardness and distortion are 64.036 HRC and 168.5 μm , respectively. Experimental verification was conducted on these process parameters, and the model prediction accuracy exceeded 90%.

Key words: aviation high-strength steel; spiral bevel gear; carburizing; quenching; parameter optimization

高性能齿轮钢是航空传动系统中的核心材料,其服役性能直接关系到整机的安全性能^[1].航空热处理技术是提升钢材服役性能的关键工艺,其中高强韧小畸变渗碳淬火技术作为一种齿轮钢组织硬化手段,可显著提升其抗疲劳与抗磨损能力^[2-3].15Cr14Co12Mo5Ni是我国新一代高性能航空齿轮钢,相比于9310钢和16Cr3NiWMoVNB,该材料在高温服役性能方面表现更为突出^[4].

近年来,国内外学者对齿轮钢渗碳淬火数值模拟进行了研究.杨婷等^[5]基于ABAQUS软件对20CrMnTi钢齿轮渗碳淬火后的碳含量、组织、硬度与淬火畸变进行了系统分析.方秀荣等^[6]基于DEFORM软件对17CrNiMo6钢制齿轮轴的渗碳预热和渗碳过程进行了定量分析,明确影响畸变的关键预热工艺参数.温冠云等^[7]借助JMatPro软件构建了12CrNi3钢的材料性能数据库,结合DEFORM软件实现了对该材料斜齿轮渗碳淬火热处理工艺过程的数值模拟.WANG等^[8]采用COSMAP软件对20CrMnTiH钢齿轮的渗碳和淬火过程进行数值模拟,揭示了齿轮组织、硬度和变形的变化规律,并进行了试验验证.LIU等^[9]整合8620RH材料性能的实验数据,构建了渗碳淬火多场模型,通过Dante软件为提高齿轮渗碳淬火变形的预测精度提供了一种新的模型和方法.丰瑞博等^[10]基于响应曲面法研究18Cr2Ni4WA钢弧齿锥齿轮不同工艺参数组合的交互作用对畸变量和齿面硬度的影响,通过响应曲面优化工艺参数组合.目前学者对15Cr14Co12Mo5Ni2钢热处理工艺^[11-15]有一定研究,

但是缺乏对15Cr14Co12Mo5Ni钢渗碳淬火数值模拟的研究.

本文以我国在役航空螺旋锥齿轮为研究对象,建立15Cr14Co12Mo5Ni钢螺旋锥齿轮渗碳淬火仿真模型,揭示渗碳淬火过程中的碳含量、相组织、硬度及变形量分布规律.采用响应曲面法分析输入变量与响应量间的关系,以提高齿面硬度并减小齿面变形量为目标,优化渗碳淬火工艺参数,为螺旋锥齿轮渗碳淬火工艺改进提供指导.

1 试验材料及方法

1.1 模型及试验

本文以某型号航空发动机螺旋锥齿轮为研究对象,建立几何模型.如图1(a)所示,齿轮几何参数为齿数43、模数3.6、法向压力角20°、轴交角90°、中点螺旋角25°、齿宽30 mm,旋向右旋.为提高计算效率,对模型进行简化,取四个齿区域进行网格划分.为避免局部几何不完整引起的网格畸变,将两端不完整齿去除,保留三个完整的齿型,简化后的齿轮模型如图1(b)所示.如图1(c)所示,采用HyperMesh软件对该简化模型进行四面体网格划分,为保证模拟精度,对齿面区域进行网格细化,最小单元尺寸0.5 mm,并设置过渡网格,最大单元尺寸3 mm,共生成123 823个网格单元.

螺旋锥齿轮渗碳淬火后,利用线切割仪器从齿轮齿面及齿根上切得15 mm×15 mm×10 mm的试样,

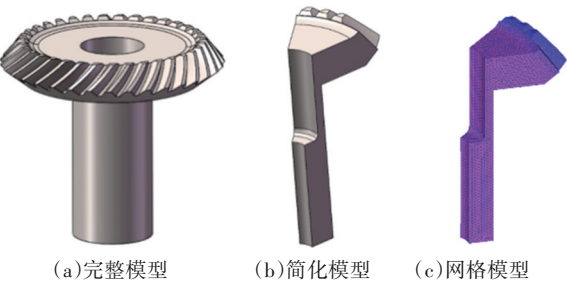


图 1 螺旋锥齿轮模型
Fig.1 Spiral bevel gear model

利用精细砂纸打磨并抛光,用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液对试样进行腐蚀.采用洛氏硬度计检测齿面及心部硬度,硬度值取 3 次测量的平均值.渗层深度采用硬度法评估,采用 KB30S 型显微硬度计进

行检测,将 550 HV 处对应的深度定义为有效渗层深度.齿面变形量采用三坐标测量机进行检测.

1.2 材料成分

本文选用新一代航空用齿轮钢 15Cr14Co12Mo5Ni,其化学成分如表 1 所示.

1.3 渗碳淬火工艺

高强度航空钢螺旋锥齿轮渗碳淬火工艺主要包括加热、渗碳、高温回火、淬火、两次低温回火,渗碳及淬火阶段采用阶段式升温,工艺流程如图 2 所示.

在淬火阶段,以淬火油为冷却介质,淬火油的初始温度为 80 ℃,其热传导系数会随温度变化而变化,淬火油的热传递系数曲线如图 3 所示.

