

## 引文格式:

王卫军, 徐川, 黄晨, 等. 高精度锻造磨球的不良圆度和飞边视觉检测研究 [J]. 集成技术, 2023, 13(4): 108-116.

Wang WJ, Xu C, Huang C, et al. High-precision visual inspection of defective roundness and burrs in forged grinding balls [J]. Journal of Integration Technology, 2023, 13(4): 108-116.

## 高精度锻造磨球的不良圆度和飞边视觉检测研究

王卫军<sup>1#</sup> 徐川<sup>2#</sup> 黄晨<sup>3\*</sup> 王建<sup>1</sup> 叶于平<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(广州先进技术研究所 广州 511458)

<sup>2</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 粤港澳人机智能协同系统联合实验室 深圳 518055)

<sup>3</sup>(安徽铜冠智能科技有限责任公司 铜陵 244151)

**摘要** 锻造生产的耐磨钢球经常出现圆度不良和飞边缺陷,严重影响其碾磨性能。为解决这一问题,作者提出一种针对高温耐磨球的在线视觉检测方法。通过计算图像中磨球圆心到轮廓的最大距离与最小距离之差,可量化圆度,完成对不良圆度磨球的筛选。针对飞边检测,作者利用深度学习策略,按一定规则有效识别飞边,以区分背景区域的复杂纹理,使模型有效地训练。此外,采用数字滤波成像方式拍摄处于高温状态的磨球可有效去除热辐射噪声,获得清晰的磨球图像。作者利用 YOLOv5 实例分割模型实现了 95.3% 的飞边检出率,达到了在线检测技术指标要求。

**关键词** 磨球质检; 圆度; 飞边; 实例分割

中图分类号 TP399 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20230727001

## High-Precision Visual Inspection of Defective Roundness and Burrs in Forged Grinding Balls

WANG Weijun<sup>1#</sup> XU Chuan<sup>2#</sup> HUANG Chen<sup>3\*</sup> WANG Jian<sup>1</sup> YE Yuping<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Guangzhou Institute of Advanced Technology, Guangzhou 511458, China)

<sup>2</sup>(Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory of Human-Machine Intelligence-Synergy Systems, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

<sup>3</sup>(Anhui Tongguan Intelligent Technology Co., Ltd., Tongling 244151, China)

\*Corresponding Author: jussan\_c@qq.com

#Equal Contribution

**Abstract** Wear-resistant steel balls produced by forging often exhibit poor roundness and flash defects, which severely impact their grinding performance. To address this issue, this paper proposes an online visual

收稿日期: 2023-07-27 修回日期: 2023-10-17

基金项目: 深圳市科技计划项目 (JCYJ20230807140705012)

作者简介: 王卫军 (共同第一作者), 正高级工程师, 研究方向为机器结构设计; 徐川 (共同第一作者), 硕士, 研究方向为人工智能; 黄晨 (通讯作者), 高级工程师, 研究方向为金属冶炼, E-mail: jussan\_c@qq.com; 王建, 硕士, 研究方向为自动控制; 叶于平, 博士, 研究方向为 3D 视觉。

inspection method for high-temperature wear-resistant balls. By calculating the difference between the maximum and minimum distances from the center of the grinding ball to the contour in the image, roundness is quantitatively represented, allowing for the selection of grinding balls with poor roundness. For flash detection, this paper utilizes a deep learning strategy to effectively identify flash according to certain rules, distinguishing the complex textures of the background area and enabling effective model training. Moreover, capturing the grinding balls at high temperatures using digital filtering imaging techniques effectively removes thermal radiation noise, resulting in clear images of the grinding balls. This paper achieves a 95.3% detection rate of flash using the YOLOv5 instance segmentation model, meeting the technical requirements for online inspection.

