

【工程与技术研究】

淬火温度对 GCr15 钢十字轴的数值模拟与试验

姚 芳, 胡 斌, 贾会星

(滁州职业技术学院 机械与汽车工程学院, 安徽 滁州 239000)

摘 要:采用数值模拟的方法研究三种不同温度下淬火对 GCr15 钢十字轴组织演变和硬度的影响。利用 Deform - 3D 软件建立十字轴数值模拟模型, 得到三种温度下淬火过程温度变化曲线、淬火后组织含量云图及表面和芯部硬度。最后对 GCr15 钢试样在三种温度下进行淬火试验, 通过金相显微镜和洛氏硬度计得到显微组织和硬度大小。结果显示: 淬火试验与数值模拟结果相似, 在 840 °C 下数值模拟的硬度最大且马氏体含量最多, 在该温度下试验得到的隐针状马氏体和细小针状马氏体最多, 硬度也最大; 在 800 °C 和 880 °C 下, 由于淬火温度过低或过高导致淬火后显微组织和硬度结果较差。

关键词: 淬火; 数值模拟; 硬度; 马氏体

中图分类号: TG 162.71 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.cnki.1673-2618.2022.06.014

万向联轴器具有传动高、传动力矩大、传动平稳、润滑条件好、噪声低、使用寿命长、倾斜角度大等优点, 适用于制作高速运转的零件^[1-3]。十字轴是万向联轴器中重要零件之一, 主要材料为 GCr15 轴承钢。GCr15 轴承钢属于高碳铬, 具有良好的抗疲劳性能、合适的弹性和韧性, 淬回火后硬度高且均匀, 并且合金成分易于控制, 热处理方法成熟, 在国内外机械零件制造领域得到广泛应用^[4-6]。董凤奎等研究了淬火的加热温度、冷却速度及回火温度对 GCr15 钢淬火裂纹的影响^[7]。张学飞等利用 Jmatpro 和 Deform - 3D 软件对 GCr15 轴承套圈进行热处理变形数值模拟, 预测了套圈在淬火过程中的温度、相变、变形等的变化情况^[8]。覃羨烘研究了回火温度对 GCr15 钢金相组织和力学性能的影响, 随着回火温度的升高, GCr15 钢试样组织中不断有碳化物析出并聚集, 残余奥氏体逐渐分解^[9]。周宋泽等通过扫描电镜、能量色散光谱仪、电子背散射衍射技术、洛氏硬度计等研究了低温回火时间对 GCr15 钢显微组织和力学性能的影响^[10]。袁晓虹等研究回火时间对高温轴承钢组织和性能的影响, 得到回火时间的延长促进了试验钢中第二相的析出和长大, 使得钢的强度和硬度提高^[11]。本文以材料为 GCr15 钢的十字轴为研究对象, 首先基于 Deform - 3D 软件分别在 800 °C、840 °C、880 °C 下进行淬火的数值模拟, 得到淬火后 GCr15 钢十字轴组织含量、温度和硬度的变化情况, 然后通过金相显微镜、洛氏硬度计得到在三种温度下淬火的 GCr15 钢的显微组织和硬度。

1 理论模型

1.1 淬火的数学模型

十字轴是具有轴对称的零件, 淬火时, 可根据傅立叶传热法和能量守恒定律建立零件传热分析问题的

收稿日期: 2022 - 03 - 22

基金项目: 滁州职业技术学院科研项目(YJY - 2020 - 23)

第一作者简介: 姚 芳(1987 -), 女, 安徽桐城人, 讲师, 硕士, 主要从事测量学、仿真学研究。

E-mail: 1135156066@qq.com

控制方程,分析对象的瞬态温度场 $T(x,y,z)$ 应满足^[12] $\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \rho Q = \rho c_T \frac{\partial T}{\partial t}$ 。式中, ρ 为零件材料的密度, ρc_T 为零件材料的比热容, k_x, k_y, k_z 分别为零件沿 x, y, z 方向的热传导系数, Q 为零件内部的热源强度。对于淬火过程, ρc_T 和热传导系数与零件淬火过程中的温度有关^[13]。

