

40Cr钢强烈淬火综合换热系数的计算及验证*

朱小硕¹, 苏喜阳¹, 傅宇东², 肖仕臣¹, 刘宇超¹

(1. 新疆大学 材料科学与工程学院 新疆环境功能材料工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017;

2. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 以40Cr钢的热物性参数和强烈淬火过程的冷却曲线为基础, 考虑材料热物性参数随温度的变化情况, 运用Deform软件的反传热模块, 计算出40Cr钢强烈淬火过程综合换热系数(HTC)。结果表明: 在强烈淬火过程中, 强烈搅拌使强烈淬火初期的膜态沸腾转变为核沸腾, 提高了强烈淬火综合换热系数, 同时, 强烈淬火前期和中期的综合换热系数保持相对稳定; 40Cr钢强烈淬火综合换热系数呈现“厂”字形, 且当温度为400 °C时综合换热系数达到最大值, 约为40 000 W/(m²·°C)。

关键词: 强烈淬火; 冷却曲线; 综合换热系数; 反传热; 温度场

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.05.31.0001

中图分类号: TG161 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)05-0574-07

引文格式: 朱小硕, 苏喜阳, 傅宇东, 肖仕臣, 刘宇超. 40Cr钢强烈淬火综合换热系数的计算及验证[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(5): 574-580.

英文引文格式: ZHU Xiaoshuo, SU Xiyang, FU Yudong, XIAO Shichen, LIU Yuchao. Calculation and verification of integrated heat transfer coefficient for 40Cr steel intensive quenching[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(5): 574-580.

Calculation and Verification of Integrated Heat Transfer Coefficient for 40Cr Steel Intensive Quenching

ZHU Xiaoshuo¹, SU Xiyang¹, FU Yudong², XIAO Shichen¹, LIU Yuchao¹

(1. Xinjiang Environmental Functional Materials Engineering and Technology Research Centre, School of Materials Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Based on the thermal properties of 40Cr steel and its cooling curve during intensive quenching, and taking into account the temperature-dependent variations in material thermal properties, the integrated heat transfer coefficient (HTC) during intensive quenching of 40Cr steel is calculated using the reverse heat transfer module of Deform software. Results show that during intensive quenching, vigorous agitation causes the initial film boiling to transform into nucleate boiling, which in turn enhances the overall heat transfer coefficient. Meanwhile, the overall heat transfer coefficient remains relatively stable during the early and middle stages of intensive quenching. The HTC of 40Cr steel during intensive quenching exhibits a “厂” shaped profile. It reaches a peak value of approximately 40 000 W/(m²·°C) at 400 °C.

Key words: intensive quenching; cooling curve; integrated heat transfer coefficient; inverse heat transfer; temperature field

* 收稿日期: 2025-05-31

基金项目: 新疆维吾尔自治区高层次人才“天池”计划“钢铁强烈淬火的应用研究”(100400018).

作者简介: 朱小硕(1971—), 男, 博士, 讲师, 主要从事强烈淬火和材料加工的研究, E-mail: 1715483612@qq.com.

0 引言

40Cr钢属于中碳低合金钢,广泛应用于机床齿轮、传动轴和汽车转向节等机械部件^[1-3]。为使40Cr钢工件能在中等负荷环境中稳定工作,需对40Cr钢工件进行淬火或调质处理。然而,在淬火处理过程中,40Cr钢工件易产生裂纹,影响工件生产效率和使用寿命。与传统淬火处理相比,强烈淬火时工件不易产生裂纹,这有效解决了40Cr钢在淬火过程中易产生裂纹的问题^[4-6]。

经强烈淬火处理的40Cr钢,其综合力学性能优于传统淬火方法^[7]。此外,强烈淬火使用盐溶液作为淬火介质,相较淬火油更加环保。随计算机技术的发展和理论模型的完善,数值模拟能够快速且准确地分析淬火过程中温度、组织和应力的演变情况,为工艺研究和优化提供新途径。而在强烈淬火的数值模拟中,需将综合换热系数纳入边界条件,故开展强烈淬火综合换热系数研究至关重要。

