

郭鹏,胡忠举.球铁材质扩径机锥体淬火热应力分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(2):65-70.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.02.009

Guo P, Hu Z J. Quenching Thermal-stress Analysis of the Ductile Iron Cone of Diameter-enlarging Machine [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology ( Natural Science Edition ), 2019, 34 ( 2 ): 65 - 70. doi: 10. 13582/j. cnki. 1672 - 9102. 2019. 02. 009

# 球铁材质扩径机锥体淬火热应力分析

郭鹏,胡忠举\*

(湖南科技大学 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**利用 ANSYS 有限元软件对扩径机锥体表面淬火过程进行热分析和热应力分析,获得其温度分布与热应力分布规律.分析表明:球铁材质扩径机锥体表面淬火冷却速度对淬火热应力的影响显著,凹槽边倒角尺寸、淬火温度对淬火热应力也有明显影响.分析结果有助于优化球铁材质扩径机锥体热处理工艺参数及结构工艺参数.

**关键词:**扩径机锥体;表面淬火;热应力;工艺参数

中图分类号: TG156 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2019)02-0065-06

## Quenching Thermal-stress Analysis of the Ductile Iron Cone of Diameter-enlarging Machine

Guo Peng, Hu Zhongju

(Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The analysis of thermal and thermal-stress on the surface quenching process of the cone of diameter-enlarging machine were conducted, and the laws of temperature distribution and thermal-stress distribution were obtained by using the finite element software ANSYS. The analysis shows that the quenching thermal-stress of the ductile-iron cone of diameter-enlarging machine can be obviously influenced by three aspects: the main one is the surface quenching cooling rate, and the others are the chamfer dimension of the groove boundary and quenching temperature. The analysis results are conducive to the optimization of heat-treatment and structure process parameters of the ductile-iron cone of diameter-enlarging machine.

**Keywords:** the cone of diameter-enlarging machine; surface quenching; thermal-stress; process parameter

扩径机是制管的关键技术装备,扩径机锥体是扩径机的核心部件之一.扩径机锥体一般由合金钢或球铁制造.为了达到生产使用的要求,需要对球铁材质扩径机锥体进行表面淬火.而淬火过程是一个复杂的热力耦合作用过程,如果生成的热应力过大会导致扩径机锥体产生微裂纹或开裂,无法正常使用.近年来,零件的淬火热应力问题受到了很多研究者的关注.朱希玲<sup>[1]</sup>、A. K. Nallathambi<sup>[2]</sup>、Eric Feulvarch<sup>[3]</sup>等分析了金属热处理中热应力的产生原因,研究了淬火应力与零件开裂失效的关系;章莹<sup>[4]</sup>用 ANSYS 模拟了工

收稿日期:2018-11-20

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2012BAF02B01)

\*通信作者,E-mail: zjhu@hnust.edu.cn

件淬冷的状况, 研究结果显示提高其换热系数, 可以提高淬冷性能, 工件的形状对淬冷后的残余应力有较大影响; 袁望姣等<sup>[5]</sup>进行了铝合金厚板淬火过程的热力耦合分析, 探讨了其在淬火过程中的热应力变化规律; 陈金明<sup>[6]</sup>对齿轮淬火过程进行了有限元分析, 得出控制淬火过程的冷却速度, 可对齿轮淬火过程的热应力及热变形进行控制的认证; 赵建琴<sup>[7]</sup>、Milan Sapieta<sup>[8]</sup>、M. Yaakoubi<sup>[9]</sup>等也进行了淬火应力-应变场的模拟分析; R. A. Hawileh 等<sup>[10-14]</sup>对淬火过程中的应力及变形问题进行了分析研究. 本文运用 ANSYS 有限元软件对球铁材质扩径机锥体表面淬火过程的温度场及热应力场进行分析, 为扩径机锥体淬火工艺参数优化提供依据.

## 1 扩径机锥体参数及有限元建模

### 1.1 问题描述

所研究的扩径机锥体由球墨铸铁 QT900-2 制造, 几何模型如图 1 所示. 根据其热处理工艺规范, 对其进行表面淬火, 即先对表面进行感应加热, 达到相关热处理工艺规范要求后, 再对其加热表面喷射聚合物水溶液进行冷却, 在 10 个表面依次进行表面淬火后, 最后进行去应力退火处理. 该热处理工艺过程的关键是控制淬火工艺参数, 使扩径机锥体表面获得 42~46HRC 的硬度, 并防止出现淬火裂纹, 导致零件报废. 该扩径机锥体的导热系数为  $31 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 比热容为  $515 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 密度为  $7\,180 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 弹性模量为  $1.76 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 线膨胀系数为  $1.25 \times 10^{-5} \text{ 1}/^\circ\text{C}$ , 泊松比为 0.275. 根据该零件表面淬火热处理工艺要求和设备条件确定的仿真参数: 淬火温度为  $880 \sim 920 \text{ }^\circ\text{C}$ , 换热系数为  $1\,000 \sim 30\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 凹槽边倒角为 C0~C4 mm.