当零件淬火时,边界条件是对流热边界条件,即 $k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h(T_\infty - T)$ 。式中, n_x, n_y, n_z 为边界外法线的方向余弦, h 为对流换热系数, T_∞ 为淬火介质温度, T 为零件表面温度。

1.2 相变动力学

材料在热处理过程中复杂的非等温相变的求解非常困难,通过数值模拟可将相变中转变量与时间的关系简化为指数关系。根据相变机制,固态相变可分为扩散型相变和非扩散型相变。扩散型相变数学模型用于描述如铁素体、珠光体等受原子扩散控制的相变中转变量与时间的关系,采用 Avrami 方程^[14] 和叠加原理^[15] 计算,即 $V = 1 - \exp(-B\tau^k)$ 。式中, V 为相转变量, τ 为等温时间, B, k 均为经验参数, B 取决于温度及原始相的成分和晶粒大小等, k 取决于相变类型。马氏体相变为非扩散型相变,其计算模型采用文献^[16]关于温度的函数关系式 $\xi_m = 1 - \exp[-1.10 \times 10^{-2} (M_s - T_q)]$ 。式中, ξ_m 为马氏体转变量, M_s 为马氏体转变开始温度, T_q 为淬火最低温度。

2 数值模拟设置

(1)模型建立与简化。根据万向联轴器中十字轴参数,利用三维建模软件 UG 对十字轴进行几何模型的建立,然后将几何模型导入 Deform - 3D 软件中进行数值模拟。考虑到十字轴具有几何对称及边界条件的对称性,取十字轴的 1/4 进行淬火数值仿真(图 1)。在保证有限元模拟求解精度情况下,简化模型可以减少模拟和求解的时间。

(2)GCr15 钢参数。十字轴采用 GCr15 钢,其主要化学成分见表 1。利用 Jmatpro 软件建立 GCr15 钢参数。

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Mo | P | S | Fe |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|--------|--------|----|
| 实测质量分数 | 0.95~1.05 | 0.15~0.35 | 0.20~0.40 | 1.30~1.65 | ≤0.10 | ≤0.027 | ≤0.020 | 余量 |

(3)工艺参数设定。采用淬火热处理工艺研究淬火温度对 GCr15 钢十字轴的影响,将 GCr15 钢十字轴从室温加热至奥氏体化以上温度,保温一定时间后放入油中进行淬火。具体热处理工艺如图 2 所示:分别在 800 °C、840 °C、880 °C 中保温 2 h,淬火介质为油,GCr15 钢十字轴在油中的热传导系数见图 3。

