

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.05.004

细粉物料干式磁选机的国内发展现状

孟祥志¹, 胡旭², 王佳强², 李艳军³, 李文博³

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819;

2. 鞍钢集团矿业有限公司 东鞍山烧结厂生产部, 辽宁 鞍山 114001;

3. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819)

摘要:与湿式磁选相比,干式磁选具有节省水资源、选矿流程短、设备投资少、占地面积少、选矿成本低等优势。我国的铁矿资源品位越来越低、嵌布粒度细,亟需开发细粒级物料干式磁选机。根据现有各种型式干式磁选机的结构和工作原理将其分为磁重联合干式磁选机、直接给料风重磁联合干选机、风力送料干式磁选机等。磁重联合干式磁选机主要有固定磁系筒型干式磁选机、干式对辊强磁选机、带式旋转磁场干式磁选机、双环形移动磁系干式磁选机、干法强磁板式磁选机、干法筛式强磁选机、振动高梯度干式磁选机等典型型式。直接给料风重磁联合干选机主要有风力滚筒干式磁选机、风力带式干法磁选机、筒式流态化干式磁选机、三级干式永磁筒式磁选机、风磁耦合干式磁选机、干式风力磁选机、风重磁联合力场磁选机等典型型式。风力送料干式磁选机主要有风力送料板式磁选机、新型干式风磁联合磁选机、干式风力永磁精选矿机、风力给料干式永磁磁选机等型式。对以上20余种干式磁选机的结构、磁选原理、特点、适用范围等进行了介绍,并对各类干式磁选机的优势和劣势进行了分析。

关键词:干式磁选;磁选机理;结构特点;细粉物料

中图分类号:TD457

文献标志码:A

文章编号:1671-9492(2024)05-0034-12

Domestic Development Status of Dry Magnetic Separator for Fine Powder Materials

MENG Xiangzhi¹, HU Xu², WANG Jiaqiang², LI Yanjun³, LI Wenbo³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Production Department of Dong'anshan Sintering Plant, Angang Group Mining Co., Ltd.,
Anshan 114001, Liaoning, China;

3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Compared with wet magnetic separation, dry magnetic separation has the advantages of saving water resources, short beneficiation process, less equipment investment, less floor space and low beneficiation cost. The grade of iron ore resources in China is getting lower and lower, and the dispersed grain size is fine, so it is urgent to develop dry magnetic separator for fine-grained materials. According to the structure and working principle of various types of dry magnetic separators, they are divided into several types, such as magnetic-gravity combined dry magnetic separator, direct feeding wind-gravity-magnetic combined dry magnetic separator, wind feeding dry magnetic separator and so on. Magnetic-gravity combined dry magnetic separators mainly include fixed magnetic system barrel dry magnetic separator, double roll high intensity dry magnetic separator, belt rotating magnetic field dry magnetic separator, double ring moving magnetic system dry magnetic separator, dry high intensity magnetic plate separator, dry screen high intensity magnetic separator, vibrating high gradient dry magnetic separator and other typical types. Direct feeding wind-gravity-magnetic combined dry separator mainly includes wind drum dry magnetic separator, wind belt dry magnetic separator, cylinder fluidized dry magnetic separator,

收稿日期:2023-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974068);辽宁省优秀青年基金资助项目(2022-YQ-10)

作者简介:孟祥志(1972—),男,安徽萧县人,博士,副教授,主要从事选矿装备研究。

通信作者:李艳军(1971—),男,内蒙古赤峰人,博士,教授,主要从事铁矿石选矿技术及工艺、流态化焙烧技术与装备研究。

three-stage dry permanent magnet cylinder magnetic separator, wind-magnetic coupling dry magnetic separator, dry wind-magnetic separator, wind-gravity-magnetic combined force field magnetic separator and other typical types. Wind feeding dry magnetic separator mainly includes wind feeding plate magnetic separator, new dry wind-magnetic combined magnetic separator, dry wind permanent magnet concentrator, wind feeding dry permanent magnet magnetic separator and other types. The structure, magnetic separation principle, characteristics and application scope of more than 20 kinds of dry magnetic separators are introduced, and the advantages and disadvantages of various dry magnetic separators are analyzed.

Key words: dry magnetic separation; magnetic separation mechanism; structural characteristics; fine powder material

磁选是利用物料的磁性差异进行选择分离的选别方法,分为湿式磁选和干式磁选。目前,在选矿企业中,湿式磁选仍然占据主导地位,干式磁选应用相对较少。究其原因,干式磁选尚存在精矿品位低、单位处理量小等缺陷。湿式磁选生产工艺复杂,设备投资大,需要大量的水,排放的废水会对环境造成严重污染,需投巨资建设尾矿库,尾矿库具有潜在的安全风险。干式磁选过程中不需要水,省去了脱水环节,因而具有节省水资源、选矿流程短、设备投资少、占地面积少、选矿成本低等优势^[1-2],且尾矿砂可进行全组分利用,极具研究和发展前景。

随着铁矿资源的开采利用,我国铁矿资源的原矿品位越来越低,铁矿物的嵌布粒度微细,磨矿粒度越来越细,进入磁选流程的粉矿粒度由几百微米下降为几十至几微米。研究开发细粉物料干式磁选机已逐渐成为业界的热点。目前已有的细粒级物料干式磁选机按照其工作原理,主要分为磁重联合干式磁选机、直接给料风重磁联合干选机、风力送料干式磁选机等几大类,本文分别对这几类干式磁选机的结构特点、磁选原理等进行了综述并分析了各类磁选机的优缺点。