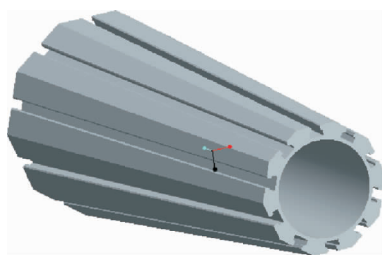


图 1 QT900-2 扩径机锥体几何模型

### 1.2 问题分析及有限元建模

本文采用 ANSYS 软件中的间接法分析扩径机锥体淬火热应力, 即首先进行热分析, 然后将求得的单元节点温度作为体载荷施加在模型结构上进行热应力分析<sup>[15-16]</sup>. 由于该扩径机锥体模型属于轴对称问题, 结合其热处理工艺, 取扩径机锥体周向结构的 1/20 表层(深度 20 mm)进行分析<sup>[17-18]</sup>. 用 Pro-E 进行三维建模, 然后导入有限元软件 ANSYS, 采用三维八节点 SOLID70 热分析单元进行热分析, 再进行热应力分析. 建立的有限元模型如图 2 所示.

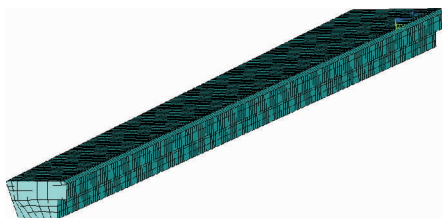


图 2 扩径机锥体有限元模型

## 2 热分析与热应力分析

### 2.1 热分析

通过扩径机锥体在热处理过程中所受的热载荷, 求出扩径机锥体表面淬火过程的温度分布. 根据扩

径机锥体表面淬火热处理过程和淬火安全技术操作规程进行热分析,加热过程对扩径机锥体表面施加表面节点温度,冷却过程对扩径机锥体表面施加表面传热载荷,边界条件是大端面、小端面、侧面、凹槽面及下表面绝热.利用 ANSYS 有限元软件,对扩径机锥体模型进行温度场分析,得到扩径机锥体表面淬火冷却过程的温度分布云图,如图 3 所示.由图可以看出,扩径机锥体在表面淬火冷却过程中,其温度梯度很大.

