

文章编号: 1001-3806(2016)02-0189-06

基于图像形态学激光模具裂纹修复技术研究

张伟杰^{1,2}, 刘立君^{2,3*}, 张红兴^{1,2}

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 太原 030024; 2. 浙江大学 宁波理工学院 机电与能源工程学院, 宁波 315100; 3. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 为了探究小功率激光模具自动修复技术, 利用同轴视觉采集系统采集模具的裂纹图像, 结合数字图像形态学细化处理识别裂纹位置信息, 建立了数字图像处理流程, 得到裂纹的轨迹信息, 将裂纹轨迹信息矢量化后, 经曲线拟合生成数控代码, 导入到数控系统完成激光模具修复。裂纹图像经图像去噪增强、形态学细化等处理后, 能够有效地得到裂纹中心线, 将裂纹位图矢量化后转为 DXF 文件格式, 通过 CAM 软件生成数控加工代码。结果表明, 该方法加工精度达到 0.0368mm, 满足模具修复的精度要求; 通过图像形态学细化处理技术可以实现激光模具自动修复。这对激光加工设备实现自动化和智能化提供了理论支持和技术基础。

关键词: 激光技术; 激光模具修复; 图像形态学处理; 数控代码; UG NX 后处理**中图分类号:** TN249; TN957.52 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.008

Repair techniques of dies with laser based on image morphological processing

ZHANG Weijie^{1,2}, LIU Lijun^{2,3}, ZHANG Hongxing^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Mechanical and Energy Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to repair dies automatically with low-power laser, crack images were taken by a coaxial vision acquisition system. Crack position information was acquired combining with digital image morphological thinning processing technology. Digital images processing were established and crack trajectory information was obtained. And then, dies were repaired by computer numerical control (CNC) system from numerical control (NC) code generated from curve fitting vector image. Crack center line was effectively obtained after image denoising, enhancement and morphological thinning treatments. NC codes were generated with the help of CAM software after crack bitmaps were converted to DXF file format. The results show that repair precision of dies can reach 0.0368mm and meet the repair demands of dies. Dies can be repaired automatically by means of image morphological thinning processing. It is theoretical support and technical foundation for automation and intelligence of laser processing equipment.

Key words: laser technique; laser die repair; image morphological thinning processing; numerical control code; UG NX post-processing

引言

在现代工业中, 模具作为基础工艺设备应用非常

广泛, 由于恶劣的工作环境, 频繁的冷热交替, 模具很容易出现破坏性的疲劳裂纹并导致失效。随着模具加工工艺的不断进步、高新技术的不断应用, 模具成本也在相应地提高。模具失效将带来巨大的经济损失^[1]。模具激光修复是以激光作为高热能的精确修复技术, 能够有效处理模具棱角等易出现裂纹区域的修补工作, 特别适合有抛光要求模具修补。采用脉冲激光修复模具缺陷, 利用能量密度高的特点, 对模具合金缺陷部位进行加热, 并加入同质合金粉末或者丝料, 能实现模具的快速修复。利用激光熔覆技术对模具进行修复已经得到应用, 现在已有成型的技术设备, 如华工激光的激光模具焊补机、大族激光的激光模具修复焊接机等。

目前绝大多数实用阶段的模具修复系统都是通过

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y1110262); 宁波市自然科学基金资助项目(2014A610078); 哈尔滨市科技创新人才专项基金资助项目(2012RFXXG75); 黑龙江省自然科学基金资助项目(E201240); 国家自然科学基金资助项目(51275468); 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室开放基金资助项目(ZKL-PR-200303)

作者简介: 张伟杰(1988-), 男, 硕士研究生, 现主要从事功能表面仿生强化及其图像处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 888liulijun@163.com