**Keywords** grinding ball quality inspection; roundness; burrs; instance segmentation

**Funding** This work is supported by Shenzhen Science and Technology Program (JCYJ20230807140705012)

## 1 引言

耐磨钢球是一种重要磨料介质,取材于高品质的合金钢,利用热处理、淬火等复杂工艺制成,能够承受高强度的冲击和摩擦,且不易变形和磨损。耐磨钢球是磨矿机、球磨机等各种研磨设备中的常用磨料,在火力发电、化工冶炼和磨矿建材等领域有广泛应用,其年消耗量在国内已超 200 万吨<sup>[1-2]</sup>。这一庞大的市场需求要求行业在磨球生产的各个环节中实施细致的设计和严格的质量控制,以确保磨球产品的高品质。其中,磨球的圆度和飞边是检验磨球质量的两个重要指标,关乎碾磨的均匀性和磨损的稳定性,直接影响碾磨效率和使用寿命<sup>[3-4]</sup>。在实际生产中,耐磨球必须在锻造后的高温状态下立刻进行检测,考虑生产效率,检测必须在磨球过程中完成。目前的检测手段主要是工作人员佩戴防护装置进行目测抽检,效率低下且存在安全隐患。针对高温耐磨球的在线视觉检测问题,目前尚无深入报道<sup>[5]</sup>。对于磨球行业来说,随着制造标准的提升,以及基于人员安全考虑,研究一种高精度的耐磨球在线视觉检测技术是非常必要的。

近年来,随着计算机视觉、工业成像和深度

学习等领域的新技术不断涌现,基于视觉的工业质检方法得到长足发展,不仅能检测各种复杂视觉特征的工业产品,还有着优秀的检测精度和效率<sup>[6]</sup>。此外,基于视觉的质检方法提供的简便安全的操作环境也促使研究人员开始选择基于视觉的方式完成磨球质检。圆度检测主要考虑寻找物体的中心点,然后以物体轮廓到中心点的最大与最小距离之差表征圆度,并设定合适的阈值进行筛选。飞边检测通常根据磨球在图像中表现出的丰富的几何边缘特征,采用 Canny 算子简单地对飞边进行定位<sup>[7]</sup>。但在背景复杂或高信噪比的像素突变区域,已有的一些飞边检测系统多从成像角度着手,例如:刘永浩<sup>[8]</sup>通过结构光中心线提取方法对飞边进行精确定位;周海陶<sup>[9]</sup>通过搭建视觉扫描平台捕获目标丰富的三维点云信息,之后以简单的图像处理算法检测飞边。上述检测方法都对成像检测环境提出更高的要求。本文则侧重于利用卷积神经网络强大的特征提取能力,检测二维图像中的飞边特征。此外,由于磨球表面的形状纹理复杂,因此,本文利用单相机从多角度拍摄,结合数字滤波和物理滤波方案,得到高质量的二维磨球图像,最终利用 YOLOv5 实例分割模型<sup>[10]</sup>对磨球飞边进行质检。

## 2 相关工作

### 2.1 磨球的不良圆度与飞边的产生与影响

耐磨钢球的制作工艺包括铸造、轧制、挤压和锻造等。大直径的磨球生产通常采用铸造或锻造方式，其中，锻造磨球的性能最好<sup>[11-12]</sup>。由于磨球的锻造坯料采用塑性较大的热轧圆钢，因此在冶炼过程中容易控制内部的杂物含量，使形成致密的内部组织，且无白点、缩孔、显微裂纹等缺陷。此外，锻造工艺在锻造速度、使用寿命等方面更有优势，但在锻造磨球过程中，较大的变形量也使圆度较难保证。以磨球的模锻为例，其基本工艺流程为：方钢坯料-锻圆棒-锻球-滚圆，如图 1 所示。造成圆度较差和出现飞边的主要原因是，在锻圆棒与锻球时，截面不规则的异性坯料无法被均匀打磨<sup>[13]</sup>。图 2 为耐磨钢球经锻造后的基本形状。

为锻造规则的圆棒，需将坯料放入模具中磨平截面四角突出的菱边。如果材料本身流动性差，或者在模具旋转时摩擦力较大，则有利于打磨出规则的圆锻棒；如果模具润滑不均匀，或者