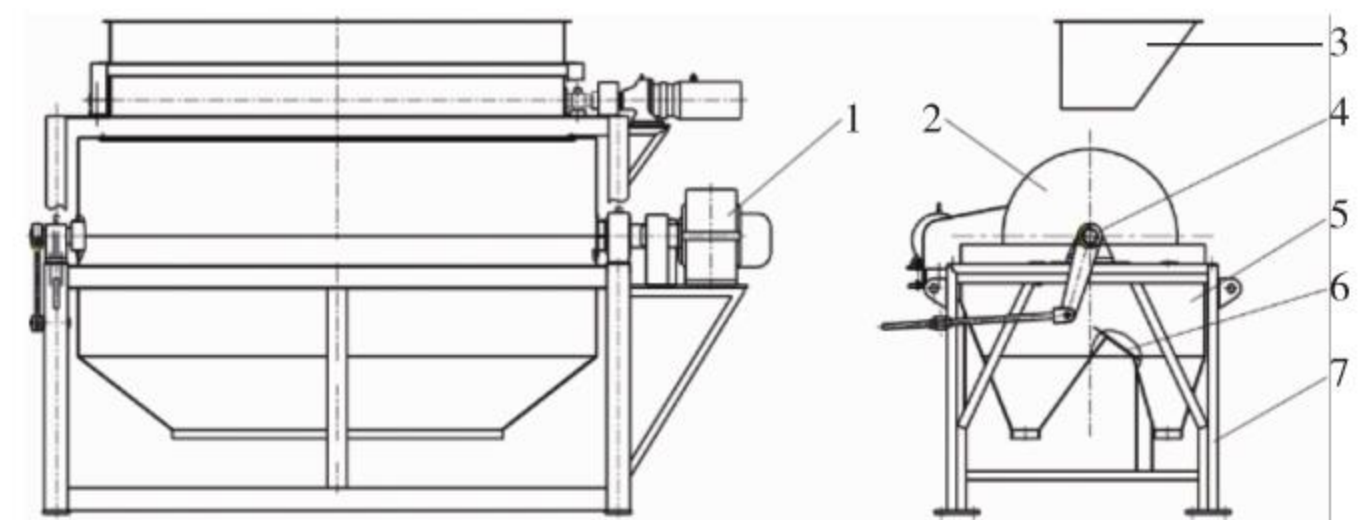
1 磁重联合干式磁选机

1.1 固定磁系筒型粉矿干式磁选机

1) CTG 型粉矿干式强磁选机

CTG 型磁选机的核心部件是磁滚筒,磁滚筒由旋转的筒体与筒体内固定的扇形磁极组成,扇形磁极一般由永磁块按 N-S 极交替排列布置而成。工作时,用振动布矿机将待选矿料直接给到磁滚筒表面,磁性物料受磁力吸引被吸附到滚筒表面并随着滚筒的转动被送到磁场区以外,然后掉落至精矿槽中;非磁性物料不受磁力随着滚筒的转动在重力和离心力作用下被抛落到尾矿槽中,从而实现物料

的分选。图 1 为 CTG-1030 型干式永磁磁选机的结构简图,该机采用大磁包角复合磁极组和多梯度挤压磁系结构,提高了筒体表面磁场强度,同时又增加了磁场作用深度^[3-4]。设备主要用于细碎后筛下细料的磁选,对矿物进行预富集,提高入选矿石的品位。



1—传动部件; 2—磁滚筒; 3—给料器; 4—调整部件;
5—尾矿槽; 6—分料挡板; 7—机架。

图 1 CTG-1030 型干式永磁磁选机

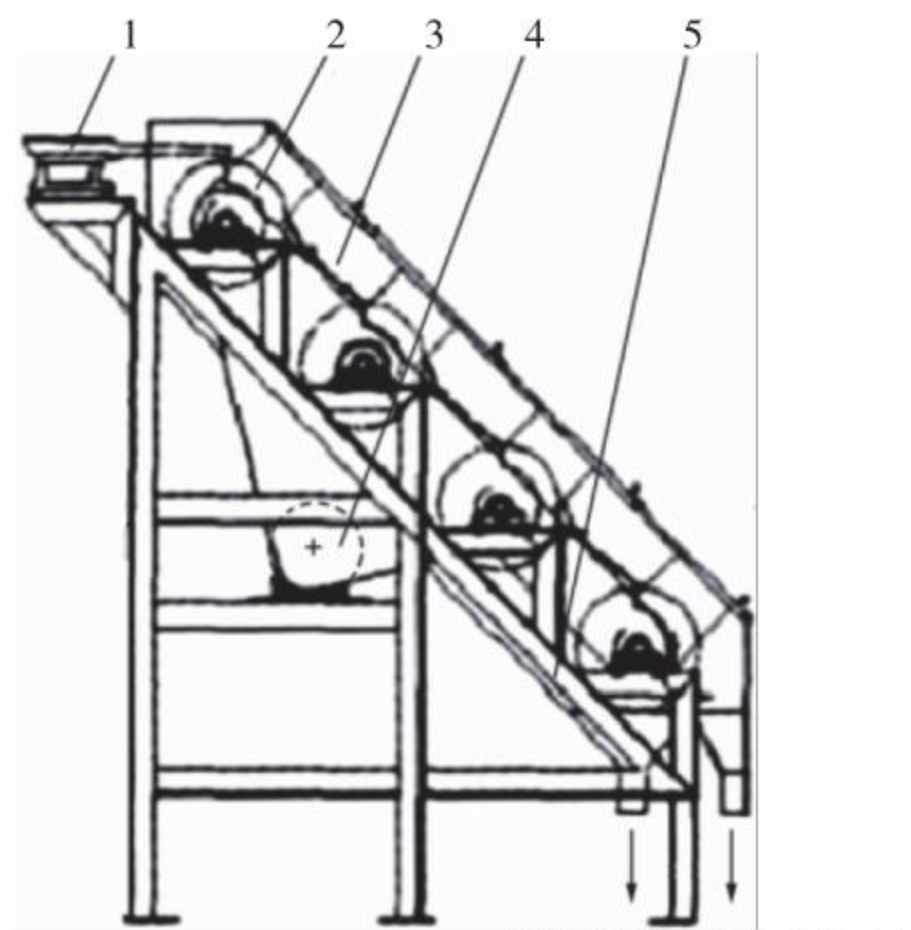
Fig. 1 CTG-1030 dry permanent magnet separator