收稿日期: 2014-12-09; 收到修改稿日期: 2015-01-15

手工示教完成的^[2-3]。而模具裂纹的形态大多都是不规则的曲线,示教过程中需要用肉眼观察裂纹,手动记录示教过程点,保证激光指示路径能够完全符合裂纹,从而生成良好的修复路径轨迹。在实际模具修复过程中,由于机床轨迹都是用近似直线段逼近的,为了保证裂纹跟踪的精度,需要尽可能多的选用示教点,以减小示教点之间的距离,使机床运动轨迹逼近裂纹的真实走向,保证激光准确作用在裂纹中心线上。若示教点数过少,则有可能导致激光焊接轨迹无法与裂纹吻合,导致部分裂纹无法被激光熔凝,这样被遗漏的微小裂纹段会继续对模具产生影响^[4]。这种主要依靠示教的方法过程繁琐、效率低、示教精度难以保证,尤其难以准确跟踪模具裂纹这样的复杂路径,并且示教者处于危险的工作环境中,环境差、危险性高^[5-7]。

基于上述原因,利用 CCD 视觉传感器检测待修复的模具,根据裂纹图片,利用数字图像处理技术提取出裂纹骨架中心线,生成焊接轨迹。这样可以在有效提高工作效率、降低人的劳动力的同时,大幅提高裂纹跟踪的准确性,为实现模具自动修复提供基础技术。

1 模具裂纹特征提取

1.1 模具裂纹图像预处理

激光模具修复过程是一个声光电热交互作用的复合过程,会产生强烈的弧光、飞溅、焊接电流变换、工件反光等,这就导致采集的图像产生很多噪声点,如图 1 所示。为避免由于噪声对模具裂纹特征提取造成干扰,需要用对图像进行预处理,通过合适的图像处理算法进行过滤增强,改善图像的噪声^[8]。

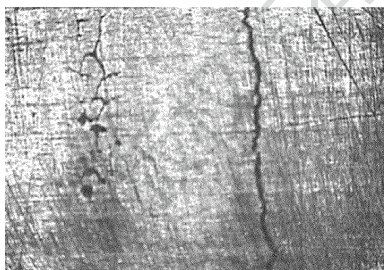


Fig. 1 Original image from CCD

图像增强的目的是突出图像中的裂纹信息,同时去除或消弱不需要的噪音。增强处理的结果使得裂纹更适合人的观察或者机器的识别系统。常用的图像增强基本上可以分为空间域增强和频率域增强^[9]。空域法是直接对像素值进行相应的灰度操作以获得增强效果,它具有理论简单、算法复杂度低的优点,可广泛应用于实时领域图像增强;频域法是通过变换域的系数进行处理,然后再逆变换,其算法比较复杂,不能对图像所有部分都很好增强^[10]。作者提取裂纹的

最终目的是要形成控制指令对加工路径进行在线调节。因此,从应用的角度,本文中主要是通过空域法来达到裂纹图像增强的目的。对采集图像的预处理主要包括灰度线性变换解决视觉上的裂纹图像整体对比度问题,伽马变换选择性地增强裂纹的对比度。线性灰度变换函数 $f(x)$ 为 1 维线性函数:

$$D_2 = f(D_1) = f_1 D_1 + f_2 \quad (1)$$

式中, f_1 为斜率, f_2 为截距, D_1 为输入的灰度, D_2 为输出的灰度。

伽马变换的一般表达式为:

$$y = (x + e)^\gamma \quad (2)$$

式中, x 与 y 的取值范围都是 $[0, 1]$, e 为补偿系数, γ 为伽马系数。

对原始裂纹图像先经过线性变换、再经过伽马变换后得到预处理图像,如图 2 所示,可以看到,在保证模具裂纹特征不变的情况下,有效地滤除了模具表面的划痕噪音,裂纹信息的对比度得到增强。

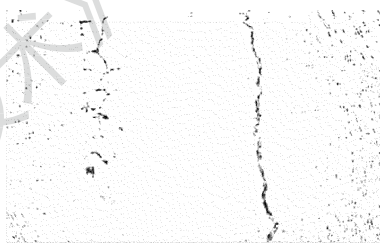


Fig. 2 Preprocessing of crack image

一般来说,裂纹图像的裂纹具有局部连续性质,即相邻像素的数值相近,而噪声的存在使得裂纹图像在噪声点处产生灰度值的跳跃,假设偶尔产生的噪声并没有改变模具裂纹图像局部连续的性质。利用加大中心点权重的高斯模板就可以滤除由于模具修复系统电气系统引起的随机噪声。高斯函数的表达式为:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2 + y^2)\right] \quad (3)$$

