



## CM690 锚链钢淬火过程数值模拟及验证

杨成威<sup>1</sup>, 朱鹏龙<sup>2</sup>, 叶玉奎<sup>1</sup>, 谢常胜<sup>1</sup>, 赵海涛<sup>2,3</sup>

(1 中天钢铁集团中天特钢有限公司技术中心, 常州 213013; 2 北京科技大学碳中和研究院, 北京 100083; 3 辽宁材料实验室, 沈阳 110179)

**摘要:**采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 6.3, 建立了一个可以描述钢淬火过程的数值模拟模型, 对 CM690 锚链钢末端淬火过程的温度场与组织场演变进行了系统模拟, 并通过实验对模拟结果进行了验证。结果表明, 所建立的模型能够准确预测试验钢在末端淬火过程中的温度分布及组织演变行为。试样在末端淬火过程中表现出近似一维传热特性, 其温度场变化主要受界面综合换热系数的影响。随着距淬火端距离的增加, 冷却速率逐渐降低, 导致显微组织呈现梯度分布: 马氏体含量逐渐减少, 主要集中于 0~20 mm; 贝氏体出现于距淬火面 9 mm 至 40 mm 的区域; 珠光体则分布于 70 mm 至顶端区间; 而铁素体形成于 25 mm 至顶端部分。此外, 对应距淬火面不同位置的热膨胀试样组织观察结果与模拟预测高度一致, 末端淬火和热膨胀试样所测得的维氏硬度值也呈现出相同的变化趋势, 进一步验证了模型的可靠性与适用性。

**关键词:** CM690 锚链钢; 末端淬火; 数值模拟; 温度场; 组织场

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.N250545 **中图分类号:** TG142.31

## Numerical Simulation and Experimental Verification of the Quenching Process for CM690 Anchor Chain Steel

Yang Chengwei<sup>1</sup>, Zhu Penglong<sup>2</sup>, Ye Yukui<sup>1</sup>, Xie Changsheng<sup>1</sup>, Zhao Haitao<sup>2,3</sup>

(1 Zenith Steel Group Company Limited., Changzhou 213013, China; 2 Institute for Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 3 Liaoning Academy of Materials, Shenyang 110179, China)

**Abstract:** A numerical simulation model describing the steel quenching process was developed using the finite element software COMSOL Multiphysics 6.3. The temperature and microstructure field evolution of CM690 anchor chain steel during Jominy end-quench test were systematically simulated, and the simulation results were verified through experiments. The results show that the developed model can accurately predict the temperature distribution and microstructure evolution of the test steel during Jominy test. During Jominy end-quench test, the specimen exhibits quasi-one-dimensional heat transfer characteristics, and the temperature field changes are mainly influenced by the comprehensive heat transfer coefficient at the interface. As the distance from the quenched end increases, the cooling rate gradually decreases, resulting in a gradient distribution of the microstructure; the martensite content gradually decreases and is mainly concentrated in the 0 mm ~ 20 mm range; bainite appears in the area from 9 mm to 40 mm away from the quenching end; pearlite is distributed in the 70 mm to the top range; and ferrite forms in the 25 mm to the quenching top. Furthermore, the observed microstructure of the dilatometric specimens at different distances from the quenched end is highly consistent with the simulation predictions. The Vickers hardness values measured for Jominy test specimen and the dilatometric specimen also show the same trend of change, further verifying the reliability and applicability of the model.

**Key Words:** CM690 Anchor Chain Steel; Jominy Test; Numerical Simulation; Temperature Field; Microstructure Field

随着港口设施、海上浮式平台以及工程船舶等海洋工程装备的快速发展, 对锚链的需求大幅增长。锚链作为连接浮体与海床的关键承力构件, 在确保海洋工程装备服役安全性及可靠性方面起着关键性作用<sup>[1-3]</sup>。锚链的服役环境十分恶劣, 需持续承受风、浪、流等带来的动态环境载荷以及高氯离子海水的侵蚀。这种至关重要的作用及极端的服

役环境对锚链钢的显微组织及冲击韧性提出了严苛要求<sup>[4-5]</sup>。然而在锚链制造过程中, 其热处理工艺通常采用调质处理(淬火+高温回火), 淬火过程往往会导致锚链出现从表面到芯部的显微组织及冲击韧性不均匀的现象。此外, 为满足不同的工业需求, 锚链通常被制造成不同的尺寸, 锚链直径从  $\phi 13$  mm 到  $\phi 190$  mm 不等。锚链直径愈大, 淬火过