目前,淬火过程中综合换热系数的计算基于冷却曲线,通过传热学理论计算得出。具体方法包括集热容法、有限差分法、边界元法以及反传热法等。隋佳丽等^[8]比较了反传热法、数值法和比拟法计算综合换热系数的精度,发现采用反传热法计算淬火过程综合换热系数的精度最高,且计算值与实测值吻合度高。刘玉等^[9]研究了40CrMo在水冷和空冷条件下的综合换热系数,发现测温点距表面越近,综合换热系数的计算精度越高,表明测温点距工件表面的位置影响计算准确性,为综合换热系数的精确计算提供了新思路。Xu等^[10]研究了工件表面粗糙度和水压对6082合金综合换热系数的影响,进一步明确了不同因素对淬火综合换热系数的影响,为提升数值模拟的准确性提供了数据支撑。Yang等^[11]研究了水温对A357合金综合换热系数的影响,指出不同工件在相同淬火条件下淬火液温度存在差异,且淬火过程中温度会持续变化。考虑淬火液温度对综合换热系数的影响,可以更准确地理解淬火过程中的冷却规律,并提高数值模拟的准确性。

综上所述,目前淬火综合换热系数的测量与计算主要考虑淬火液温度、温度测量位置以及计算方法对计算精度的影响,但并未考虑淬火液流速和材料热物性参数变化对综合换热系数的影响。强烈淬火通常在剧烈搅拌的盐溶液中进行,这与传统淬火液处于静止状态不同,现有研究缺乏针对强烈淬火工艺和机理的研究。

本文选用40Cr钢作为测温探头,测量其在10% NaCl水溶液中强烈淬火过程的冷却曲线。通过JMatPro软件计算40Cr钢的热物性参数,考虑热物性参数随温度变化对强烈淬火综合换热系数的影响,利用Deform软件结合反传热法计算40Cr钢强烈淬火综合换热系数,为40Cr钢强烈淬火数值模拟提供必要数据支撑。

1 研究方法

1.1 温度方程

根据傅里叶定律和能量守恒定律,淬火过程的传热符合第三类边界条件下非稳态传热,直角坐标系下传热方程为^[12]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q, \quad (1)$$

式中: ρ 、 c 和 λ 分别为材料的密度、比热容和热传导系数; Q 为相变潜热。

强烈淬火过程中采用较大水流的盐溶液对工件进行冲击,其换热过程可视为对流换热过程,传热方程为^[13]

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\tau} = H(T_s - T_q), \quad (2)$$

式中: T 为工件温度; n 为单位面积; τ 为单位时间; H 为综合换热系数; T_s 为工件表面实时温度; T_q 为淬火介质温度。

1.2 综合换热系数计算方法

图1展示了强烈淬火综合换热系数的计算流程,该流程利用Deform-3D中反传热模块计算强烈淬火过程中的综合换热系数。由于实验材料为块状,且属于轴对称试样,为缩短计算时间,计算模型采用1/4模型。计算步骤:首先,输入实验测量点对应的冷却曲线,设置传热区域及表面HTC的初始值(100~5 000 W/(m²·°C)),可根据所求淬火介质的冷却强度进行估计。初始值越接近所测介质HTC,所需迭代次数越少。其次,将HTC在所测温度范围内进行离散,离散点数目为5~6最宜,离散点之间温度所对应的HTC采用线性插值。最后,通过有限元方法推算测温探头其他位置的温度值,根据推算值与测定值的差值求出HTC的修正值,重新计算热电偶处

