

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2021.05.011

废旧动力电池破碎料涡流分选试验研究

周宏喜^{1,2}, 卢世杰^{1,2}, 魏红港^{1,2}, 郎平振^{1,2}, 苏勇^{1,2}

(1. 北矿机电科技有限责任公司, 北京 100160; 2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘要:介绍了涡流分选原理,分析了动力电池破碎产物的物料特性及影响分选效率的关键因素,采用自主研发的 ECS 型涡流分选机开展试验研究,结果表明,理想形态(片状)下金属和非金属的分选回收率远高于物料破碎后的原始形态(球团状、条状、折叠等);理想形态下的正极片和负极片也可通过涡流分选技术高效分离,一次分选后正极片回收率达 92.3%,分选物料的形状和大小越相近,越有利于提高分选效率。

关键词:动力电池;涡流分选;破碎;比导电率;分选效率

中图分类号:TD924 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-1744(2021)05-0066-07

Experimental Study on Eddy Current Separation of Spent Traction Battery Broken Materials

ZHOU Hongxi^{1,2}, LU Shijie^{1,2}, WEI Honggang^{1,2}, LANG Pingzhen^{1,2}, SU Yong^{1,2}

(1. BGRIMM Machinery & Automation Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China;

2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: This paper introduces the working principle of eddy current separation, analyzes the material characteristics of the traction battery broken products and the key factors affecting sorting efficiency. The self-developed ECS-type eddy current separator by BGRIMM is used to conduct experimental research. Results show that separation recovery rate of metals and non-metals in the ideal form(flake) is much higher than the original form after crushing(such as pellet, strip form and folding, etc.). The ideal form of positive electrode and negative electrode plates can also be separated efficiently by eddy current separation technology, and the recovery rate of positive electrode plates is 92.3%. The shape and size of the sorting materials is more similar, the more beneficial to improve separation efficiency.

Key words: traction battery; eddy current separation; crush; conductivity specific density; sorting efficiency

截至 2019 年底,全国新能源汽车保有量达 381 万辆,占汽车总量的 1.46%,与 2018 年底相比,增加 120 万辆,增长 46.05%。其中,纯电动汽车保有量 310 万辆,占新能源汽车总量的 81.19%。新能源汽车增量连续两年超过 100 万辆,呈快速增长趋

势。自 2014 年我国新能源汽车大规模推广应用后,按照废旧动力锂电池 5~8 a 的使用寿命推算,2020 年前后将迎来电池报废高峰。中国汽车技术研究中心数据显示,预计 2020 年我国废旧动力锂电池退役量超过 20 万 t,市场规模达到 175 亿元,预计到

收稿日期:2020-11-19

基金项目:矿冶科技集团重大科研基金项目(JTZD 0130-1904)

Fund: Supported by BGRIMM Group Major Scientific Research Project(JTZD 0130-1904)

作者简介:周宏喜(1985—),高级工程师,硕士,从事废旧电池回收处理工艺与装备研究。

引用格式:周宏喜,卢世杰,魏红港,等.废旧动力电池破碎料涡流分选试验研究[J].有色金属工程,2021,11(5):66-72.

ZHOU Hongxi, LU Shijie, WEI Honggang, et al. Experimental Study on Eddy Current Separation of Spent Traction Battery Broken Materials[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(5): 66-72.

2030 年,市场规模将超过千亿元^[1-2]。

动力电池主要由外壳、正极片、负极片、电解液和隔膜组成,正极片由铝箔和其上粘附的正极材料构成,负极片由铜箔和其上粘附的负极材料构成,这些材料中含有大量的有价金属,不同的正极材料所含的有价金属成分不同,其中经济价值最高的是钴、锂、镍等金属。如三元类电池中锂平均含量为 1.9%、镍 12.1%、钴 2.3%;此外,铜和铝的占比也达到 13.3% 和 12.7%,它们的含量甚至远高于原生矿石中的含量,极具回收价值。此外,大量废旧动力电池退役后直接填埋或者堆存处理,不仅占用土地资源而且钴、锂、镍等重金属渗透到土壤中会造成土壤和水资源的严重污染,严重威胁环境和人类的健康,给社会生态环境造成巨大的压力。因此,进行废旧动力电池回收处理,实现钴、锂等稀缺矿产资源的绿色循环利用,具有较大的经济价值和社会价值。

