DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2013.03.020

# 一种新型材料淬火过程的数值模拟和实验研究

## 张世珍,王维锐,李玉良,杨文伟,颜 益

(浙江大学 机械设计研究所,浙江 杭州 310027)

摘 要:一种新型摩托车制动盘专用材料 B410DB的淬火工艺目前仍采用人工经验和小批量试制的方法,针对这 一现状,对该新型材料的淬火过程进行了数值模拟、温度实验和温度场、组织场的分析.运用材料性能模拟软件 JMatPro 得到了 B410DB的机械、热物理性能及其等温转变曲线(TTT)、连续冷却转变曲线(CCT),在此基础上,利用 热处理专业软件 DEFORM,建立了能够反应制动盘实际淬火过程的数值模型.利用该数值模型模拟了某型号制动盘 的温度场和组织场的变化过程.仿真和实验结果对比表明:该模型准确可行,温度变化和组织状态与实验吻合度高, 为优化制动盘淬火过程提供了依据,该方法也可用于其他材料和型号的制动盘淬火过程,具有一定的通用性. 关键词:摩托车;数值模拟;B410DB;制动盘;淬火

中图分类号:TG 156 文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2013)03-0535-05

## Numerical simulation and experimental study of a new material during its quenching process

ZHANG Shi-zhen, WANG Wei-rui, LI Yu-liang, YANG Wen-wei, YAN Yi (Institute of Mechanical Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the current quenching process status of a new type of motorcycle brake disc special materials B410DB which is based on artificial experience and small batch trial production, its quenching process's numerical simulation and temperature experiment were carried out and it's temperature and microstructure fields were analyzed. Through the material performance simulation software JMatPro, the mechanical, thermal physical properties and the time temperature transformation (TTT) curve, the continuous cooling transformation CCT curve of B410DB were given. Based on the quenching process, and using heat treatment professional software DEFORM, a finite element model (FEM) was developed to indicate the brake disc actual quenching process. The FEM was used to successfully simulate the temperature field and the change of the organization process of a certain type of brake disc. Simulation and experiment at results show that the FEM not only is accurate and feasible, but also can provide evidence for optimizing the quenching process; This method can be generally used for the quenching process of other materials and types of brake disc.

Key words: motorcycle ;numerical simulation; B410DB; brick disc; quenching process

作为中国大陆第一家专业制造摩托车制动盘的 企业,浙江隆中机械制造有限公司生产的摩托车制 动盘大多采用 Cr13 系列材料.但是 Cr13 系列材料 热处理后容易出现硬度不均匀、组织不稳定、易变 性、耐蚀性降低等缺陷.隆中公司与宝钢集团 2008 年共同开发了 B410DB 材料,它是在 410 型不锈钢 的基础上控制碳和氮,加大锰含量,调整冶炼和轧制 工艺而研发成功的一种摩托车制动盘专用材料.该

收稿日期: 2011-10-21. 浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

作者简介:张世珍(1987-),女,硕士生,从事机械设计及有限元分析、CAD/CAE 等方面的研究. E-mail: 20925189@zju. edu. cn 通信联系人:王维锐,男,博士后. E-mail: wwrzju@126. com

材料性能与国外摩托车制动盘普遍应用的 R410DB 材料相当,其优点是淬火后不必进行回火即可获得 稳定的组织.

淬火过程是将工件加热至临界点或临界点以上 一定温度,保温后以大于临界冷却速度冷却得到相 关组织的热处理工艺.淬火过程十分复杂,材料内部 的温度、组织和应力相互作用、相互影响并且不断变 化.目前的发展趋势是用计算机数值模拟的方法来 预测出金属的热处理过程.Bokota等<sup>[1]</sup>对感应加热 和火焰加热两种热处理方法的组织场和残余应力进 行数值分析,并通过 TTT 加热曲线和 TTT 冷却曲 线计算得到相变过程中各相的百分比.Zhao 等<sup>[2]</sup>研 究了淬火对中碳轴承钢微观结构和机械性能的影 响.当然热处理数值模拟现状也存在诸多问题与难 点,如微观变形机理难以预测宏观材料行为、相变塑 性理论还未成熟<sup>[3]</sup>、对流传热系数复杂<sup>[4]</sup>、材料参数 不完整<sup>[3]</sup>等.

本文针对这种新型摩托车制动盘材料,通过 JMatPro软件得到了其性能参数,利用 DEFORM 软件建立了淬火过程的数值模型,并通过对某型号 制动盘淬火过程温度场和组织场的实验研究,验证 该数值模型的准确性.

## 1 新型材料 B410DB

B410DB 材料的化学成分质量分数和化学成分 见表 1.