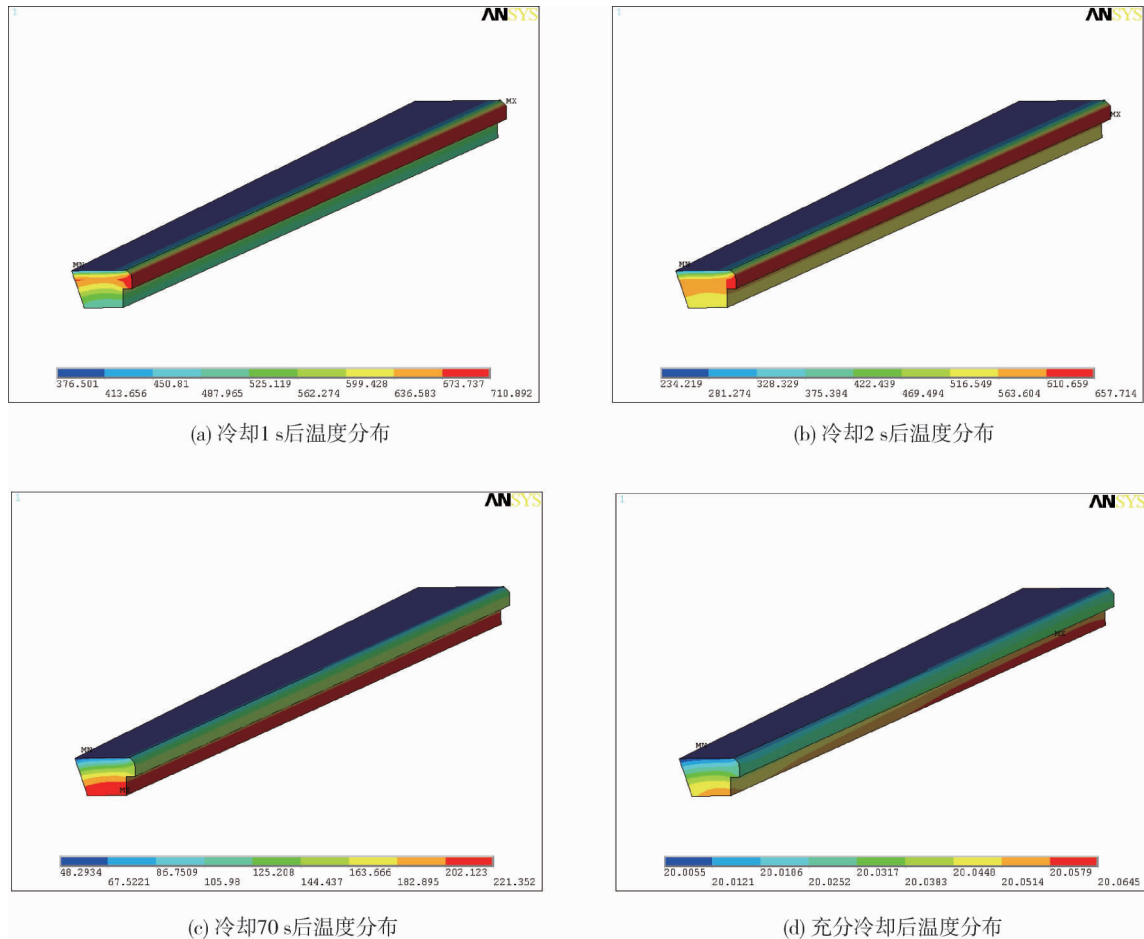


图3 扩径机锥体温度分布

## 2.2 热应力分析

在 2.1 节热分析的基础上,再进行热应力分析.采用 SOLID185 结构单元,设置相关的位移约束,并根据 2.1 节热分析的结果施加温度载荷后求解<sup>[19-20]</sup>.通过热应力分析,得到相对应的扩径机锥体模型的热应力分布云图,如图 4 所示.图 4 中所取仿真参数:淬火温度 880 °C,换热系数 12 500 W/(m<sup>2</sup>·K),凹槽边倒角 C3.由图 4a 可知:最大热应力位置在小端面、侧面及下表面的交汇处,最大热应力值为 457.49 MPa.

## 3 扩径机锥体表面淬火热应力的变化规律

### 3.1 冷却速度对扩径机锥体淬火热应力的影响

图 5 是冷却速度对热应力的影响情况.图 5a 是在热处理工艺规范要求的淬火温度范围内,凹槽边倒角一定时,不同的冷却速度对热应力的影响;图 5b 是在结构允许的凹槽边倒角范围内,淬火温度一定时,不同的冷却速度对热应力的影响.从图中可以看出:随着扩径机锥体的冷却速度的增大,其热应力先减小,后增大,最大差值接近 380 MPa 对热应力的影响较大.这主要是由于淬火时,升温速度快,表层温度高,当冷却换热系数较小时,随着冷却速度的增大,扩径机锥体表面温度与里层温度的差值减少;当冷却速度超过一定值时,在冷却过程中扩径机锥体表面温度与里层温度的差值过大,从而导致其热应力出现先减小后

增大的情况.在有限元模型中,以换热系数的大小来体现冷却速度,换热系数越大,冷却速度越快.由图5可知,换热系数取10 000~13 000 W/(m<sup>2</sup>·K)时,淬火热应力相对较小.

