

基于金相图片与 OpenCV 技术的二次枝晶间距测量系统

李胜民¹ 谢 垚¹ 李军义² 殷亚军¹ 沈 旭¹ 计效园¹ 王东新² 周建新¹

(1.华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室;2.西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司)

摘 要 为了解决传统测量方法中过分依赖经验、操作时间较长、缺乏专业软件的问题,提出了一种利用 OpenCV 自动分析金相图测量二次枝晶间距的方法,并开发了相应自动计算系统。通过 50 组金相组织的测量试验验证了系统的高效性和准确性。结果表明,测量系统与传统方法的测量误差不超过 15%,耗时相比于传统方法缩短了 75% 以上。

关键词 OpenCV; 二值化; 机器视觉; 二次枝晶间距

中图分类号 TG245; TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



System for Secondary Dendrite Spacing Measurement Based on Metallographic Images and OpenCV Technique

Li Shengmin¹, Xie Yao¹, Li Junyi², Yin Yajun¹, Shen Xu¹, Ji Xiaoyuan¹, Wang Dongxin², Zhou Jianxin¹

(1.State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology; 2. Northwest Rare Metal Materials Research Institute Ningxia Co., Ltd.)

Abstract: In order to solve the problems of over reliance on experience, long operation time and lack of professional software in traditional measurement methods, a method of automatically analyzing metallographic images and measuring secondary dendrite spacing was proposed using the OpenCV, and a corresponding automatic calculation system was developed. The efficiency and accuracy of the system were verified by 50 sets of metallographic measuring experiments. The results indicate that the measurement error between the measurement system and traditional method is less than 15%, and the time consumption is reduced by more than 75%, compared with traditional methods.

Key Words: OpenCV, Binarization, Machine Vision, Secondary Dendrite Spacing

二次枝晶间距的大小直接影响着铸件的力学性能^[1-5],并影响合金成分的微观偏析、第二相和显微缩松的分布^[6-7]。杨化冰等^[8]细化 A356 合金的枝晶间距,使得其拉伸性能大幅提升;SASCHA G 等^[9]发现二次枝晶间距对汽车铸铝合金的疲劳性能有一定影响;MOSTAFAEI M 等^[10]利用二次枝晶间距来预测铸件的拉伸性能;凌云等^[11]在研究重力铸造缩孔预测时也将二次枝晶间距作为一个重要的参数引入计算模型。因此准确地测定二次枝晶间距对于研究合金的性能及凝固过程中的缺陷分布十分重要。传统的二次枝晶测定方法受操作员的经验影响较大且耗时较长。利用机器视觉代替人工可以提高工作效率还能减少对操作员经验的依赖,被广泛地应用在缺陷识别和距离测量上^[12-16]。赵红颖等^[17]利用机器视觉实现了发动机缺陷

的检测;WANG D 等^[18]利用机器视觉对 U 肋与顶板焊缝疲劳裂纹进行监测;LIN Z 等^[19]利用机器视觉进行选择激光熔化缺陷检测;武博等^[20]将机器视觉应用到了铸件缺陷的识别上;郑如新等^[21]利用机器视觉对工件的尺寸进行了测量。利用机器视觉能够很好地识别金相中枝晶的轮廓、位置信息从而获得其间距,但目前有关将机器视觉运用到枝晶间距测量上的报道很少。OpenCV 作为一个较为成熟的图像识别的库,提供了许多可用于识别金相的函数。因此,本研究提出了一种基于 OpenCV 的二次枝晶间距识别方法,并开发了相应自动计算系统,旨在为其应用提供参考。

1 系统设计

获得二次枝晶间距需要获取金相中枝晶间的像素

收稿日期:2023-01-05;修改稿收到日期:2023-03-13
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB1710100)
第一作者简介:李胜民,男,1998 年出生,硕士研究生,武汉(430074),E-mail:lishengmin1@qq.com
通信作者:殷亚军,男,1985 年出生,副教授,武汉(430074),E-mail:yinyajun@hust.edu.cn
引用格式:李胜民,谢垚,李军义,等. 基于金相图片与 OpenCV 技术的二次枝晶间距测量系统[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 628-1 632.
LI S M, XIE Y, LI J Y, et al. System for secondary dendrite spacing measurement based on metallographic images and OpenCV technique [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 628-1 632.