坯料截面极不对称，则容易使磨球端面出现明显的倾斜，而非规则的圆形截面会进一步导致磨球在锻球阶段打磨不均。锻球阶段除了要求稳定放置坯料外，还对异性方钢存在要求，主要包括保证坯料的截面积和体积与模具适配，以下介绍 4 种不适配的情况：(1) 当方坯截面积和下料体积都过大时，容易产生飞边，图 3(a) 为锻棒时被折成波浪形的飞边和锻球时的飞边；(2) 当坯料仅截面积过小时，虽然能锻造合格的圆棒，但锻球时容易在截面椭圆的长轴方向形成飞边，而短轴的两侧也填充不足，如图 3(b) 所示；(3) 当方坯截面积和下料体积都过小时，模具无法将方坯的各个棱角进行充分打磨，即便滚圆后，也容易圆度不足，如图 3(c) 所示；(4) 当仅下料体积偏大时，由于锻球模具由上下两个椭球型腔分别打磨，因此，中间未被充分打磨的部分容易形成一条环球飞边，如图 3(d) 所示。综上所述，在打磨时，需要严格控制坯料规格，并配备相应的模具，否则容易产生圆度和飞边问题，尤其在自动化生成中，会产出批量的废品，造成损失。

飞边和圆度对磨球的使用影响主要表现在碾

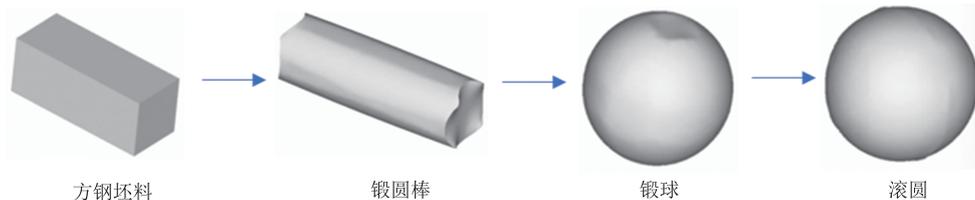


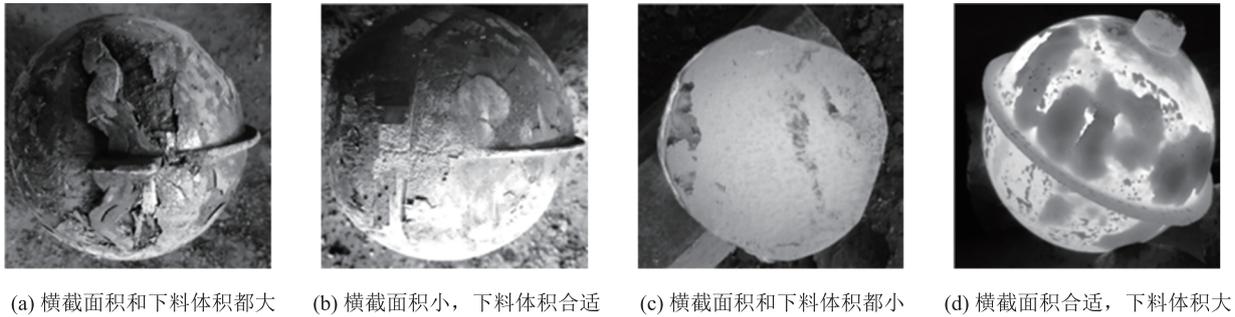
图 1 锻造磨球的工艺流程图<sup>[13]</sup>

Fig. 1 Process flow diagram of forging grinding balls<sup>[13]</sup>



图 2 不同视角下的磨球

Fig. 2 Grinding ball from different perspectives



(a) 横截面积和下料体积都大 (b) 横截面积小, 下料体积合适 (c) 横截面积和下料体积都小 (d) 横截面积合适, 下料体积大

图 3 使用异形方钢锻造磨球可能出现的问题<sup>[13]</sup>

Fig. 3 Possible problems when forging grinding balls with irregular square steel<sup>[13]</sup>

磨效果、磨损寿命和安全性 3 个方面。第一, 磨球在矿物等碾磨物料中进行着高斯碰撞和摩擦, 以实现碾磨物的破碎和细化。高圆度的耐磨球能均匀碾磨物料, 可提高碾磨效率, 且能量损耗较低。第二, 磨球与物料的统一接触使磨球表面各部位均匀磨损, 能减少设备振动和降低噪音, 从而延长设备的使用寿命。第三, 有飞边的磨球在使用过程中易出现碎裂、磨料松散等情况, 甚至产生碎片, 既影响系统的稳定运行, 也可能伤害工作人员。可见, 对磨球的圆度和飞边进行严格质检是有必要的, 而在我国的磨球生产工业中, 合格率仅有 2%, 这带来了繁重的质检工作, 迫切需要采用智能质检系统替代低效且不可靠的人工质检方式<sup>[5]</sup>。