**作者简介:** 杨成威(1981—), 男, 博士, 正高级工程师; **E-mail:** yangchengwei\_2@163.com; **收稿日期:** 2025-09-19

**通信作者:** 赵海涛(1987—), 男, 博士, 研究员; **E-mail:** zhaohaitao@ustb.edu.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

程中从表面到芯部的显微组织与冲击韧性差异就愈显著。若仅依靠试验方法研究这种不均匀性,不仅成本高昂,而且因试验研究位置的有限性,难以对淬火钢棒进行整体、系统的分析。因此,建立锚链淬火过程的数值模拟模型至关重要。

已有许多学者对钢淬火过程数值模拟开展了研究工作。陆东旭等<sup>[6]</sup>建立了30Cr2Ni2Mo钢淬火过程的数值模拟模型,预测了水冷、油冷和水空交替三种冷却方式下的冷却曲线和组织分布,其结果与试验吻合良好。陆书萌等<sup>[7]</sup>系统研究了SA508Gr.4N钢淬火过程的数值模拟,并通过试验验证了数值模拟结果的准确性。Coroas等<sup>[8]</sup>提出了一种有效的数值模拟模型,用于预测汽车钢主轴淬火过程的温度场和组织场分布,模拟结果与试验较为吻合。Cemil等<sup>[9]</sup>建立了预测轴对称钢构件淬火过程温度场的数值模型,对St50、Ck45和C60类型的实心 and 空心钢部件温度场进行了预测,结果与试验吻合较好。基于数值模拟软件COMSOL Multiphysics及编程软件MATLAB,建立了描述淬火过程的数值模型,并对CM690锚链钢的末端淬火过程进行了模拟,分析了锚链钢末端淬火过程温度场及组织场的分布情况,并结合实验钢末端淬火实验结果以及根据模型导出的距淬火面不同距离冷速进行的热膨胀试样的显微组织及硬度,对建立的实验钢末端淬火过程数值模拟模型进行了评价。

## 1 数学模型

基于COMSOL Multiphysics / Heat Transfer模块及MATLAB / Global Optimization工具箱,建立了描述淬火过程的数值模型。

### 1.1 温度场模型

在温度场的数值模拟中,针对淬火过程的非稳态导热问题,根据Fourier导热方程和能量守恒定律可得到温度场分析模型的核心公式<sup>[10]</sup>。此外,考虑了相变场对温度场影响,即相变过程的相变潜热产生的温度变化。因此,在Fourier公式中额外设置了一个热源项,以表示相变潜热产生的热,公式如式(1)和式(2)。

$$\rho c \dot{T} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \sum \rho_l l_i \dot{\xi}_i = 0 \quad (1)$$

$$l_i = \frac{\partial H}{\partial \xi} \quad (2)$$

式中, $\rho$ 表示材料的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c$ 表示材料的热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $k$ 表示材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $l_i$ 表

示由第*I*各组分产生的相变潜热, $\text{J}/\text{kg}$ 。在将该温度场模型应用至模拟实验钢末端淬火过程时,以上材料物性参数通过Thermo-calc热力学软件计算得出,并以差值函数的形式嵌入数值模拟软件中。

对于温度场的边界条件,由于实际淬火过程中工件表面与冷却介质之间对流与辐射换热较为复杂且通常呈现非线性变化规律<sup>[11]</sup>。因此,边界条件选定为第三类边界条件,其计算公式如式(3)。

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s = h_c(T_s - T_A) + \sigma \varepsilon(T_s^4 - T_A^4) = H(T_s - T_A) \quad (3)$$

式中, $\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s$ 为沿法线方向对温度梯度求导; $h_c$ 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_s$ 为工件表面温度, $^\circ\text{C}$ ;  $T_A$ 为环境温度, $^\circ\text{C}$ ;  $\sigma$ 为玻尔兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ,通常取 $5.67 \times 10^{-8}$ ;  $\varepsilon$ 为工件表面辐射率;  $H$ 为综合换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

综合换热系数一般需要先通过试验测量工件淬火过程的温度变化,随后结合反传法<sup>[12]</sup>进行计算。通常而言,不同钢种末端淬火试验的综合换热系数是相似的,因此,末端淬火过程的综合换热系数采用文献<sup>[13]</sup>中所提及的数据,如图1所示。