的温度值,并求出迭代系数 S 。只有当 S 符合设定要求时,才输出HTC;若不符合,则继续进行迭代计算,最终获得符合冷却条件的综合换热系数曲线。

1.3 40Cr钢材料热物性参数

材料的热物性参数随温度变化而不断变化,为准确计算40Cr钢强烈淬火过程的综合换热系数,需获取更准确的热物性参数。通过JMatPro材料计算软件,能够高效且准确地计算出不同温度下材料的热物性参数。图2展示了不同温度下40Cr钢热导率、比热容、密度和热膨胀系数等热物性参数。随温度升高材料的各类热物性参数也随之变化,故利用不同温度下40Cr钢热物性参数计算出的综合换热系数更加准确。表1是文献[14-15]中40Cr钢的热物性参数,与本文计算出的40Cr钢热物性参数进行对比,最大误差不超过10%,误差在合理范围内,认为是准确的。

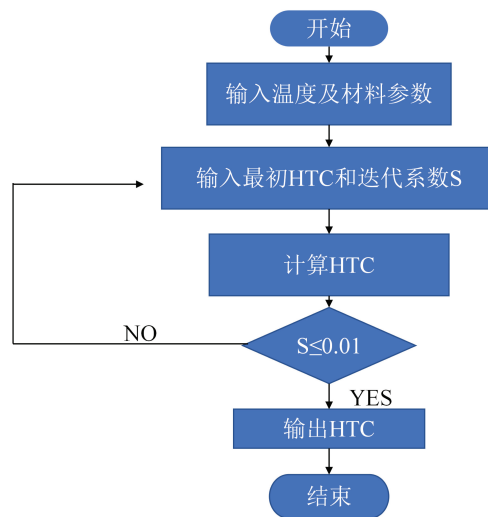


图 1 强烈淬火综合换热系数计算流程

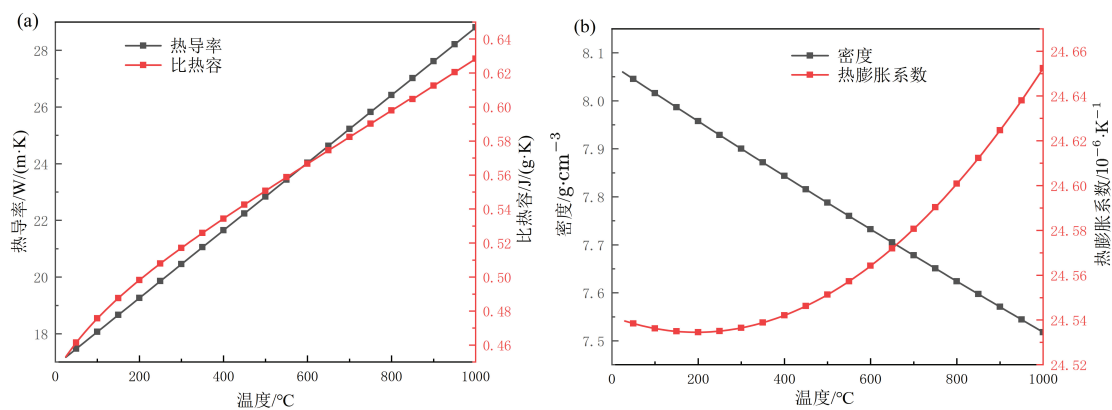


图 2 40Cr钢在不同温度下的热物性参数 (a) 热导率和比热容, (b) 密度和热膨胀系数

表 1 文献[14-15]中40Cr钢热物性参数

热物性参数	温度/°C						
	20	150	300	450	600	750	900
热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	15	17	19	21	23	25	26
比热容/ $J \cdot (g \cdot K)^{-1}$	0.45	0.48	0.52	0.56	0.59	0.62	0.65
密度/ $g \cdot cm^{-3}$	8.00	7.90	7.80	7.70	7.60	7.50	7.40
热膨胀系数/ $10^{-6} \cdot K^{-1}$	24.53	24.52	24.54	24.55	24.56	24.58	24.60

2 温度测量实验

2.1 实验材料

在温度测量实验中需使用测温探头测量强烈淬火过程不同位置的冷却曲线. 由于不同材料热物性参数存在差异, 影响淬火过程冷却曲线和最终换热系数. 故本文选用武汉佳盟新科实验器材有限公司的40Cr钢测温探头材料, 其化学成分如表2所示.

