

基于交流电磁场检测裂纹尺寸反演研究

刘志刚 丛军 聂炳林 李巨川

(中石化胜利海上石油工程技术检验有限公司 山东 东营 257001)

摘要: 本文针对被检工件表面的裂纹尺寸量化反演问题,在分析交流电磁场检测(ACFM)检测信号的影响因素基础上,构建裂纹尺寸量化反演的数学模型。为使算法更接近实际,搭建实验平台,利用实验数据得到裂纹尺寸与磁场信号特征值回归方程,运用最小二乘法对数据进行拟合得到裂纹尺寸与检测信号的函数关系。在考虑影响因素的基础上进行修正,实验验证结果表明该算法长度和深度反演精确度分别达到 97% 和 92.5%,为金属表面裂纹尺寸量化提供了可靠的方法。

关键词: 交流电磁场检测技术; 裂纹尺寸; 量化反演

0 引言

交流电磁场检测(ACFM)技术属于无损检测技术,因其在检测过程中操作简单、非接触检测、可数字化以及无需去除表面保护层即可实现表面缺陷及疲劳裂纹的检测而得到推广运用^[1-3]。借助 ACFM 技术对裂纹尺寸量化反演问题展开深入分析和研究,是检测工作的关键要点内容,其能够有效保证产品的质量,同时推动安全生产作业的进行^[4]。技术人员借助 ACFM 技术对产品表面展开检测时,激励线圈将在金属表面感应出一定区域的匀强磁场,如果有裂纹,电流会从裂纹两端和底部绕过,引起金属表面电磁场的变化。检测人员对 x 和 z 两方向上的磁通密度进行分析,就可获得裂纹的尺寸信息,从而达到裂纹尺寸量化反演的目的^[5]。

由于裂纹尺寸对电磁场信号的影响机理复杂,难以进行定量研究,且电磁场信号易受干扰,目前仍未有一套通用数学模型来描述裂纹尺寸与电磁场信号的关系^[6]。针对以上问题,本文基于交流电磁场检测原理建立 ACFM 裂纹检测模型,对含裂纹的工件表面磁场信号进行分析,用插值拟合的方法建立裂纹尺寸量化反演的数学模型,提出了一种裂纹尺寸反演算法,并搭建实验平台进行验证。

1 ACFM 裂纹检测模型的建立

根据交流电磁场检测原理,建立的 ACFM 裂纹检测模型如图 1 所示。预设该模型工件的长度为 130mm,宽度为 5mm,厚度为 11mm;在金属板的

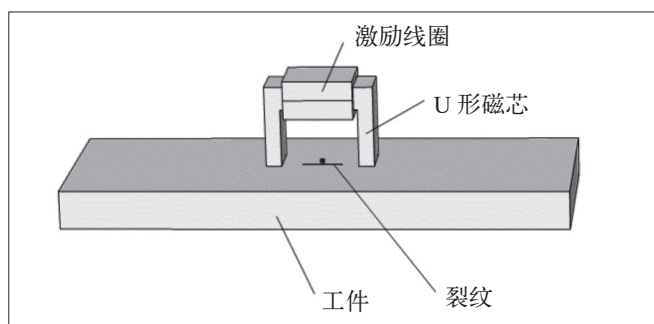


图 1 ACFM 裂纹检测模型

中心位置做布尔差运算预设槽型裂纹。在检测过程中,预设模型中激励探头的提高高度为 0,探头中 U 型磁芯两脚连线平行于裂纹缺陷。激励线圈匝数为 500 匝,激励电流设置为 2A、2kHz 的正弦波。建立对应的仿真几何模型后,根据需求自定义材料属性。

2 仿真结果及分析

根据交流电磁场检测原理,传感器须在一定区域的匀强磁场中检测裂纹,因此在 U 型磁芯中心位置处提取磁感应强度分量 B_x 和 B_z 。同时沿着裂纹走向来设置感应磁场的测量路径,可更准确地得到路径上的磁感应强度分量。

2.1 裂纹长度对磁场信号的影响

设置裂纹宽度为 0.5mm,深度为 5mm,对长度分别为 1mm、5mm、10mm、20mm、30mm 的裂纹进行模拟检测,通过电磁场模块的仿真分析得到裂纹长度的变化对磁场信号 B_x 和 B_z 的影响,结果如图 2 所示。