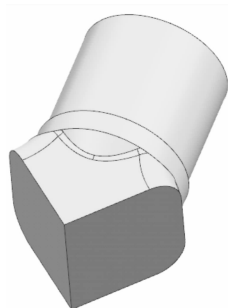


图 1 1/4 十字轴模型

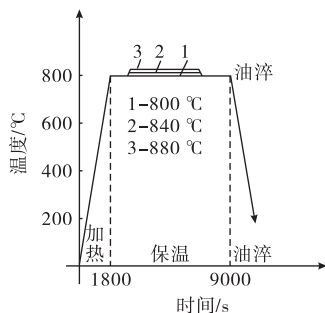


图 2 热处理工艺

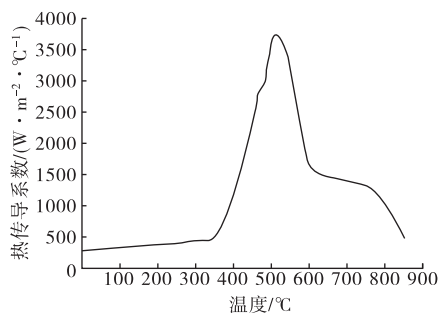


图 3 十字轴在油中的热传导系数

3 数值分析

为更好地分析 GCr15 钢十字轴淬火后表面和芯部组织、硬度的变化情况,将 1/4 十字轴模型分割一

半并分别用 A 和 C 表示表面和芯部的情况,分别用 AA₁ 和 CC₁ 表示表面和芯部轴向变化情况(图 4)。

3.1 温度的变化

由图 5 可知,淬火过程中由于油的换热能力差,三种温度下表面和芯部冷却速率几乎一样。但 GCr15 钢十字轴超过奥氏体化温度后,三种淬火温度下冷却,表面温度首先开始下降,然后芯部温度也开始下降,最后温度趋于一致。三种温度下表面的降温速率比芯部快,表面和芯部分别在 150 s 和 180 s 后温度才达到一致。这是由于十字轴表面先接触冷却介质且表面能与冷却介质有较大的接触面积,换热剧烈。GCr15 钢十字轴表面先与油接触且开始产生马氏体相变,产生的相变潜热将会影响芯部的降温速率;但随着芯部温度也达到 Ms 点,发生马氏体转变,内外温度趋于一致。

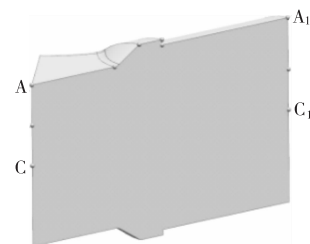


图 4 十字轴截面

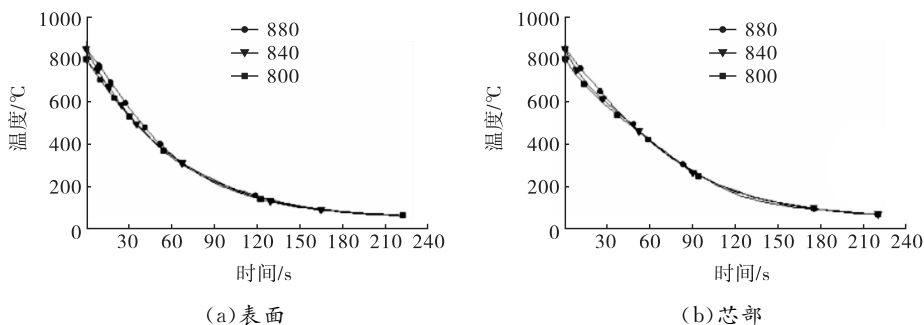


图 5 GCr15 钢十字轴淬火过程温度变化曲线

3.2 组织的变化

对 GCr15 钢十字轴进行淬火数值模拟,得到马氏体、残余奥氏体及少量碳化物。GCr15 钢十字轴分别在 800 °C、840 °C、880 °C 下进行淬火得到马氏体和残余奥氏体的体积分数变化云图(图 6、图 7)。

分别在三种温度下进行淬火,GCr15 钢十字轴表面马氏体含量大于芯部(图 6)。其中,在 800 °C 淬火时,芯部马氏体含量为 5.98%,表面马氏体含量为 66.00%,芯部和表面相差 60.02%;而在 840 °C 下,芯部马氏体含量为 77.70%,表面马氏体含量为 86.20%,表面和芯部相差 8.50%;880 °C 淬火时,表面和芯部的马氏体含量反而都比 840 °C 时少,表面马氏体含量为 84.70%,芯部马氏体含量为 37.70%。