#### 表 1 B410DB 材料化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of B410DB %

B410DB	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)
生产标准	0.05~0.1	≪0.6	1. 0∼2. 5	≪0.035	≪0.03	11. 5~14
成分化验	0.0727	0.582	1.62	0.0175	0.005	12.9

由于是新型材料,材料参数不完整,没有经验值 可寻.本文通过 JMatPro 得到材料性能,并进行相 图分析. Saunders 等<sup>[5]</sup> 对 JMatPro 软件的功能进行 了详细的说明,指出其可以克服现有方法的许多缺 点,并得出精确结果. Guo 等<sup>[6]</sup> 应用 JMatPro 软件 给出了多成分合金元素凝固过程相变时的物理性能 和热物性性能,并指出改变合金元素成分值对其性 能的影响. 韩利战等<sup>[7]</sup> 由 JMatPro 软件计算了 X12CrMoWVNbN10-1-1 铁素体耐热钢加热过程中 各相的平衡转变温度及变化过程. 计算得到的 B410DB 材料性能见表 2 所示.

表 2 B410DB 材料性能参数

Tab 2	Material	narameters	of	B410DB
1 a.D. 2	widterial	parameters	O1	DELUDD

$\theta$ /°C	$E/\mathrm{GPa}$	$\rho/$ (g • m <sup>-3</sup> )	$\mu$	$\lambda / (W \cdot (m \cdot ^{\circ}C)^{-1})$	) $\alpha/(10^{-6}  ^{\circ}\mathrm{C}^{-1})$	$c/(\mathbf{J} \cdot (\mathbf{g} \cdot \mathbf{^{\circ}C})^{-1})$
20	213.537 0	7 757.96	0.291 52	24.94084	11.925 87	0.448 92
100	208.125 2	7 735.50	0.294 64	25.886 04	12.470 32	0.494 39
300	194.6266	7 675.23	0.30243	27.99395	13.826 19	0.68538
500	181. 215 4	7 608.69	0.3102	28.88385	15.173 36	0.701 56
700	167.6133	7 538.97	0.318 0	31.549 35	16.51958	1. 089 6
900	128.477 9	7 552.21	0.33926	30.89278	23.779 53	0.615 86

## 2 淬火过程数值模型

#### 2.1 热传导控制方程

制动盘淬火过程属于瞬态非线性热分析,在冷却过程中制动盘与空气同时发生对流和辐射传热, 且自身不同部位之间发生着热传导.当导热系数 κ 随温度变化时,导热微分方程直角坐标系中的表达式为<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa \, \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \kappa \, \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \, \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + q''' = \rho \, c \, \frac{\partial \theta}{\partial t} \,.$$
<sup>(1)</sup>

式中: $q^{\prime\prime}$ 为内热源的热流密度, $\theta$ 为温度,t为过程 进行的时间, $\kappa$ 为导热系数, $\rho$ 为材料密度,c为材料 定压比热.

#### 2.2 初始条件

因在加热炉中长时间保温使制动盘内部均匀热 透(详见本文 3.1 节描述),初始温度场为

$$\theta \mid_{t=0} = \theta_0 = 860 \ ^{\circ} \mathbb{C}. \tag{2}$$

式中:0。为出炉温度,即初始温度.

2.3 边界条件

该制动盘淬火传热模型属于第三类换热边界条 件,其表达式为

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}\Big|_{s} = H(\theta_{\rm w} - \theta_{\rm c}) . \tag{3}$$

式中: $\theta_{w}$ 为制动盘温度, $\theta_{c}$ 为环境温度,H为换热 系数.

2.4 奥氏体化过程

在光学金相显微镜下对供货态 B410DB 材料进 行金相检测,如图 1 所示为热处理前的原始组织放



图 1 B410DB 原始组织金相图

Fig. 1 B410DB original microstructure

大 400 倍效果图, 其组织是铁素体和粗颗粒状碳化物, 铁素体质量分数在 80%以上.

图 2 所示为 JMatPro 分析得到的 B410DB 材料 由原始组织进行加热奥氏体化的过程,原始组织为 铁素体和 MNS、 $M_{23}C_6$ 、 $M_3P$ 、 $M_2$ (C,N)等多种其他 组织,铁素体质量分数为 83%,与图 1 铁素体质量 分数 80%以上相对应.



图 2 B410DB 奥氏体化过程

Fig. 2 B410DB Austenitic transformation

在加热到 750 ℃左右时,开始有奥氏体生成;加 热到 860 ℃左右时,组织的奥氏体化已接近 100%, 但仍然有部分碳化物未溶.在制动盘实际热处理过 程中,加热的最高温度设置为 860 ℃,并保温较长时 间,此时制动盘均匀透热,整体已经达到 860 ℃均 温,奥氏体化已基本完成.由于 MNS、 $M_{23}C_6$ 、 $M_3P$ 、 $M_2(C,N)$ 等组织的多样性和微量性,例如 MNS、 $M_{23}C_6$ 、 $M_3P$ 质量分数均在 2%以下,在数值模拟中 可忽略其影响,设定模拟的初始状态为铁素体,且在 模拟过程中只对铁素体、奥氏体及淬火冷却过程中 的马氏体、珠光体、贝氏体等进行研究.