2) 多筒干式强磁选机

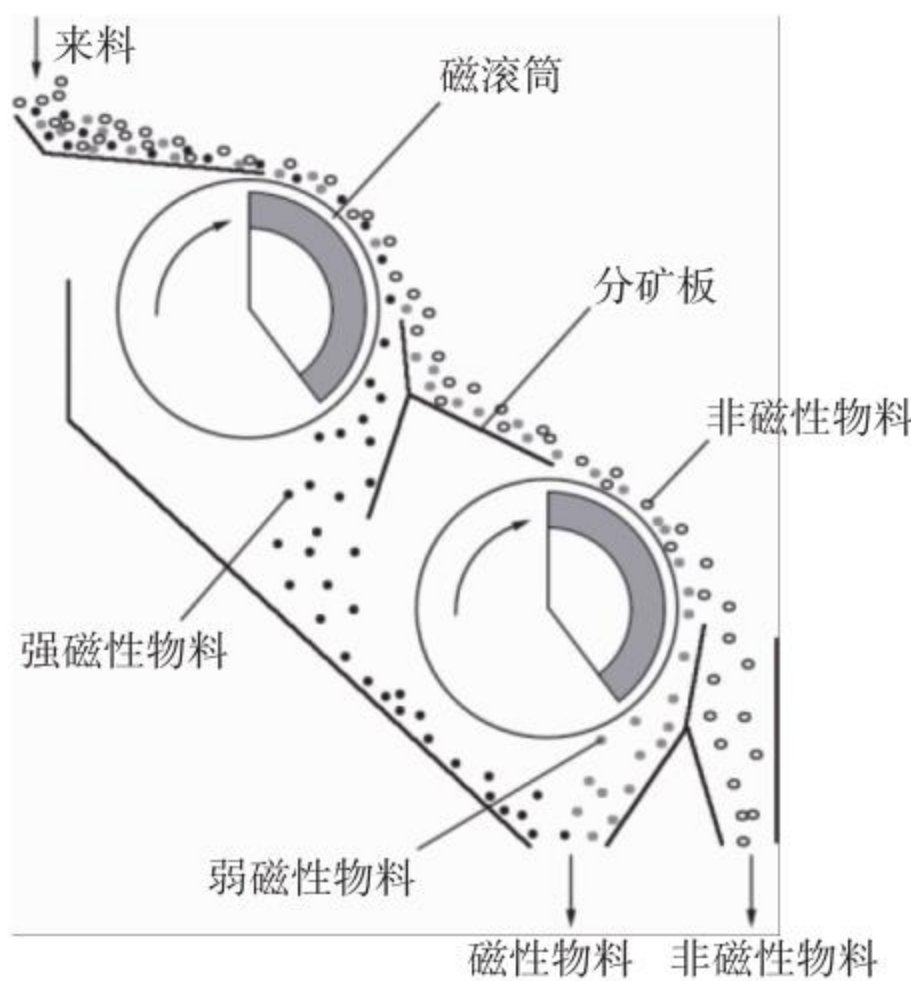
如图 2(a)所示,干式多筒强磁选机在同一台设备上由上至下布置多个磁滚筒,对物料进行连续分选,磁滚筒的数量可根据矿料性质和工艺要求改变。在非金属矿除铁与弱磁性矿物分选作业中一般采用 2~3 个磁滚筒,对于分选指标要求更高的磁选作业可采用 4~5 个磁滚筒^[1,5]。从上至下各磁筒的磁场强度一般是逐渐升高的,各磁滚筒的磁场强度可根据物料性质和分选要求设计。分选过程如图 2(b)所示,弱磁性颗粒的回收量可以通过调节分矿板的角度来控制,也可以作为一种产品单独分离出来。利用 RTGX 四筒型与 CTF 双筒型干式强磁选机对连云港某石榴石矿进行了联合磁选,经过选别后, +0.25、-0.25+0.15、-0.15 mm 三种级别的石榴石产品纯度分别达到 86%、92%、90%以上^[6]。设备既可用于细粒级非金属矿除铁、弱磁性矿物分选,也可用于细粒磁性矿的预选、精选、扫选等。

1.2 干式对辊强磁选机

干式对辊强磁选机是由两条相近的平行磁辊间隙构成闭合磁路而产生高磁场分选区的强磁选设备。设备的分选原理如图3所示,工作时,电磁辊产生磁场,辊面设计成齿形结构,有很强的聚磁作用,磁场梯度大,可在分选区内产生较高的磁场强度。随着电磁辊转动,非磁性物料直接通过分选区下落至尾矿槽中,磁性物料则吸附在电磁辊表面被带至非磁场区,最终被毛刷扫落,进入精矿槽^[7]。该设备可用于0~2 mm非金属矿细粉的分选,效果良好。设备特点:齿形辊面,磁场梯度大,磁场强度高,对细小铁磁物质吸附效果好;磁极两两相对形成闭合磁回路,背景磁场强度高。设备适用于细粒弱磁性矿的干法分选、非磁性干粉物料去除磁性杂质以及铁矿石干粉尾矿的扫选等。



(a)磁选机结构示意图



(b)分选过程示意图

1—振动给料器; 2—机架; 3—电机减速器; 4—磁筒; 5—箱体。

图2 多筒干式强磁选机

Fig. 2 Multi-cylinder dry high intensity magnetic separator

1.3 输送带式旋转磁场干式磁选机

这种磁选机的皮带滚筒内设计有独立旋转的磁系,磁系的磁极为N-S交替排列,形成交变磁场,磁

性料在这种交变磁场中会进行快速磁搅动和磁翻转,能够有效破坏磁团聚和磁性颗粒链,减少非磁性夹杂,提高精矿品位。磁选机的分选原理如图4所示,利用振动给料机将原矿给到运输带上,矿料随皮带移至磁滚筒上部,受磁场力的吸引作用,磁性较强的物料被吸附在皮带表面上继续随皮带运动;非磁性料不受磁场吸引力,在重力和离心力作用下被抛入尾矿槽,从而实现物料分离;吸附在皮带上的磁性矿料经过不断的快速磁极翻转,其中夹杂的废石及弱磁性物料被清除,直至脱离磁场区后,在重力和惯性力作用下落入精矿斗,黏附在皮带表面的少量精矿粉可通过旋转的毛刷或精矿刮板清除后也落入精矿斗。与常规磁选机相比,这类磁选机的磁系设计为整周,漏磁少,磁系的旋转方向可与外筒体的转向相同或相反;振动给料机可以实现矿料均匀分布在输送带上,并能控制料层厚度。设备具有磁场梯度大、分选作业深度大、选矿指标好等优点。CTX型粉矿干法磁选机^[8]、CTFG型^[9]、XCTG型^[10]、XGTF型干式磁选机^[11]等都属于这类磁选机。这类磁选机适用于细粒级磁性矿的预选抛尾、扫选及串联精选,也可用于非磁性矿除铁等。