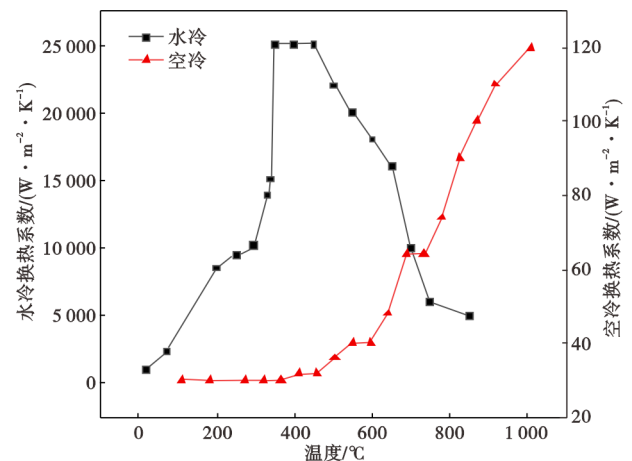


图1 CM690锚链钢末端淬火试验的综合换热系数

Fig. 1 The comprehensive heat transfer coefficient of Jominy test for CM690 anchor chain steel

### 1.2 组织场模型

相变开始温度求解过程是组织场有限元分析中的关键步骤。在实际淬火过程中,铁素体开始转变温度( $F_s$ )通常与孕育期有关。Scheil叠加原理<sup>[14-15]</sup>是一种通过离散化连续冷却路径并累加各温度下的孕育期贡献,以预测连续冷却条件下相开始

转变温度的方法。因此,本研究 $F_s$ 基于 Scheil 叠加原理进行计算。珠光体开始转变的温度( $P_s$ )通常遵循热力学原理,且需考虑合金元素的温度相关分配情况,Yoon 等<sup>[16]</sup>提出的修正的经验公式提及了这些,本研究被用于计算 $P_s$ ,如式(4)。贝氏体开始转变温度( $B_s$ )以及马氏体开始转变温度( $M_s$ )基于 Lee 等<sup>[17]</sup>、Capdecila 等<sup>[18]</sup>修正的经验公式来计算,如式(5)和(6)。

$$P_s(C_\gamma) = 297.5 + 665C_\gamma(1 - 0.205C_\gamma) + 13.3Mn - 13.3Ni(1 - 0.06Ni) + 6.5Mo - 16.6Cu + 79.8Cr(1 + 0.055Cr) - C(4.7Mn - 25.6Si - 9.6Ni + 36.7Cr - 8.7Cu) \quad (4)$$

$$B_s(C_\gamma) = 745 - 110C_\gamma - 59Mn - 39Ni - 68Cr - 106Mo - 17MnNi + 6Cr^2 + 29Mo^2 \quad (5)$$

$$M_s(C_\gamma) = 764.2 - 302.6C_\gamma - 30.6Mn - 16.6Ni - 8.9Cr + 2.4Mo - 145Si \quad (6)$$

式中, $C_\gamma$ 为奥氏体中碳的质量分数;Mn、Ni、Mo、Cu、Cr、和Si分别为合金中锰、镍、铜、铬和硅的质量分数。

在组织场的有限元分析中,相变通常被分为马氏体型和非马氏体型两类。对于非马氏体型相变(铁素体、珠光体或贝氏体转变),常用的方程有 Leblond-Devauz (L-D) 方程、Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) 方程和 Kirkaldy-Venugopalan (K-V) 方程。由于在实际淬火过程中,工件的相变过程通常与相的形核和长大有关。因此,采用更能体现各相形核与长大行为的 JMAK 方程<sup>[19]</sup>来描述该类型的相变,如式(7)。

$$\xi^d = \xi_0^d + (\xi_{eq}^d - \xi_0^d) \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{\tau_{s \rightarrow d}} \right)^{n_{s \rightarrow d}} \right] \right\} \quad (7)$$

式中, $\xi_0^d$ 为铁素体、珠光体或贝氏体的初始相分数,%; $\xi_{eq}^d$ 为铁素体、珠光体或贝氏体在时间 $t$ 时的理论平衡相分数,%; $\xi^d$ 为铁素体、珠光体或贝氏体在时间 $t$ 时的转变相分数,%; $\tau_{s \rightarrow d}$ 和 $n_{s \rightarrow d}$ 分别是 Avrami 系数(1/s)和指数,通常为与温度相关的函数。 $\tau_{s \rightarrow d}$ 和 $n_{s \rightarrow d}$ 是根据上述提及的相变开始温度计算方法以及自主开发的基于连续冷却转变曲线的相变动力学数据提取程序,采用 MATLAB /

Global Optimization 工具箱计算得出的。

Koistinen-Marburger (K-M)方程<sup>[20]</sup>通常被用于描述马氏体型相变,如式(8)。

$$\xi^d = \xi_0^d \left\{ 1 - \exp \left[ - \beta (M_s - T) \right] \right\} \quad (8)$$

式中, $\xi_0^d$ 为母相初始相分数,%; $\beta$ 是 Koistinen-Marburger 系数,取 0.021, 1/K, $T$ 是转变温度,°C。