2.5 冷却过程

在热处理中,通常有2种冷却方式:等温冷却和 连续冷却.等温冷却转变曲线(TTT曲线)计算的一 般方程由 Kirkaldy 方程决定<sup>[9]</sup>:

$$\tau(x,\theta) = \frac{1}{\alpha D \Delta \theta^q} \int_0^{\infty} \frac{\mathrm{d}x}{x^{2 (1-x)/3} (1-x)^{2x/3}} \,. \tag{4}$$

式中: $\alpha = \beta 2^{(G-1)/2}$ ,  $\beta$ 是一个经验系数, G是晶粒尺

寸;D 是有效扩散系数;  $\Delta \theta$  是过冷度, q 是一个取决 于有效扩散机制的指数; x 是转变的百分数. 由 JMat-Pro 得到的 B410DB 的 TTT 曲线如图 3 所示. 同时, 连续冷却转变曲线(CCT 曲线)依据 TTT 曲线运用 孕育期叠加原理得到. CCT 曲线如图 4 所示.



#### 图 4 B410DB 的 CCT 曲线

Fig. 4 CCT curve of B410DB

在实际热处理过程中,制动盘的淬火冷却过程 为连续冷却,由 CCT 曲线可知,在 B410DB 的连续 冷却过程中,有奥氏体→珠光体、奥氏体→铁素体、 奥氏体→马氏体的转变.奥氏体化的温度是 85& 23 C,珠光体转变温度是 794.7 C,铁素体转变温度是 818.3 C,贝氏体转变温度是 151.3 C.铁素体转变是 在 1 C/s 左右的速度下开始的;珠光体的转变开始速 度是 1 C/s 左右,转变结束的速度是 0.1C/s 左右.

关于奥氏体→马氏体的转变,因为马氏体是非 扩散性的相变,对于马氏体的转变采用的是 Magee 方程进行计算<sup>[10]</sup>:

$$\boldsymbol{\xi}_{\mathrm{M}} = 1 - \exp\left(\boldsymbol{\psi}_{1}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\psi}_{4}\right) \,. \tag{5}$$

式中: $\theta$ 是温度; $\xi_{M}$ 是马氏体转变量; $\phi_{1}$ 和 $\phi_{4}$ 是因数. 由 CCT 图可知,马氏体开始转变的温度 $\theta_{cq}$ 为 285. 2°C,当转变量达到 50%时 $\theta_{50\%}$ =248.5°C.分别 将 $\xi_{M}$ =0, $\theta_{cq}$ =285.2°C和 $\xi_{M}$ =0.5, $\theta_{50\%}$ =248.5°C 代入到式(5)中,得到 $\phi_{1}$ =0.029和 $\phi_{4}$ =-5.553.

通过对 CCT 曲线的坐标离散化和时间求对数 等处理,最终得到奥氏体→珠光体和奥氏体→铁素 体的 CCT 曲线,见图 5(a)和图 5(b)所示.



图 5 B410DB 不同组织 CCT 曲线

Fig. 5 Microstructure CCT curves of B410DB

## 3 仿真与实验分析

#### 3.1 仿真算例

淬火过程在隆中公司 100 kW 推杆式热处理炉 内进行,炉体温度设置为 860 ℃,测温系统采用 Zhang 等<sup>[11]</sup>设计的测温装置,每秒钟采集一次温度 数据.针对 YLP567 型号制动盘,如图 6,散热孔、型 孔、安装孔均匀分布;测温点选择在散热孔附近(测 点 A)和型孔附近(测点 B),并分别设置 2 组,如图 中测温头(K 型热电偶)固定位置.该图为制动盘空 冷 20 s 左右的状态,通体红透,温度 600 ℃左右.

就该型号制动盘采用 DEFORM 软件进行淬火 过程模拟. 如图 7 所示给出了空冷 20 s 时制动盘的 温度分布图,此时的温度区间为 573~617 ℃,与图 6 相对应.



图 6 温度实验中空冷 20 s 时制动盘温度分布图





### 图 7 温度模拟中空冷 20 s时制动盘温度分布图

Fig. 7 Simulated temperature distribution map on brake disc at the time of 20 s during air-cooling process

#### 3.2 实验验证

对测温系统得到的温度数据进行整合,提取散 热孔附近和型孔附近的温度模拟值,将实验和模拟 数据进行拟合,如图 8(a)、(b)所示.由图可知,两者 拟合较好.模拟与实验温度差值( $\theta_t$ )区间分布如图 9 所示,T为温度差值 $\theta_t$ 所占的百分比,由图可知在 -10~10 ℃区间的概率为 93. 1%,吻合度较高.