距离、标尺的像素长度及其含义。首先需要导入图片，因此必须添加选择图片控件，而后识别图片中的标尺像素长度及其含义。为应对有些金相图片较为模糊标尺识别不到的情况，必须添加手动选择标尺位置键入标尺长度含义的控件。然后需要选择枝晶在金相图中的大致位置，减小识别时间，提高识别的准确性，因此必须设计框选放大控件。最后需要识别框选图像中的枝晶间距，添加一键识别枝晶间距按钮，同时为应对图像模糊、枝晶轮廓断裂不连续、枝晶轮廓模糊等现象影响识别，添加手动选择枝晶间距控件以校准识别结果。识别算法流程图见图 1。

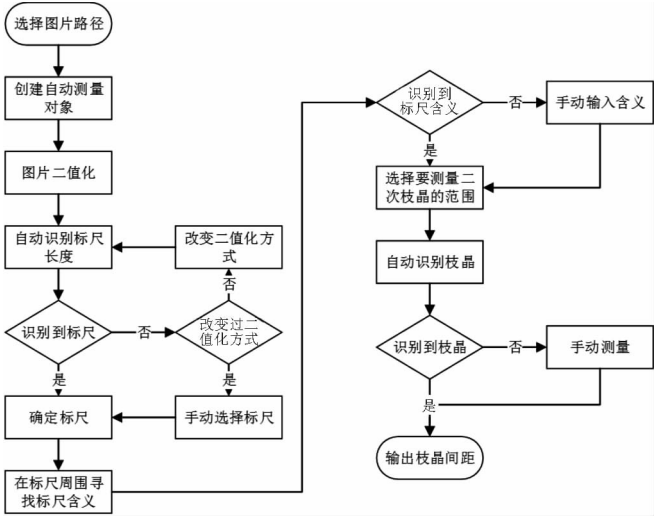


图 1 二次枝晶间距测量方法流程图

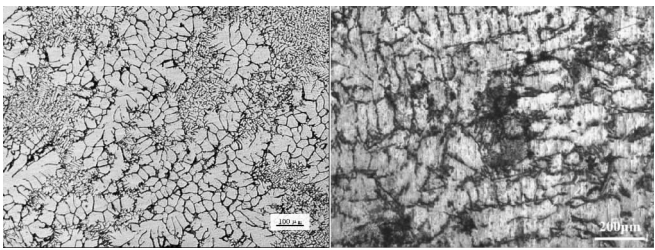
Fig.1 Flow chart of secondary dendrite spacing measurement

2 金相图标尺识别

传统的标尺使用方法主要通过测量金相图上枝晶间距或其他距离量的长度除以标尺的长度再乘上标尺代表的实际长度含义得到最终距离。这种方法受到人为操作的影响较大，标尺长度的测定需要依靠肉眼，极易产生误差。利用计算机视觉来自动测定金相图中标尺的长度对于准确地确定长度标准、提高最终测试精度意义重大。

2.1 金相图像二值化

图像二值化是将图像上的像素点的灰度值设置为 0 或 255，即将整个图像呈现出明显的黑白效果的过程^[22]。图像二值化是图像处理中一个非常活跃的分支，其应用领域非常广泛，特别是在图像信息压缩、边缘提取和形状分析等方面起着重要作用^[23]。对于金相图上的标尺而言，采用半透明白色矩形为底，黑色标识的方式以提高辨识度。但对于某些整体颜色较深的金相图有时也会有用白色标识的情况，见图 2b^[24]。