表 2 40Cr钢化学成分/wt%

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
含量	0.420	0.230	0.630	0.013	0.006	0.920	余量

2.2 测温系统

淬火过程为三维非稳态传热过程, 计算综合换热系数需考虑多维传热, 计算过程复杂. 为简化计算, 只考虑测温探头在直径方向的传热, 忽略其他方向传热的影响. 根据传热学理论以及其他学者的研究, 为达到上述传热模型的设计要求, 当圆柱长径比超过3:1时, 径向传热的影响可忽略, 传热问题可简化为沿轴向的一维模型^[16]. 故本文采用长为100 mm、直径为20 mm的40Cr钢棒.

测温探头尺寸和测温点的位置如图3所示. 在圆柱一端距表面2 mm、6 mm以及中心钻取3个深度为50 mm、直径为2 mm的圆孔, 分别命名为A、B、C, 用于安放K型热电偶. 为确保测量温度的准确性, 本实验使用晨实公司生产的WRNK-191铠装K型热电偶(测温频率高达1 000 Hz, 测温范围-50~1 000 °C), 并采用高温焊接胶黏接. 3个圆孔底端的中心点为测温点, 通过热电偶传递强烈淬火过程中的温度信息, 获取不同位置的冷却曲线.

测量温度时, 先将测温探头与热电偶相连, 随后放入热处理炉中保温30 min, 待测温探头完全奥氏体化后, 浸入含10% NaCl水溶液的工业搅拌器(转速2 000 r/min, 水流速度超过4.0 m/s)强烈搅拌冷却, 进而测量不同点位强烈淬火过程的温度变化.

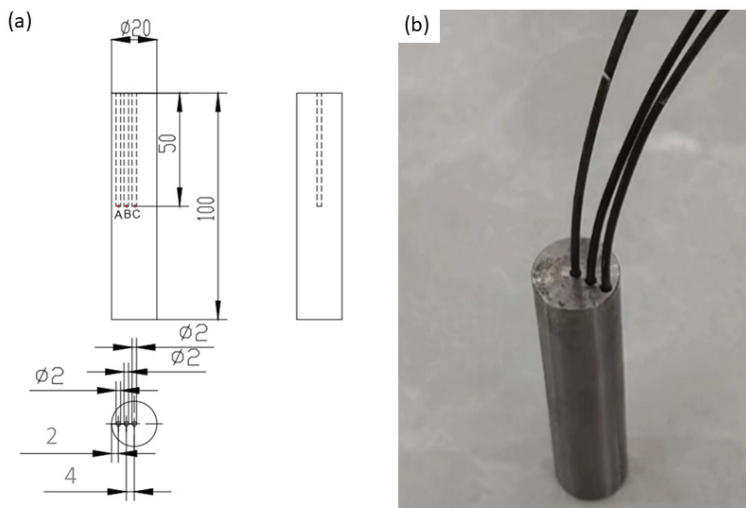


图 3 测温探头 (a) 三维图, (b) 实物图

3 结果与分析

3.1 温度测量结果

图4为测温探头内不同点位强烈淬火过程中的冷却曲线. 0~5 s冷却速度最快, 5 s后冷却速度减缓, 这是由于强烈淬火初始阶段, 工件温度较高, 热量交换剧烈, 而随强烈淬火持续进行, 探头温度不断下降, 热量交换速率也随之下降, 探头在不同位置最大温差达400 °C. 距表面最近的A点冷却速度最快, 表明A点的热量交换最为剧烈. 距表面越远, 冷却速度越慢, 符合一维稳态传热的特点, 说明本文的钢制测温探头符合设计要求.

3.2 综合换热系数计算结果

强烈淬火过程不同温度的综合换热系数如图5所示, 强烈淬火综合换热系数呈“厂”字形. 400 °C以上综合换热系数较为稳定, 随温度降低综合换热系数逐渐增大, 在400 °C时达到最大值, 约为40 000 W/(m²·°C). 400 °C以下, 随温度降低, 综合换热系数不断减小.