Fig. 8 Comparison of simulated and experimental results



图 9 实验与模拟温度误差分布图



对热处理后的制动盘在光学金相显微镜下进行 金相检测,如图 10 所示为热处理后的 B410DB 材料 放大 400 倍的金相图,其组织是马氏体、残余奥氏体 和部分碳化物,马氏体质量分数在 80%以上.图 11 为 淬火后组织场数值模拟结果,马氏体质量分数在 98%以上,其他为残余奥氏体.在模拟结果中,马氏体 质量分数相对于实际偏高,误差主要在于忽略了各种 碳化物的影响,由图 2 可知在 860 ℃时仍有 MNS、M<sub>23</sub> C。等组织未溶,且在淬火过程中并没有发生转变.



图 10 制动盘淬火后组织金相图

Fig. 10 Brick disc's microstructure after quenching



图 11 组织模拟中制动盘淬火后马氏体分布图

Fig. 11 Simulated microstructure distribution map of martensite after quenching

## 4 结 语

应用热处理专业软件 DEFORM 对制动盘淬火 过程进行模拟获得了温度场和组织场的变化过程, 仿真和实验结果表明:本文建立的淬火过程数值模 型可行有效,能很好的反映实际,可方便掌握淬火过 程中制动盘任意时刻的温度分布和组织状态,从而 得到预期的材料状态;为制动盘淬火过程工艺改进 和优化提供依据,使制动盘性能得以提高.该淬火过 程数值模型也可用于其他任何材料、任何型号的制 动盘,具有一定的通用性.

## 参考文献(References):

[1] BOKOTA A, ISKIERKA S. Numerical analysis of

phase transformations and residual stresses in steel cone-shaped elements hardened by induction and flame methods [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1998, 40 (6):621-629.

- [2] ZHAO Ying-li, SHI Jie, CAO Wen-quan, et al. Effect of direct quenching on microstructure and mechanical properties of medium-carbon Nb-bearing steel[J]. Journal of Zhejiang University-Science A : Applied Physics & Engineering, 2010,11(10):776-781.
- [3] 牛山廷,赵国群,李辉平. 淬火冷却过程三维有限元模及 工艺参数优化的研究[D]. 济南:山东大学,2007:2-3.
   NIU Shan-ting, ZHAO Guo-qun, LI Hui-ping. Research on 3D finite element simulation and parameter optimization for quenching processes [D]. Jinan: Shandong University, 2007:2-3.
- [4] 陈水宣,傅新. 热轧带钢温度建模和数值模拟[D]. 杭州:浙江大学,2008:40-41.
  CHEN Shui-xuan, FU Xin. Thermal modeling and numerical simulation of strip steels in the hot rolling [D].
  Hangzhou: Zhejiang University, 2008:40-41.
- [5] SAUNDERS N, GUO Z, LI X, et al. Using JMatPro to model materials properties and behavior [J]. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 2003, 12 (55):60-65.
- [6] GUO Z, SAUNDERS N, MIODOWNIK A P, et al. Modelling of materials properties and behaviour critical to casting simulation [J]. Materials Science and Engineering A, 2005,413/414:465-469.
- [7] 韩利战,顾剑锋,潘健生. X12CrMoWVNbN10-1-1 铁 素体耐热钢中的马氏体相变过程[J]. 上海交通大学学 报,2010,44(1):11-15.
   HAN Li-zhan, GU Jian-feng, PAN Jian-sheng, Martensitic transformation in X12CrMoWVNbN10-1-1 fer-

tensitic transformation in X12CrMoWVNbN10-1-1 ferrite heat-resistant steel [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010,44(1):11-15.

- [8] 俞昌铭. 热传导及其数值分析[M]. 北京:清华大学出 版社, 1982:20-40.
- [9] BOK H H, LEE M G, PAVLINA E J, et al. Comparative study of the prediction of microstructure and mechanical properties for a hot-stamped B-pillar reinforcing part[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011,53: 744-752.
- [10] 董达善,孙儒中,乔榛.运用 DEFORM 的连续冷却转 变曲线数值仿真[J].上海海事大学学报,2010,31(2): 61-65.

DONG Da-shan, SUN Ru-zhong, QIAO Zhen. Using DE-FORM for numerical simulation of CCT curve [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2010,31(2): 61-65.

[11] ZHANG Shi-zhen, WANG Wei-rui, JIN Liang, et al. Numerical analysis and experimental study on temperature field of brake disc during the air-cooling process
[J]. Advanced Materials Research, 2011, 189-193: 2009-2012.