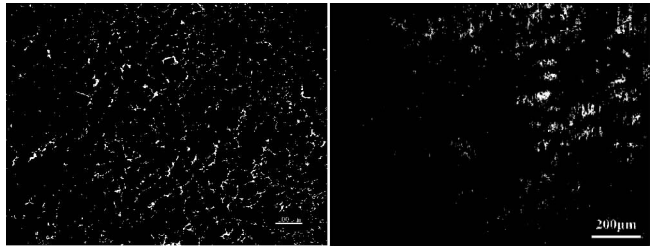


(a) 白底黑色标识 (b) 深色底白色标识

图 2 合金的二次枝晶金相图

Fig.2 Metallographic structure of secondary dendrite

对于标尺为“白底黑字”的金相只需利用 OpenCV 提供的二值化函数 double threshold(InputArray src, Output Array dst, double threshold, double maxval, int type);将第 3 个参数即二值化的阈值设定为 25，将最后的参数设定为 THRESH_BINARY_INV，即将像素灰度值小于 25 的设为 255，大于等于 25 全设为 0。对于白色标尺的金相就需要将第 3 个参数设为 240，最后一个参数设为 THRESH_BINARY，即将像素灰度值大于等于 240 全设为 255，小于 240 全设为 0。二值化后的图像见图 3。可以看出，2 种方式都可以清楚地分辨出标尺，便于后期处理。



(a) 白底黑色标识 (b) 深色底白色标识

图 3 合金的二次枝晶二值化金相图

Fig.3 Binarization metallographic structure of secondary dendrite

需要确定标尺为白色或黑色，再确定参数设定的模式。本研究通过“试错法”来确认标尺颜色，直接用第 1 种参数设定模式二值化，然后对二值化后的图像进行后续的标尺识别处理，若识别不到（见图 4），则说明参数设定方法错误，再改用第 2 种参数设定进行二值化操作，这样算法较为简单，且整个时间复杂度较低。



图 4 深色底白色标识金相图二值化处理后的图像

Fig.4 Image with white on dark background after binary processing

2.2 轮廓提取和筛选

不同的标尺绘制方式可能筛选到的轮廓主要有 3 种：“L”字型，“H”字型，“一”字型，见图 5。为了统一筛选标准，对所有轮廓进行预处理，将宽度方向上左右各十分之一截去，所有种类的标尺轮廓统一都会变成“一”字型，此时只需要再根据二值化图像中所有轮廓的长宽比、轮廓点纵向变化次数等信息筛选出“一”字型轮廓，再根据位置信息就能最终确认标尺位置。根据其轮廓包围矩形的宽度可以获得其像素距离，定位到标尺之后，利用与标尺轮廓的相对位置和轮廓尺寸，可以筛选出标尺上方的长度信息（即数字和单位的）的轮廓。

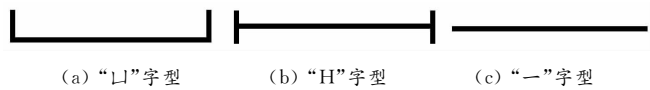


图 5 3 种标尺轮廓
Fig.5 Scale outlines

2.3 模板匹配算法

根据已知目标模板图在另一幅图像中寻找目标位置并定位的过程叫做模板匹配^[25]，类似于卷积原理。图像像素的对比顺序为左右上下。模板在原图像上从原点开始滑动，计算模板与图像被模板覆盖区域的差异，找到图像中的与模板图像中最相似的像素点，再根据模板的宽度和高度，标记出对应的区域范围。本研究已经把标尺信息的轮廓筛选出来了，因此不需要模板在图像上移动，计算筛选出的轮廓的包围矩形，利用包围矩形截取到标尺信息并逐一与不同模板进行对比，匹配度最高的模板即该轮廓代表的含义。图 6 为利用包围矩形截取的标尺信息，图 7 为事先准备的模板图像。