式中, σ 为尺度参量。中值滤波器是在数字图像处理中应用非常广泛的一种顺序统计滤波器,它的输出响应是窗口中像素排序结果的中值,像素的原始值包含在中值的计算结果中。因此它对很多本系统的随机噪声都有很好的去噪能力,能够保留图像更多的裂纹细节特征信息,尤其在消除椒盐噪声上效果明显。

$$g(x, y) = \text{med}\{f(x - k, y - l), (k, l \in W)\} \quad (4)$$

式中, $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 分别为原始图像和处理后图像; W 为 2 维模板,通常为线状、圆形、十字形,圆环形的 $3 \times 3, 5 \times 5$ 区域; k, l 是 W 的特征变量,组合使用大小为 5×5 。 $\sigma = 0.85$ 的高斯滤波器和大小为 5×5 的十字形的中值滤波器得到的结果如图 3 所示,与图 2 相比,模具裂纹图像周边的噪点明显去除,但是裂纹图

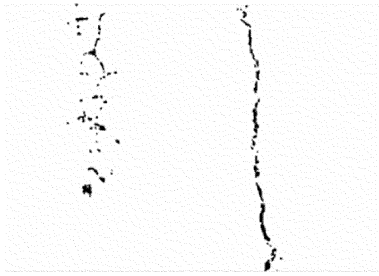


Fig. 3 Crack image spatial filtering

像的连续性也遭到破坏。

1.2 形态学模具裂纹中心线

使用形态学原理解决模具裂纹图像连续性的问题,形态学的基本原理是利用结构元素作为模板,同原始图像进行卷积处理。结构元素一般是 2 维的,由数值 0 和 1 组成的矩阵,形状任意。结构元素的原点指定图像处理范围,结构元素中数值为 1 的点决定领域像素是否需要参与计算。腐蚀是指消除边界点,使边界向内部收缩的过程。若 A 和 B 是 Z_2 (代表 2 维整数空间) 中的集合, A 被 B 腐蚀定义为:

$$A \ominus B = \{Z | (B)_z \subseteq A\} \quad (5)$$

膨胀运算将是将与物体接触的所有背景点合并到该物体中,使边界向外部扩张的过程。 A 被 B 腐蚀定义为:

$$A \oplus B = \{Z | [(B)_z \cap A] \subseteq A\} \quad (6)$$

对图像进行膨胀运算后再腐蚀得到的图像如图 4 所示,可以看出,裂纹图像中间的断点得到连接仍保持原有裂纹图像的特征。

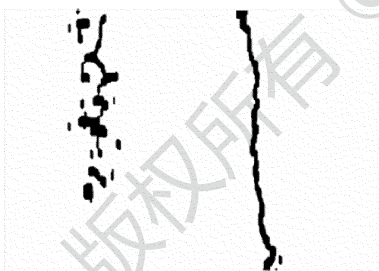


Fig. 4 Image morphological processing of crack

这样就得到了裂纹的完整图像,由于激光加工形成的熔池大小大于裂纹的宽度,可以沿着裂纹宽度方向的中心线进行激光模具修复,裂纹中心线可以看作是图像细化后的骨架,细化骨架在原始图像的中间位置,并且保持裂纹的连接线、拓扑结构和细节特征。从形态学的角度看,细化就是从 8 个方向分别对图像进行腐蚀的结果。集合 A 使用结构 B 进行细化,用 $A \otimes B$ 表示:

$$A \otimes B = A - (A * B) = A \cap \complement_U(A * B) \quad (7)$$

式中, $A * B$ 表示在 A 中对 B 进行击中或不匹配:

$$A * B = (A \ominus X) \cap [\complement_U A \ominus (W - X)] \quad (8)$$

式中, A 是由 X, Y 和 Z 3 个子集组成的集合; X 被包围在小窗口 W 中; $\complement_U A$ 为 A 在全集 U 的补集; B 为 X 和 Y 的背景集合。