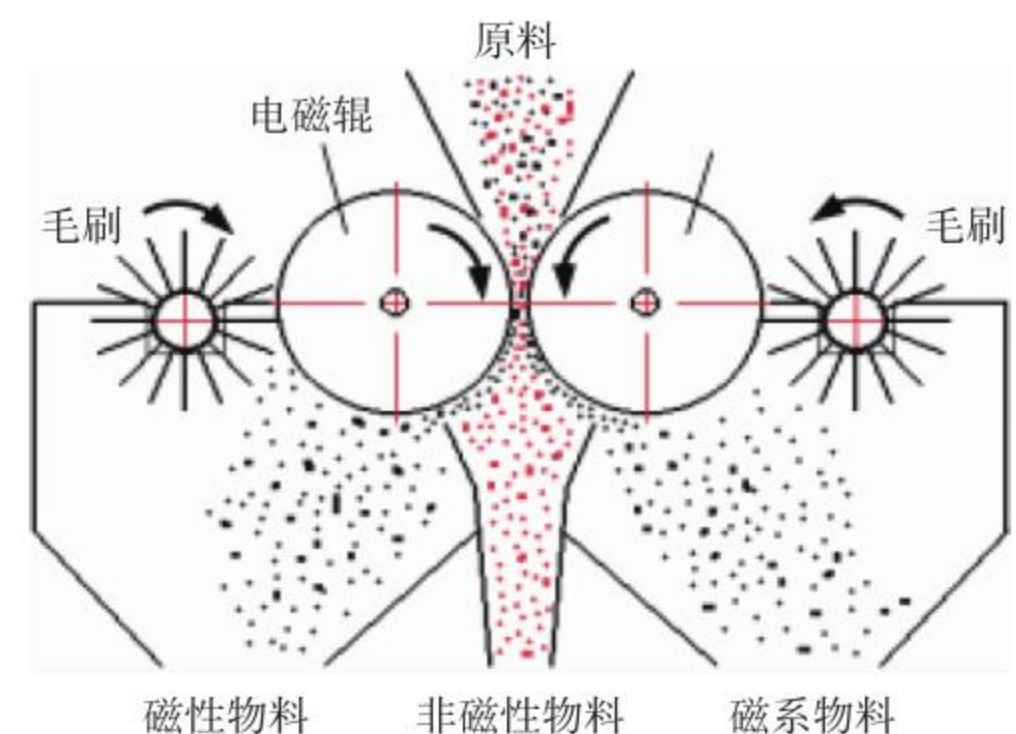
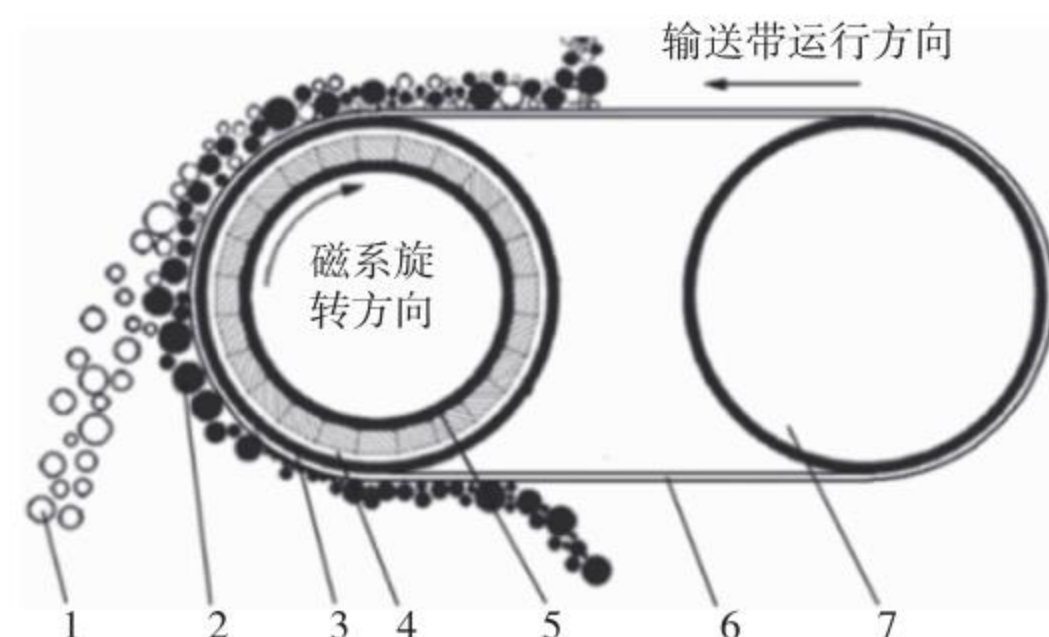