图 6 截取到的标尺信息
Fig.6 Captured scale information

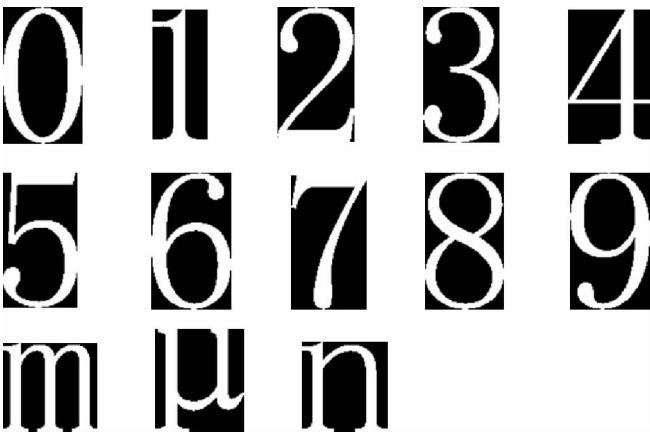


图 7 模板图像
Fig.7 Template images

利用模板分别与筛选出的轮廓进行匹配，识别出标尺含义为 200 μm 。

3 枝晶间距测量

3.1 框选扩大缩小识别范围

利用框选局部区域放大功能，首先初步筛选出要测量的枝晶所在的区域以缩小识别范围，提高识别准确率，图 8 为框选区域。

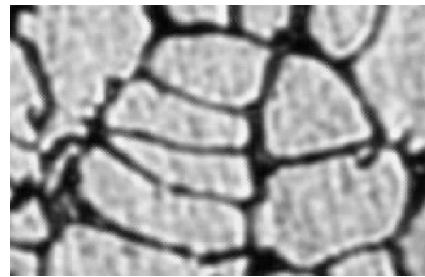


图 8 框选区域放大
Fig.8 Enlarged view of selection area

3.2 二值化及轮廓筛选

将框选后的图像进行二值化处理，采用 TRIANGLE 自适应阈值，该算法从灰度输入源的直方图寻找其最大峰值，以该峰值向 X 轴作 45°线，该线到直方图上的最短距离即为自适应阈值，见图 9。



图 9 二值化后图像
Fig.9 Image after binarization

二值化后对面积相似的相邻轮廓进行形状相似性比对，当相似度超过阈值时视为相邻两个枝晶轮廓，利用 OpenCV 中的 `double cv::matchShapes(InputArray fcontour, InputArray contour2, int method, double parameter)` 函数进行轮廓相似度比对，该函数通过计算两轮廓的 Hu 不变距来计算相似度。

3.3 自动识别枝晶间距

在筛选出相邻的枝晶轮廓后，分别获得两轮廓的最小包围矩形的中心点，并计算两个中心点的间距，获得该间距的像素距离，将获得的像素距离除以标尺的像素距离乘上标尺含义最终得到枝晶间距。

4 系统界面设计

为了使得系统操作过程更加可视化,增强系统的可操作性,设计了一套可视化界面,见图 10。通过选择图片按钮可以选择要识别的金相图并在界面左边部分的窗口中显示,之后系统会利用搭载的算法自动识别金相图中的标尺并将标尺含义和标尺像素长度显示在相应的控件上。而后利用框选放大功能筛选出枝晶密集且清晰的区域,点击自动识别图像测量,系统会利用算法计算出枝晶间距。对于枝晶边界较为模糊或枝晶边界断裂的情况,也可以通过“测量”按钮手动补足。



图 10 二次枝晶间距测量系统界面

Fig.10 Display of secondary dendrite spacing measurement system

5 试验验证

为验证测量系统的准确性和高效性,选取了 50 组金相照片,分别用测量系统以及传统方法测量二次枝晶间距,统计测量耗时和测量的长度,结果见表 1,传统的枝晶测量方法每张金相图测量一次金相耗时约2 min。结果表明,测量系统与传统方法的测量误差不超过 15%,系统测量与传统方式测量的距离误差图见图 11。除刚运行程序时的第一张图像外,自动识别图像的时间相对于传统方法平均缩短了 75% 以上。

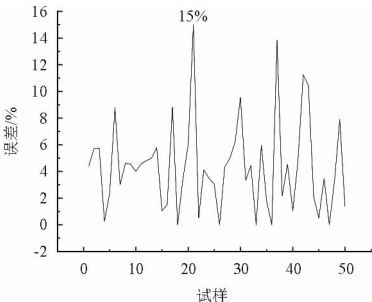


图 11 系统测量与传统方式测量的距离误差图

Fig.11 Distance error diagram between system measurement and traditional measurement

