

基于图像处理的颗粒参数测量方法研究进展

张以诺 张家耀 胡帆

摘要 颗粒材料在医药、材料科学等多领域作用关键。在颗粒学研究中,颗粒形态信息检测与评估是关键问题,传统手工计算方法因主观性和低效率,无法满足现代科研和工业生产需求。计算机图像处理技术优势显著,为颗粒图像参数自动提取提供有效手段。本文梳理文献,归纳颗粒图像处理算法及进展。预处理方面,涉及颗粒图像滤波算法评估和前沿深度学习去噪模型应用。分割环节,总结分水岭算法解决分割问题的方案、适配颗粒图像的水平集算法、凹点检测技术进展及基于霍夫变换和随机圆检测的成果,关注颗粒粘连和堆叠时的分割策略。此外,回顾深度学习在该领域的成果,分析U-Net与Mask R-CNN模型优势及改进,探讨注意力机制等改进方法成果。最后提出未来颗粒图像参数测量的三大趋势:高性能定制化算法、通用型算法和深度学习融合算法。

关键词 颗粒测量;图像处理;粘连分割;深度学习

DOI: 10.3969/j.issn.1002-3208.2026.02.013.

中图分类号 R318;TP399 **文献标志码** A **文章编号** 1002-3208(2026)02-0201-06

本文著录格式 张以诺,张家耀,胡帆. 基于图像处理的颗粒参数测量方法研究进展[J]. 北京生物医学工程,2026,45(2):201-206. ZHANG Yinuo,ZHANG Jiayao,HU Fan. Research progress in measuring particle parameters based on image processing methods [J]. Beijing Biomedical Engineering, 2026, 45 (2) : 201-206.

Research progress in measuring particle parameters based on image processing methods

ZHANG Yinuo,ZHANG Jiayao,HU Fan

School of Biomedical Engineering, Capital Medical University, Beijing 100069

Corresponding author:HU Fan (E-mail: hufan@ccmu.edu.cn)

【Abstract】 Particle materials are of critical importance across various disciplines, including medicine and materials science. In the field of particle science research, the accurate detection and evaluation of particle morphology are essential tasks. Traditional manual methods, however, are inherently subjective and inefficient, thus failing to meet the demands of modern scientific research and industrial applications. Computer image processing technologies offer significant advantages and provide an effective solution for the automated extraction of particle image parameters. This paper presents a comprehensive review of existing literature, summarizing the algorithms and advancements in particle image processing. In the area of image preprocessing, it discusses the performance of particle image filtering algorithms and the application of cutting-

edge deep learning-based denoising models. Regarding image segmentation, the paper outlines how the watershed algorithm addresses segmentation challenges, explores the level set method tailored for particle images, reviews progress in concave

基金项目:北京市教育委员会科研计划项目(KM202410025022)
资助

作者单位:首都医科大学生物医学工程学院(北京 100069)

通信作者:胡帆,博士,副教授。E-mail:hufan@ccmu.edu.cn

point detection techniques, and highlights achievements based on Hough transform and random circle detection. Particular attention is given to segmentation strategies for scenarios involving adhered or stacked particles. Furthermore, the paper reviews recent advances in deep learning, analyzes the strengths and enhancements of architectures such as U-Net and Mask R-CNN, and discusses improvements that integrate attention mechanisms. Finally, three major future directions in particle image parameter measurement are proposed: high-performance customized algorithms, general-purpose algorithms and deep learning fusion algorithms.

【Keywords】 particle measurement; image processing; adhering segmentation; deep learning

0 引言

颗粒是指在特定尺寸范围内具有特定形状的几何体,其参数测量在多领域不可或缺。如临床医学中将特定细胞数量用于疾病早期诊断,粮食品质检测以粮食颗粒统计信息为重要指标^[1],微生物学需对菌落计数^[2],材料学中纳米颗粒形态特征会影响材料性能^[3]。由于颗粒分析的应用场景极为广泛,如何有效获取颗粒材料信息成为这些领域中亟待解决的核心问题。传统颗粒分析方法如物理筛分法、激光粒度分析法、手动测量法等,对专业设备依赖高或操作繁琐耗时。近年来,图像处理技术在颗粒图像处理领域广泛应用,因处理速度快、实时监测强、成本低等优势,成为颗粒材料分析重要工具。本文总结研究进展,将方法分为传统图像处理算法和深度学习算法两类,并分析未来的发展趋势与方向。