图3 干式对辊强磁选机分选原理

Fig. 3 Principle of dry double roll high intensity magnetic separator



1—尾矿; 2—磁性精矿; 3—外筒体; 4—整周磁系; 5—内筒体; 6—输送带; 7—驱动滚筒。

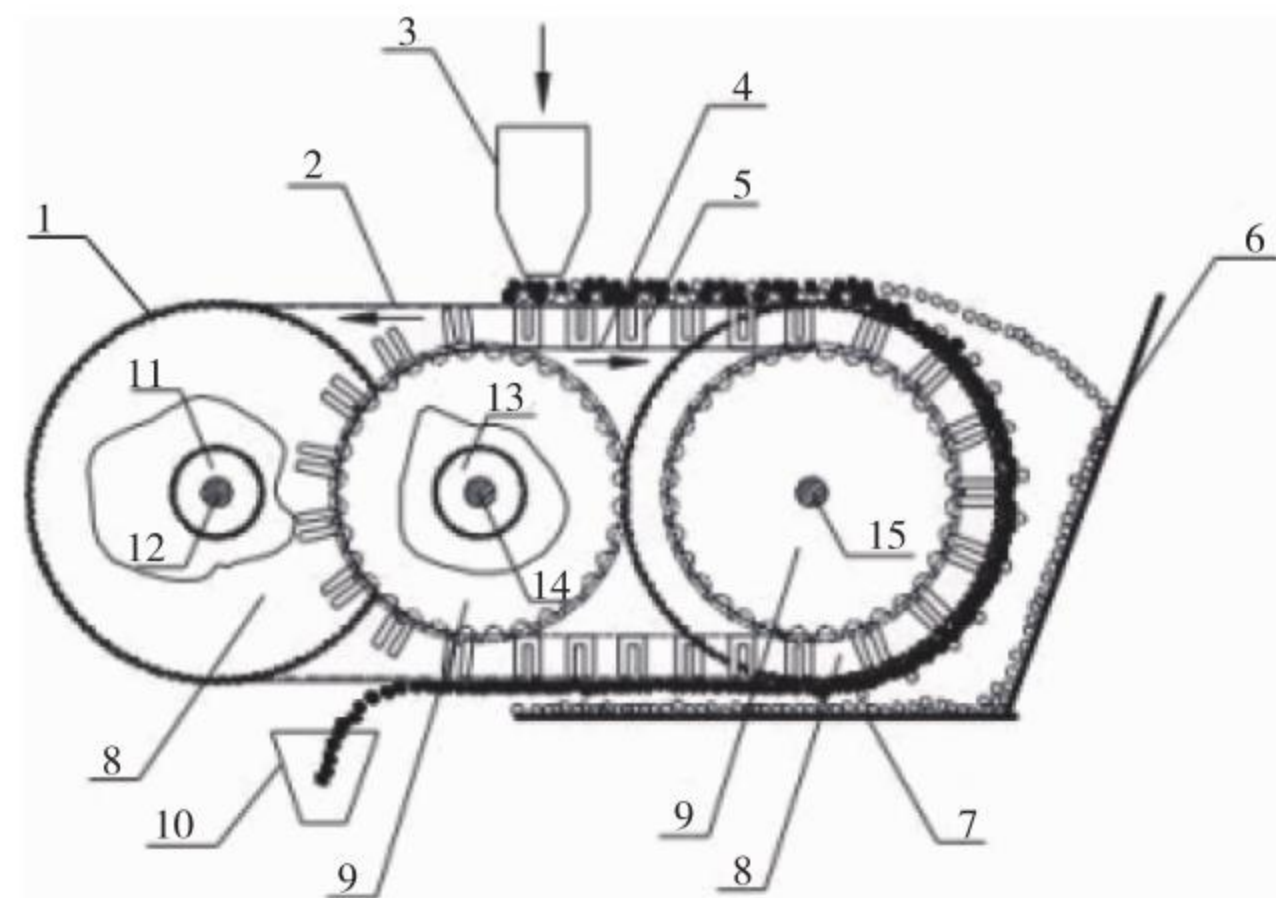
图4 带式旋转磁场磁选机原理

Fig. 4 Principle of belt rotating magnetic field separator

1.4 双环形移动磁系干式细粉料磁选机

该设备的环形原料分选输送带下边有一个横向运动的尾矿排料皮带,环形原料输送带内设计有独立运动的环形移动磁系。设备既能对磁性矿料进行预富集与精选,又能对非磁性矿料进行扫选,克服了细粉料因团聚力大而使分选指标差的缺陷。图5为设备的结构示意图,双环形移动磁系干选机将长距离环形移动磁系与脉石排料皮带立体交叉布置,与输送带反向移动的磁铁拖动皮带面上的粉料不断翻滚移动,从而实现磁性矿料分类富集、脉石抛尾及磁性料精选,这几个过程依次独立进行,分选过程中矿料不需要充分分散^[12]。该设备的分选区域大,单机处理量大;原料分选皮带的磨损较为严重。

磁选机的分选原理如图6所示,细粉矿料随着环形磁系的移动不断作翻滚运动,环形移动磁系不但是物料移动的动力源,还是分选过程的磁力源。根据矿料在环形磁选皮带上所处的不同位置,将磁选过程分为磁性矿富集、非磁性矿或弱磁性矿抛离磁系以及磁性矿精选三个阶段。磁选皮带按逆时针转动,而环形移动磁系的转向与之相反,总体上确保矿料沿顺时针运动。利用该设备对平均粒径30 μm、铁品位14.86%的钢渣粉进行了分选试验,获得了精矿铁品位32.21%和铁回收率90.30%的良好指标^[12]。该设备尤其适合从含有水化活性成分的细粉料中高效干选磁性物的场合。设备适用于细粒级磁性矿的磁选及非磁性矿除铁等。



1—分选输送带; 2—皮带链条; 3—给矿斗; 4—磁铁链条;
5—U型磁块盒; 6—挡板; 7—脉石排料皮带; 8—皮带链轮;
9—磁铁链轮; 10—磁性矿槽; 11—皮带传动链轮; 12—皮带链轮轴;
13—磁铁传动链轮; 14—磁铁链轮轴; 15—公共从动轴。

图5 双环形移动磁系干式磁选机

Fig. 5 Dry separator with double ring moving magnetic system

1.5 干法强磁板式磁选机

磁选机如图7所示,矿料输送带及磁系倾斜布置,利用振动给料机将待选矿料均匀给至输送带,干

矿直接落至物料输送带上层表面,由于强磁磁系对磁性物质的吸引力使得摩擦力大于重力沿输送带的分力,因此磁性物质能够被吸附于输送带表面并跟随输送带向尾部移动;而非磁性物质未受到强磁磁系的磁力作用,在重力的作用下,可使得非磁性物质较为快速自然地沿物料输送带下落,而干矿中的磁性物质被强磁磁系吸附于输送带表面并向尾部的方向输送。强磁磁系和物料输送带倾斜角度为35°~45°,便于物料滑落。通过驱动辊筒带动输送带转动,给到输送带上的物料通过强磁场区时被吸附至带面,随着输送带转动至卸料位置,通过卸料装置将磁性矿物汇集到精矿口,非磁性矿物通过自重自流到废料出口^[13]。设备主要用于-1 mm非金属矿的除铁干选,也可用于磁性矿尾矿扫选。

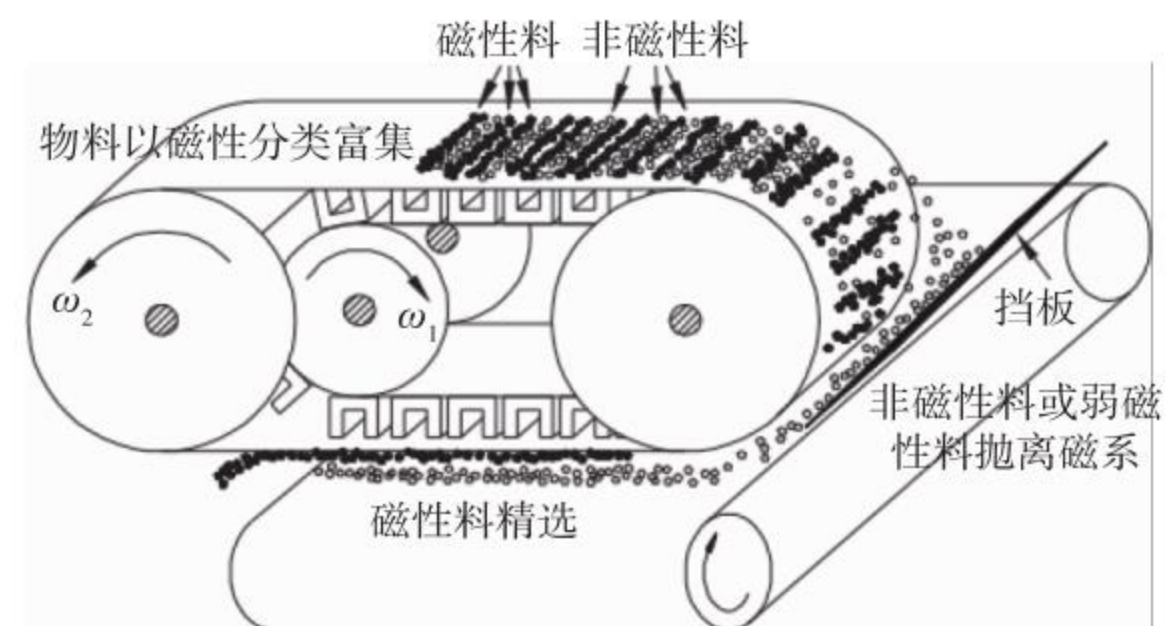
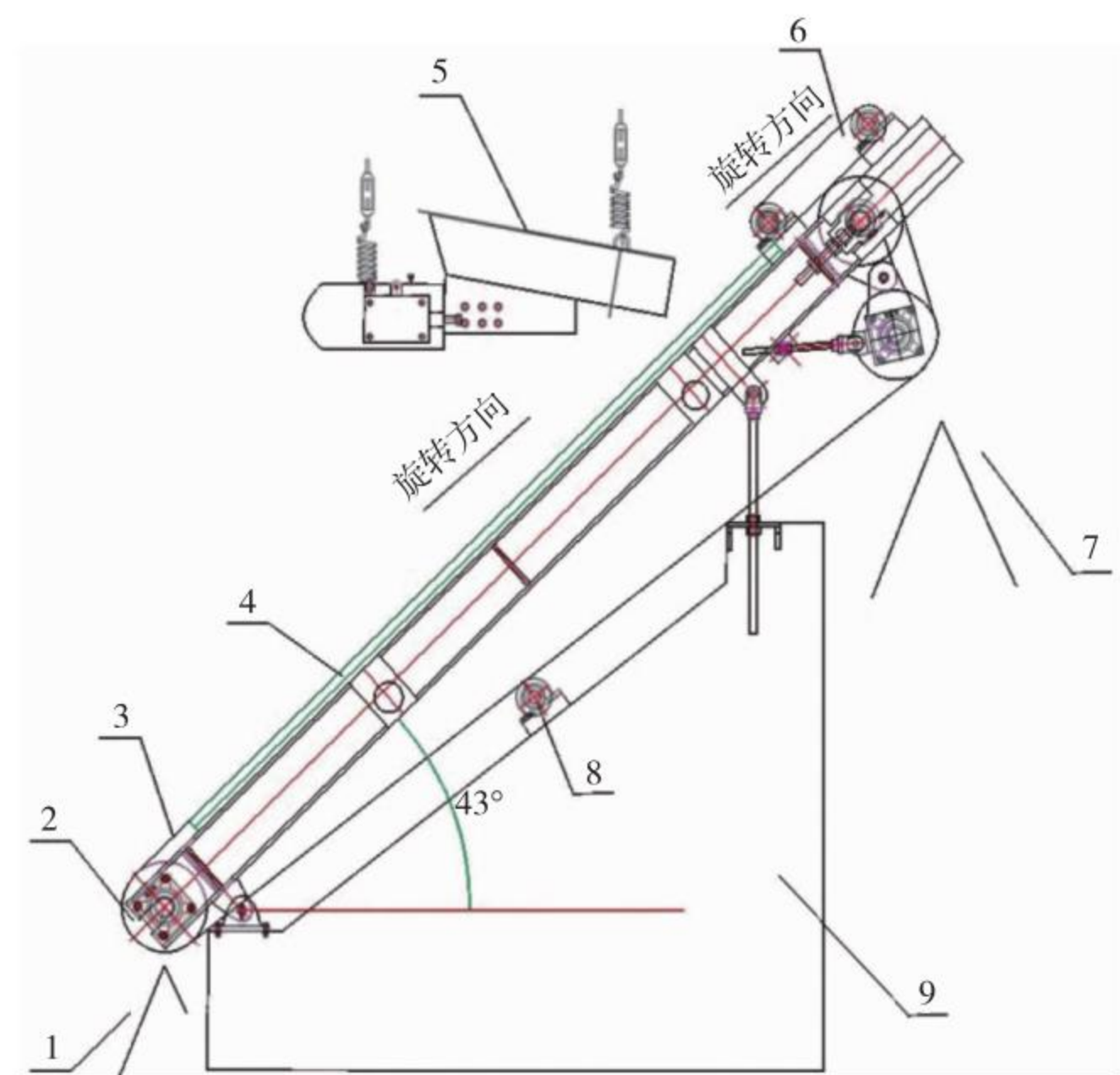