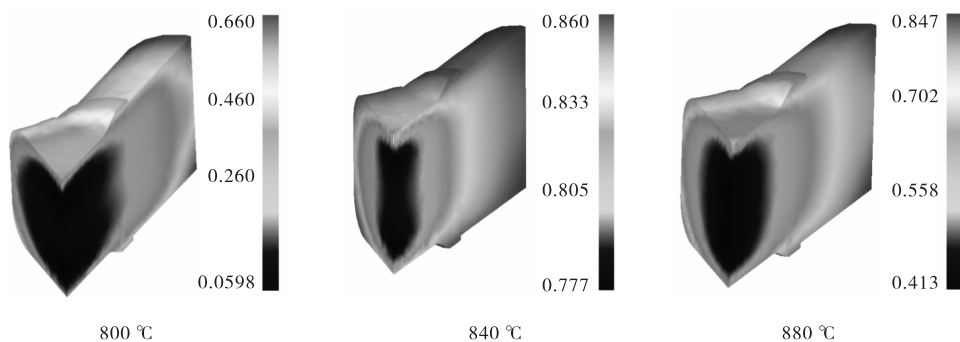


图 6 不同温度下淬火的马氏体体积分数云图

在三种温度下进行淬火,表面和芯部残余奥氏体含量都随温度升高而增加,且表面残余奥氏体含量变化较小,芯部残余奥氏体含量变化大(图 7)。在 800 °C、840 °C、880 °C 下淬火时,表面残余奥氏体含量分别为 9.00%、11.70%、11.80%,而芯部残余奥氏体最低,含量分别为 0.80%、5.89%、10.00%。

3.3 硬度的变化

在三种温度下进行淬火,表面硬度大于芯部。其中 GCr15 钢十字轴表面,在 800 °C 下进行淬火得到的硬度为 60.0 HRC;在 840 °C 下淬火得到的硬度最大,为 61.0 HRC;随着淬火温度升高到 880 °C,硬度

下降到 60.5 HRC。在 800 °C、840 °C、880 °C 下进行淬火, GCr15 钢十字轴芯部硬度分别为 58.6 HRC、60.2 HRC、59.8 HRC, 其变化规律与 GCr15 钢十字轴表面硬度类似。

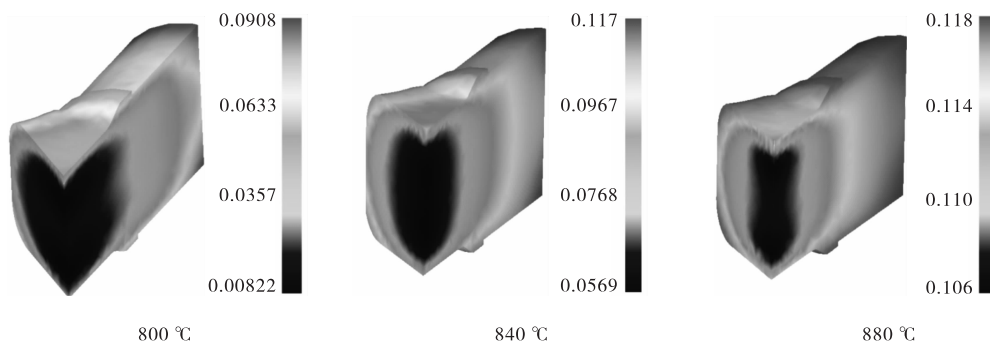


图 7 不同温度下淬火的残余奥氏体体积分数云图

4 GCr15 钢的淬火试验

首先对 GCr15 钢进行球化退火得到珠光体组织, 然后在 KSL-1200X-M 箱中进行淬火, 淬火工艺如图 2 所示。对淬火后试样进行机械抛光, 选用体积分数 4% 的硝酸酒精溶液对试样进行侵蚀, 以使用金相显微镜观察。并利用 HRD-150 型电动洛氏硬度计对试样进行洛氏硬度测量。

4.1 微观组织分析

图 8 为三种温度下淬火的 GCr15 钢显微组织。图 8(a) 显示淬火温度过低时, GCr15 钢显微组织仅部分发生了相变, 还保留着未溶解的白色碳化物。其余发生相变部位得到隐针状马氏体和黑色团状的托氏体。图 8(b) 显示在 840 °C 下进行淬火时, 显微组织全部发生相变, 组织成分主要是隐针状(黑区)及细小针状马氏体(亮区), 未溶解的白色碳化物以及残余奥氏体较少。图 8(c) 显示 880 °C 下淬火, 显微组织以马氏体、残余奥氏体及碳化物为主, 但是在马氏体组织中出现了粗针状的马氏体。说明随着淬火温度升高, 碳化物颗粒大量溶解, 并随着保温时间的增加不断向晶内扩展, 从而使淬火后的隐针状马氏体区域减少, 在富碳、富铬区除获得粗大针状马氏体外, 残余奥氏体含量也因为 M_s 点下降而增多。