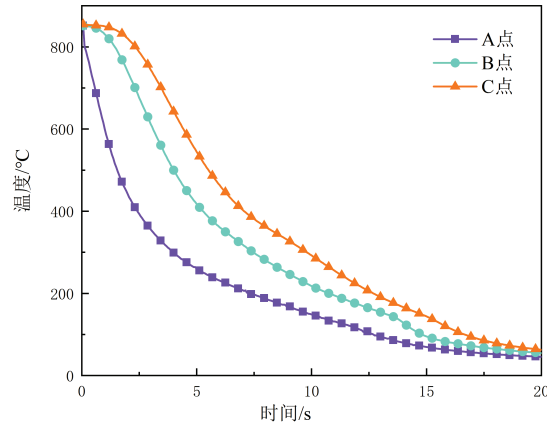


图 4 不同点位强烈淬火过程温度曲线

金属工件在液体介质中淬火时,工件表面与淬火介质之间的传热过程通常分为膜态沸腾、过渡态沸腾、核态沸腾和单相对流4个阶段^[17-18]。其中:膜态沸腾阶段和单相对流阶段的综合换热系数较低,过渡态沸腾阶段的综合换热系数居中,核态沸腾阶段的综合换热系数较高。

传统淬火液通常处于静止状态,工件刚浸入淬火液时,工件表面淬火液因温度升高,产生大量细小气泡,阻碍热量传导,导致综合换热系数较小,传热过程处于膜态沸腾阶段。随淬火液温度升高,气泡开始变大并脱离工件或者部分破裂,热量传递能力增强,综合换热系数增加,传热过程处于过渡态沸腾阶段。随淬火液温度持续升高,气泡大量破裂,带走热量,故此阶段综合换热系数最大,传热过程处于核态沸腾阶段。随淬火工件温度下降,淬火液温度也逐渐降低,工件上不再产生气泡,综合换热系数逐渐降低,传热过程进入单相对流阶段。故传统淬火综合换热系数曲线接近抛物线^[18-20]。

与传统淬火过程传热方式有所不同,强烈淬火在10% NaCl水溶液中剧烈搅拌完成。当工件浸入溶液时表面会产生气泡,但剧烈搅拌会使气泡立刻破碎,这使强烈淬火没有膜态沸腾阶段和过渡态沸腾阶段,直接进入核态沸腾阶段,所以强烈淬火在淬火初期保持较高的冷却速度,最大综合换热系数出现在400 °C时,约为40 000 W/(m²·°C)。在400 °C以下综合换热系数急速下降,是由于淬火工件和淬火液温度下降,传热过程进入单相对流阶段,导致强烈淬火综合换热系数不再呈抛物线型,反而呈“厂”字形。

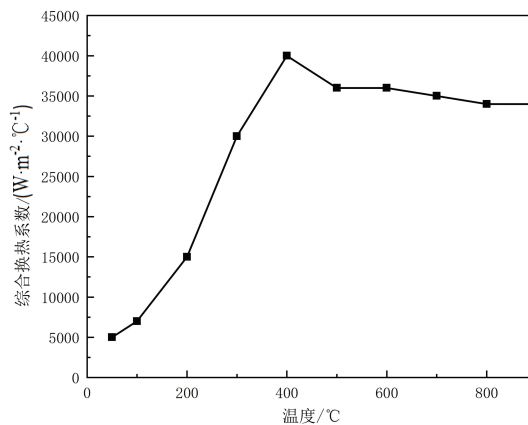


图 5 强烈淬火过程中不同温度的综合换热系数

3.3 综合换热系数计算结果验证

为验证综合换热系数计算结果的准确性,利用计算所得综合换热系数进行温度场模拟计算,将测量点的温度曲线与综合换热系数作为边界条件的温度模拟曲线进行对比。图6为圆柱A点、B点和C点的模拟温度与测量

温度对比. 不同点冷却曲线的温度拐点出现时间较为一致. 距圆柱表面较近的A点较距离较远的B点和C点, 其模拟温度与测量温度的误差更小. 这是由于距圆柱表面越远越易受到轴向传热影响, 所以误差相对更大. 3个点的模拟温度与测量温度误差都在5%以内, 模拟温度和测量温度总体吻合, 证明了综合换热系数计算的准确性.