动力电池回收利用常用的方法有火法、湿法和机械物理回收法,三种处理方法都有必要将电池中的绝缘塑料、隔膜等非金属预先去除,既可以降低黑粉中的杂质含量,提高有价金属物的纯度,又可以降低塑料、隔膜在高温热解时产生二噁英的概率,降低尾气的处理难度和成本。

涡流分选技术是用于固体废弃物中有色金属回收工艺的核心技术之一,主要是根据物质导电率的不同将有色金属从固废破碎料中分离出来,被广泛应用于废杂金属的分离回收领域。

1 涡流分选原理

涡流分选原理是基于两个重要的物理现象:一个随时间而变的交变磁场总是伴生一个交变的电场(即电磁感应定律)和载流导体产生磁场(即毕奥—萨伐尔定律)。如图 1 所示,有色金属导体在物料输送皮带的静摩擦力 f 的作用下运动,当其进入高速旋转的 N-S 极交替磁系所形成的交变磁场区域时,导体磁通量发生变化,使导体内部产生闭合环形感应电流,即涡流。涡流又在导体内激发出相应的磁场,并与旋转磁系产生的磁场方向相反,使磁系与有色金属导体之间产生排斥力 F (洛仑兹力),使金属从料流中分离出来,达到分选的目的^[3-7]。

以质地均匀的圆形有色金属片为例,在旋转磁场中不考虑转矩作用引起的自旋转时的排斥力 F 可以表示为:

$$F = \frac{kB^2(\omega R - v)\sigma VS^2}{16\pi^3 R^3 (\sec\theta - 1)^2} \quad (1)$$

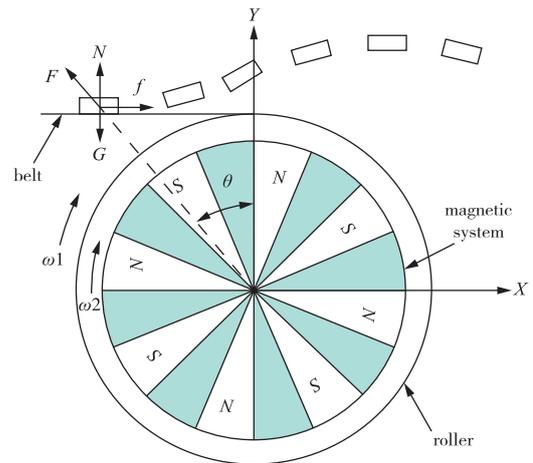


图 1 涡流分选原理图

Fig. 1 Working principle of eddy current separation

式中: B —磁场强度, A/m ; k —磁极对数; R —磁筒半径, m ; ω —磁筒转速, rad/s ; v —输送皮带速度, m/s ; V —物料体积, m^3 ; S —物料截面积, m^2 ; σ —导电率, $A/(V \cdot m)$; θ —物料位置角度, rad 。

有色金属导体随皮带继续沿滚筒旋转方向运动,其与磁系的距离越近,位置点的磁场强度越大,导体所受的排斥力 F 逐渐增大,弹力 N 和静摩擦力 f 逐渐减小,当导体所受的排斥力 F 在竖直方向分量等于其重力 G 的瞬间,导体被弹射出,不同物料由于导电率的不同,弹射点和弹射路径都不相同,从而实现不同导电率物料的分选。