### 1.3 数值模拟模型

采用数值模拟软件对 CM690 锚链钢末端淬火过程进行模拟。为减小计算量,只对末端淬火样坯 2D 模型的 1/2 进行建模,即模型为 12.5 mm × 100 mm 的矩形平面,采用自由多边形进行网格划分,划分单元共计 820 个,如图 2 所示。

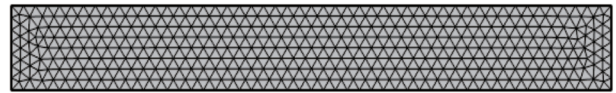


图 2 CM690 锚链钢有限元模型网络划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of finite element model network partitioning for CM690 anchor chain steel

## 2 试验材料与方法

试验材料选用某钢厂生产的 CM690 高强锚链钢,该材料是在工业条件下通过熔炼、铸造和轧制工艺制造而成的  $\phi 129$  mm 的轧制钢棒,采用电火花直读光谱仪 (ARL8860, 美国) 和氧氮氢分析仪 (EMGA-830, 日本) 测定钢的化学成分见表 1,各合金元素含量均在 GB/T 18669—2012 规定范围内。

按照国标 GB/T 225—2006 规定进行末端淬火试验。在  $\phi 129$  mm 的试验钢距侧表面 20 mm 位置处取尺寸为  $\phi 25$  mm × 100 mm 的试样,于 900 °C 保温 30 min 以确保完全奥氏体化,随后在 5 s 内迅速转运至 WDZ-系列全自动端淬试验机夹具处进行淬火,15 min 后取出置于水中冷却至室温。硬度采集位置距淬火末端 30 mm 内(含 30 mm)按国标规定采集,30 ~ 50 mm 之间每隔 5 mm 取一个数据点。

为验证 CM690 锚链钢末端淬火数值模拟模型的准确性,在试验钢上取  $\phi 3$  mm × 10 mm 的圆柱形试样,利用 L78 RITA 型淬火热膨胀仪进行热膨胀试

表 1 CM690 锚链钢化学成分(质量分数)

Table. 1 Chemical composition of CM690 anchor chain steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Al	B	O	N	Fe
0.32	0.26	1.60	0.018	0.005	0.150	0.015	0.021 4	0.000 6	0.000 7	0.004	Bal.

验,具体条件为:900 °C 保温 5 min,随后根据数值模拟模型导出的距淬火面不同位置(1.5、9、13、20、25、40 mm)的冷速冷却至室温。

从热膨胀试样横截面的中间部分切取用于金相观察的试样。试样被镶嵌、研磨、抛光,并用4%的硝酸盐溶液进行蚀刻,以便通过光学显微镜(OM, Axio Vert.A1, ZEISS, Germany)和扫描电子显微镜(SEM, Auriga, ZEISS, Germany)在20 kV电压、工作距离为15 mm的条件下进行观察。

利用SHIMADZU hmv-31型维氏硬度计对热膨胀试样进行硬度测试。为了减小硬度测试的误差,所使用的硬度值为5个硬度点的平均硬度。

### 3 模拟结果分析与试验验证

#### 3.1 温度场

图3显示了末端淬火过程中试样在不同时刻的温度分布情况。当 $t = 10$  s时,淬火端温度迅速降低,而试样顶端的温度仍保持在894 °C,表明该位置与淬火介质之间的热交换作用较弱,该阶段试样的温度变化主要源于内部热传导。当 $t = 100$  s时,淬火面温度降至约136 °C左右,顶端温度降至684 °C左右,该阶段试样与水之间的换热系数较高,淬火端冷却速率大,内部传热显著。随着淬火进行( $t = 200$ 、500、700 s),淬火面温度下降趋缓,试样中段区域呈现均匀降温。淬火结束时( $t = 900$  s),淬火面温度为48.2 °C,顶端为101 °C,两端温差约为50 °C。整体来看,在淬火过程中,试样淬火面与水的换热是影响温度场的主要因素。

图4展示了沿试样中心轴距淬火面不同位置处的冷却曲线。可以看出,在同一时刻,距离淬火面越近的位置冷却速率越大。整个淬火过程可近似视为一维传热,试样其他区域的温度变化主要依赖于内部热传导。

#### 3.2 组织场

图5显示了模拟末端淬火后试样中不同组织的分布情况。从图5(a)可以看出,残余奥氏体主要分布于距淬火面0~9 mm范围内,且总体含量较低。如图5(b)所示,铁素体在距淬火面25 mm处开始出现,并于试样顶端达到最高含量。如图5(c)所示,珠光体在距淬火面70 mm处开始生成,其含量在顶端达到最大值。在图5(d)中,贝氏体分布于距淬火面9~40 mm处。从图5(e)可见,马氏体分布于0~20 mm范围内,其含量随距淬火面距离的增加而逐渐降低。这种组织分布差异主要与冷却速率沿试