图6 双环形干式磁选机的原理

Fig. 6 Principle of DMS with double ring



1—废料口; 2—驱动辊筒; 3—输送带;
4—强磁磁系; 5—振动给料机; 6—卸料装置;
7—精矿口; 8—清扫辊; 9—机架。

图7 干式强磁板式磁选机

Fig. 7 Dry high intensity magnetic plate separator

1.6 干法筛式强磁选机

这种磁选机(图8)将转动筒体的内部作为磁选空间,将固定的向心磁系安装在筒体外部,并在转动筒体的内壁设置螺旋叶片,矿料可在螺旋叶片的作用

用下沿轴向流动,翻滚次数增多,磁选距离和时间显著延长,从而有效提高了磁性矿物的回收率并减少了非磁性夹杂。利用振动给料器将矿粉均匀给到回转筒内,进入回转筒体内的分选磁场。磁性矿料在磁场力的作用下被捕获并吸附到筒体内表面,并随筒体一起旋转,当磁性料被提升至顶部无磁区时,在重力作用下脱离筒体落入精矿槽,由螺旋输送机推送排出;非磁性与弱磁性矿料在回转筒内螺旋叶片推动下向前移动,并在轴向阶梯磁场的作用下,不断进行分选,直至进入尾矿槽^[14]。设备适用于铁矿石细碎后筛下产物入磨前的预选抛尾及尾矿扫选等。