1 颗粒图像的预处理方法

图像预处理是获取颗粒图像后的首要步骤,其核心功能为:(1)校正图像采集干扰,剔除无关信息;(2)强化关键特征,为后续处理奠基。颗粒图像常用滤波算法有同态滤波、维纳滤波,二值化方法有自适应二值化方法、最大类间方差法和最大熵值法。随着深度学习技术在图像领域发展,在去噪领域表现出巨大潜力。近年来,如引入残差块等优化的 CNN 架构、生成对抗网络及 Transformer 等技术进展,显示了深度学习去噪技术在颗粒图像去噪上的应用前景。2022 年,Tawfik 等^[4]比较了多孔介质岩石图像传统与深度学习去噪方法,认为先进的监督式与半监督式深度学习去噪模型可降低去噪引入的岩石物理特征误差。可见,深度学习去噪技术为颗粒图像去噪提供了潜在方案,未来研究或将聚焦

于开发无需先验信息的盲去噪技术。

2 颗粒分割方法

经二值化处理的图像仅能区分前景与背景。对于未粘连的颗粒,连通域检测可直接完成分割。但实际中颗粒常粘连或堆叠,因此复杂场景下单颗粒分离是颗粒图像分割的研究热点。综合文献,解决策略主要分 4 类:分水岭算法、水平集相关算法、凹点检测算法和针对圆形颗粒的圆检测算法。

2.1 分水岭相关算法

目前,分水岭算法改进聚焦解决过度与不足分割问题,核心是优化距离变换技术和改进极值点的选择策略。从发展趋势看,算法向自适应性演进,泛化能力增强。2019 年,郭观凯等^[5]改进加速分割测试获得特征法(features from accelerated segment test, FAST),并与 h-maxima 分水岭算法结合,准确率在玉米、玻璃珠砂、盐三种颗粒的图像中均得到提升,表现出更广的适用范围。2022 年,王增硕等^[6]提出不限定颗粒形状的自适应粘连颗粒图像分割方法,基于自适应多重欧氏距离变换改进分水岭算法,实现不同形状颗粒有效分割。

2.2 水平集相关算法

水平集方法^[7]的优化致力于降低对初始轮廓依赖性和对噪声敏感性,提升算法稳定性和效率。众多改进模型中,Chan-Vese 模型^[8]、距离正则化水平集演化(distance regularized level set evolution, DRLSE)^[9]和局部区域拟合(region scalable fitting, RSF)^[10]模型尤为突出。2016 年,陈颖^[11]针对纳米颗粒参数测量场景分析三种水平集算法优劣,发现 Chan-Vese 模型可应对模糊边缘影响,但分割亮度不均或目标复杂图像时结果不精确;DRLSE 模型解决了水平集函数重新初始化问题,但对初始位置敏感,限制其在模糊边缘图像应用;RFE 模型通过局

部区域拟合,能适应边缘模糊和强度不均图像。2025年,Wang等^[12]在X射线计算机断层扫描图像对颗粒的三维重建研究中,用形态学膨胀技术识别传统分水岭算法过度分割,简化后续水平集方法能量函数,提出动态选择最优迭代步数方法,克服融合分水岭与水平集方法的两大局限,即预处理阶段人工主观干预和优化过程的不可控性问题。

2.3 凹点检测相关算法

凹点检测算法优化研究引入先进高效的边缘检测和自适应技术。2019年,樊蒙蒙^[13]在大米分割研究中,基于矢量夹角原理,针对两粒粘连大米的分割问题,构建基于三点夹角的凹点检测算法,开发自适应凹点匹配技术。同年,孙卫红等^[14]提出基于凹点定向腐蚀原理的图像分割策略,规避凹点匹配步骤,实现96.2%的平均分割精度。2023年,曾凡智等^[15]提出结合改进分水岭算法与凹点分割技术的矿石粒径分级检测新策略,联合应用两种算法克服了单一算法的局限性。