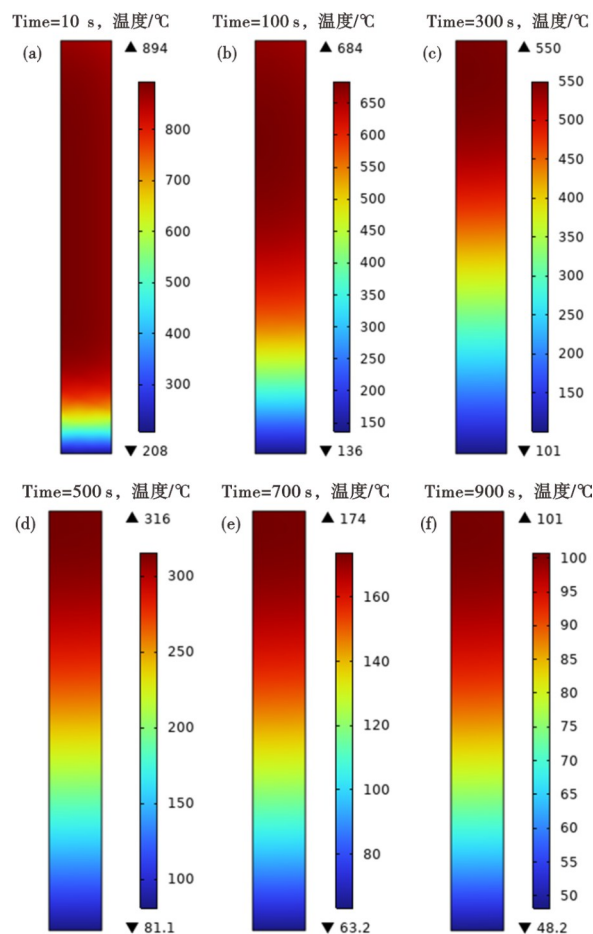


图3 CM690锚链钢末端淬火过程不同时刻的计算温度场:(a) 10 s, (b) 100 s, (c) 300 s, (d) 500 s, (e) 700 s, (f) 900 s

Fig. 3 Simulated temperature field at different times of Jominy test for CM690 anchor chain steel: (a) 10 s, (b) 100 s, (c) 300 s, (d) 500 s, (e) 700 s, (f) 900 s

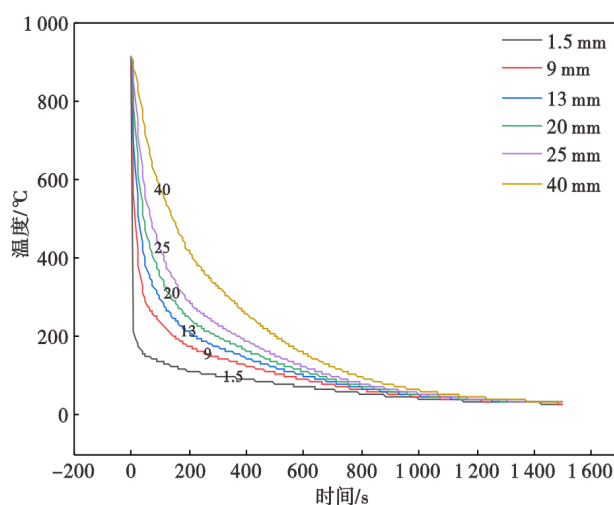


图4 CM690锚链钢末端淬火中心轴上距淬火面不同位置的计算冷却曲线

Fig. 4 Simulated cooling curves at different distances along the central axis of Jominy test for CM690 anchor chain steel

样长度的变化有关,越靠近顶端,冷却速率越低。

### 3.3 显微组织验证

图6和图7分别为根据模型导出的距淬火面不同距离冷速进行的热膨胀试样的显微组织OM和SEM图。从图6(a)-(d)和图7(a)-(d)中可以看出,距离淬火面1.5 mm至20 mm位置的显微组织均存在板条马氏体形貌,其立体形态为呈长条状聚集在一起的板条群。在距离淬火面9 mm至40 mm处(如图6(b)-(f)和图7(b)-(f)所示),组织存在粒状或板条状的贝氏体组织,其板条状贝氏体随着距离的增大而减少,粒状贝氏体则相反,这是因为冷却速率降低导致的。在距离淬火面25 mm处(如图6