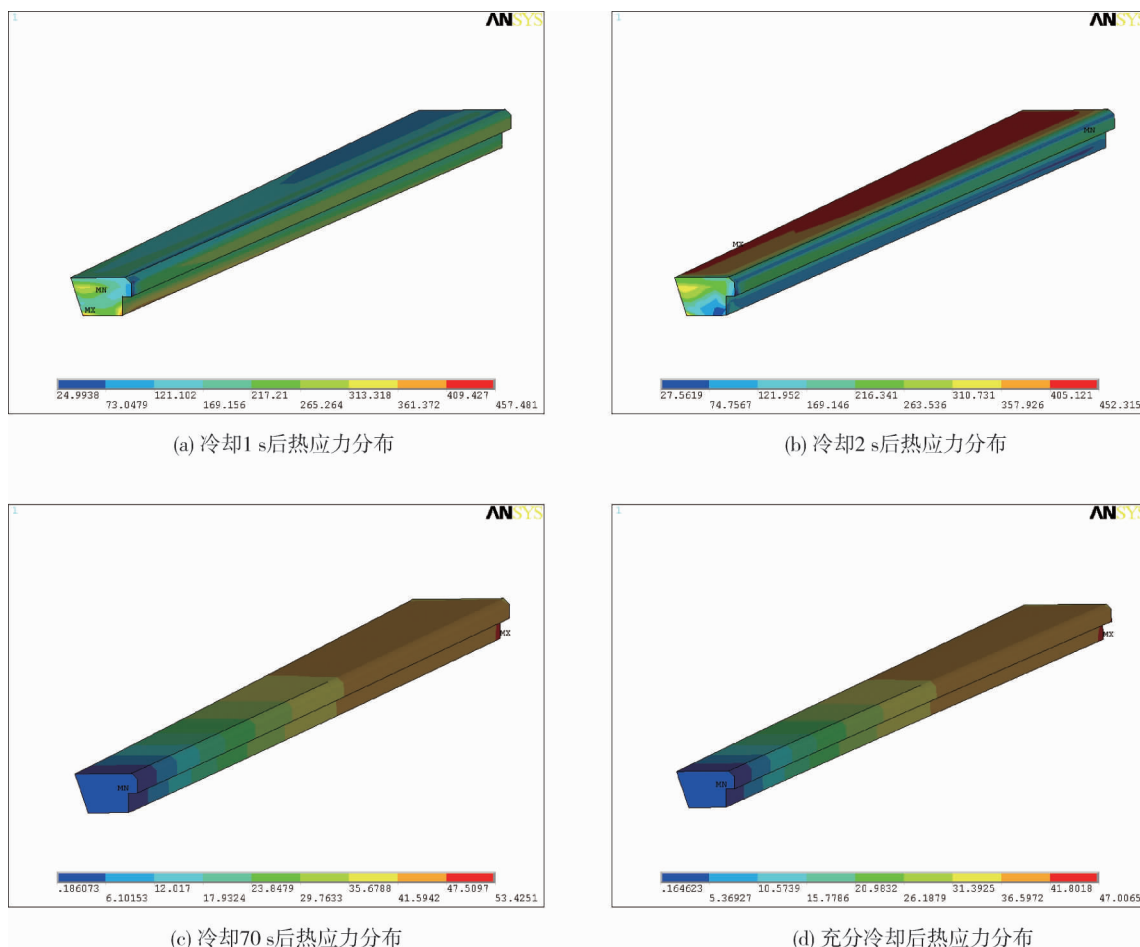


图4 扩径机锥体热应力分布

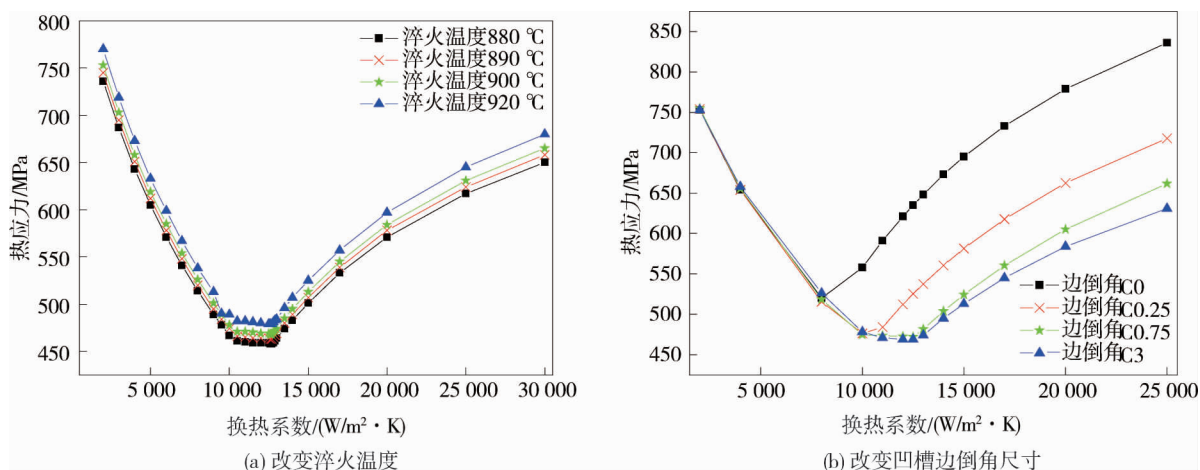


图5 冷却速度对热应力的影响

### 3.2 淬火温度对扩径机锥体淬火热应力的影响

图6是淬火温度对热应力的影响情况,从图中可看出:随着淬火温度的增加,其热应力增大,最大差值接近190 MPa.这主要是由于随着淬火温度的增加,增大了冷却过程中扩径机锥体表面与里层的温度差,从而使其淬火热应力增加.