## 2.2 飞边缺陷检测

飞边指物体边缘在特定测量条件下的突出部分, 本文面向直径为 120 mm 磨球的检测任务, 将大于 1 mm 的突出视为飞边。然而, 图像中的飞边与通常的工业缺陷类似, 它出现在图像的小部分区域, 语义概念模糊, 且显著程度更低, 有着比较主观的定义。图像中磨球的飞边主要表现为如图 2 所示的过球心的环带, 在热力成像中与周边区域有明显的色彩差异和坡度。在磨球的锻造过程中, 强烈的塑性变形使金属颗粒发生形变和重组, 导致磨球表面形成复杂的纹理和细小晶粒结构。然而, 随后的热处理过程可能会对这些

纹理和晶粒结构产生不利影响, 导致其进一步退化。当采集图像从多个角度拍摄时, 环带飞边的长度、位置和视角等特征也复杂起来。相机采集角度的不一致导致语义模糊的缺陷在复杂背景纹理中更难以辨别, 迫使人们寻求其他方法来改善缺陷的微弱性, 并设计具有更强的检测和应用能力的算法。

基于有监督设置的深度学习方法有着强大的特征提取能力, 能一次性地对整张图像进行卷积运算, 隐式建模了图像的全局结构特征<sup>[14]</sup>。它在许多视觉任务上表现出优越的性能, 更适合飞边的特征检测。根据检测结果的粒度大小, 可把卷积神经网络分为分类、检测和分割 3 种。尽管本文面向的是正负磨球样品的二分类问题, 但模型需要对缺陷做精确的学习, 以达到更精准的检测, 因而不适合采用普通的图像分类模型。检测指用一个个的矩形框框选出目标, 但从多角度拍摄的飞边有着不规则形状的几何轮廓, 致使矩形框中容易引入与飞边无关的背景信息, 从而影响检测性能。因此, 具有像素级检测精度的分割模型更适用于复杂的缺陷检测任务<sup>[15]</sup>。

## 3 方法

### 3.1 磨球的拍摄

在质检环节, 磨球在 900~1 000 °C 的高温

状态下被进行拍摄,具有强热辐射的特点,这给相机成像带来挑战<sup>[16]</sup>。例如:强热辐射造成大量热噪声,混入图像中使亮度过曝和暗部细节丢失;强热辐射也将导致光谱特性发生变化,出现色温偏移,使物体偏离真实颜色。对此,采用数字滤波和物理滤波相结合的图像采集方案,可分别有效地处理这类挑战,获得更清晰、可靠的图像数据。如图2所示,磨球表面的飞边、凸起、纹理等特征在不同视角下有着迥异的表现,因此需要拍摄同一样品的多个侧面。视觉系统采用飞拍方案,设计上侧相机位,高温球体在滚动的过程中会产生旋转,相机至少抓拍3张图片,基于3张图片判断球圆度和飞边缺陷。只要有一张图片被检出,则判定为负样品。由于拍摄时的磨球成像位置和角度不同,可能因相机成像的近大远小特点导致圆度降低,因此需要开启相机去畸变<sup>[17]</sup>设置,以做几何矫正。

### 3.2 不良圆度和飞边的处理

圆度可通过以下步骤求解:首先,遍历二值化磨球图像中的每一个像素点,得到物体像素点的横坐标均值与纵坐标均值,并作为球心;其次,计算球轮廓到球心的最大与最小距离的差,以表示圆度;最后,将像素的距离换算成物理距离,判定大于4 mm的圆度为负样品。深度学习模型的检测效果取决于目标的语义特征是否明确,故而飞边需要按照确切的规则标注。飞边依