2.4 圆检测相关算法

识别圆形对象主流方法有传统霍夫变换(Hough Transform)和随机圆检测方法(randomized algorithm for detecting circles, RDC)^[16]。霍夫变换空间复杂性高,RDC效率随边缘点数量增加而下降,都挑战算法性能。因此,圆形检测算法优化研究核心是提升检测精度时确保计算简洁及时,实现性能与效率均衡。2014年,Alomari等^[17]在RDC基础上用迭代圆检测算法对白细胞和红细胞计数,准确率分别达95.3%和98.4%。2015年,秦长泽^[18]针对球团颗粒图像特点,用霍夫变换检测球团颗粒个数和粒度,分割粘连颗粒,解决分水岭算法过分割问题。2018年,牛利等^[19]对大气颗粒物图像分割时,提出基于迭代直径圆检测的分割方法,用直径抽样策略抑制噪声、减少候选圆数量、提高边界圆检测准确率。

3 颗粒参数的测量

在颗粒图像数据统计分析中,颗粒计数至关重要。理论上分割处理后的图像可直接确定颗粒数目、面积、粒径等信息,但准确性受杂质颗粒和二值图像中空洞等干扰。常见解决方案有引入形状因子、Feret直径等。在生物医学领域,除传统尺寸参

数,还需提取复杂特定参数。2021年,张晗等^[20]提出基于像素强度的分类标准用于显微图像细胞计数,区分死细胞与活细胞,为获取复杂参数提供新思路。同年,陈建湟等^[21]通过傅里叶级数拟合和棱角关键点识别技术,提取了对矿物学研究有重要意义的参数(球度、凸度、长宽比和磨圆度等)。2023年,吴秀君^[22]用反向传播(back propagation, BP)神经网络技术实现米粒外观类型识别,展示了传统机器学习算法在颗粒特征提取方面的潜力,为相关领域技术进步和应用拓展提供新视角和实践案例。

4 深度学习算法处理颗粒图像的研究进展

4.1 常用于颗粒图像处理的深度学习模型

U-Net模型最初用于神经细胞分割,其面临的挑战与颗粒图像分割有相似性。作为语义分割模型,U-Net核心是区分背景与颗粒,相比传统二值化算法,能解决颗粒粘连问题,这得益于训练时对边缘区域赋予更高权重。传统算法处理不同尺寸的颗粒需相应地调整参数,而U-Net通过编码器—解码器—跳跃连接结构,能捕捉全局信息。2018年,Zhou等^[23]重新设计U-Net的跳跃连接,缩小编码器与解码器特征图的语义差异,提出U-Net++。2022年,荣亚琪^[24]结合神经微分方程,提出NODE-UNet++,并结合标记分水岭算法实现红细胞图像分割,效果优于U-Net++和单独的标记分水岭算法。此外,2023年,Cao等^[25]提出基于Transformer网络的类U-Net架构Swin-Unet,解决了传统CNN架构U-Net学习全局及长距离语义信息交互的局限。2023年,王孝鹤^[26]将Swin-Unet技术用于催化剂纳米颗粒识别与分割,性能超越传统U-Net模型。

Mask-RCNN模型核心优势在于卓越的实例分割性能,既需对每个像素分类,又要区分同类目标。在颗粒图像处理中,它要分离颗粒与背景,还需区分各颗粒。其能利用区域提议网络(region proposal network, RPN)分割粘连颗粒,通过掩膜分支对感兴趣区域内像素进行二分类,这或是解决颗粒粘连问题的关键。2022年,李颖等^[27]在Mask-RCNN基础上,分析煤粉颗粒特点,引入锚点框预处理模块指导锚点框尺寸,以匹配煤粉颗粒图像数据集。同年,陈宗元等^[28]用双向FPN结构解决小颗粒检测率

低的问题,用 Soft-NMS 避免重叠颗粒漏检。

其他模型也有显著研究价值。如 2016 年推出并持续优化的 YOLO(you only look once)模型^[29],单神经网络架构使其能“一次性浏览图像即完成检测”,速度快,适用于对实时性要求高的场景。自 2015 年提出后,从 v1 迭代到 v12 等多个版本,在速度与精度平衡、小目标检测能力、鲁棒性、注意力机制等方面均有提升^[30]。这些模型的发展和优化,为颗粒图像处理提供了更丰富高效的技术手段。深度学习算法凭借深层次网络结构,能学习更丰富抽象的特征表示,在处理复杂颗粒分割任务时,性能优于传统算法。