表 1 15Cr14Co12Mo5Ni 的化学成分

Tab.1 Composition analysis of 15Cr14Co12Mo5Ni									%
成分	C	Cr	Co	Ni	Mo	Mn	Si	S	P
范围	0.1~0.16	12.0~15.0	11.0~13.0	1.8~2.2	4.5~5.0	≤0.1	≤0.1	≤0.005	≤0.01
实测	0.15	14.2	11.7	2.07	4.63	0.05	0.02	0.002	0.003

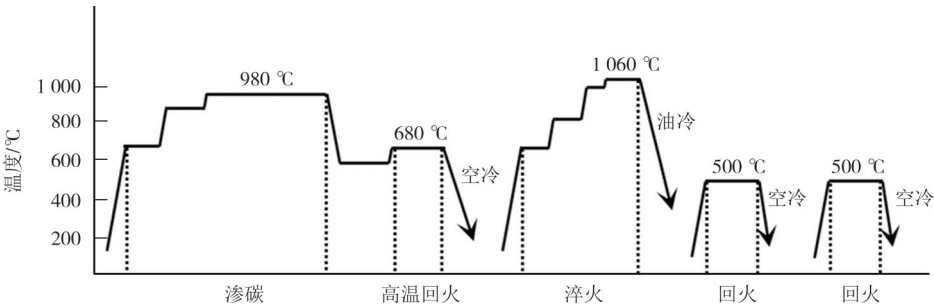


图 2 螺旋锥齿轮热处理工艺路线
Fig.2 Heat treatment process of spiral bevel gear

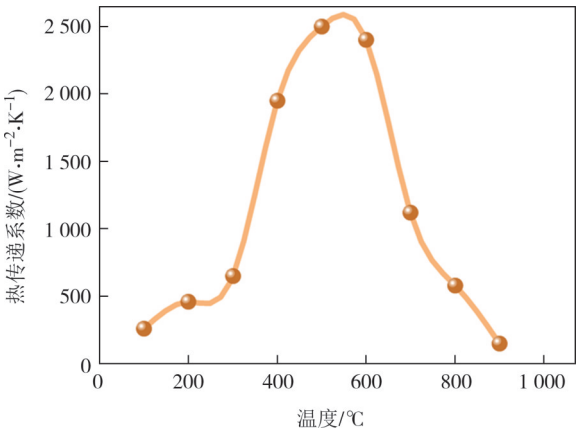


图 3 淬火油热传递系数曲线
Fig.3 Curve of heat transfer coefficient of quenching oil

1.4 材料性能参数

基于 JMatPro 材料性能分析软件,计算了 15Cr14Co12Mo5Ni 钢的热物性能参数,并在 DEFORM

软件中建立该材料数据库.

如图 4 所示,获得的热物性能参数包括热导率、比热容、密度、潜热、杨氏模量、泊松比,分析表明,贝氏体-珠光体相、铁素体相、马氏体相的热物性能参数均比较接近,在后续仿真过程中为简化计算模型,统一采用马氏体相的热物性能参数进行计算.

图 5 为 15Cr14Co12Mo5Ni 钢在应变率为 0.001、0.1、1、100 四种情况下的应力-应变曲线,分析表明,在给定的应变、温度条件下,材料的流动应力随着应变率的升高而增大.