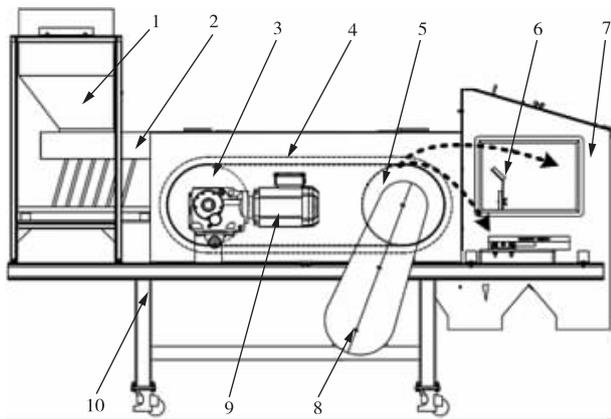
2 涡流分选试验

试验原料为三元方形铝壳电池电芯破碎料,包括铝外壳、正极片、负极片、电解液、白色隔膜和硬质塑料,为了降低电解液挥发物对人员的伤害,分选试验前对破碎料干燥处理;为避免物料堵塞,人工剔除大尺寸铝壳。破碎料中的非金属物主要是隔膜和硬质塑料,非金属物一旦进入后面的高温热解作业中被高温炭化成气体有机物,甚至产生二噁英,大大增加了尾气的处理难度和处理成本,甚至导致尾气不达标;此外非金属经高温炭化后变成灰分,增大金属物中杂质含量,降低有价金属的纯度,有必要在高温热解之前的工序中预先分离,涡流分选试验前已采用气流分选技术预先分选出大部分隔膜。

2.1 试验系统

采用一台自主研发的 ECS 型涡流分选机进行正负极片与硬质塑料,正极片和负极片间的分选试验。涡流分选机的结构如图 2 所示,主要由振

动给料机、物料输送皮带、分选磁筒及相应的驱动装置、机架等构成。物料经左上端的给料斗进入振动给料机中,给料机通过电磁振动使得物料均匀散落在输送带上,物料进入涡流分选区后因所受的涡流排斥力不同,弹射点和弹射路径都不相同,从而实现不同导电率材料的分离。排料端设计有两个出料口,靠近磁筒的近端出口收集非金属物或比导电率低的金属物,远端出口收集金属物或比导电率高的金属物。



1—feeding box; 2—vibrator feeder; 3—steering cylinder;
4—belt; 5—sorting roller; 6—regulating board; 7—receiving hopper;
8—magnetic drum driver; 9—belt driver; 10—base frame

图 2 同心皮带式涡流分选机

Fig. 2 Concentric belt eddy current separator

2.2 金属与非金属分选试验

影响涡流分选试验效果的因素有设备因素和分选物料的因素,设备因素包括输送带带速,分选磁筒转速、宽度,磁系内部结构及表面场强,分矿板位置等;物料因素有大小、形状及比导电率等。本文主要探索输送带带速、磁筒转速、分矿板位置、物料大小、形状等可调设备和工艺参数对分选效果的影响规律,为大型设备选型及工业化生产线中工艺流程和参数确定提供参考依据。

试验前对物料输送皮带带速进行探索试验,当皮带速度较大时,金属与非金属的抛射距离都增大,导致非金属物进入金属分离区,分选效果变差,皮带速度过低时金属物容易落在非金属分离区,试验期间输送带维持在 $10\text{ Hz}@0.6\text{ m/s}$ 左右。分别在 $+19-37\text{ mm}$ 、 $+9.5-19\text{ mm}$ 和 -9.5 mm 三种不同粒度下考察不同磁筒转速 ($50\text{ Hz}@3\ 500\text{ r/min}$) 和分矿板与磁筒间距下的分选效果。

1) $+19-37\text{ mm}$ 物料分选试验

$+19-37\text{ mm}$ 物料中的非金属主要是透明塑

料片及少量隔膜,金属物为正极片(铝箔及粘附的正极材料)和负极片(铜箔及粘附的负极材料)。当分矿板与磁筒表面间距减小至 12 mm 时,金属物的回收率高达 91.3% ,但是非金属的回收率仅有 57.3% ,即 43% 的非金属进入金属分离区中,间距太小时非金属物无法进入非金属分离区,导致金属中夹杂过多的非金属,见图 3。



图 3 $+19-37\text{ mm}$ 物料分选后的非金属物

Fig. 3 $+19-37\text{ mm}$ non-metallic products after eddy current separation

如图 4 所示,试验结果表明,在磁筒转速 $35\text{ Hz}@2\ 450\text{ r/min}$,分矿板与磁筒表面间距 23 mm 条件下,金属物回收率最高,达 84.9% ,非金属物回收率为 85.2% ,金属和非金属回收率的均值最大,达 85.0% ,分选效果最好。