若结构元素序列为:

$$\{B\} = \{B_1, B_2, \dots, B_n\} \quad (9)$$

则用这个序列细化定义为:

$$A \otimes \{B\} = ((\dots((A \otimes B_1) \otimes B_2) \dots) \otimes B_n) \quad (10)$$

这种处理的过程为:先使用 B_1 对 A 进行细化处理,然后再使用 B_2 对经过 B_1 处理得到的结果进行细化,如此重复进行下去,直到得到的细化结果不再变化为止。细化后的骨架如图 5 所示。通过对比可以看到,裂纹图像细化处理后的“骨骼”即为裂纹的中心线。



Fig. 5 Thinning processing of crack image

2 裂纹图像矢量化及数控代码生成

经过前面的处理获得了裂纹图像的骨架曲线,裂纹骨架由像素点来描述原裂纹曲线走向、宽度、长度等基本信息特征。裂纹骨架曲线图像为位图格式,并不能被数控软件识别。为了便于数控软件的矢量编辑运用,需要对其进行矢量化,从而得到能够让数控系统识别的裂纹数据信息,从裂纹数据信息中得的数控编程需要的裂纹坐标尺寸信息,依靠裂纹关键点的信息完成数控编程。

2.1 轮廓跟踪

通过图像处理得到的裂纹轮廓是无序像素的组合,轮廓跟踪可用 Freeman 码实现^[11],链码的定义如图 6 所示, P 代表中心像素, P 的 8 个相邻的像素被分别定义为 0 到 8 的数值,即链码值加 1,链码所指方向就按逆时针旋转 45° 。当裂纹图像信息用 Freeman 码

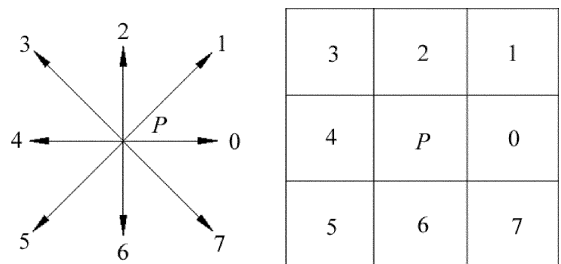


Fig. 6 Freeman chain code and implication

表示后,裂纹轮廓的跟踪变为对裂纹图像像素序列信息的解读。裂纹轮廓坐标值可以通过表 1 得到。

Table 1 Freeman chain code value translation table

Freeman chain code value	0	1	2	3	4	5	6	7
x axis direction	1	1	0	-1	-1	-1	0	1
y axis direction	0	1	1	1	0	-1	-1	-1

2.2 曲线拟合

经过上述 Freeman 码轮廓跟踪得到了离散的裂纹数字化模型。裂纹的线框模型通过依次连接相邻像素得到。若直接使用裂纹的线框模型进行图像编程,生成的数控代码步长过小、加工速度不仅下降明显而且波动剧烈,这种代码段间的不连续性正是由于线框模型的像素点间距过小造成的。利用这样的代码进行加工,会导致激光对模具表面的重复作用,不仅会对裂纹修复造成影响,也会导致加工速度、加速度的不连续性,从而影响模具修复的效率和质量^[12]。所以,在生成数控代码前,必须将线框模型的离散点拟合成曲线。目前曲线拟合的方法中,B 样条曲线由于其强凸包性、可微性、局部修改性和递推性等优点在表示与设计自由型曲线曲面上显示出强大的应用。在实际工程应用中,多数情况下由于三次样条曲线具有 2 阶导矢连续性,即 2 阶光滑性,已能满足工程实际的需求^[13]。