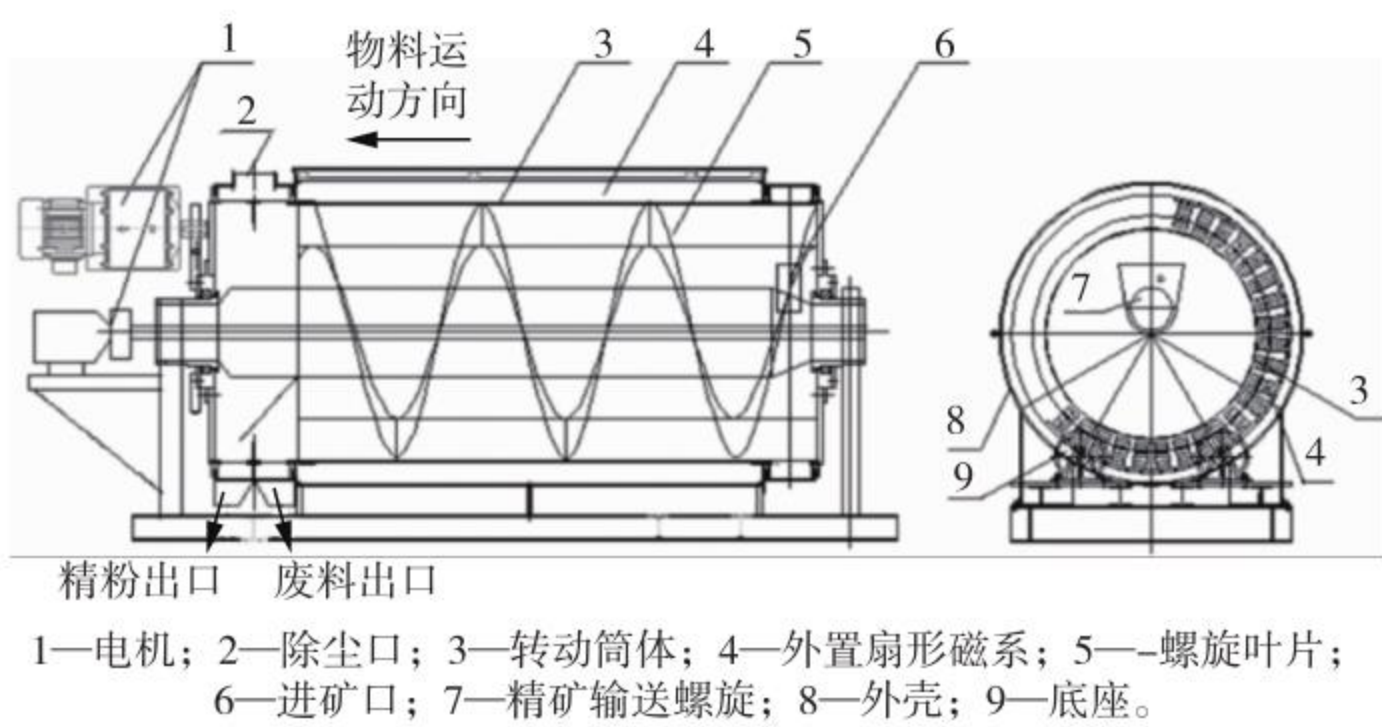


图8 干法筛式磁选机
Fig. 8 Dry sieve magnetic separator

1.7 振动高梯度干式磁选机

如图9所示,磁选机主要由励磁线圈、偏心机构、驱动电机、铁轭、板式热交换器、振动系统和机架等组成^[15]。其中,振动系统由磁介质、磁介质顶头、弹簧座和弹簧等构成。工作时,将磁介质盒的振动杆用螺栓固定在磁介质顶头上,用电机带动偏心机构产生偏心距,通过滚动轴承驱动磁介质顶头及弹簧,迫使磁介质盒做上下简谐振动。调整偏心机构的偏心距和电机变频器,可将磁介质盒的上下振动幅度控制在0~2 mm,振动次数0~2 820次/min。调节励磁电流以得到所需的磁场强度,磁介质在分选区内作上下简谐振动的同时被磁场磁化,表面产生高梯度磁场;将充分分散的干矿料沿着给矿斗中的导料条均匀给入分选腔中,给料中的磁性颗粒被吸附在磁介质表面,非磁性颗粒穿过磁介质堆排入尾矿槽。每周给矿完成后,关闭励磁电流,磁介质保持振动,将磁性矿物完全排出,即完成一个周期的选矿。分选腔内的磁介质由导磁不锈钢棒或导磁不锈钢板网制成,也可充填导磁不锈钢毛作为磁介质。当磁介质振动时,振动力使矿料在分选过程中始终保持松散,以减少非磁性物和连生体的夹杂,提高了磁选的分选选择性。此外,分选时振动还可以有效防止磁介质的堵塞。DVS型磁选机解决了现有干

式高梯度磁选机对细粒弱磁性矿物分选选择性差、物料易聚团堵塞磁介质和分选通道等缺点。设备适合于细粒非磁性矿除铁以及磁性矿的扫选。

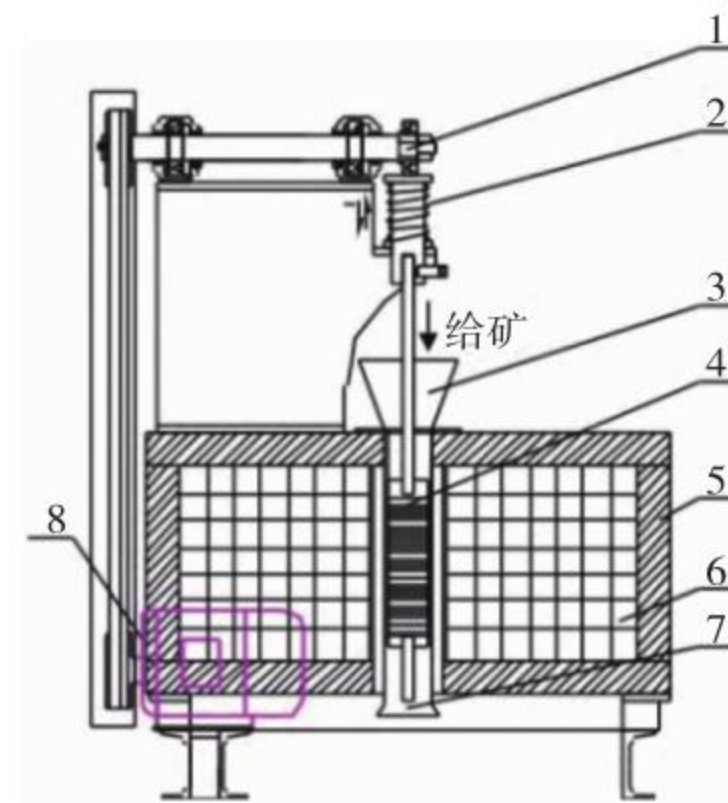


图9 DVS型振动高梯度干式磁选机
Fig. 9 DVS vibrating high gradient dry magnetic separator

2 直接给料风重磁联合干式磁选机

2.1 风力滚筒干式磁选机

风力滚筒干式磁选机由山东华特磁电科技研制^[16-17],可用于0~5 mm细粒级干物料的磁选,结构如图10所示。矿料从给矿口给至磁滚筒表面,磁性料被吸附在磁滚筒上并随之转动,转到离开磁场区后掉落到精矿槽中;非磁性料则在重力和风力的联合作用下直接掉落至尾矿槽中。在分选区内由进风管6吹入的风经喷口压缩后产生高压风,形成风刀结构,将滚筒表面的非磁性料吹起,降低了精矿中的夹杂。磁选机的磁系设计为多磁极、大包角、高磁场强度;可根据矿料性质调节筒体转速;具有压缩的高压风刀结构和风力补偿装置,可吹散物料破坏磁团聚;筒体表面有清料装置,可清除物料在筒体表面的残留。磁选机适用于0~5 mm粒级磁性矿的干式预选及磁性矿粉料的干式磁选。