4.2 近年来的改进措施

近年来基础模型改进措施包括引入注意力机制、空洞卷积技术、深度可分离卷积、非对称卷积、残差模块与密集连接等,如表 1 所示。其中,空间注意力机制可增强图像颗粒边界、使细节更清晰^[31]。同时,注意力机制消融实验表明不同类型图像或需不同注意力机制优化处理效果。空洞卷积技术通过引入扩张率参数,显著扩展了卷积核的感受野,缓解了传统池化操作的信息损失问题,可以保留细微颗粒的信息。对于 Mask R-CNN 模型的改进主要有两方

面:一是替换主干网络架构以适应不同场景和需求,二是调整损失函数以优化训练过程和分割效果。

5 结论

颗粒图像处理技术在多领域广泛应用,推动现有图像分割算法大量改进,针对粘连颗粒分割及过、欠分割问题的研究是提升精度和效率的关键。虽已有特定场景解决方案,但仍有优化空间。

(1)高性能定制化算法。图像处理技术在颗粒参数测量中作用愈发重要,颗粒目标识别范围和获取参数都在扩展。未来研究焦点是保证性能与精确度的算法优化,核心问题是不牺牲精度的前提下降低复杂度,算法将结合实际需求解决具体问题。

(2)通用型算法。颗粒图像处理技术在多领域有共性,已有研究探索同一算法在不同场景的适用性。为实现更高自动化,研究者用自适应策略优化算法,降低人工参数设定,增强可扩展性以适应多样化需求。

(3)深度学习融合算法。深度学习提取复杂特征有优势,传统方法运算高效且解释性强。未来二者结合有望催生应对高难度任务、保持高精度和运算效率的新一代算法。

表 1 近年来的改进方法汇总

Table 1 Summary table of improvement methods in recent years

分割对象	基础模型	时间	原始数据集	改进方法	评价指标	改进前/%	改进后/%
铁矿球团 ^[31]	U-Net	2022	30 张球团图像	CBAM 注意力机制	mIoU	64.1	78.8
细胞 ^[32]	U-Net	2023	Dsb_2018、Isbi、自建数据集	SE 注意力机制	mIoU	81.55	84.12
				多尺度的跳跃连接+注意力机制	mIoU	81.55	84.47
腺体细胞 ^[33]	U-Net	2019	Warwick-Qu 数据集、	注意力模块	F1	78.8	83.2
			UCSB breast 数据集	空洞空间金字塔池化模块(ASPP)	F1	78.8	84.7
腺体细胞 ^[34]	U-Net	2022	30 张透射电子显微镜图像 (ISBI 数据集)	空洞残差模块	Dice	78.3	92.5
磨粒 ^[35]	Mask R-CNN	2021	642 张具有典型磨损特征的 磨粒图片	迁移学习	Accuracy	—	38.2
颗粒 ^[28]	Mask R-CNN	2022	220 张球形颗粒重叠图像	调整残差网络、双 FPN 结构、 使用 Soft-NMS	Accuracy	—	91