为了保证数控代码的精度及加工效率,必须对如图 5 所示的裂纹图像的曲线部分生成的连续微小直线段进行拟合预处理,找到在连续直线中可以不拟合的直线段,进行分段拟合。本文中采用圆弧近似法估算相邻两段拟合的弓高误差^[14],用以拟合时进行选用,其原理如图 7 所示, θ 为相邻两段的夹角, Q_{i-1}, Q_i, Q_{i+1} 为原始数据点, L_1 和 L_2 为相邻线段的长度。弓高误差 δ_1 和 δ_2 的计算方法如下:

$$\delta_1 = r(1 - \cos\phi_1) \quad (11)$$

$$\delta_2 = r(1 - \cos\phi_2) = r[1 - \cos(\pi - \theta - \phi_1)] \quad (12)$$

式中, $r = \frac{L_2}{2\sin\phi_1}$, $\phi_1 = \tan^{-1}\left[\frac{L_1 \sin(\pi - \theta)}{L_2 + L_1 \cos(\pi - \theta)}\right]$, $\phi_2 = \tan^{-1}\left[\frac{L_2 \sin(\pi - \theta)}{L_2 + L_1 \cos(\pi - \theta)}\right]$ 。

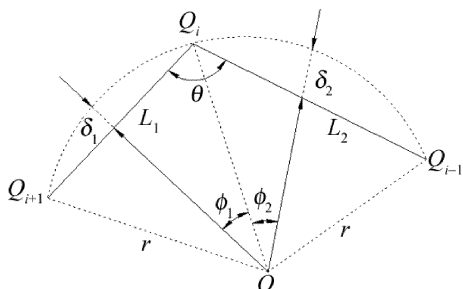


Fig. 7 Schematic diagram of arc approximation of consecutive lines

B 样条曲线拟合的具体流程为:首先获取解析的数据点,之后采用圆弧近似法估算弓高误差并设置其极限阈值 δ_{th} ,计算可拟合的最大直线段数并设定其阈值 M_{max} 以避免超出,对可拟合的微直线段输出 B 样条曲线,对于不可拟合的直线段采用传统直线插补输出^[15]。

2.3 数控代码生成

经过上述处理后,裂纹的特征信息已由矢量线段组成,需要先在 CAD 系统中经过编辑处理后生成数控代码再导入到数控系统中进行修复加工。在此之前,需要将矢量化的裂纹图形信息输入到 CAD 系统中,DXF 格式是存储已经提取的模具裂纹矢量线段最好的 CAD 图像格式。DXF 文件能够对图形进行完整描述,它不仅是 AutoCAD 标准图形交互文件,还广泛地应用在所有的主流 CAD 系统中,是该领域事实上的标准。将有轮廓信息的 DXF 文件读入后,依据裂纹修补的工艺要求,利用 UG 软件的 CAM 模块将刀具路径自动转换成 G 代码,送入计算机的数控系统便可实现自动加工。UG 软件不仅有强大的实体建模和造型功能,其 CAM 模块能够仿真加工环境、生成运动轨迹、进行加工仿真验证,为各类机床数控编程提供完整的解决方案。利用 UG CAM 模块,可以改善其 NC 编程和加工过程,减少浪费,提高生产效率。

利用 UG 软件提供的 UG/post 后置处理工具,可将刀位源文件数据通过后置处理器转换成适应机床控制系统的 NC 程序,利用加工输出管理器(manufacturing output manager, MOM)应用程序启动后处理输出数控代码^[16]。在程序开始加入激光加工的控制程序,通过之前对模具实验调试出的不同材料对应的激光参量进行参量设置。

具体实施方案为:首先在 UG 中设置如图 8 所示的后处理,在 DXF 矢量图下建立实体模型,初始化加工环境,设置零件的加工坐标系,创建毛坯,根据激光加工特点设置刀具参量,选择精铣加工,设置铣刀削模式、切削深度、切削进给率及速度等参量,设置完成后