2 结果与讨论

2.1 渗碳淬火结果分析

2.1.1 碳含量分析

将已建立的网格模型、15Cr14Co12Mo5Ni 钢热

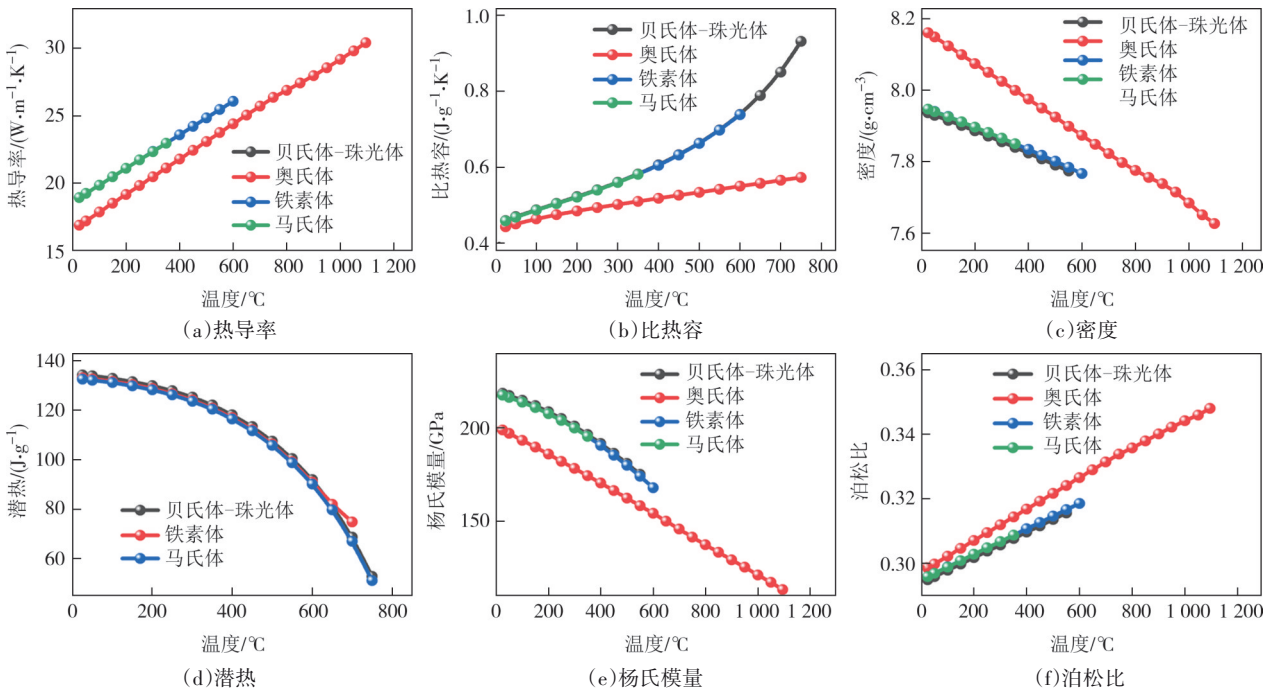


图4 15Cr14Co12Mo5Ni钢的热物性能参数

Fig.4 Thermal physical properties of 15Cr14Co12Mo5Ni steel

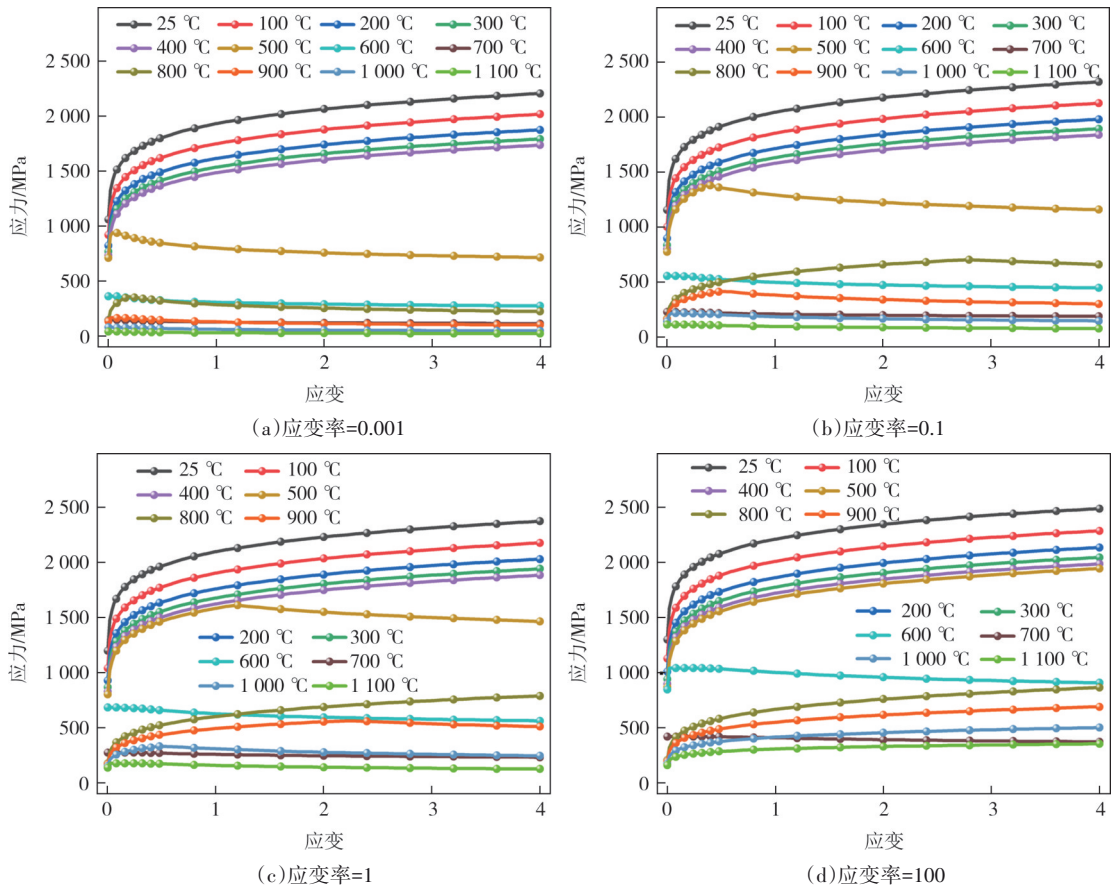


图5 15Cr14Co12Mo5Ni钢的应力-应变曲线

Fig.5 True stress-strain curves of 15Cr14Co12Mo5Ni steel

物性能参数和流动应力-应变曲线导入DEFORM软件,进行渗碳淬火过程数值仿真分析,图6为螺旋

锥齿轮的碳含量云图及各特征部位的碳含量梯度曲线.结果表明,渗碳后齿轮齿顶、齿面和齿根表层的

碳含量分布均匀,差异较小.其中,齿顶表面碳含量最高,达到1.93%,这是由于其尖角几何特征,使碳原子可以同时从两个方向渗入.齿根表面碳含量最低,为1.69%,这是由于该区域为凹角形态,与渗碳气氛的接触面积较小,阻碍了碳原子的扩散.齿面凹侧和凸侧的形状变化平缓,故两侧的碳含量分布基本一致,均为1.795%.

渗碳后,齿顶、齿面和齿根的表层碳含量呈递减趋势,且各部位沿深度方向的碳含量均逐渐降低.模拟结果表明,齿顶、齿面和齿根处的有效渗层深度分别为2.011、1.373和1.065 mm.