参考文献

- [1] 申冉,甄彤,李智慧,等.谷类作物粘连颗粒图像分割方法研究进展[J].中国粮油学报,2022,37(10):313-320.
Shen R, Zhen T, Li ZH, et al. Research progress in image segmentation methods of cereal adhesion grains [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 313-320.
- [2] 司秀娟,王红强,宋良图.基于图像处理的菌落自动计数系统[J].北京生物医学工程,2017,36(6):633-638.
Si XJ, Wang HQ, Song LT. Automatic colony counting system based on image processing[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2017, 36(6): 633-638.
- [3] 高鹏,石晓龙.基于透射电子显微镜的纳米颗粒图像识别研究综述[J].广州大学学报(自然科学版),2019,18(1):73-78.
Gao P, Shi XL. Review of nanoparticles image recognition in TEM micrographs[J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2019, 18(1): 73-78.
- [4] Tawfik MS, Adishesha AS, Hsi Y, et al. Comparative study of traditional and deep-learning denoising approaches for image-based petrophysical characterization of porous media [J]. Frontiers in Water, 2022, 3: 800369.
- [5] 郭观凯,刘伟,余玲玲,等.基于改进FAST与分水岭算法的颗粒图像分割[J].中国粉体技术,2019,25(2):61-67.
Guo GK, Liu W, Yu LL, et al. Image segmentation of touching particles based on improved FAST and watershed algorithm[J]. China Powder Science and Technology, 2019, 25(2): 61-67.
- [6] 王增硕,刘溢文,关子昂,等.基于自适应多重欧氏距离变换的分水岭粘连颗粒分割方法[J].电脑知识与技术,2022,18(3):93-96.
- [7] Osher S, Fedkiw R, Piechor K. Level set methods and dynamic implicit surfaces [J]. Applied Mechanics Reviews, 2004, 57(3): B15.
- [8] Chan TF, Vese LA. Active contours without edges [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277.
- [9] Li C, Xu C, Gui C, et al. Distance regularized level set evolution and its application to image segmentation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(12): 3243-3254.
- [10] Li C, Kao CY, Gore JC, et al. Minimization of region-scalable fitting energy for image segmentation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(10): 1940-1949.
- [11] 陈颖.基于偏微分方程的纳米颗粒尺寸测量方法研究[D].天津:天津工业大学,2016.
- [12] Wang T, Fei W, Ehinger KA, et al. Improved level set method for particle reconstruction from X-ray computed tomography images [J]. Powder Technology, 2025, 455: 120743.
- [13] 樊蒙蒙.基于PCNN和凹点的粘连大米图像分割[D].郑州:河南工业大学,2019.
- Fan MM. Image segmentation of adhesive rice based on PCNN and pit [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019.
- [14] 孙卫红,洪徐健,梁曼,等.基于凹点定向腐蚀的粘连蚕茧图像分割方法[J].蚕业科学,2019,45(3):369-376.
Sun WH, Hong XJ, Liang M, et al. Image segmentation method for adhesive cocoons based on directional erosion in concave point [J]. Science of Sericulture, 2019, 45(3): 369-376.
- [15] 曾凡智,黄子豪,周燕,等.基于改进分水岭-凹点分割的矿石粒径分级检测方法[J].计算机测量与控制,2023,31(8):31-37.
Zeng FZ, Huang ZH, Zhou Y, et al. Ore particle size classification detection method based on improved watershed-concave point segmentation [J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(8): 31-37.
- [16] Chen TC, Chung KL. An efficient randomized algorithm for detecting circles [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, 83(2): 172-191.
- [17] Alomari YM, Abdullah SNHS, Azma RZ, et al. Automatic detection and quantification of WBCs and RBCs using iterative structured circle detection algorithm [J]. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2014, 2014: 979302.
- [18] 秦长泽.球团颗粒粒度检测系统的研究[D].武汉:武汉科技大学,2015.
Qin CZ. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master in engineering [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.
- [19] 牛利,尹唱唱,刘喜禄,等.一种基于迭代直径圆检测的大气颗粒物图像分割方法[J].中国科技论文,2018,13(20):2330-2336.
Niu L, Yin CC, Liu XL, et al. An image segmentation method of atmospheric particulates based on iterative diameter circle detection [J]. China Sciencepaper, 2018, 13(20): 2330-2336.
- [20] 张晗,廖福元.一种基于显微图像的细胞计数技术研究[J].国外电子测量技术,2021,40(10):123-126.
Zhang H, Liao FY. Research on cell counting technology based on microscopic image [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(10): 123-126.
- [21] 陈建滢,张中俭,徐文杰,等.基于数字图像处理的矿物颗粒形态定量分析[J].工程地质学报,2021,29(1):59-68.
Chen JH, Zhang ZJ, Xu WJ, et al. Quantitative method of shape parameters of mineral particles based on image processing [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1): 59-68.
- [22] 吴秀君.基于BP的食品外观品质检测可视化系统研究[J].粮食与饲料工业,2023(6):65-69.
Wu XJ. Research on visual system of food appearance quality detection based on BP [J]. Cereal & Feed Industry, 2023(6): 65-69.