据不同的拍摄视角可分为3种情况:如图4(b)所示,可根据圆弧轮廓的凸出部分判断飞边,尽管可以通过圆度判别飞边,但飞边凸出的距离要求更严格,需要做更细致的筛选;如图4(c)~(d)所示,飞边边缘表现出亮度和坡度特征,但有时并不显著;如图4(c)所示,由于是正面拍摄,因此,即便是微小的凸起也能在边缘产生较大的颜色突变。对于后两种情况来说,可以只标注显著的边缘坡度,以防止背景纹理干扰;当识别出正面拍摄的飞边距圆心较近时,如图4(c)所示,可重新从其他角度拍摄,并进行二次检测。据此,可将飞边标记为凸起飞边(如图4(b)所示)和边缘坡度飞边(如图4(c)~(d)所示),分别记为flash和slope。在分割模型中,语义分割指将每个像素进行分类,而实例分割指先检测出每个目标,再在每个框选的区域分割出实例。相比之下,实例分割更不容易因受复杂纹理背景干扰而误检出飞边。

## 4 实验

### 4.1 图像的采集与处理

实验采用大恒MER2-503-23GM工业相机<sup>[18]</sup>,内置RGB可见光单波段窄带滤光片,使只有目标波长范围内的光能够透过,从而去除高温磨球热辐射噪声。相机的分辨率为 $2\,448 \times 2\,048$ 像

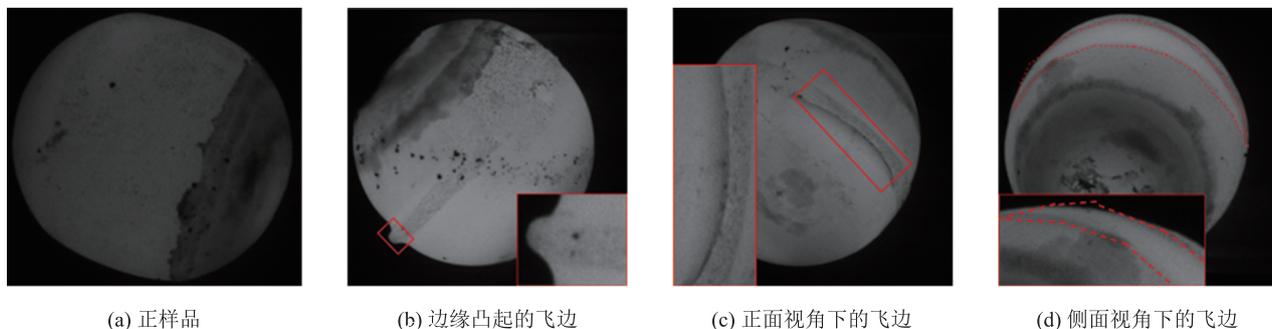


图4 磨球标注的飞边类型

Fig. 4 Types of flashes labeled for grinding balls

素, 对 1 169 个直径为 120 mm 的滚动球体每次连续抓拍 3 张图片, 通过观察图像发现, 磨球直径普遍小于 700 像素, 1 mm 的实际长度约为 5 个像素, 使用 Halcon 图像处理库中的算子对灰度图在像素层级进行处理。例如, 裁剪掉磨球外的背景与热噪点: 第一, 使用 `scale_image_max` 算子<sup>[19]</sup>将像素值扩充到 0~255 区间, 充分利用像素值范围, 采取一个较小的阈值做二值化处理; 第二, 使用 `select_shape_std` 算子<sup>[19]</sup>计算出最大的像素连通域, 抑制掉剩余噪点; 第三, 采用扫描线法计算最小外接矩形, 统一裁剪为 736×736 像素大小, 通过上述步骤, 可使 4.78 MB 的图像缩小为 126 kB 左右。在上述预处理过程之后, 依照第 3.2 小节的步骤计算圆度。首先, 在图像目标区域随机选取一点, 采样该点的 720 个等差角度的射线, 调用 `measure_pos` 算子<sup>[19]</sup>计算射线, 方向的像素变化关键点, 得到一个轮廓点集; 其次, 调用基于最小二乘法的 `fit_circle_contour_xld` 算子<sup>[19]</sup>计算出最能拟合输入轮廓的圆, 记该圆圆心为  $\delta$ ; 最后, 遍历轮廓点集, 计算每个点到圆心  $\delta$  的距离, 将圆度表示为最大距离与最小距离之差, 记作  $|r_1 - r_2|$ , 据此差值筛除圆度大于 24 像素精度大小的图像, 图 5(c) 显示了磨球轮廓上分别以  $r_1$  和  $r_2$  为半径的两个圆。另外, 本节给出了本文提出的方法和经典的 Canny 算法<sup>[20]</sup>及万物分割模型(segment anything model, SAM)<sup>[21]</sup>在飞边检测上的性能对比。在实验中, 将 Canny 算法采用的双阈值默认为 31 和 227, 其检测结果如图 5(a) 所示。SAM 方法采用手动交互标记操作, 其生成结果如图 5(b) 所示, 特别地, 右下角分别为对应的手动标记掩码(mask)点, 其中, 蓝色掩码点代表添加区域, 粉色掩码点代表删除区域。