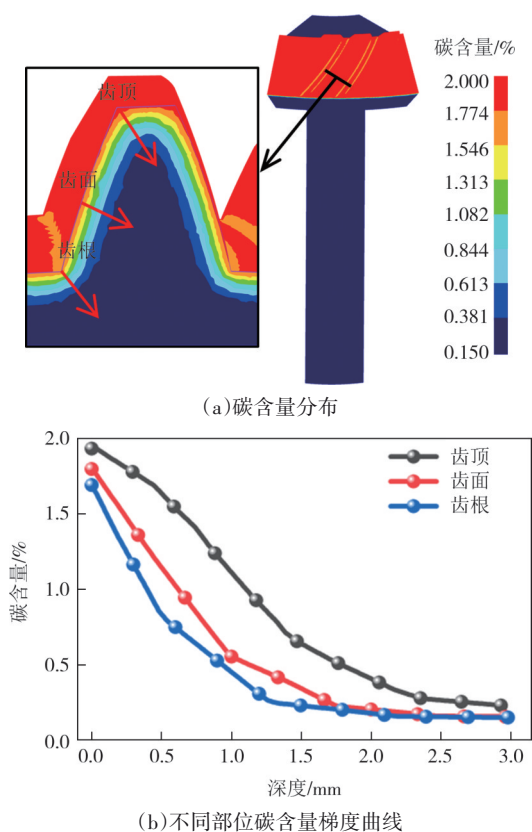


图6 螺旋锥齿轮碳含量仿真结果

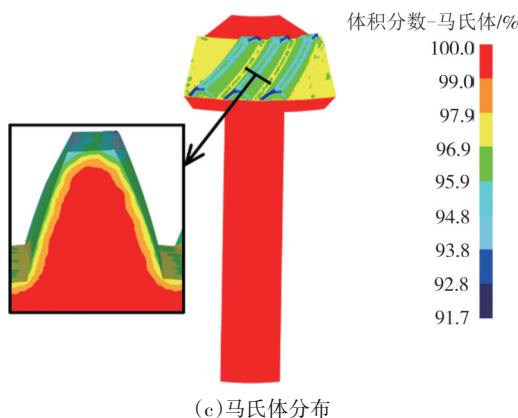
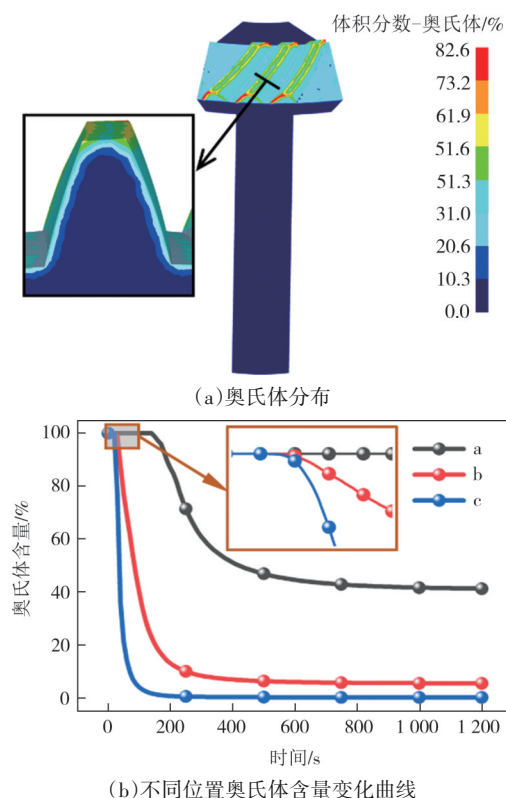
Fig.6 Simulation results of carbon content in spiral bevel gears

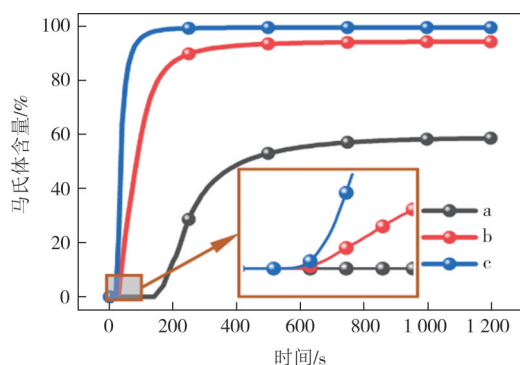
2.1.2 相组织分析

螺旋锥齿轮的微观组织转变主要发生在淬火冷却阶段,得益于15Cr14Co12Mo5Ni钢的淬透性较高,相组织转变过程为奥氏体向马氏体转变,图7展示了淬火后齿轮相组织仿真结果,淬火结束后,齿轮仍存在一定的残余奥氏体,由于高碳奥氏体具有较高的稳定性,在齿面边角位置残余奥氏体体积分数最高,达93.2%,而心部区域最低,仅为0.23%,这是由于先形成的马氏体对周围奥氏体构成机械约束,

抑制其进一步转变,从而导致残余奥氏体的留存.相应地,马氏体体积分数在齿面边角处最低,为6.8%,在心部最高,体积分数为99.77%.

为进一步分析相变动力学,在齿面、过渡层和心部选取代表性位置,分别标示为a、b、c点,由图7(b)可知,b点和c点优先发生马氏体转变,起始时间分别约为25 s和26.5 s;而a点的马氏体转变开始时间显著延迟,约为145 s.最终a点的残余奥氏体含量明显高于b、c两点,这是由于齿面、过渡层和心部的碳含量大小关系为齿面>过渡层>心部,导致马氏体转变温度满足 $M_{sa} < M_{sb} < M_{sc}$,因而心部及过渡层在冷却过程中更早进入马氏体转变区,相变完成程度也更高.





(d) 不同位置马氏体含量变化曲线

图7 螺旋锥齿轮相组织仿真结果

Fig.7 Simulation results of phase of spiral bevel gears

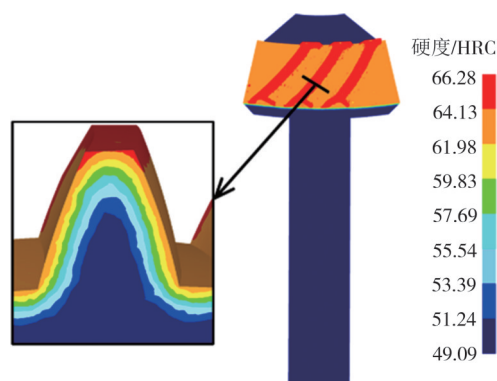
在齿轮渗碳淬火过程中,残余奥氏体的存在通常不利于表面硬度的提升,而回火处理可有效促进其分解或转变为回火马氏体.经过两次回火后,齿轮心部及齿轮轴区域的残余奥氏体已完全转变,但齿顶及边角处仍存在少量残余奥氏体,体积分数最高为8.26%,这是由于该区域的碳含量较高,显著降低了马氏体转变终止温度,从而抑制奥氏体向马氏体的完全转变.