表 1 部分测量结果

Tab.1 Partial measuring results

编号	系统测量结果/ μm	传统测量结果/ μm	系统测量耗时/s
1	23.9	25	30
2	26.4	28	15
3	37.7	40	15
4	39.9	40	15
5	37.1	38	15
6	30.1	33	15
7	29.1	30	15
8	24.8	26	15
9	21.0	22	15
10	33.6	35	20
11	33.4	35	15
12	23.8	25	20
13	34.2	36	20
14	17.9	19	15
15	18.8	19	20
16	20.3	20	15
17	15.5	17	20
18	21.0	21	20
19	30.9	32	20
20	21.2	20	15
21	15.3	18	20
22	20.1	20	20
23	17.7	17	20
24	22.2	23	20
25	23.7	23	15
26	16.0	16	15
27	31.3	30	20
28	16.8	16	20
29	27.2	29	15
30	19.9	22	15
31	20.3	21	20
32	18.8	18	15
33	22.0	22	20
34	21.2	20	15
35	16.7	17	20
36	31.0	31	20
37	38.7	34	15
38	23.5	23	15
39	21.0	22	15
40	18.8	19	20
41	23.8	25	20
42	21.3	24	20
43	20.6	23	20
44	19.4	19	15
45	19.9	20	15
46	23.8	23	15
47	22.0	22	20
48	24.8	24	15
49	17.5	19	20
50	22.3	22	15

50 组金相识别试验中,有 23 组由于图像模糊、枝晶边界模糊或枝晶边界不连续等原因无法自动识别,靠人工选点后自动计算得到枝晶间距,整个系统还不够稳定,下一步将提高系统对于模糊图像或枝晶边界模糊、

枝晶边界不连续的金相的识别率,提高系统稳定性。

6 结 论

(1)利用“试错法”确定二值化方法识别标尺位置、标尺像素长度、标尺信息,可以得到准确的标尺信息。

(2)利用框选局部放大、二值化、轮廓提取筛选,定位到枝晶,并通过枝晶轮廓最小包络矩形中心点像素距离与标尺像素长度的比值,最终得到枝晶间距值。

(3)设计的方法系统人工干预少,能够准确地识别枝晶间距,耗时较短,对操作人员的依赖性较小。

参 考 文 献

- [1] XU J, WANG T, ZHU J, et al. In situ study on secondary dendrite arm coarsening of Sn-Bi alloy by synchrotron microradiography[J]. Materials Research Innovations, 2011, 15: 156-159.
- [2] 赖朝彬, 辛博, 陈伟庆, 等. 连铸板坯二次枝晶臂间距对中心碳偏析的影响[J]. 炼钢, 2009, 25(4): 42-45.
- [3] 李荣德, 孙玉霞, 白彦华, 等. 凝固参数对 ZA27 合金二次枝晶间距及抗拉强度的影响[J]. 材料科学与工艺, 2001(2): 199-202.
- [4] 项大伟, 张炳荣, 田身军, 等. 金属型重力铸造铝合金缸盖关键部位二次枝晶间距研究[J]. 铸造设备与工艺, 2010(4): 35-38.
- [5] 沈月, 何国球, 田丹丹, 等. 二次枝晶臂间距对 A319 铝合金拉伸及疲劳性能的影响[J]. 材料研究学报, 2014, 28(8): 587-593.
- [6] 郭东伟, 郭坤辉, 张福利, 等. 基于二次枝晶间距变化特征的连铸方坯 CET 位置判断新方法[J]. 金属学报, 2022, 58(6): 827-836.
- [7] 李晨希, 郭太明, 李荣德, 等. 二次枝晶臂间距的研究[J]. 铸造, 2004(12): 1 011-1 014.
- [8] 杨化冰, 王海超, 刘桂亮, 等. N 掺杂型 Al-4Ti-1C 对 A356 合金细化及力学性能的影响[J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 39-43.
- [9] SASCHA G, ULRICH K, WILHELM M. Influence of secondary dendrite arm spacing (S_{DAS}) on the fatigue properties of different conventional automotive aluminum cast alloys [J]. Frattura ed Integrità Strutturale, 2019, 13(48): 105-115.
- [10] MOSTAFAEI M, GHOBADI M, BEYGI R, et al. New numerical/experimental model for prediction of tensile properties in aluminum A357 castings: The effect of microstructure and microshrinkages[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2018, 31(6): 332-345.
- [11] 凌云, 周建新, 南海, 等. 基于瞬态压强分布的重力铸造缩孔定量预测技术及应用[J]. 铸造, 2017, 66(8): 840-846.
- [12] 汤勃, 孔建益, 伍世虔. 机器视觉表面缺陷检测综述[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(12): 1 640-1 663.
- [13] 李少波, 杨静, 王铮, 等. 缺陷检测技术的发展与应用研究综述[J]. 自动化学报, 2020, 46(11): 2 319-2 336.
- [14] 孙雪晨, 姜肖楠, 傅瑶, 等. 基于机器视觉的凸轮轴表面缺陷检测系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1 647-1 653.
- [15] 张涛, 刘玉婷, 杨亚宁, 等. 基于机器视觉的表面缺陷检测研究综述[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(35): 14 366-14 376.
- [16] 胡明红. 基于机器视觉的锂电池极片缺陷检测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [17] 赵红颖, 于微波. 计算机视觉技术在发动机缺陷检测系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2000(3): 283-286.