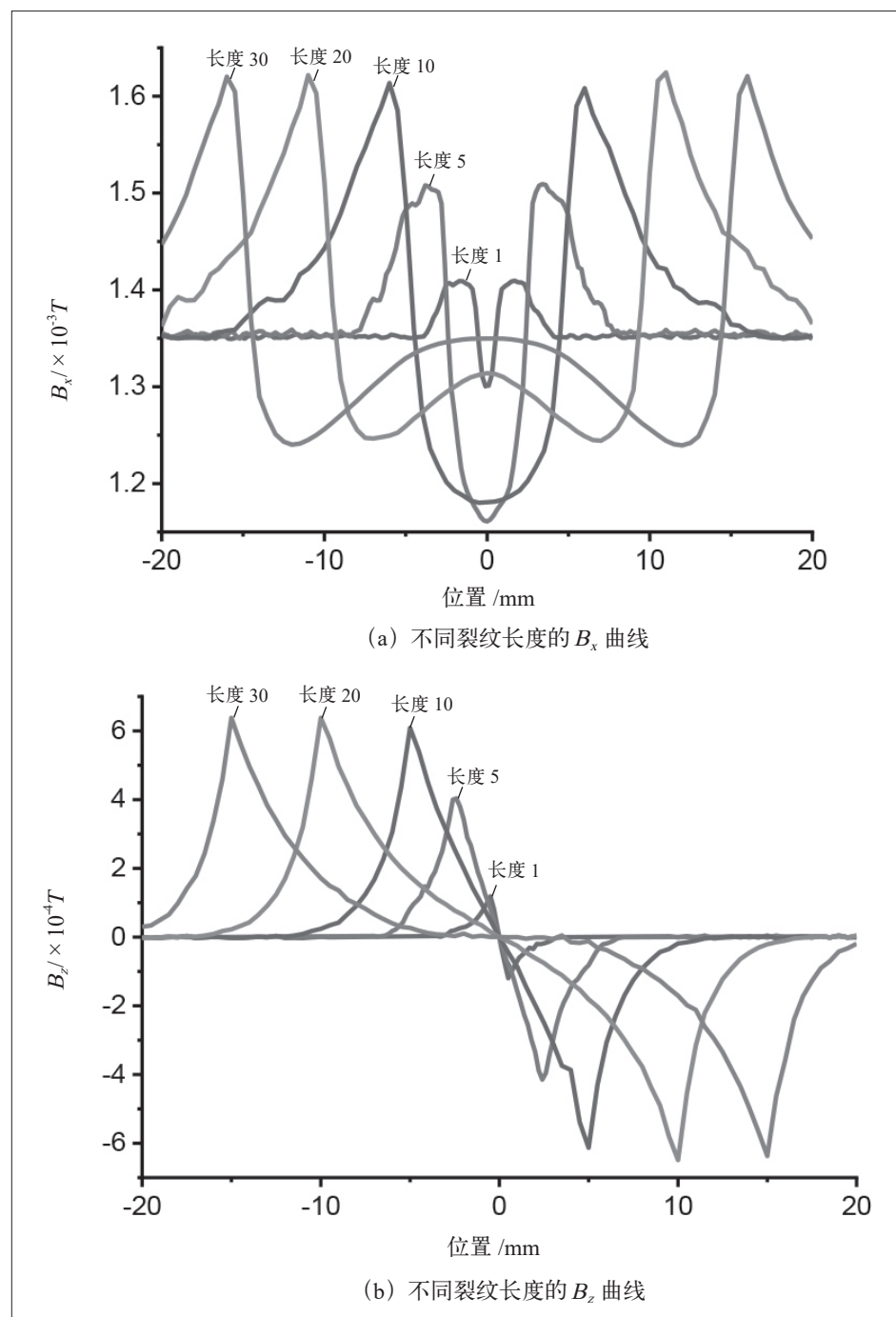


图2 深度5mm不同裂纹长度的磁场信号

通过对图2进行分析可知, B_x 曲线的两峰值出现在裂纹两端点附近, 而 B_z 曲线的峰值和谷值更是精确地出现在裂纹两端点处。这是因为在U型磁芯刚扫查到裂纹和刚离开裂纹时, 产生的匀强磁场会绕过裂纹两端, 在垂直方向产生磁场分量, 而在端点处磁感应强度垂直分量达到最大。因此在裂纹长度的反演计算中, B_z 曲线的峰值和谷值可以作为裂纹开始到结束的标记, 其间距能很好地表达出裂纹