2.1.3 硬度分析

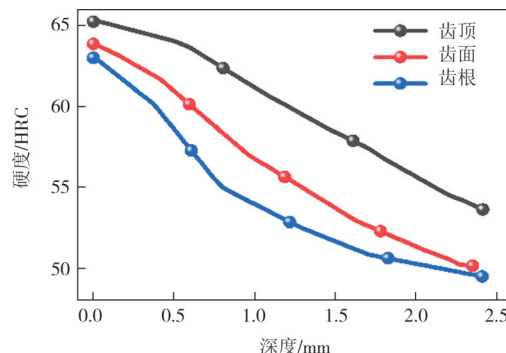
硬度是评价齿轮疲劳性能、抗变形性能以及材料淬透性的重要指标.图8展示了螺旋锥齿轮淬火后的硬度仿真结果,结果表明,淬火后齿轮硬度分布呈现梯度特征,齿顶区域硬度最高,为66.28 HRC,而心部硬度最低,为49.09 HRC;齿顶、齿面和齿根的硬度随着深度的增加而逐渐减小,深度为0 mm时,三者硬度值依次为65.25 HRC、63.87 HRC、63.01 HRC,表现为齿顶>齿面>齿根的分布规律,这是由于齿顶的碳含量高于齿面和齿根,且少量残余奥氏体对硬度的影响较小.此外,由于齿面区域由高碳马氏体构成,而心部为低碳马氏体,导致齿面硬度显著高于心部.

2.1.4 变形量分析

图9(a)为螺旋锥齿轮淬火后的变形量分布结果,结果表明,齿轮整体呈现膨胀变形特征,齿轮轴的变形量由底端至台阶面处逐渐减小,最大变形量为359.4 μm ,齿面区域的变形量为152.5 μm .为深入分析变形行为,按图9(b)在六个典型位置取点(P1~P6),绘制淬火阶段变形量随时间的变化曲线,如图9(c)所示,在加热阶段,由于热膨胀效应,齿轮试样产生显著变形,淬火冷却后,变形较小.六个位置的变形量排序为P6>P3>P2>P1>P4>P5,其中P6位置的变形量远高于其他各点,说明淬火过程中自由



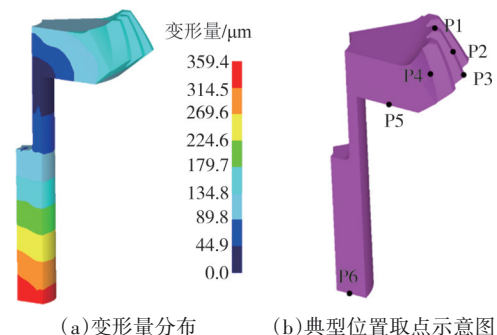
(a) 硬度分布



(b) 不同位置硬度梯度曲线

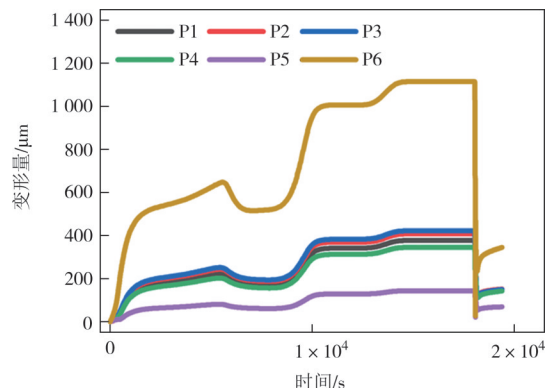
图8 螺旋锥齿轮硬度仿真结果

Fig.8 Simulation results of hardness of spiral bevel gear



(a) 变形量分布

(b) 典型位置取点示意图



(c) 六个典型位置变形量随时间变化曲线

图9 螺旋锥齿轮淬火变形仿真结果

Fig.9 Simulation results of deformation of spiral bevel gear

端的尺寸变化更为明显,而P5位置因受设置边界条件约束,变形量较小.此外,齿顶区域的变形量从上

至下逐渐减小,但整体变形量仍大于齿根部位。

2.1.5 仿真试验对比验证

为了验证仿真模型的准确性,本研究对螺旋锥齿轮渗碳淬火后的齿面硬度、心部硬度以及齿面与

齿根处的有效渗层深度进行了试验测量,并将仿真值与实测结果进行对比分析。具体对比数据如表 2 所示。结果表明,各项指标的仿真值与试验值均较为接近,误差均控制在 5% 以内。

表 2 仿真与试验结果对比
Tab.2 Comparison of simulation and test results

齿面硬度			心部硬度			齿面有效渗层深度			齿根有效渗层深度		
仿真值/HRC	试验值/HRC	误差/%	仿真值/HRC	试验值/HRC	误差/%	仿真值/mm	试验值/mm	误差/%	仿真值/mm	试验值/mm	误差/%
63.87	65.50	2.49	49.09	51.00	3.75	1.373	1.32	4.02	1.065	1.05	1.43

2.2 响应曲面模型与验证

2.2.1 试验设计及仿真结果

为了探究热处理工艺对齿面硬度 H 及齿面变形量 D 的影响,采用 Box-Behnken 法 (BBD) 设计试验方案,以渗碳温度 T_c 、渗碳时间 t 和淬火油温 T_o 作为影响因素。各因素水平设定如下:渗碳温度 960~1 000 °C,渗碳时间 14~16 h,淬火油温 60~100 °C。共设计 17 组试验,BBD 试验方案及仿真结果如表 3 所示。