(e)和图7(e)所示),铁素体组织开始出现。与图5所示的末端淬火数值模拟模型预测的显微组织分布情况较为吻合。

### 3.4 维氏硬度验证

图8对比了末端淬火试验与热膨胀试验所得到的维氏硬度结果。可以看出,两种方法测得的维氏硬度值吻合良好,均表现出从淬火面到试样顶端逐渐降低的趋势。这一结果说明,本研究所建立的末端淬火数值模型能够准确反映实际末端淬火试验条件下距淬火面不同位置处的冷却速率,表明该模型具有良好的可靠性。

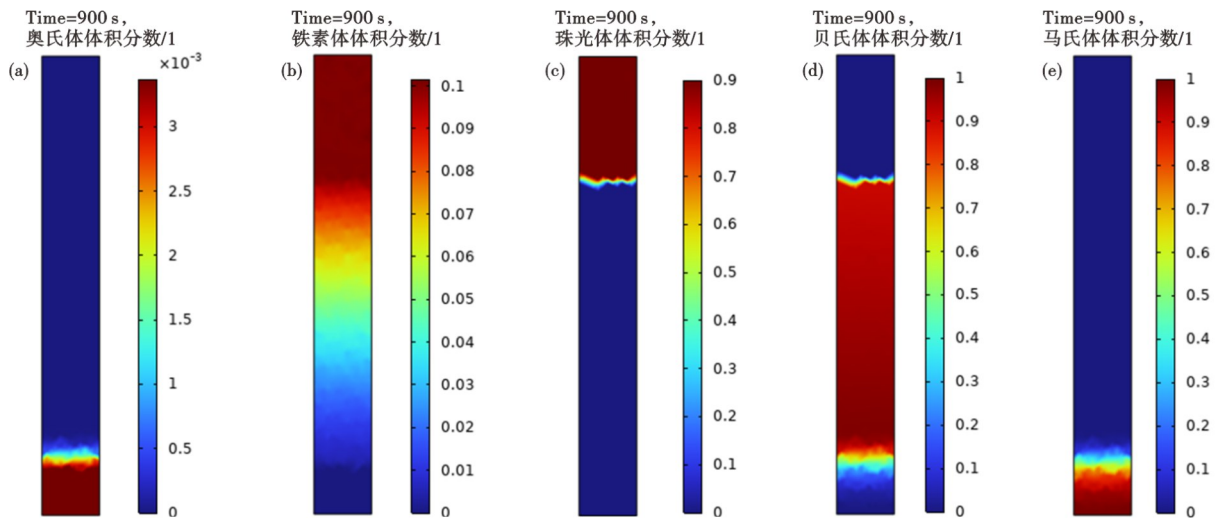


图5 CM690锚链钢末端淬火后的计算相体积分数:(a) 奥氏体,(b) 铁素体,(c) 珠光体,(d) 贝氏体,(e) 马氏体

Fig. 5 Simulated phase volume fraction after Jominy test for CM690 anchor chain steel: (a) Austenite, (b) Ferrite, (c) Pearlite, (d) Bainite, (e) Martensite

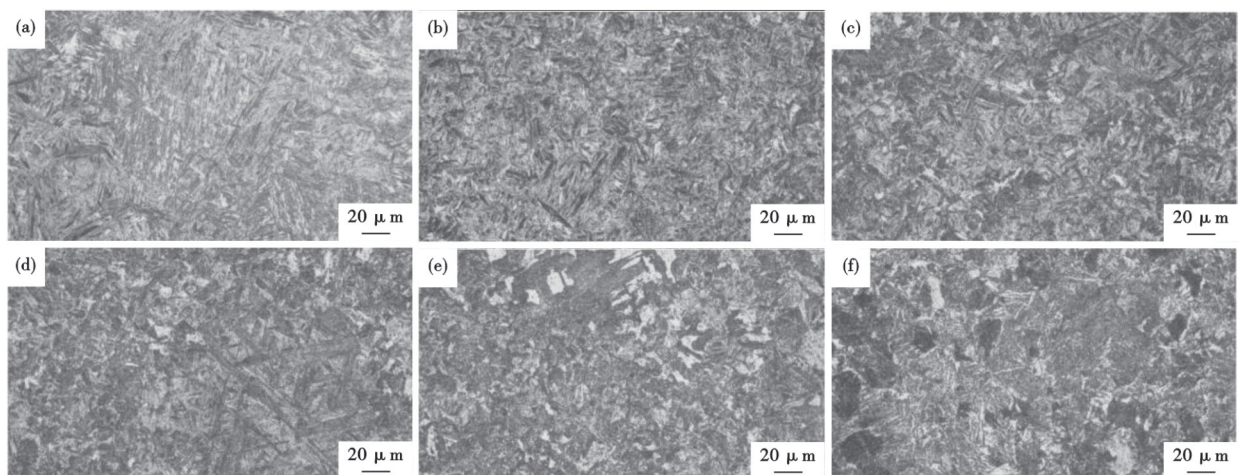


图6 CM690锚链钢对应淬火面不同位置处热膨胀试样的OM图:(a) 1.5 mm,(b) 9 mm,(c) 13 mm,(d) 20 mm,(e) 25 mm,(f) 40 mm