的长度信息。

同时, 裂纹长度不仅影响 B_x 两峰值和 B_z 峰值与谷值的间距, 还会影响 B_x 、 B_z 信号的变化幅度。观察图2(b)可以发现, B_z 曲线峰谷间的差值 ΔB_z 随裂纹长度呈正比变化, 可作出 B_z 与裂纹长度关系。在裂纹长度低于10mm时, 裂纹长度变化对 ΔB_z 影响较大, 灵敏度较高; 裂纹长度大于10mm时, 裂纹长度变化对 ΔB_z 影响不明显, 曲线变化平坦, 灵敏度很低。因此当裂纹较小时, 也可以通过 ΔB_z 来反演裂纹长度。

2.2 裂纹深度对磁场信号的影响

设置裂纹宽度为0.5mm, 长度为5mm, 对深度分别为1mm、2mm、3mm、5mm、7mm、11mm的裂纹进行模拟检测, 通过电磁场模块的仿真分析得出 B_x 和 B_z 信号强度变化与裂纹深度成正比, 即裂纹越深, B_x 和 B_z 信号强度变化越大。裂纹深度对 ΔB_x 、 ΔB_z 信号的影响趋势相似。在裂纹深度较小时, ΔB_x 、 ΔB_z 随裂纹深度的增大呈近似线性增大; 随着裂纹深度的增大, ΔB_x 、 ΔB_z 的灵敏度逐渐减小, 当裂纹深度大于10mm时, ΔB_x 、 ΔB_z 对裂纹深度的增大不敏感。这是由于电流的集肤效应, 高频的磁场信号集中在工件

表面, 对浅表的缺陷变化很敏感, 而高频的磁场信号很难透入工件深处, 因此当裂纹过深时, 裂纹深度的增大很难再引起磁场信号的变化。根据仿真分析中裂纹深度与 ΔB_x 的关系, 通过数值拟合得到如下函数关系式:

$$H = -0.000366e^{-0.55B_x} + 0.000366$$

2.3 探头提离高度对磁场信号的影响

设置提离高度分别为1mm、2mm、3mm、4mm、

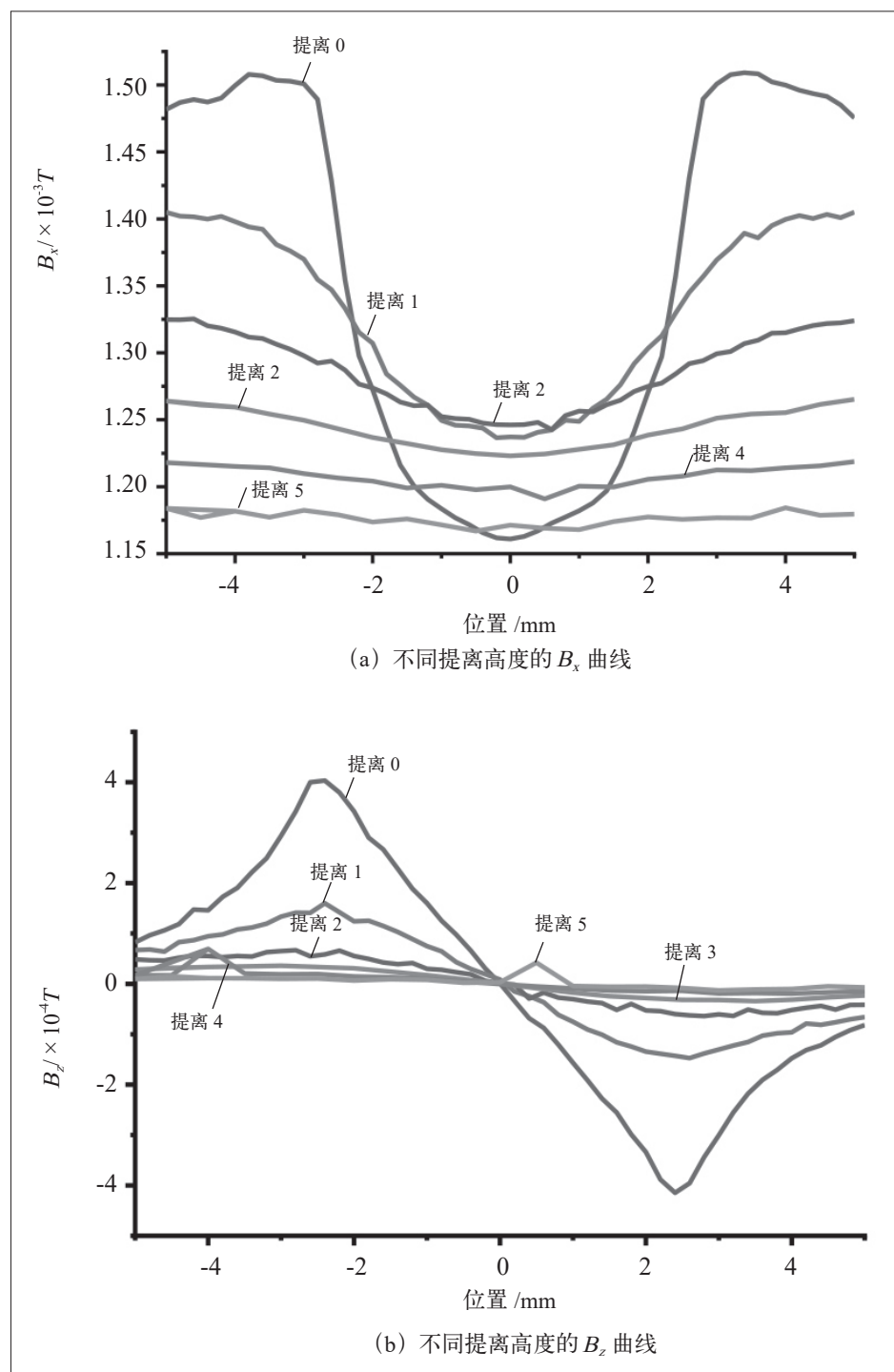


图3 不同提离高度的磁场信号

5mm, 对尺寸为 $5\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的工件表面裂纹进行模拟检测, 从而得到提离高度与 ACFM 检测信号之间的关系, 以及所造成的影响程度。通过电磁场模块的仿真分析得到提离高度的变化对磁场信号 B_x 和 B_z 的影响结果, 如图3所示。

对图3进行分析可以看出, 提离高度改变会直接影响检测信号强度, 探头离检测工件表面越高, 检

测信号强度越弱。当裂纹深度为5mm时, 探头提离有效高度为3mm。对于深度大的裂纹, 探头提离一定的高度, 依然可有效识别出裂纹尺寸, 说明试件表面涂抹防腐蚀材料的情况下, ACFM 技术也能发挥出良好的检测效果。但提离高度超过5mm之后, 检测信号变得非常微弱, 信号强度基本没有产生变化, 进一步说明 ACFM 技术在试件的表面和近表面的检测效果较好, 在探头距裂纹较远即提离高度较高的情况下检测效果较差。

3 裂纹尺寸反演算法

由上述仿真结果分析可知, 表面裂纹长度出现变化, 会改变磁感应强度分量 B_z 。金属表面有裂纹的情况下, B_z 检测曲线出现两个极性相反的特征极值点, 当探头提离高度为0时, 两特征极值点出现的位置与裂纹出现的始末位置相重合。此时能够借助 B_z 检测曲线上峰值和谷值的间距 D_z 标明裂纹长度信息。当裂纹长度确定后, 裂纹深度和 ΔB_x 、 ΔB_z 的关系即可确定, 因此裂纹深度可由 ΔB_x 、 ΔB_z 反演得出。 B_x 信号比 B_z 信号的强度要大得多, 在实际检测时更易检出, 因此常常使用 ΔB_x 来反演裂纹深度。裂纹尺寸反演的具体流程如图4所示。

4 算法实验验证

4.1 系统搭建

根据 ACFM 技术原理, 设计裂纹尺寸反演算法验证系统, 其系统框图如图5所示。整个系统由激励及检测探头、信号发生器、信号采集模块以及信号处理模块共同构成。检测探头包括激励线圈、检