表 3 试验方案及仿真结果

Tab.3 Experimental scheme and simulation results					
序号	$T_c/^\circ\text{C}$	t/h	$T_o/^\circ\text{C}$	H/HRC	$D/\mu\text{m}$
1	960	16	80	62.956	172.2
2	980	15	80	63.870	171.3
3	960	15	100	63.620	181.7
4	980	16	60	64.014	174.1
5	960	15	60	63.818	186.5
6	980	16	100	63.843	170.5
7	980	15	80	63.858	171.4
8	980	14	60	63.940	178.5
9	980	15	80	63.836	171.8
10	980	15	80	63.809	171.3
11	980	15	80	63.837	171.5
12	980	14	100	63.922	176.3
13	1 000	14	80	63.285	175.6
14	1 000	15	100	64.135	182.4
15	1 000	15	60	64.208	182.6
16	960	14	80	63.654	176.8
17	1 000	16	80	63.993	168.5

2.2.2 响应曲面模型构建与分析

为探究渗碳淬火工艺参数对齿面硬度及齿面变形量的影响规律并对工艺参数进行优化,基于 BBD 试验数据,采用二阶响应曲面法构建渗碳淬火工艺参数与齿面硬度 H 及齿面变形量 D 间的预测模型:

$$H = -147.8475 + 0.60848T_c - 11.28738t -$$

$$0.16295T_o + 0.0175T_ct + 0.000078T_cT_o + 0.001912tT_o - 0.000443T_c^2 - 0.19275t^2 + 0.000701T_o^2 \quad (1)$$

$$D = 11644.775 - 24.8805T_c + 130.425t - 5.3105T_o - 0.0325T_ct + 0.002875T_cT_o - 0.0175tT_o + 0.0128T_c^2 - 3.33t^2 + 0.01681T_o^2 \quad (2)$$

为评估所建响应曲面模型的可靠性,对二阶回归模型进行了方差分析与显著性检验,由表 4 的齿面硬度方差分析结果可知,模型的 F 值远大于 20 且 P 值远小于 0.05,说明该模型的拟合效果显著。方差大小关系为 $T_c > T_o > t$,表明对齿面硬度影响的主次顺序为渗碳温度>淬火油温>渗碳时间。此外,决定系数 $R^2=0.993$,校正 $R^2=0.984$,预测 $R^2=0.91$,说明该模型拟合效果好且预测精度高。

表 4 齿面硬度方差分析
Tab.4 Analysis of variance of surface hardness

数据来源	方差	自由度	F 值	P 值
模型	1.43	9	110.39	<0.000 1
T_c	0.309 3	1	214.79	<0.000 1
t	3.13×10^{-6}	1	0.002 2	0.964 1
T_o	0.026 4	1	18.37	0.003 6
T_ct	0.494 2	1	343.21	<0.000 1
T_cT_o	0.003 9	1	2.71	0.143 5
tT_o	0.005 9	1	4.06	0.083 6
T_c^2	0.132 3	1	91.87	<0.000 1
t^2	0.156 4	1	108.64	<0.000 1
T_o^2	0.331 3	1	230.06	<0.000 1

表 5 为变形量方差分析,结果表明,模型的 F 值远大于 20 且 P 值远小于 0.05,说明该模型的拟合效果显著,可靠性高。其方差大小关系为 $t > T_o > T_c$,说明对变形量影响的主次顺序为渗碳时间>淬火油温>渗碳温度, $R^2=0.9981$,校正 $R^2=0.9957$,预测 $R^2=0.9758$,说明该模型拟合效果好且预测精度高。

表5 变形量方差分析

Tab.5 Analysis of variance of deformation

数据来源	方差	自由度	F值	P值
模型	436.34	9	415.39	<0.000 1
T_c	8	1	68.54	<0.000 1
t	59.4	1	508.98	<0.000 1
T_o	14.58	1	124.92	<0.000 1
$T_c t$	1.69	1	14.48	0.006 7
$T_c T_o$	5.29	1	45.32	0.000 3
$t T_o$	0.49	1	4.2	0.079 7
T_c^2	110.38	1	945.7	<0.000 1
t^2	46.69	1	400.04	<0.000 1
T_o^2	190.14	1	1 629.11	<0.000 1

图 10 为不同工艺参数交互作用对齿面硬度的影响,由图 10(a)可知,随着渗碳时间和渗碳温度的

增加,齿面硬度先减小后增大,由图 10(b)和图 10(c)可知,在较低淬火油温下,硬度随渗碳时间与温度的增加先增大后减小,而在较高淬火油温下,则随渗碳温度单调递增.在不同工艺参数的交互作用中,渗碳时间和渗碳温度对齿面硬度的交互作用明显,其余交互作用不明显.

图 11 为不同工艺参数交互作用对齿面变形量的影响,由图 11(a)和图 11(b)可知,当渗碳时间一定时,齿面变形量随着渗碳温度和淬火油温的升高,呈现先减小后增大的变化趋势,图 11(c)进一步表明,随着淬火油温和渗碳温度的增加,齿面变形量先减小后增大.在不同工艺参数的交互作用中,淬火油温和渗碳温度对齿面变形量的交互作用明显,其余交互作用影响相对较弱.