- 65-69.
- [23] Zhou Z, Siddiquee MMR, Tajbakhsh N, et al. UNet++: a nested U-Net architecture for medical image segmentation [J]. Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support, 2018, 11045: 3-11.
- [24] 荣亚琪. 基于常微分方程和标记分水岭算法的细胞图像分割 [D]. 长春: 长春工业大学, 2022.
- Rong YQ. Cell image segmentation based on neural ordinary differential equation and marker watershed algorithm [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2022.
- [25] Cao H, Wang Y, Chen J, et al. Swin-Unet: Unet-like pure transformer for medical image segmentation [C]// Computer Vision-ECCV 2022 Workshops. Tel Aviv, Israel: Springer Cham, 2023: 205-218.
- [26] 王孝鹤. 基于Transformer网络架构的催化剂纳米颗粒识别与分割 [D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
- Wang XH. Recognition and segmentation of catalyst nanoparticles based on Transformer network architecture [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [27] 李颖, 李秀宇, 卢兆林, 等. 基于深度学习的煤粉颗粒CT图像分割方法 [J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(8): 2252-2259.
- Li Y, Li XY, Lu ZL, et al. Coal particle CT image segmentation method based on deep learning [J]. Computer Engineering and Design, 2022, 43(8): 2252-2259.
- [28] 陈宗元, 张磊磊, 赵宁宁, 等. 混合颗粒系重叠图像分割与分类方法研究 [J]. 计量学报, 2022, 43(6): 746-753.
- Chen ZY, Zhang LL, Zhao NN, et al. Research on segmentation and classification methods of mixed overlapped particle images [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(6): 746-753.
- [29] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: unified, real-time object detection [C]// 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA: IEEE Press, 2016: 779-788.
- [30] Sapkota R, Flores-Calero M, Qureshi R, et al. YOLO advances to its genesis: a decadal and comprehensive review of the You Only Look Once (YOLO) series [J]. Artificial Intelligence Review, 2025, 58: 274.
- [31] 肖成勇, 李擎, 王莉, 等. 基于CBAM-Unet的铁矿球团边缘分割实验方法 [J]. 烧结球团, 2022, 47(2): 8-15, 23.
- Xiao CY, Li Q, Wang L, et al. Edge segmentation experimental method of iron ore pellets based on CBAM-Unet [J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(2): 8-15, 23.
- [32] 吴雪丽, 齐苏敏, 孟静, 等. MSE-UNet: 基于多尺度特征和注意力机制的细胞分割模型 [J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 71-76.
- Wu XL, Qi SM, Meng J, et al. MSE-UNet: cell segmentation model based on multiscale features and attention mechanisms [J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science), 2023, 49(2): 71-76.
- [33] 贝琛圆, 于海滨, 潘勉, 等. 基于改进U-Net网络的腺体细胞图像分割算法 [J]. 电子科技, 2019, 32(11): 18-22.
- Bei CY, Yu HB, Pan M, et al. Gland cell image segmentation algorithm based on improved U-Net network [J]. Electronic Science and Technology, 2019, 32(11): 18-22.
- [34] 周涛. 基于改进U-net网络的腺体细胞图像分割算法应用研究 [J]. 现代信息科技, 2022, 6(13): 94-97.
- Zhou T. Application research of glandular cell image segmentation algorithm based on improved U-net network [J]. Modern Information Technology, 2022, 6(13): 94-97.
- [35] 杨智宏, 贺石中, 冯伟, 等. 基于Mask R-CNN网络的磨损颗粒智能识别与应用 [J]. 摩擦学学报, 2021, 41(1): 105-114.
- Yang ZH, He SZ, Feng W, et al. Intelligent identification of wear particles based on Mask R-CNN network and application [J]. Tribology, 2021, 41(1): 105-114.

(2025-04-28 收稿, 2025-09-04 修回)

(上接第 182 页)

- [16] 顾伟, 王欣国, 杨越, 等. SPD 模式下医用耗材供应商评价指标体系构建研究 [J]. 中国医院, 2023, 27(9): 58-62.
- Gu W, Wang XG, Yang Y, et al. Research on the construction of an evaluation index system of medical consumables suppliers under the SPD model [J]. Chinese Hospitals, 2023, 27(9): 58-62.
- [17] 白路花, 吕庆文, 徐明明, 等. 供应链管理模式下(SPD 模式)在医院医用耗材精细化管理中的应用分析 [J]. 北京生物医学工程, 2022, 41(6): 623-627.

- Bai LH, Lyu QW, Xu MM, et al. Supply chain management mode (SPD mode) and its application in hospital medical consumables management [J]. Beijing Biomedical Engineering, 2022, 41(6): 623-627.
- [18] 董桂青, 范医鲁. 我院医用耗材不良事件监测报告及管理策略分析 [J]. 中国医疗设备, 2023, 38(10): 113-118.
- Dong GQ, Fan YL. Analysis of adverse events monitoring report and management strategy of medical consumables in our hospital [J]. China Medical Devices, 2023, 38(10): 113-118.

(2025-07-18 收稿, 2025-09-09 修回)