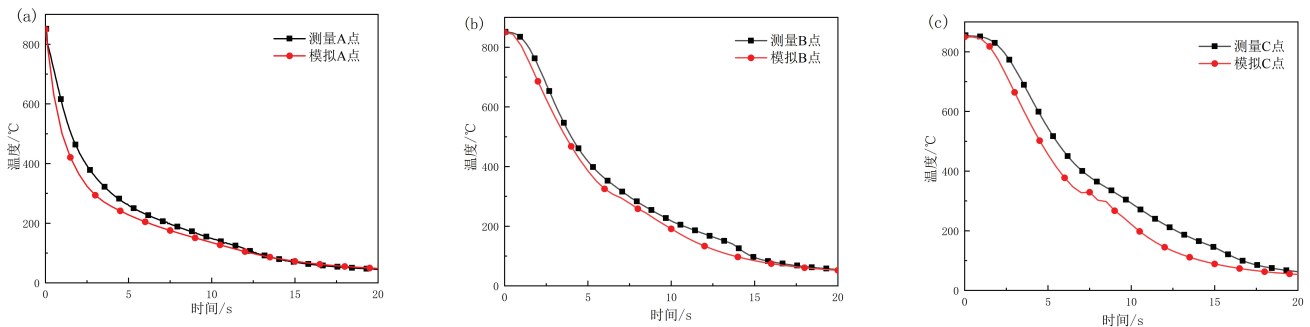


图 6 不同点强烈淬火模拟温度与测量温度对比 (a) A点, (b) B点, (c) C点

4 结论

本文完成了40Cr钢强烈淬火过程的测量分析, 在建立40Cr钢热物性参数数据库的基础上, 计算分析了40Cr钢强烈淬火综合换热系数并得出如下结论:

1) 强烈淬火初始阶段, 强烈搅拌使传热过程从膜态沸腾转变为核态沸腾, 提高了强烈淬火综合换热系数, 使强烈淬火综合换热系数呈“厂”字形, 并在400 °C时达到最大值, 约为40 000 W/(m²·°C).

2) 强烈淬火温度的模拟结果与测量结果误差不超过5%, 验证了强烈淬火综合换热系数计算的准确性.

参考文献:

- [1] 刘海亮, 姚文德, 刘宇盖, 等. 40Cr钢转动轴齿轮磨损原因[J]. 理化检验—物理分册, 2024, 60(1): 45-48.
LIU H L, YAO W D, LIU Y G, et al. Reasons for wear of 40Cr steel rotating shaft gears[J]. Physical and Chemical Inspection-Physical Division, 2024, 60(1): 45-48. (in Chinese)
- [2] 梁成成. 40Cr钢紧固螺栓断裂原因分析[J]. 热处理, 2023, 38(4): 56-59.
LIANG C C. Analysis on cause of 40Cr steel fastening bolt breaking[J]. Heat Treatment, 2023, 38(4): 56-59. (in Chinese)
- [3] 郭勤宇, 陈永峰, 张洪彪, 等. 40Cr钢方坯表面淬火工艺及组织转变规律[J]. 钢铁, 2022, 57(2): 109-116.
GUO Q Y, CHEN Y F, ZHANG H B, et al. Surface quenching technology and microstructure evolution law of 40Cr steel billet[J]. Steel, 2022, 57(2): 109-116. (in Chinese)
- [4] 赵步青, 徐利建, 朱敏, 等. 低碳钢的强烈淬火[J]. 热处理, 2021, 36(4): 31-33.
ZHAO B Q, XU L J, ZHU M, et al. Intense quenching of low-carbon steel[J]. Heat Treatment, 2021, 36(4): 31-33. (in Chinese)
- [5] FREBORG A M, FERGUSON B L, ARONOV M A, et al. Intensive quenching theory and application for imparting high residual surface compressive stresses in pressure vessel components[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2003, 125(2): 188-194.
- [6] AMATANWEZE K T, BUCHELY M F, ATHAVALE V A, et al. Residual stress distribution, distortion, and crack initiation in conventional and intensive quench practices[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(8): 3838-3848.
- [7] 杨登贵, 朱小硕, 傅宇东, 等. 40Cr钢的强烈淬火+回火处理[J]. 金属热处理, 2023, 48(2): 117-123.
YANG D G, ZHU X S, FU Y D, et al. Intensive quenching and tempering of 40Cr steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(2): 117-123. (in Chinese)
- [8] 隋佳丽, 李新生, 肖桂勇, 等. 淬火介质表面换热系数的计算方法与应用[J]. 热加工工艺, 2023, 52(14): 137-141.
SUI J L, LI X S, XIAO G Y, et al. Calculation method and application of surface heat transfer coefficient of quenching medium[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(14): 137-141. (in Chinese)
- [9] 刘玉, 李玥. 淬火换热系数的计算及实验验证[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(11): 192-199.
LIU Y, LI Y. Calculation and experimental verification of heat transfer coefficient during quenching[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(11): 192-199. (in Chinese)
- [10] XU R, LI L X, ZHANG L Q, et al. Influence of pressure and surface roughness on the heat transfer efficiency during water spray quenching of 6082 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 2877-2883.