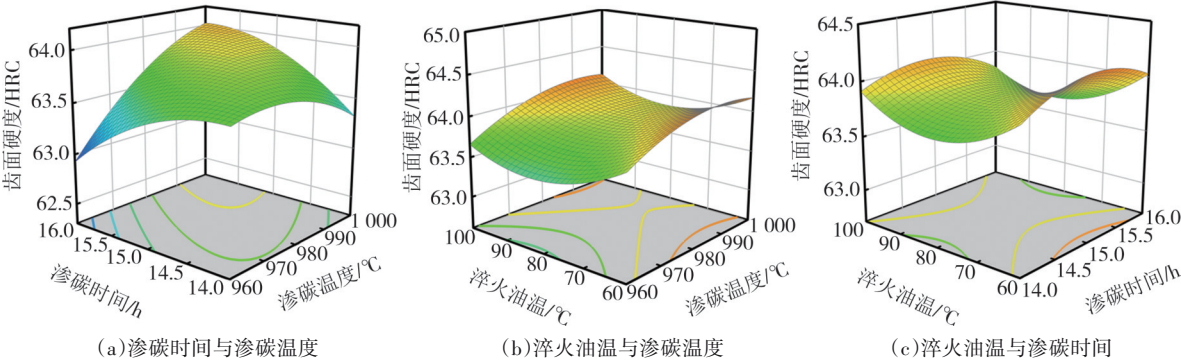


图 10 不同工艺参数交互对齿面硬度的影响

Fig.10 The influence of the interaction of different process parameters on the tooth surface hardness

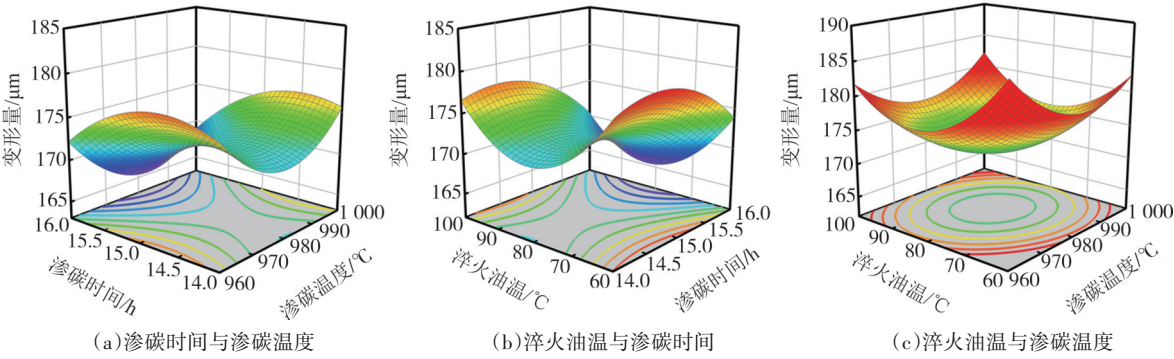


图 11 不同工艺参数交互对齿面变形量的影响

Fig.11 The influence of the interaction of different process parameters on the tooth surface deformation

2.2.3 工艺参数优化与验证

以最大齿面硬度 $H_{\max}$ 和最小齿面变形量 $D_{\min}$ 为优化目标,以渗碳温度 T_c 、渗碳时间 t 、淬火油温 T_o 为设计变量,基于 Design-Expert 软件对各响应指标进行协同优化,设置各响应指标相应的优化准则、权重系数和重要性,如表 6 所示.通过协同优化求解,

获得优化后工艺参数为渗碳温度 995 $^{\circ}\text{C}$,渗碳时间 16 h,淬火油温 72 $^{\circ}\text{C}$,在此参数下,齿面硬度为 64.036 HRC,齿面变形量为 168.5 μm .

将螺旋锥齿轮按照优化后的工艺参数进行渗碳淬火试验,对齿面硬度和齿面变形量进行检测,试验结果与基于响应曲面法得到的预测值对比见表 7,结果表明,试验值与预测值的误差小于 10%.

表 6 优化准则及期望响应设置

Tab.6 Optimization criteria and expected response settings

名称	目标	下限	上限	权重	重要性
T_c	范围内	960 ℃	1 000 ℃	1	3
t	范围内	14 h	16 h	1	3
T_o	范围内	60 ℃	100 ℃	1	3
H	最大化	62.956 HRC	64.208 HRC	1	3
D	最小化	168.5 μm	186.5 μm	1	3

表 7 预测值与试验值对比

Tab.7 Comparison of predicted values with experimental values

齿面硬度			齿面变形量		
预测值/HRC	试验值/HRC	误差/%	预测值	试验值/ μm	误差/%
64.036	66	2.98	168.5	185	8.92

3 结 论

本文利用有限元软件 DEFORM, 结合 JMatPro 软件计算 15Cr14Co12Mo5Ni 航空高强钢的材料性能参数, 对螺旋锥齿轮的渗碳淬火过程进行数值模拟, 得到如下主要结论:

1)经渗碳(980 ℃)、高温回火(680 ℃保温)后, 齿顶表面碳含量为 1.93%, 齿根为 1.69%, 两侧齿面的碳含量分布相近, 有效渗层深度在齿面处为 1.373 mm, 齿根处为 1.065 mm, 模拟与试验误差小于 5%.

2)经淬火(1 060 ℃保温 15 min)后, 马氏体体积分数为 6.8%~99.77%, 经两次回火(500 ℃)后, 除齿顶及边角外完全马氏体化. 齿顶、齿面、齿根和心部的硬度分别为 65.25 HRC、63.87 HRC、63.01 HRC 和 49.09 HRC, 硬度沿深度逐渐递减, 与试验结果误差在 5% 以内. 齿轮整体呈膨胀变形, 齿轮轴的最大变形量为 359.4 μm , 自底端向台阶面递减, 齿面的变形量为 152.5 μm , 齿顶区域的变形量从上至下逐渐减小, 整体大于齿根部位.

3)构建基于 BBD 试验设计的工艺参数优化模型, 结果显示渗碳温度对硬度影响最显著, 渗碳时间主导变形量. 优化工艺参数为渗碳温度 995 ℃, 渗碳时间 16 h, 淬火油温 72 ℃, 对应的齿面硬度达 64.036 HRC, 齿面变形量为 168.5 μm , 模型预测精度大于 90%.