Fig. 6 OM micrographs corresponding to different distances from the quenched end of the Jominy test for CM690 anchor chain steel : (a) 1.5 mm, (b) 9 mm, (c) 13 mm, (d) 20 mm, (e) 25 mm, (f) 40 mm

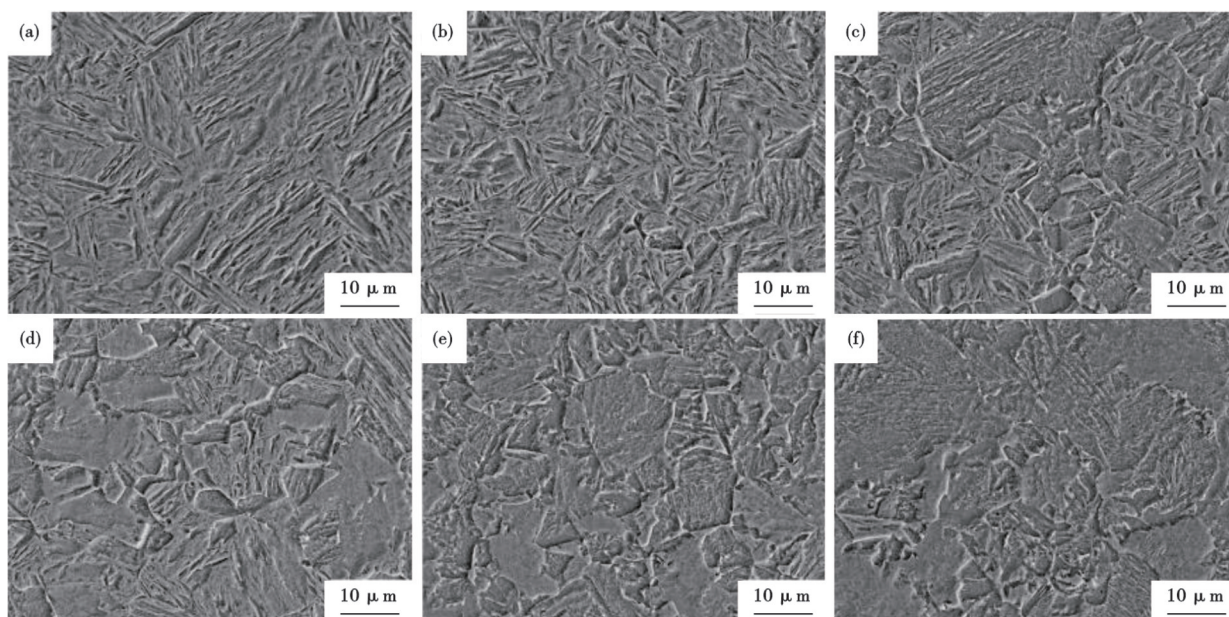


图7 CM690锚链钢对应淬火面不同位置处热膨胀试样的SEM图:(a) 1.5 mm,(b) 9 mm,(c) 13 mm,(d) 20 mm,(e) 25 mm,(f) 40 mm

Fig. 7 SEM micrographs corresponding to different distances from the quenched end of the Jominy test for CM690 anchor chain steel : (a) 1.5 mm, (b) 9 mm, (c) 13 mm, (d) 20 mm, (e) 25 mm, (f) 40 mm

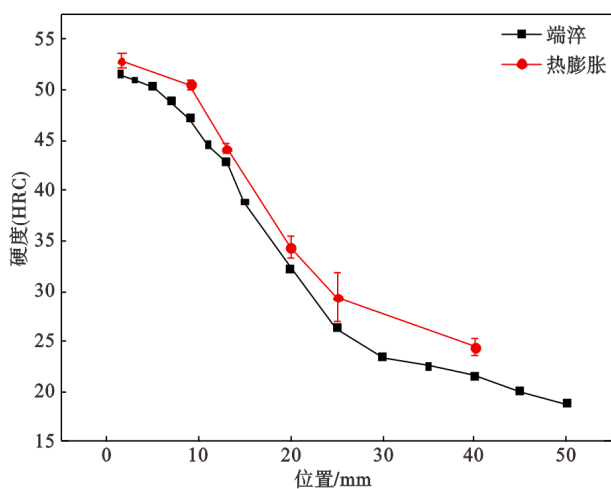


图8 CM690锚链钢末端淬火试验与热膨胀试验维氏硬度对比

Fig. 8 Comparison of Vickers hardness between the Jominy specimen and dilatometer specimens for CM690 anchor chain steel