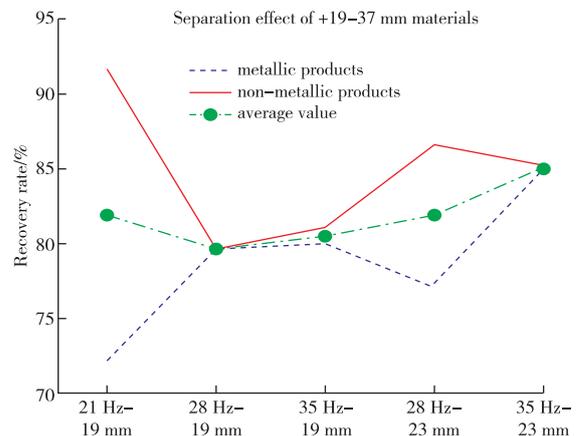


图 4 $+19-37\text{ mm}$ 物料分选结果

Fig. 4 Separation effect of $+19-37\text{ mm}$ materials

2) $+9.5-19\text{ mm}$ 物料分选试验

如图 5 所示, $+9.5-19\text{ mm}$ 物料中的非金属主要是黑色塑料条,金属物为正极片和负极片。当分矿板与磁筒表面间距增大至 15 mm 时,小块金属弹跳高度不足以翻越分矿板而进入非金属分离区,间距太小也会导致非金属物进入金属分离区,导致分选效果差。



图 5 +9.5-19 mm 物料分选后产品

Fig. 5 +9.5-19 mm products after eddy current separation

如图 6 所示,试验结果表明,在磁筒转速 42 Hz @2 940 r/min,分矿板与磁筒表面间距 12 mm 条件下,金属物回收率最高达 81.7%,非金属物回收率为 94.0%,金属和非金属回收率均值为 87.9%,比磁筒转速 35 Hz@2450 r/min 条件下的回收率均值低 0.4 个百分点,分选效果最好。对分选后的非金属物混合料进行二次分选,分选后金属回收率合计达 94.7%,显著减少了金属物的损失。

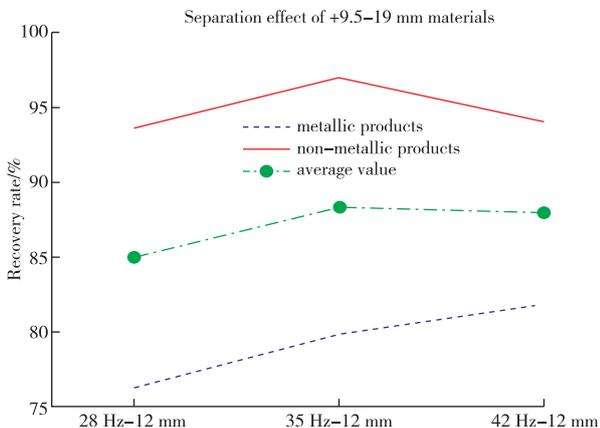


图 6 +9.5-19 mm 物料分选结果

Fig. 6 Separation effect of +9.5-19 mm materials

3) +1-9.5 mm 物料分选试验

如图 7 所示,试验前对 +1-9.5 mm 物料进行粒度筛析,其中 -1 mm 物料中几乎没有非金属,主要对 +1-9.5 mm 物料进行分选试验,物料中的非金属主要是黑色绝缘塑料条和少量隔膜,金属物为正极片和负极片。当分矿板与磁筒表面间距增大至 10 mm 时,小块金属弹跳高度不足以翻越分矿板而进入非金属分离区,间距太小也会使非金属物进入金属分离区,导致分选效果差。



图 7 +1-9.5 mm 物料分选后的非金属物

Fig. 7 +1-9.5 mm non-metallic products after eddy current separation

如图 8 所示,试验结果表明,在磁筒转速 35 Hz@2 450 r/min,分矿板与磁筒表面间距 5 mm 条件下,金属物回收率最高达 80.2%,非金属物回收率为 88.9%,金属和非金属回收率的均值最大,达 84.6%,分选效果最好,对分选后的非金属物进行二次分选,分选后金属回收率合计达 90.8%,显著减少了金属物的损失。