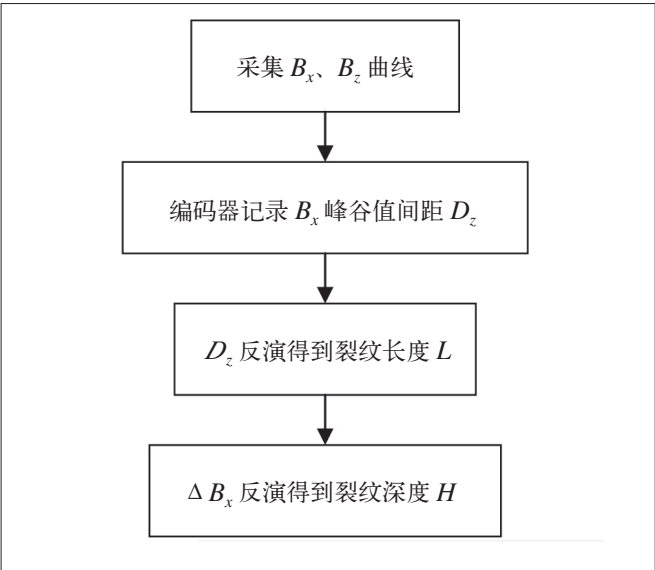


图 4 裂纹尺寸反演流程图

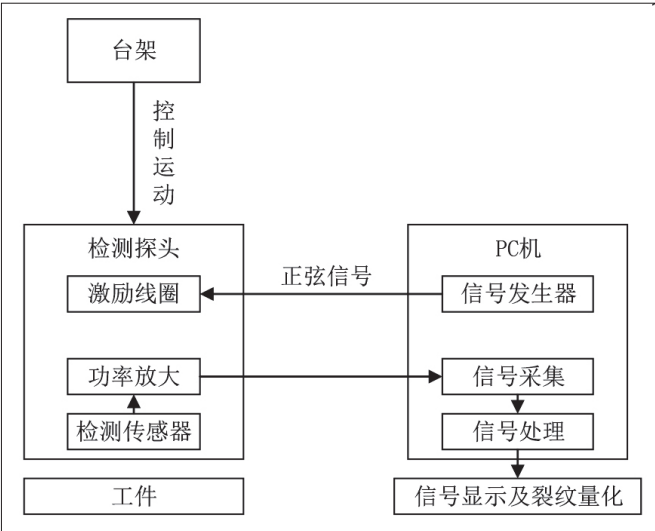


图 5 裂纹反演算法验证系统框图

测传感器和功率放大电路板。PC 机内置信号发生器、采集卡和信号处理系统。信号发生器产生正弦信号，给激励线圈提供磁场激励源，台架控制探头以匀速扫过工件，传感器检测工件表面磁场信号，采集卡采集放大后的磁场信号，然后利用电脑实现检测信号实时波形显示、检测信号的处理以及尺寸反演算法的验证。检测系统运行时，信号发生器会将交流电信号加载于激励线圈，将探头平行于裂纹走向放置于工件裂纹区域，在探头达到指定位置后，规划好台架的运动路径，确保其能够顺着工件裂纹走向稳定移动。检测探头将磁场信号转化为微弱电压信号，同时利用相应模块对信号作放大处理，为之后的数据处理工作提供便利条件。检测信号通过数据

表 1 长度反演结果

序号	1	2	3	4	5
深度 /mm	4	4	4	4	4
实际长度 /mm	8	12	16	20	24
反演长度 /mm	8.41	11.3	16.3	20.05	24.2
精确度	95%	94%	98%	99%	99%

表 2 深度反演结果

序号	1	2	3	4	5
长度 /mm	5	5	5	5	5
实际深度 /mm	1	1.5	2	3	4
反演深度 /mm	0.78	1.4	1.96	3.02	3.76
精确度	78%	93%	98%	99%	94%

采集模块传递到计算机上，借助 LabVIEW 软件展开数据处理工作，显示出相应的波形图，同时对裂纹进行识别及尺寸反演。

4.2 程序设计

检测信号由 TMR 传感器提取后，经过放大电路的信号调理，通过接口被传输到 PC 端。PC 机需要对检测信号进行处理，并在屏幕上显示信号波形图。由于 PC 内嵌 NI 采集卡，因此选择 LabVIEW 作为程序开发环境。程序主要包含信号采集、信号处理、信号显示和信号反演四部分。信号采集模块主要进行采集参数配置，即对采集模式、采样数、采样速率、电压最大值、电压最小值及接线端配置进行设置。信号处理模块包括信号放大、均方根处理以及均值处理三个主要功能，将采集到的信号做均方根处理求取信号的有效值，然后再做均值处理使信号更为平滑。信号显示模块将 B_x 、 B_z 信号放大，显示波形。信号反演模块提取 B_x 信号的极大值和极小值之差 B_x 以及 B_z 信号的极大值和极小值间距 D_z ，分别带入长度和深度反演公式得到并显示裂纹长度 L 和裂纹深度 H 。