## 4 结论

1) 在末端淬火过程中,CM690锚链钢近似符合一维传热特征,其温度场的求解主要取决于综合换热系数。自淬火端至试样顶端,冷却速率沿轴向逐渐降低。

2) 随着距淬火面距离的增加,马氏体含量不断减少;贝氏体存在于距离淬火面9 mm至40 mm处位置;珠光体存在于距离淬火面70 mm处至顶端位置;铁素体存在于距离淬火面25 mm处至顶端位置。试样组织变化试验结果与模拟结果一致。

3) 对应末端淬火不同位置处热膨胀试样与末端淬火试样的维氏硬度结果吻合良好,表明所建立的CM690锚链钢末端淬火数值模型能够准确模拟实际试验过程。该模型可为该钢种在相应条件下的淬火工艺优化提供可靠依据。

## 参考文献

- [1] 杜伟,李鹤林.海洋石油平台用钢的现状与发展趋势(二)[J].石油管材与仪器,2016(4):1-5+10.
- [2] 张文基,郭艳,张玉峰,等.高强度、高韧性海洋四级系泊锚链钢的试制及应用[J].钢铁钒钛,2000,21(2):6-11.
- [3] Melchers R E, Jeffrey R. Influence of water velocity on marine immersion corrosion of mild steel [J]. Corrosion, 2004, 60 (1) : 84-94.
- [4] 李伟,于洋,刘贤朋.基于锚链状态监测的锚泊安全评估[J].大连海事大学学报,2004,30(1):55-57.
- [5] Kitagawa T, Tamada A, Wakana H, et al. Characteristic of cathodic current in tidal zone of cathodically protected marine steel structure in the ocean [J]. Zairyo-to-Kankyo, 2005, 54 (6) : 288-294.
- [6] 杜东旭,任利国,李家驹.30Cr2Ni2Mo特厚超大锻件淬火过程数值模拟[J].一重技术,2022(4):25-28+45+12.
- [7] 陆书萌,万莉,郑善举,等.核电用钢淬火过程温度场-组织

- 场数值模拟及试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(7): 2527-2537.
- [8] Coroas C, Viéitez I, Martín E, et al. Numerical modeling for the prediction of microstructure and mechanical properties of quenched automotive steel pieces[J]. *Materials*, 2023, 16(11): 4111.
- [9] Gür C H, Tekkaya A E. Finite element simulation of quench hardening[J]. *Steel Research*, 1996, 67(7): 298-306.
- [10] 杨 坤, 蒋业华, 冯 晶. 低密度高强度钢淬火过程温度场的数值模拟[J]. *铸造技术*, 2017, 38(8): 1859-1861.
- [11] 胡仕成, 李晓谦, 朱志华, 等. 连续铸轧过程中的热-力耦合模型及数值计算[J]. *上海有色金属*, 2000, 21(4): 161-164.
- [12] Samuel A, Nayak U V, Pranesh Rao K M, et al. Estimation of heat flux transient during quench hardening of varying diameter steel probes using IHCP-phase transformation coupled model[J]. *Heat Treat 2023: Proceedings from the 32nd Heat Treating Society Conference and Exposition*, 2023, 84697: 88-97.
- [13] Chen X J, Xiao N M, Li D Z, et al. The finite element analysis of austenite decomposition during continuous cooling in 22MnB5 steel[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2014, 22(6): 065005.
- [14] 杨 婷, 段路昭, 刘 需, 等. 20CrMnTiH 连续冷却相变预测模型[J]. *特殊钢*, 2024, 45(1): 82-86.
- [15] 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.
- [16] Yoon S, Lee S J. Improved thermodynamic formula for austenite/(Austenite+Cementite) phase boundary in low alloy steels [J]. *ISIJ International*, 2014, 54(6): 1453-1455.
- [17] Lee Y K. Empirical formula of isothermal bainite start temperature of steels[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2002, 21(16): 1253-1255.
- [18] Capdevila C, Caballero F G, de Andrés C G. Determination of ms temperature in steels: A Bayesian neural network model[J]. *ISIJ International*, 2002, 42(8): 894-902.
- [19] 王志豪, 李红斌, 刘会群. C-Mn 钢连续冷却转变及相变动力学模型优化[J]. *钢铁研究学报*, 2025, 37(1): 117-126.
- [20] 乔靖乾, 冯 玮. 20CrMnTi 钢的等温相变行为分析及动力学建模[J]. *金属热处理*, 2020, 45(11): 115-121.