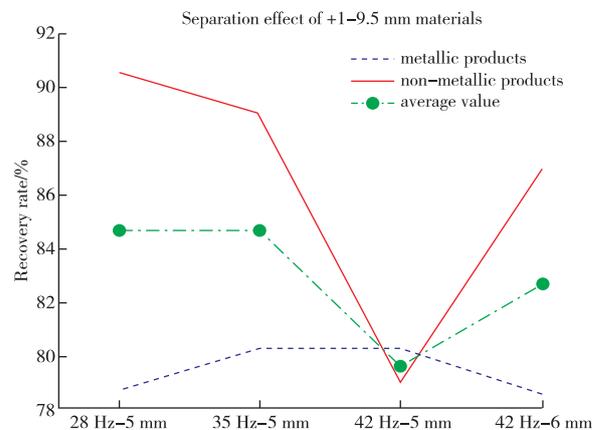


图 8 +1-9.5 mm 物料分选结果

Fig. 8 Separation effect of +1-9.5 mm materials

上述试验表明,不同粒度物料需要的分选参数各不相同,分选磁筒转速介于 2 450~2 940 r/min,

分矿板与磁筒表面间距适中,分选物料粒度越大、粒级分布越窄越有利于金属和非金属间的分选,金属物的回收率越高。

4) 理想形态下(片状)物料分选试验

根据涡流分选原理和关键因素分析可知,入料平

展且有一定的表面积下分离效率较高,电池破碎料形状复杂,有球团状、条状、折叠等,多个方向的排斥力相互抵消而削弱。为了探索物料形状对分选效果的影响,选取一定量的破碎料,人工展平后裁剪成不同尺寸的物料,如图 9 所示,分选试验结果如表 1 所示。



图 9 理想形态下的物料

Fig. 9 Materials in the ideal form before sorting

表 1 理想形态下物料分选试验结果

Table 1 Separation effect of materials in the ideal form

	7 Hz	21 Hz	35 Hz	/%
Magnetic roller speed	7 Hz	21 Hz	35 Hz	
Metal recovery rate in metal separation zone	68.9	90.4	96.9	
Non-metallic recovery rate in non-metallic separation zone	72.8	100.0	100.0	
Average value	70.9	95.2	98.5	

试验结果表明,在磁筒转速 35 Hz@2 450 r/min,分矿板与磁筒表面间距 12 mm 条件下,金属物回收率最高达 96.9%,非金属物回收率为 100%,金属和非金属回收率的均值最大达 98.5%,分选效果最好。非金属回收区中既有正极片又有负极片,形状既有圆形又有方形,混杂的金属物具有表面积小的共同点($<1 \text{ cm}^2$)。

综合对比可知,理想形态下金属和非金属物的回收率均高于前述几组试验近 10 个百分点,涡流分选前对物料进行压平处理,增大分选物料的粒度,使物料粒度相近,都有利于提高金属和非金属物的分选效率。

2.3 正极片和负极片的分选试验

正极片上粘附的正极材料如锰酸锂、钴酸锂、磷酸铁锂及三元材料等是主要回收对象,负极材料暂不具备回收价值。正负极片一同进入细碎脱粉作业中不仅增加设备处理能力,而且在后续工序中需对铜、铝再次分离,铜箔和石墨等负极材料进入黑粉后

降低黑粉的纯度,增加冶金处理成本。利用铜铝间比导电率差异,尝试采用涡流分选技术进行分离。多次探索试验发现,负极片的弹跳点位置相对于正极片更为提前,之后将分矿板前端设置在负极片弹跳后且正极片弹跳前,且分矿板前沿呈水平布置,如图 10 所示。分选过程中负极片从分矿板的前端弹

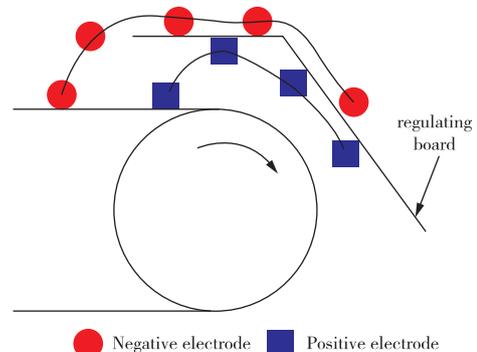


图 10 基于弹射点位置不同的正极片和负极片分选示意图
Fig. 10 Sorting schematic diagram of positive electrode and negative electrode plates based on different ejection point