如图 5 所示, Canny 算法仅能粗略地提取出飞边的边缘信息, 但是这些边缘信息存在非连续或非闭合的情况, 如图 5(a) 中的箭头所示,

无法准确地反映飞边的空间位置, 同时还会产生大量的干扰性边缘。通过交互式地手动标注掩码点, SAM 方法可以得到更连续且闭合的飞边轮廓, 并且能大致估计出飞边的空间位置, 如图 5(b) 所示。然而, SAM 方法过于依赖人为的标注结果, 而且忽略了飞边的语义约束, 因此无法精细地分割出飞边的轮廓。如图 5(d) 所示, 与 Canny 算法和 SAM 方法相比, 本文提出的模型无论是在飞边的轮廓形态上, 还是在定位标记上, 都具有更精细的分割结果和更精确的空间位置信息。这主要归功于以下两个方面: 一是本文提出的模型通过引入语义规则标注飞边; 二是本文提出的模型利用强化的原型分割生成飞边的实例掩码。

## 4.2 飞边的分割检测

将上述采集的图像经过图像预处理并裁剪后, 得到 3 507 张图像; 并将这些图像按 6:2:2 的比例划分为训练集、验证集和测试集。训练集和验证集用于训练与调试模型, 测试集用以评估模型性能。依照第 3 节的方案标注飞边, 应用 YOLOv5m-P5 实例分割模型, 基本超参数(如学习率等)沿用默认设置, 在两块 GeForce RTX 3090 显卡上设置批大小为 16, 共训练 200 个 epoch。模型在测试集图像上获取 flash 和 slope 的 mask mAP 分别为 43.2% 和 25.4%。根据不同飞边类型计算出的图像检出率如表 1 所示, 即检出有 flash 或 slope 的图像占比; 统计每个样品在 3 张拍摄图像上的表现, 又可算得负样品检出率。对所得图像的突出飞边的负样品的一次检出率为 63.2%, 边缘坡度飞边的负样品一次检出率为 87.7%。图 5 为分割效果, 或许应该计算被分割的线性区域的最大宽度, 然后判断飞边凸起部分是否大于 5 个像素, 但这是不必要的, 因为 5 个像素的距离足够小, 通常检出的飞边都大于 5 个像素; 采用这个判断标准虽然可能导致部分微弱的飞边凸起被背景纹理干