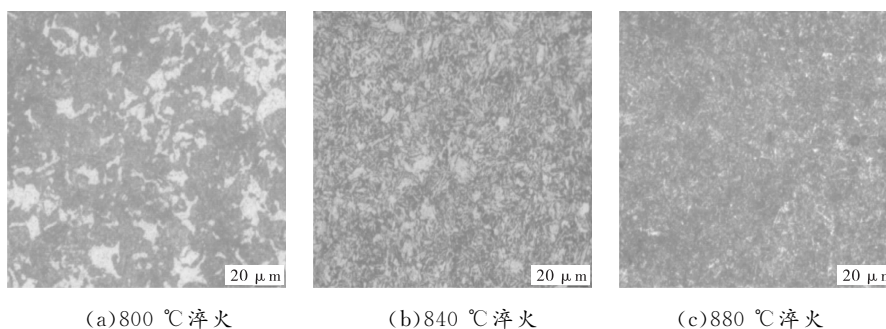


图 8 不同温度下淬火的 GCr15 钢显微组织

4.2 硬度分析

GCr15 钢分别在 800 °C、840 °C 和 880 °C 下进行淬火得到的表面硬度分别为 59.1 HRC、63.9 HRC、62.5 HRC, 芯部硬度分别为 56.1 HRC、62.9 HRC、60.4 HRC。三种温度下淬火的 GCr15 钢表面硬度大于芯部硬度, 主要因为表面的马氏体含量高于芯部。在 800 °C 下淬火的表面和芯部硬度都低于 60 HRC, 说明淬火温度不够, 淬火后硬度偏低。在 840 °C 进行淬火的表面和芯部硬度高于 800 °C 和 880 °C, 说明在该温度下马氏体含量最多, 且淬火后得到隐针状马氏体和细小针状马氏体。在 880 °C 下淬火时, 实际加热已经接近 900 °C, 随着温度增加, 淬火后隐针状马氏体区域显著减少, 粗大针状马氏体增加, 残余奥氏体的含量也因 M_s 点的下降而增多, 从而导致在该温度下淬火的硬度下降。

5 结论

(1)利用 Deform-3D 软件对 GCr15 钢十字轴分别在 800 °C、840 °C、880 °C 下淬火进行数值模拟。结果显示,GCr15 钢十字轴表面冷却速率大于芯部;在 840 °C 下淬火,GCr15 钢十字轴表面和芯部马氏体含量大于 800 °C 和 880 °C,而残余奥氏体含量在 880 °C 下进行淬火时最多;在 840 °C 下淬火得到的表面和芯部的硬度大于 800 °C 和 880 °C。

(2)对 GCr15 钢分别进行三种温度的淬火试验,利用金相显微镜和洛氏硬度计进行显微组织和硬度检测,结果与数值模拟结果相近。在 840 °C 下淬火得到隐针状马氏体和细小针状马氏体含量多,且硬度最大;在 800 °C 下,由于淬火温度不够,马氏体含量少,碳化物和残余奥氏体含量多,导致硬度偏低;在 880 °C 下淬火,由于温度过高,淬火后隐针状马氏体含量减少,残余奥氏体含量增多,导致硬度降低。

参 考 文 献:

- [1] 范景峰,李大磊.单十字轴万向节十字轴的运动分析及仿真[J].机械传动,2016,40(3):131-133.
- [2] 郑红梅,姜子刚,朱长江.轧机万向联轴器十字轴断裂分析与改进[J].机械设计与制造,2015(5):14-18.
- [3] MELVIN A. Kinetics of phase change. II transformation-time relations for random distribution of nuclei[J]. The journal of chemical physics,1940,8(2):212.
- [4] 李明,赵永桥,何星,等.带状碳化物对 GCr15 轴承钢耐磨性能的影响[J].上海金属,2017,39(1):49-53.
- [5] 李昭昆,雷建中,徐海峰,等.国内外轴承钢的现状与发展趋势[J].钢铁研究学报,2016,28(3):1-12.
- [6] 郝庆婷,杜三明,王梦丹,等.不同化学热处理对 GCr15 钢力学性能及摩擦行为的影响[J].材料热处理学报,2021,42(5):117-123.
- [7] 董凤奎,刘年富,廖卓文,等.热处理工艺对 GCr15 轴承钢淬火裂纹的影响[J].金属材料与冶金工程,2020,48(2):46-50.
- [8] 张学飞,李卓,崔晓.GCr15 轴承套圈热处理变形数值模拟[J].轴承,2020(11):45-49.
- [9] 覃美烘.回火温度对 GCr15 机械轴承钢组织和力学性能的影响[J].热加工工艺,2021,50(6):120-122.
- [10] 周宋泽,汪小锋,陈剑斌.低温回火时间对 GCr15 钢组织演变与力学性能的影响[J].材料热处理学报,2021,42(5):64-71.
- [11] 袁晓虹,郑善举,阴树标,等.回火时间对高温轴承钢组织和性能的影响[J].金属热理,2014,39(10):28-31.
- [12] KOISTINEN D P, MARBURGER R E. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels[J]. Acta metallurgica,1959,7(1):59-60.
- [13] 樊东黎,潘健生,徐跃明,等.热处理技术手册[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [14] 崔忠圻,刘北兴.金属学与热处理原理[M].3版.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [15] 张清东,林潇,刘吉阳,等.Q&P 钢热处理过程有限元法数值模拟模型研究[J].金属学报,2019,55(12):1569-1580.
- [16] LI S, ZHANG L, REN Y, et al. Transient behavior of inclusions during reoxidation of Si-killed stainless steels in continuous casting tundish[J]. ISIJ international,2016,56(4):584-593.

Numerical Simulation and Experiment of Different Quenching Temperature of GCr15 Steel Cross Shaft

YAO Fang, HU Bin, JIA Hui-xing

(College of Mechanical and Automotive Engineering,
Chuzhou Polytechnic, Chuzhou 239000, China)

Abstract: The effects of quenching at three different temperatures on microstructure evolution and hardness of GCr15 steel are studied by numerical simulation and experiment. Using Deform-3D software, the numerical simulation model of the cross shaft is established, and the temperature change curve, the microstructure cloud chart after quenching and the hardness of the surface and core are obtained. Finally, GCr15 steel samples are quenched at three temperatures, and the microstructure and hardness at different temperatures are obtained by metallographic microscope and rockwell hardness tester. The results of quenching test are similar to that of numerical simulation. At 840 °C, the maximum hardness and the maximum content of Martensite are obtained. However, the results of microstructure and hardness are poor at 800 °C and 880 °C because of too low and too high quenching temperature.

Keywords: quenching; numerical simulation; hardness; Martensite

(责任编辑:王新亮)

~~~~~  
(上接第 19 页)

## Simulation Study on Flight Timing and Reduction Workflow of Airport Transportation Management Committee Based on Petri Network

HUANG Tao<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>2</sup>

(1. General Aviation Industry Development Research Center, Shenyang Aerospace University;  
2. Civil Aviation College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In recent years, the civil aviation industry is in a period of digital transformation and the construction of a collaborative operation mechanism, and the demand for air transport services has increased significantly. It is imperative to optimize the operation workflow and to improve the efficiency of civil aviation operation. In this paper, the workflow of the civil aviation airport joint operation management committee on the adjustment and reduction of airport flights is summarized under the background of digital transformation. The workflow is simulated based on the modeling theory of the Petri network system, and the performance of the simulation model is analyzed to find out the links that are prone to bottlenecks in the operation process. Combined with the current digital development process of the civil aviation industry, the strategy of how to apply the new system of civil aviation digital transformation at key operating nodes is put forward. It can provide a decision-making basis for civil aviation to seize the opportunity of digital transformation and optimize the operation workflow.

**Keywords:** airport transportation management committee; Petri network; simulation modeling

(责任编辑:唐立平)