跳进入分矿板上部,被分矿板导入涡流分选机的远端出料口;正极片在分矿板后端弹射,与分矿板碰撞后改变运动轨迹,进入近端出料口。

分选试验前对+19-37 mm物料进行压平处理,试验结果表明,在磁筒转速35 Hz@2 450 r/min,分矿板与磁筒表面间距23 mm条件下,分选后正极片回收率达92.3%,负极片的回收率为77.1%。对分选后的负极片混合料进行二次分选,分选后正极片的回收率合计达96.8%,显著减少了正极片的损失,分选后的物料如图11所示。



图11 分选后的正极片和负极片

Fig. 11 Positive electrode and negative electrode plates after sorting

综上所述,采用涡流分选技术可以实现正极片和负极片的有效分离,分选前需将物料压平处理,分选物料的形状和大小越相近,越有利于提高正负极片间分选效果。

3 结论

废旧动力电池即将进入退役高峰期,电池中含有大量有价稀缺重金属具有较大的经济价值,回收再利用有助于缓解我国对国外矿产资源的过度依赖问题,而且可以解决废旧动力电池退役后造成的环境污染问题,进而实现新能源行业的绿色良性循环,为国民经济的可持续发展提供战略保障。涡流分选技术适合于正负极片与硬质塑料,正极片和负极片的分选、分选效果与物料的形状、大小以及分选机磁筒转速、分矿板间距及位置有关,试验结果表明:

1)物料大小对分选效果影响较大,尽可能增大分选物料的粒度,且物料的粒度分布越窄越利于提高正负极片与硬质塑料的分选效率,物料粒度宜大于10 mm。

2)理想形态(片状)下正负极片与硬质塑料的分选回收率比破碎后原始形态(球团状、条状、折叠等)高10个百分点,因此在涡流分选前对物料压平处理可显著提高分选效率。

3)利用正极片和负极片比导电率差异及弹跳位置不同,涡流分选技术实现了二者分离,理想形态下一次分选后正极片回收率达92.3%。进行正极片和负极片的预先分离有助于提高黑粉的纯度,降低黑粉中杂质含量。

参考文献:

- [1] 卫寿平,孙杰,周添,等.废旧锂离子电池中金属材料回收技术研究进展[J].储能科学与技术,2017,6(6):1196-1207.
WEI Shouping, SUN Jie, ZHOU Tian, et al. Research development of metals recovery from spent lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017,6(6):1196-1207.
- [2] 王芳,张邦胜,刘贵清,等.废旧动力电池资源再生利用技术进展[J].中国资源综合利用,2018,36(10):106-111.
WANG Fang, ZHANG Bangsheng, LIU Guiqing, et al. Progress in recycling technology of waste power battery resources[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018,36(10):106-111.

- [3] 魏红港,冉红想,王晓明. 固废破碎料涡流分选过程中有色金属弹射角影响因素分析[J]. 矿山机械, 2020, 48(5):55-59.
WEI Honggang, RAN Hongxiang, WANG Xiaoming. Analysis of factors affecting ejection angle in of non-ferrous metals in the process of eddy current separation of solid waste[J]. Mining & Processing Equipment, 2020, 48(5):55-59.
- [4] 魏红港,冉红想. 回收废旧有色金属涡流分选机研制及导体弹射轨迹研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(3):114-118,125.
WEI Honggang, RAN Hongxiang. Development of eddy current separator for recycling waste non-ferrous metal and study on the conductor ejection trajectory[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(3):114-118,125.
- [5] 王全强,段晨龙,张洪建. 涡流操作参数对铝分选影响的研究[J]. 中国资源综合利用, 2005, 23(12):22-25.
WANG Quanqiang, DUAN Chenlong, ZHANG Hongjian. Research on separation result of electronic scrap by eddy current separator[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2005, 23(12):22-25.
- [6] 柏宇轩. 废旧磷酸铁锂电池破碎产物的涡流分选研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2018.
BAI Yuxuan. Study on eddy current separation of broken products from waste ferric phosphate lithium battery [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [7] 李成,汪小凯,章振原,等. 基于深度残差网络的有色金属破碎料视觉识别方法[J]. 有色金属工程, 2019, 9(8):127-134.
LI Cheng, WANG Xiaokai, ZHANG Zhenyuan, et al. Visual recognition method for nonferrous metal crushed aggregates based on deep residual network[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(8):127-134.