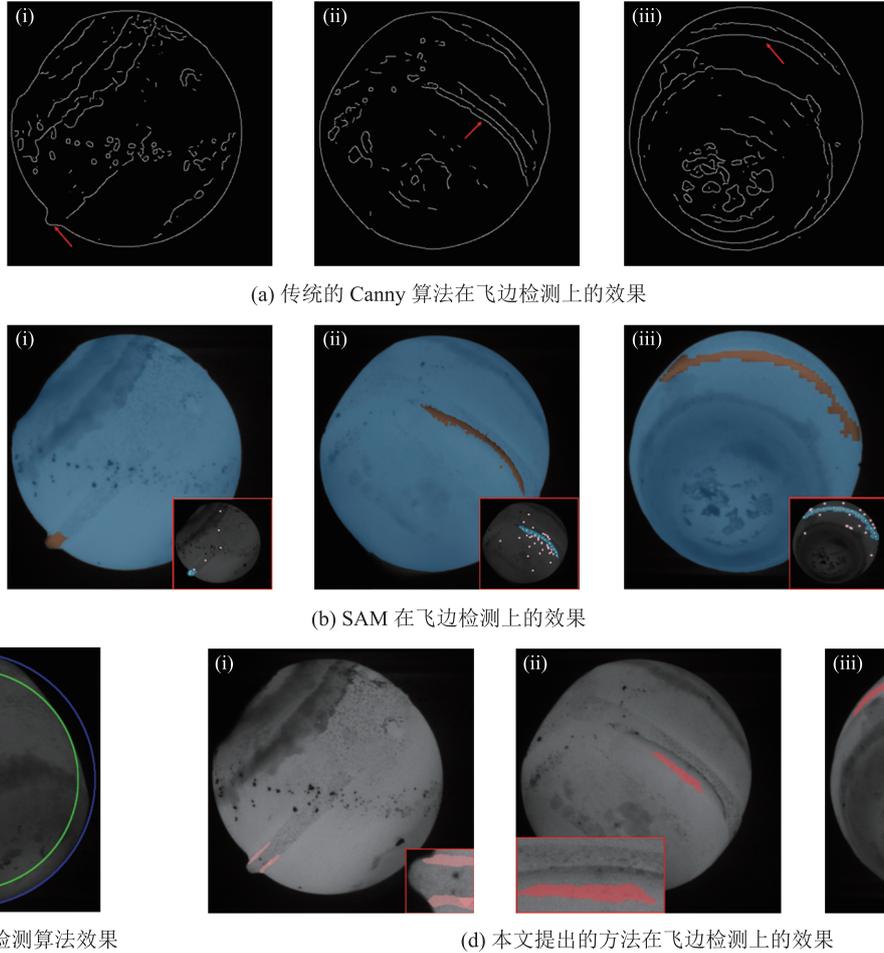


图 5 3 种不同的检测算法在飞边检测上的性能对比

Fig. 5 Comparison of the performance of three different detection algorithms in burr detection

表 1 测试集上根据不同飞边类型计算的图像与样品检出率

Table 1 Sample detection rate calculated from images

based on different burr types in the test dataset

飞边类型	测试集图像数与样品数	
	检出图像数(检出率)	检出样品数(检出率)
凸起飞边	349(49.7%)	149(63.2%)
边缘坡度飞边	571(81.3%)	205(87.6%)
兼具两种飞边	630(89.7%)	223(95.3%)

扰, 但 slope 总是分布在过球心环带的边缘, 有明显的结构特征, 只标注特征明显区域可有效降低误检。因此, slope 可以与 flash 一起直接地判断飞边, 如此算得的图像检出率与负样品检出率分别为 89.7% 和 95.3%。

## 5 总结

本文面向磨球工业生产中圆度和飞边的质检任务, 介绍在磨球锻造过程中产生圆度和飞边的原因, 以及飞边对磨球碾压效率的不良影响, 分析磨球的图像采集与表面纹理的特点, 完成 3 部分工作。首先, 通过采用具有数字滤波和物理滤波的图像采集方法, 可明显减少高温磨球的热辐射噪声, 获取清晰的图像。其次, 采用 Halcon<sup>[22]</sup>等图像库的相关算子, 求解轮廓到球心的最大距离与最小距离之差, 以表示圆度, 并进行筛选。最后, 根据飞边的边缘突出和坡度特征进行标注, 采用具有像素级精确粒度的实例分