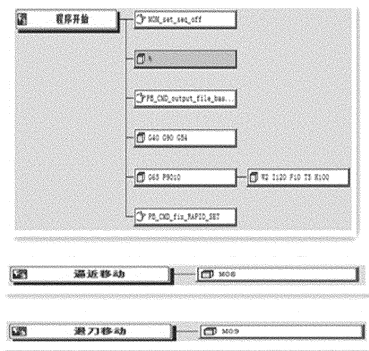


Fig. 8 Settings of UG NX post-processing

UG 即可生成加工轨迹,利用 UG 软件设置过的后处理程序,将仿真生成的加工轨迹转换成自主研发的激光仿生强化机床的 BeiJing-FANUC Oi-MD 五轴控制系统所能识别的加工指令,最后输出激光加工的数控程序如图 9 所示。

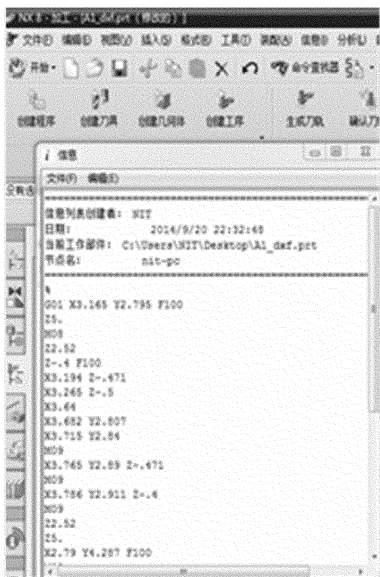


Fig. 9 NC code of laser processing

3 实验验证与结果分析

激光仿生强化机床如图 10 所示,其数控系统通过指令信息 G 代码和 M 代码实现与激光器的通信,代码的加工程序为 G65 P9010 W_I_F_T_K_,通过调用宏程序,将激光加工参量的波形号、电流、频率、脉宽、百分比等参量分别赋值给变量 W, I, F, T, K。本文中的参量设置为:G65 P9010 W2I120F10T5K100。通过控制坐标轴的移动来实现对离焦量和扫描速率的控制。激光加工不同于刀具的切削加工,当需要更换切削区域的过程时要保证关闭激光,同时当进入下一段加工时需要将激光打开。通过辅助气体的开关指令与激光器的开关指令相连,通过 M08 和 M09 指令控制着激光和辅助气体的同时开与闭。由于激光加工有一定的离焦

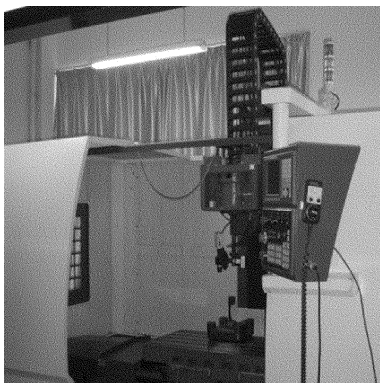


Fig. 10 Laser biomimetic strengthening machine

量,不会产生干涉故可以减少一些不必要的抬刀,提高加工效率。为实现不同区域激光强化,对激光及辅助气体开与关进行准确控制,在后处理的逼近移动加入 M08 与退刀移动处加入了 M09 指令。将实验生成的数控代码导入到数控系统中,得到的加工结果与裂纹中心线对比情况如图 11 所示。

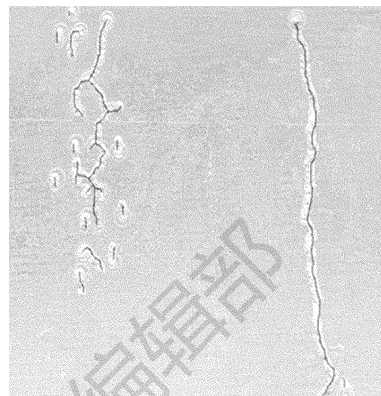


Fig. 11 Comparison of laser processing results

激光加工精度一般考虑机床本身的精度和加工精度。本系统所用机床数控系统精度为每轴 0.05mm,重复定位精度为 ±0.02mm,满足 GB17421.2-2000 和 ISO230.2-2006 及工程实用。为了评估激光修复加工精度,采用提取裂纹的中心线图像坐标与激光加工后图像的对应点图像坐标之差的模平均值作为加工精度的评估函数,单位为像素,公式如下:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x'_{ij} - x''_{ij})^2 + (y'_{ij} - y''_{ij})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