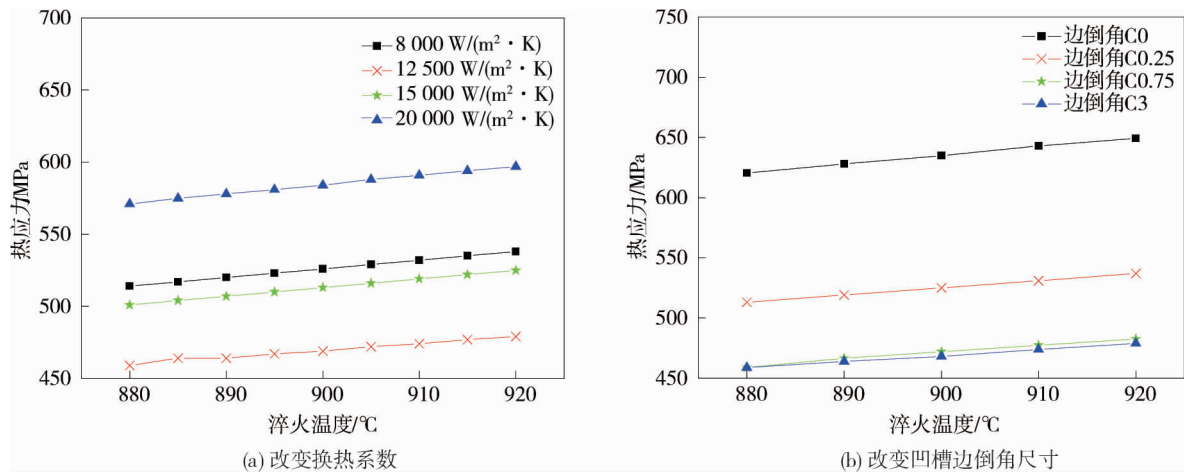


图6 淬火温度对热应力的影响

### 3.3 凹槽边倒角尺寸对扩径机锥体淬火热应力的影响

图7是凹槽边倒角尺寸对热应力的影响情况,从图中可看出:随着凹槽边倒角尺寸的增大,其热应力减小,其差值达264 MPa.这主要是由于在零件上具有夹(尖)角、切口、凹槽的部位易产生应力集中,通过倒角(或倒圆角)可以有效地改善其应力集中的情况.根据图7的结果,结合该扩径机锥体的使用要求,凹槽边倒角取C3,是合理的结构工艺参数.