4.3 实验验证

运用实验仪器和软件检测工件表面不同尺寸裂纹，将实际尺寸和量化尺寸信息作对比，得出精确度。深度同为 4mm 的不同长度裂纹尺寸量化反演结果如表 1 所示，精确度最低 94%，最高 99%，精确度均在 90% 以上，可以看出长度的反演量化效果是比较好的。深度不同、长度同为 5mm 的裂纹尺寸量化反演结果如表 2 所示，裂纹数据深度反演平均精确度为 92.5%，除了裂纹深度较小的裂纹精确度较低，其余裂纹精确度均在 90% 以上，检测结果表明本文提出的反演算法能够满足实际检测工程需求。

5 结语

综上所述,本文对基于 ACFM 技术的金属表面和近表面裂纹智能化检测需求,以及 ACFM 裂纹尺寸量化模型作了全面分析,设计了工件表面裂纹的尺寸量化反演计算方法,并根据实际检测要求对算法进行了修正。经实验验证,该算法对裂纹的长度反演和裂纹深度反演的精确度可达 90% 以上。该算法提高了裂纹尺寸检测结果的准确度,对 ACFM 检测技术的实际应用提供了有力支持。

参考文献:

[1] 袁新安,李伟,李文艳,等.交流电磁场裂纹实时判定与评估方法[J].无损检测,2019,41(04):7-11+57.

[2] 王景林,任尚坤,张丹,等.基于 ACFM 检测技术的表面裂纹特征评价方法研究[J].中国测试,2019,45(01):40-46.

[3] 苏令铨.基于漏磁空间变化率和交变电场检测的无损检测新方法研究[D].厦门:厦门大学,2017.

[4] 李伟.基于交流电磁场的缺陷智能可视化检测技术的研究[D].青岛:中国石油大学(华东).2007.

[5] 郑玲慧,任尚坤,王景林.ACFM 技术的表面裂纹识别和尺寸反演算法研究[J].测控技术,2020,39(05):80-85+116.

[6] 王慷.双通道十字结构激励平面旋转场涡流传感器裂纹检测机理研究[D].兰州:兰州理工大学,2021.

作者简介:刘志刚(1982.01-),男,汉族,山东东营人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:海洋石油设备检测检验、安全评估。

(上接第 42 页)

基金项目:中铁工程装备集团有限公司科研项目(装备研合 2022-037);中铁工程装备集团隧道设备制造有限公司科研项目(设备研合 2022-09)。

参考文献:

[1] 陈磊.TBM 滚刀刀圈用 5Cr5MoSiV1 钢的热处理特性研究[D].南昌:南昌大学,2012.

[2] 王锴,王琴.回火温度对 CREG-1 钢组织和力学性能的影响[J].金属热处理,2018,43(10):155-158.

[3] 陈欢,张银霞,郜伟,等.TBM 滚刀刀圈用 DC53 钢淬火工艺的研究[J].热加工工艺,2017,46(20):208-210+213.

[4] 陈鹰,陈再枝,董瀚,等.经深冷处理的 4Cr5MoSiV1 钢的回火组织和力学性能[J].钢铁研究学报,2006,18(05):29-32.

[5] 邓黎辉,汪宏斌,李绍宏,等.高强韧冷作模具钢深冷处

理性能及组织[J].材料热处理学报,2011,32(04):76-81.

[6] 谢尘.高碳高合金钢深冷处理微观结构演化及相变机理研究[D].上海:上海大学,2016.

[7] 孙尧卿.基体钢 65Cr4W3Mo2VNb 的断口形貌分析[J].钢铁,1981,16(04):12-18.

[8] 李雄,李士燕,张鸿冰,等.6W-5Mo-4Cr-2V 高速钢深冷处理微观组织结构的分析[J].上海交通大学学报,2002,36(07):905-907+910.

[9] 葛艳辉.深冷处理对 GCr15 轴承钢组织及力学性能的影响[J].材料导报,2013,27(Z2):334-335+338.

作者简介:王锴(1977.03-),男,汉族,河南信阳人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:机械制造及自动化、材料性能改进等。