选择左侧裂纹中心线上 48 个特征点,右侧裂纹中心线上 16 个点作为测试点。其中, (x', y') 为裂纹细化中心线的图像坐标; (x'', y'') 为激光加工后图像对应点的坐标; n 为测试点数。进行误差分析后得到加工图像坐标误差为 2.171875pixel。本文中的图像经测定平均每 1mm 有 59pixel,即本方法的误差为 0.0368mm,满足激光模具修复加工 ±0.05mm 的精度要求。

4 结 论

(1) 通过线性灰度变化、伽马变化、中值滤波去噪等方法和形态学细化处理可以得到很好的裂纹中心线图像。

(2) 通过轮 Freeman 码廓跟踪和 B 样条曲线拟合可以将裂纹图像矢量化,利用 UG CAM 软件可以将裂纹中心线轨迹生成数控代码,将生成的数控代码导入到数控机床中加工后,可以实现模具裂纹的激光修复。

(3) 利用本文中方法进行加工,精度达到激光模具修复 ±0.05mm 的精度要求。

参 考 文 献

- [1] FU Y M, BAI X Z, ZHENG L J, *et al.* Advance of research on crack arrest in metal die[J]. Journal of Yanshan University, 2007, 31(2): 95-102 (in Chinese).
- [2] LIU L F, YANG X C, WANG F, *et al.* Flexible laser remanufacturing system based on robot[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(12): 70-75 (in Chinese).
- [3] LI J H, YAO F P, ZHANG D Q, *et al.* Research on digital repairing of mould based on laser cladding[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(12): 158-159 (in Chinese).
- [4] HE L H, ZHOU F, YANG H Y. Research of in situ synthesis of TiC-TiB₂ reinforced Co-based composite coating by laser cladding[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 306-309 (in Chinese).
- [5] XIANG H W, JONATHAN K. Human-inspired robot task learning from human teaching[G]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York, USA: IEEE, 2008: 3334-3339.
- [6] HARUHISA K, SYUNSUKE N, TETSUYA M, *et al.* Virtual robot teaching for humanoid hand robot using multi-fingered haptic interface [C]//Communications, Computing and Control Applications (CCCA). New York, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [7] JIANG Z W, GONG S H, WANG Q X. Study on the tracking control technology of dual-beam laser welding[J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 1-5 (in Chinese).
- [8] SU P, NIU Y X, LI D Q, *et al.* Image acquisition and processing of a laser warning system based on planar array CCD[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 394-399 (in Chinese).
- [9] RAFAEL C G. Digital image processing[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 59-61 (in Chinese).
- [10] LI Y M. Research on key techniques of image enhancement and its application [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 14-15 (in Chinese).
- [11] GONG Sh H, ZHU G L, CHEN Sh J, *et al.* On key problems in the binary image profiled processing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(2): 48-50 (in Chinese).
- [12] WANG Y H, WU W Y, ZHAO R J. Segmentation and recognition techniques for planner contour[J]. Journal of Computer aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(12): 1142-1145 (in Chinese).
- [13] DUAN L M, LUO Sh. Method of generating numerical control codes directly based on industrial computed tomography image[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(7): 1392-1398 (in Chinese).
- [14] YAU H T, WANG J B. Fast Bezier interpolator with real-time look ahead function for high-accuracy machining[J]. International Journal Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(10): 1518-1529.
- [15] PI Y G, FAN D H. B-spline curve fitting of consecutive micro-segment trajectory in NC machining[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(1): 53-57 (in Chinese).
- [16] LIU Q. The study of five axis NC machining post processing technology and high speed cutting simulation technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014: 25-47 (in Chinese).