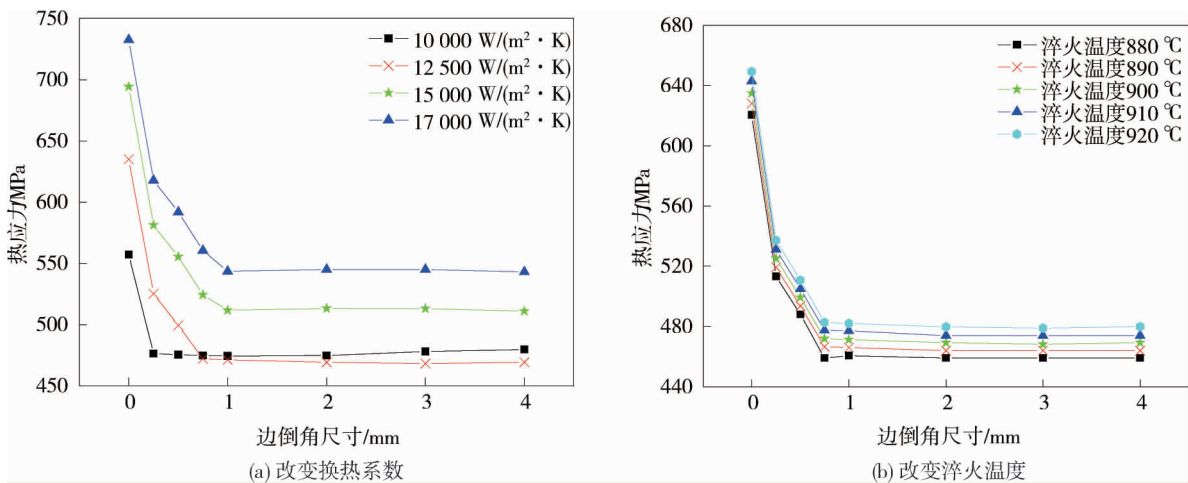


图7 凹槽边倒角尺寸对热应力的影响

## 4 结论

1) 冷却速度对球铁材质扩径机锥体淬火热应力的影响较大,凹槽边倒角尺寸、淬火温度对扩径机锥体淬火热应力也有明显的影响.随着冷却速度的增大,表面淬火热应力呈先减小后增大趋势,换热系数在 $10\,000\sim 13\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 范围时,淬火热应力较小;淬火温度的提高,增大了扩径机锥体表面与里层的温度差,从而导致其表面淬火热应力增大;凹槽边倒角的增大,能有效改善其应力集中,可使其淬火热应力减小.

2) 对所研究的球铁材质扩径机锥体,其合理的表面淬火工艺参数:换热系数为 $10\,000\sim 13\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,淬火温度为 $880\text{ }^\circ\text{C}$ .

3) 凹槽边倒角尺寸C3是合理的结构工艺参数.

### 参考文献:

[1] 朱希玲.端盖淬火过程中的热应力分析[J].上海工程技术大学学报,2018,32(3):240-243.

- [2] Nallathambi A K, Kaymak Y, Specht E, et al. Distortion and residual stresses during metal quenching process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(2):204-211.
- [3] Feulvarch E, Fontaine M, Bergheau J M. XFEM investigation of a crack path in residual stresses resulting from quenching[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2013, 75(11):62-70.
- [4] 章莹. 基于 ANSYS 的潜孔冲击器活塞淬火过程分析及工艺优化设计[D]. 荆州: 长江大学, 2018.
- [5] 袁望姣, 吴运新. 基于 ANSYS 的铝合金厚板淬火过程热力耦合数值分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(6): 2207-2212.
- [6] 陈金明. 齿轮淬火过程的温度场、热应力与热变形的有限元分析[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(6):181-184.
- [7] 赵建琴. H 型钢冷却过程的热应力分布规律研究[J]. *机械设计与研究*, 2010, 26(2):89-91.
- [8] Sapieta M, Dekyys V, Sapietová A. Thermal-stress Analysis of Beam Loaded by 3 Point Bending[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 136:216-219.
- [9] Yaakoubi M, Kchaou M, Dammak F. Trip effect on the modeling of thermo-mechanical behavior of steels during quenching process[J]. *Design and Modeling of Mechanical Systems*, 2013, 143(3):517-522.
- [10] Hawileh R A, Naser M Z. Thermal-stress analysis of RC beams reinforced with GFRP bars[J]. *Composites Part B*, 2012, 43(5):2135-2142.
- [11] Li Z, Ferguson B L, Nemkov V, et al. Effect of quenching rate on distortion and residual stresses during induction hardening of a full-float truck axle shaft[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(1):4170-4180.
- [12] Kchaou M, Durand D, Dammak F. Superficial quenching of mechanical pieces and calculation of residual stresses: modeling and simulation[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2010, 195(9):157-162.
- [13] Sawarn T K, Banerjee S, Kumar S. Study of the response of Zircaloy-4 cladding to thermal shock during water quenching after double sided steam oxidation at elevated temperatures[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2016, 473(2):237-248.
- [14] Teixeira J, Denand B, Aeby-Gautier E, et al. Simulation of coupled temperature, microstructure and internal stresses evolutions during quenching of a  $\beta$ -metastable titanium alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 651(1):615-625.
- [15] 崔大伟, 王金龙, 宋红梅, 等. 供暖管道铸铁螺纹接头的热应力分析[J]. *材料热处理学报*, 2018, 39(9):125-130.
- [16] 胡忠举, 彭成章. 铝薄带超常铸轧辊套热应力仿真分析[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 21(2):52-54.
- [17] 童乐, 钟斌, 陈刚, 等. 基于 ANSYS 的火车车轮热应力有限元分析[J]. *安徽冶金*, 2018(2):7-11.
- [18] 林国庆, 王茂廷, 王飞, 等. 肋片式换热器的有限元热应力分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, 8(7):148-151.
- [19] 邵和新. 高温合金精铸空心叶片充型及热应力有限元分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [20] 王振生, 彭真, 杨双双, 等. 一种 7CrSiMnMoV 扩径锥体的热处理方法: 中国, 104451095A[P]. 2015-3-25.