割模型完成检测, 最终在 234 个测试样品中实现 95.3% 的飞边检出率, 且无明显误检。

### 参 考 文 献

- [1] Stalinskii DV, Rudyuk AS, Solenyi VK, et al. Improving the quality of steel grinding balls [J]. *Steel in Translation*, 2017, 47(2), 130-136.
- [2] Global Forged Steel Grinding Balls Market 2020 by Manufacturers, Regions, Type and Application, Forecast to 2025 [EB/OL]. [2023-07-26]. <https://www.marketandresearch.biz/report/115634/global-forged-steel-grinding-balls-market-2020-by-manufacturers-regions-type-and-application-forecast-to-2025#tof>.
- [3] 孙浩, 蒋业华, 张晓伟, 等. 大直径锻球的制备工艺及其磨损性能研究 [J]. *铸造技术*, 2011, 32(6): 863-865.  
Sun H, Jiang YH, Zhang XW, et al. Study on fabrication process and wear properties of large-diameter forging balls [J]. *Foundry Technology*, 2011, 32(6): 863-865.
- [4] Zhang HY, Xie FQ, Cao MY, et al. A steel ball surface quality inspection method based on a circumferential eddy current array sensor [J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1536.
- [5] Ladouceur M. The Effects of Feedrate and Material Hardness on Burr Formation in Grinding Processes [D]. Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 2008.
- [6] Chen YJ, Ding YY, Zhao F, et al. Surface defect detection methods for industrial products: a review [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(16): 7657.
- [7] 陈国锋. 工业机器人智能打磨视觉系统中铸件飞边信息提取关键技术研究与应用 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.  
Chen GF. Research and application of key technologies for extraction of casting flash information in vision system of intelligent grinding robot [D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [8] 刘永浩. 基于结构光的铸件去飞边机器人系统关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021.  
Liu YH. Research on key technologies of casting flash removal robot system based on structured light [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [9] 周海陶. 基于铸件飞边点云信息的机器人打磨规划方法研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2022.  
Zhou HT. Research on robot grinding planning method based on casting flash point cloud information [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [10] Ultralytics. YOLOv5 [EB/OL]. (2020-05-27)[2023-10-17]. <https://github.com/ultralytics/yolov5>.
- [11] 汪有才, 路远, 于浩. 耐磨钢球模锻与自由锻工艺比较 [J]. *中国金属通报*, 2019, (12): 77-79.  
Wang YC, Lu Y, Yu H. Comparison of forging and free forging processes for wear-resistant steel balls [J]. *China Metal Bulletin*, 2019, (12): 77-79.
- [12] 潘继勇. 我国铸造磨球的生产及研发现状 [J]. *铸造*, 2013, 62(3): 210-217+221.  
Pan JY. Production and research status of casting grinding balls in China [J]. *Foundry*, 2013, 62(3): 210-217+221.
- [13] 闫红艳, 陈燕妮. 方钢锻造磨球模具设计原则及应用 [J]. *锻压技术*, 2020, 45(10): 142-150.  
Yan HY, Chen YN. Design principle and application of forging grinding ball mold with square steel [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45(10): 142-150.
- [14] Dvornik N, Mairal J, Schmid C. Modeling visual context is key to augmenting object detection datasets [C] // *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2018: 364-380.
- [15] 罗东亮, 蔡雨萱, 杨子豪, 等. 工业缺陷检测深度学习方法综述 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2022, 52(6): 1002-1039.  
Luo DL, Cai YX, Yang ZH, et al. Survey on industrial defect detection with deep learning [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2022, 52(6): 1002-

- 1039.
- [16] Yu L, Pan B. Overview of high-temperature deformation measurement using digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 61(7): 1121-1142.
- [17] Zhang YS, Zhao X, Qian DH. Learning-based framework for camera calibration with distortion correction and high precision feature detection [Z/OL]. arXiv Preprint, arXiv: 2202.00158, 2022.
- [18] 中国大恒(集团)有限公司. 可见光滤光片 [EB/OL]. (2020-01-12)[2023-10-17]. <https://www.daheng-imaging.com/show-104-1904-1.html>. Daheng Image Technology Co., Ltd. Visible light filter [EB/OL]. (2020-01-12)[2023-10-17]. <https://www.daheng-imaging.com/show-104-1904-1.html>.
- [19] MVTec Software GmbH. HALCON Operator Reference 22.11.2.0 [EB/OL]. (2000-09-11)[2023-10-17]. [https://www.mvtec.com/doc/halcon/2211/en/index\\_by\\_name.html](https://www.mvtec.com/doc/halcon/2211/en/index_by_name.html).
- [20] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 6: 679-698.
- [21] Kirillov A, Mintun E, Ravi N, et al. Segment anything [Z/OL]. arXiv Preprint, arXiv: 2304.02643, 2023.
- [22] HALCON. HALCON-强大的机器视觉软件 [EB/OL]. (2020-01-12)[2023-07-26]. <https://www.mvtec.com/cn/products/halcon>. HALCON. HALCON-Powerful machine vision software [EB/OL]. (2020-01-12)[2023-07-26]. <https://www.mvtec.com/cn/products/halcon>.