- [11] YANG X W, ZHU J C, NONG Z S, et al. FEM simulation of quenching process in A357 aluminum alloy cylindrical bars and reduction of quench residual stress through cold stretching process[J]. *Computational Materials Science*, 2013, 69(1): 396-413.
- [12] 张帅坤, 张超勇, 吴剑钊, 等. 40Cr钢滚刀织构表面激光淬火的数值模拟[J]. *金属热处理*, 2024, 49(5): 47-54.
ZHANG S K, ZHANG C Y, WU J Z, et al. Numerical simulation of laser hardening of 40Cr steel hob textured surface[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2024, 49(5): 47-54. (in Chinese)
- [13] NARAYAN N M, MOQADAM S I, ELLENDT N, et al. Multiphase numerical modeling and investigation of heat transfer for quenching of spherical particles in liquid pool[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 186: 108016.
- [14] 林继辉. 40Cr钢和60Si2Mn钢顶端淬火过程的数值模拟[D]. 大连: 大连交通大学, 2011.
LIN J H. Numerical simulation of the end-quenching process in 40Cr and 60Si2Mn steels[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [15] 高鹤芯. 40Cr齿轮钢激光淬火过程多场耦合数值模拟及实验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.
GAO H X. Numerical simulation and experimental research of multi-field coupling in laser quenching process of 40Cr gear steel[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2023. (in Chinese)
- [16] 袁忠禹, 吴运新, 龚海, 等. 基于改进集中热容法的Mg-Gd-Y-Zr-Ag变形镁合金表面换热系数求解方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(4): 1281-1289.
YUAN Z Y, WU Y X, GONG H, et al. A method for solving surface heat transfer coefficient of Mg-Gd-Y-Zr-Ag wrought magnesium alloy based on improved lumped heat capacity method[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2023, 54(4): 1281-1289. (in Chinese)
- [17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG S M, TAO W Q. Heat transfer (4th ed)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政, 译. 北京: 科学出版社, 1984.
PATANKAR S V. Numerical calculations of heat transfer and fluid flow[M]. ZHANG Z, translator. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [19] VENKITESH V, DASH S. Enhancement of quenching heat transfer performance through destabilization of vapor film[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 204: 123851.
- [20] WANG Z F, DENG J, QIAN L B, et al. Experimental investigation of the transient pool boiling heat transfer on the quenching of vertical rodlet in water[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Nuclear Engineering Collocated with the ASME 2020 Power Conference. August 4-5, 2020. Virtual, Online. 2020.

责任编辑: 刘敏