- [18] WANG D, DONG Y, PAN Y, et al. Machine vision-based monitoring methodology for the fatigue cracks in U-Rib-to-deck weld seams[J]. IEEE Access, 2020, 8: 94 204-94 219.
- [19] LIN Z, LAI Y, PAN T, et al. A new method for automatic detection of defects in selective laser melting based on machine vision[J]. Materials, 2021, 14(15): 4 175-4 182.
- [20] 武博, 计效园, 孙晓龙, 等. 基于 X 射线图像的铸件缺陷智能检测与识别方法研究进展[J]. 铸造, 2022, 71(6): 709-718.
- [21] 郑如新, 孙青云, 肖国栋. 基于机器视觉的工件尺寸测量研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 110-115.
- [22] GARCÍA J, MORAGA P, CRAWFORD B, et al. Binarization technique comparisons of swarm intelligence algorithm: An application to the multi-demand multidimensional knapsack problem [J]. Mathematics, 2022, 10(17): 3 183.
- [23] 江明, 刘辉, 黄欢. 图像二值化技术的研究[J]. 软件导刊, 2009, 8(4): 175-177.
- [24] 车家宝. 铝合金铸件相成分与二次枝晶臂间距预测的数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [25] 范壮. 机械零件尺寸视觉检测系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

(编辑: 栗万仲)

宝钛集团、西安交大联合研制的 4N 级高纯镁半连续化示范 装置交付

近日,宝钛集团装备科技公司联合西安交通大学研制的 4N 级高纯镁半连续化示范装置,在中国西部科技创新港交付。宝钛装备科技公司总经理武建文参加示范装置验收交付会。

在验收交付会上,宝钛装备科技公司与西安交大研发团队逐一核准装置的设计、验收指标。前期测试表明,该示范装置满足并部分超越设计指标,标志着该示范装置将步入工艺调试和试产的新阶段。同时,双方还围绕该装置的基本设计原理、装置设计制造重难点等问题进行了复盘总结,为后续双方持续发挥产学研联合攻关作用,迭代升级高纯示范装置积累了宝贵经验。

据悉,镁具有优异的生物相容性和极强的还原性,在新兴可降解生物医用植入材料、高纯战略金属(钛、锆、钎)还原剂等领域颇具应用潜力。然而,镁和镁合金的耐腐蚀性等性能对杂质及其组合极度敏感,且其中的杂质元素会遗传到下游产品中,从而导致某些特种用途的下游产品后处理成本急剧上升。

近年来,宝钛装备科技公司联合西安交通大学单智伟教授研究团队,经过多年科研攻关,基于气态原子选择性分离来除杂的新思路,吸收消化“含杂气化,梯度冷凝,吸附过滤,净密结晶”系列技术,研发制造了“10 t/a Mg99995 级高纯镁半连续化生产示范装置”,以期实现 99.995% 高纯镁的低成本规模化稳定制备。

(摘自中国有色网)