参考文献

[1] 吕春艳, 尹书颖, 孙科举. 美国新一代航空高性能齿轮钢研制进展分析[J]. 航空动力, 2025(5):27-29.

LÜ C Y, YIN S Y, SUN K J. Development of next generation high performance steels for aviation gears in the USA [J]. Aerospace Power, 2025(5):27-29. (in Chinese)

[2] 王承霖, 何非, 文超, 等. 基于数值模拟的 20MnCr5 钢齿轮渗碳淬火工艺优化[J]. 金属加工(热加工), 2025(9):81-90.

WANG C L, HE F, WEN C, et al. Optimization of carburizing and quenching process of 20MnCr5 steel gear based on numerical simulation[J]. Metal Working, 2025(9):81-90. (in Chinese)

[3] 丰瑞博, 徐红玉, 张丰收, 等. 18Cr2Ni4WA 钢弧齿锥齿轮淬火工艺参数优化研究[J]. 机械传动, 2025, 49(6):124-130.

FENG R B, XU H Y, ZHANG F S, et al. Optimization of quenching process parameters for 18Cr2Ni4WA steel spiral bevel gears [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(6):124-130. (in Chinese)

[4] HE Y, ZENG X J, LI L Q, et al. Phase composition and numerical model of low-pressure pulse carburized layer in 15Cr14Co12Mo5Ni2W steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 484:130868.

[5] 杨婷, 冯志明, 刘需, 等. 20CrMnTi 钢齿轮渗碳淬火模拟及其组织与性能分析[J]. 金属热处理, 2025, 50(10):310-316.

YANG T, FENG Z M, LIU X, et al. Simulation on carburizing and quenching process of 20CrMnTi steel gear and analysis of its microstructure and properties [J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(10):310-316. (in Chinese)

[6] 方秀荣, 刘留, 徐慧慧, 等. 渗碳前预热处理对 17CrNiMo6 钢制齿轮轴畸变的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(3):113-119.

FANG X R, LIU L, XU H H, et al. Effect of pre-heat treatment before carburizing on distortion of gear shaft made of 17CrNiMo6 steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(3):113-119. (in Chinese)

[7] 温冠云, 杜晨, 麻瑜梁, 等. 12CrNi3 斜齿轮渗碳淬火工艺有限元仿真关键技术研究[J]. 新技术新工艺, 2019(6):20-26.

WEN G Y, DU C, MA Y L, et al. Research on key technology of finite element simulation of 12CrNi3 helical gear carburizing and quenching process [J]. New Technology & New Process, 2019(6):20-26. (in Chinese)

[8] WANG J G, YANG S, LI J H, et al. Mathematical simulation and experimental verification of carburizing quenching process based on multi-field coupling[J]. Coatings, 2021, 11(9):1132.

[9] LIU H M, HU X, TANG J Y, et al. A novel method for predicting carburizing and quenching deformation of the gear with

- the mandrel based on carburizing expansion strain and dynamic thermal boundary conditions of quenching [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 494:131377.
- [10] 丰瑞博, 徐红玉, 张丰收. 基于响应曲面法的弧齿锥齿轮渗碳淬火工艺参数优化[J]. *金属热处理*, 2025, 50(5):293-299.
- FENG R B, XU H Y, ZHANG F S. Optimization of carburization and quenching process parameters for spiral bevel gears based on response surface methodology [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2025, 50(5): 293-299. (in Chinese)
- [11] 李新宇, 杨卯生, 周晓龙, 等. 15Cr14Co12Mo5Ni2 齿轮钢的扭转疲劳特性及裂纹扩展行为[J]. *钢铁*, 2017, 52(9): 84-91.
- LIX Y, YANG M S, ZHOU X L, et al. Torsion fatigue characteristics and crack propagation behavior of 15Cr14Co12Mo5Ni2 gear steel[J]. *Iron and Steel*, 2017, 52(9):84-91. (in Chinese)
- [12] 朱鹏, 冯玮. 基于BP神经网络的15Cr14Co12Mo5Ni2 齿轮钢本构模型建立及热加工图研究[J]. *塑性工程学报*, 2025, 32(8):177-186.
- ZHU P, FENG W. Research on establishment of constitutive model and hot processing map of 15Cr14Co12Mo5Ni2 gear steel based on BP neural network [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2025, 32(8):177-186. (in Chinese)
- [13] 孙振淋, 何培刚, 李岩, 等. 离子氮化对 15Cr14Co12Mo4Ni2 材料微观组织与性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2025, 54(10): 106-113.
- SUN Z L, HE P G, LI Y, et al. Effects of ion-nitriding on microstructure and property of 15Cr14Co12Mo4Ni2 material [J]. *Hot Working Technology*, 2025, 54(10):106-113. (in Chinese)
- [14] 施文鹏, 黎恒逸, 张元东, 等. 基于 DEFORM 数值模拟的 15Cr14Co12Mo5Ni 钢齿轮锻造方案优化[J]. *精密成形工程*, 2025, 17(4): 78-86.
- SHI W P, LI H Y, ZHANG Y D, et al. Optimization of 15Cr14Co12Mo5Ni steel gear forging scheme based on DEFORM numerical simulation [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2025, 17(4): 78-86. (in Chinese)
- [15] 王会. 航空轴承钢的真空低压渗碳及渗后热处理组织性能研究[D]. 沈阳:东北大学, 2020.
- WANG H. Investigation on the microstructure and property of an aero bearing steel during vacuum low pressure carburizing and subsequent heat treatment [D]. Shenyang: Northeastern University, 2020. (in Chinese)