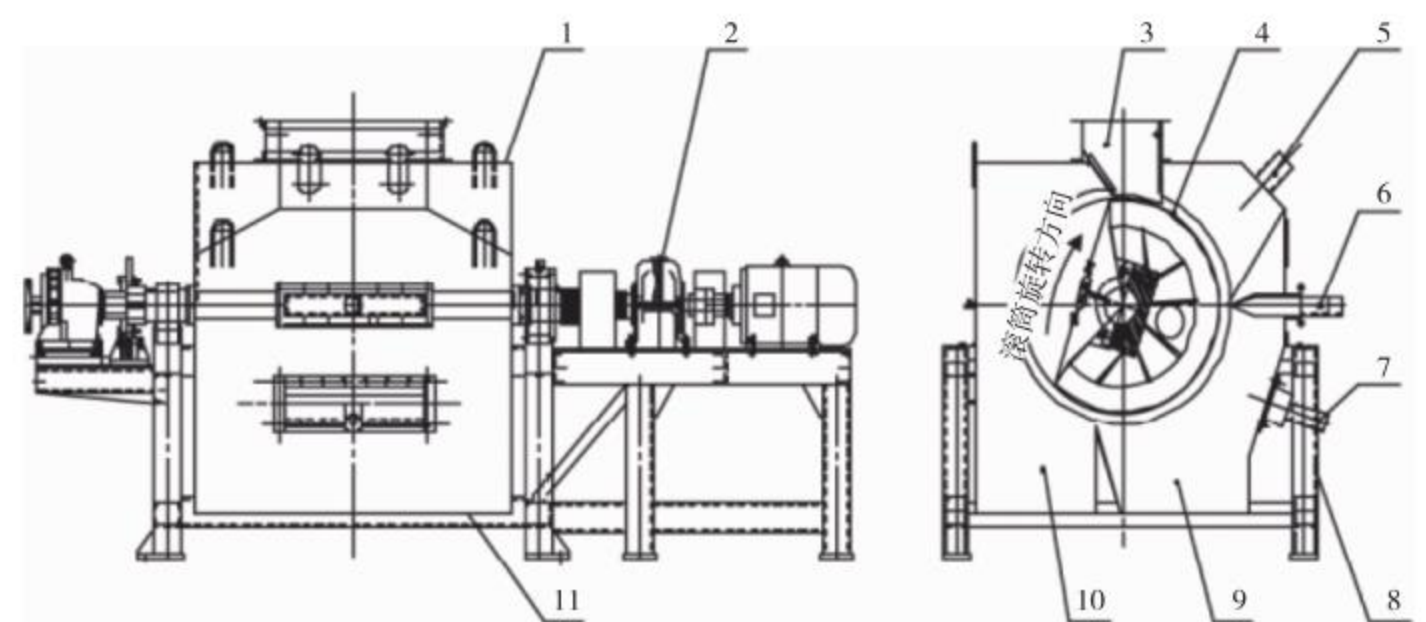


图10 风力滚筒干式磁选机
Fig. 10 Wind drum dry magnetic separator

2.2 风力带式干法磁选机

图 11 为风磁联合干式磁选机原理示意图。分选时,将细粉矿料均匀给到输送带上,物料随输送带移动到磁块组上方的分选区内,非磁性的细粉物料被引风罩内的负压风带走,经引风管进入袋式除尘器,落入尾灰料斗;磁性物料被吸附在输送带上继续前进,离开分选区后,最终落入精料斗。采用一段干式预选+三段干式精选工艺,将该设备用于对酒钢电厂粉煤灰的选铁作业,获得的分选指标为:精矿总产率 4.73%、铁品位 57.12%、总铁回收率 28.87%^[18]。这种设备选铁时,会造成微细粒铁矿物的大量跑尾;同时精矿中的粗粒夹杂较多。该设备适用于去除磁性物料中的微细粒非磁性夹杂效果较好。

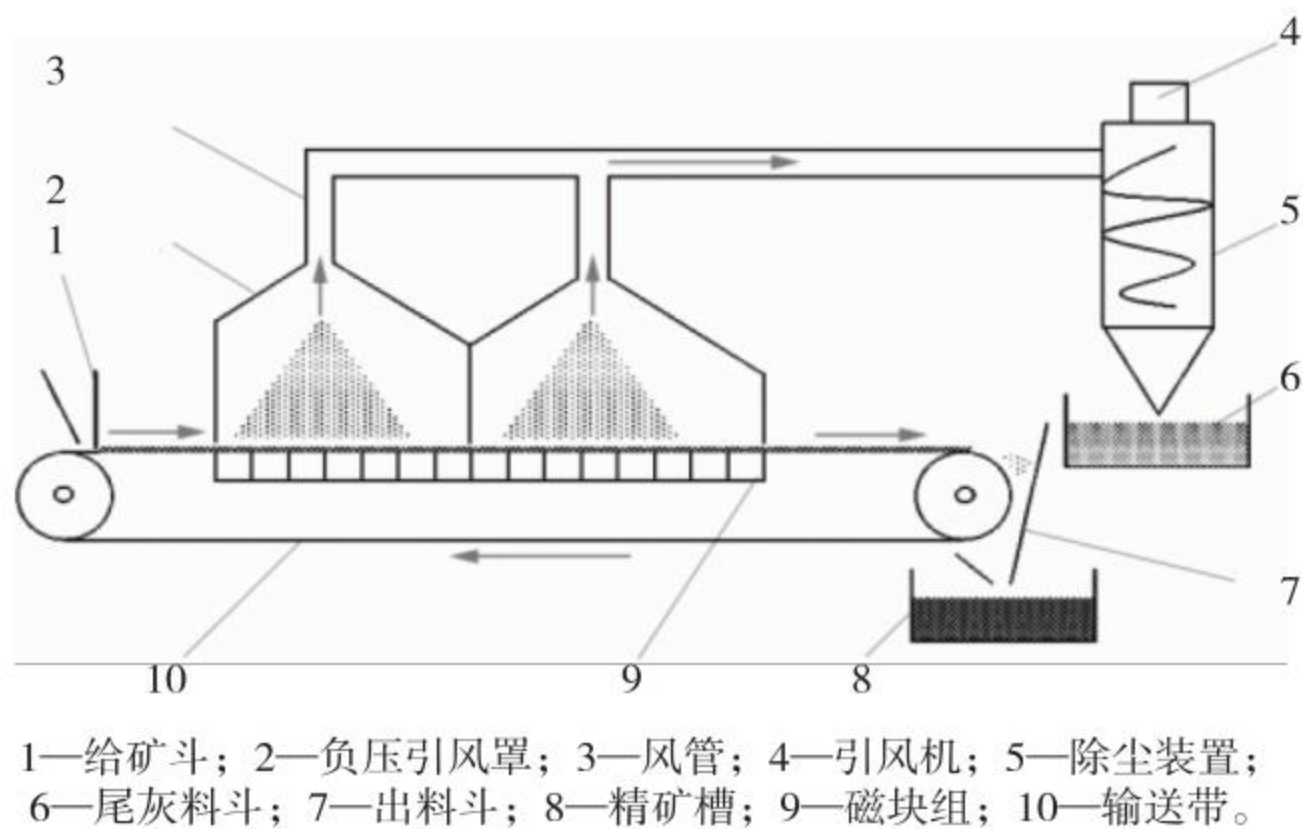


图 11 风磁联合干式磁选机的原理

Fig. 11 Principle of wind-magnetic combined dry separator

图 12 所示的磁选机^[19]是图 11 磁选机的改进型,设备增加了两组磁系,磁选效果明显提高。将细粉矿料均匀给到输送带上,矿料进入磁块组一上方时,矿料中的微细非磁性料及部分微细磁性料被引风罩内的负压风吸走,经除尘器除尘进入尾灰斗;矿料到达磁辊 4 表面时,磁性物被吸附在磁辊外面的皮带上,非磁性物料因重力和离心力落进尾矿槽;磁性矿料直至离开磁块组二以后,落入精矿槽中,毛刷

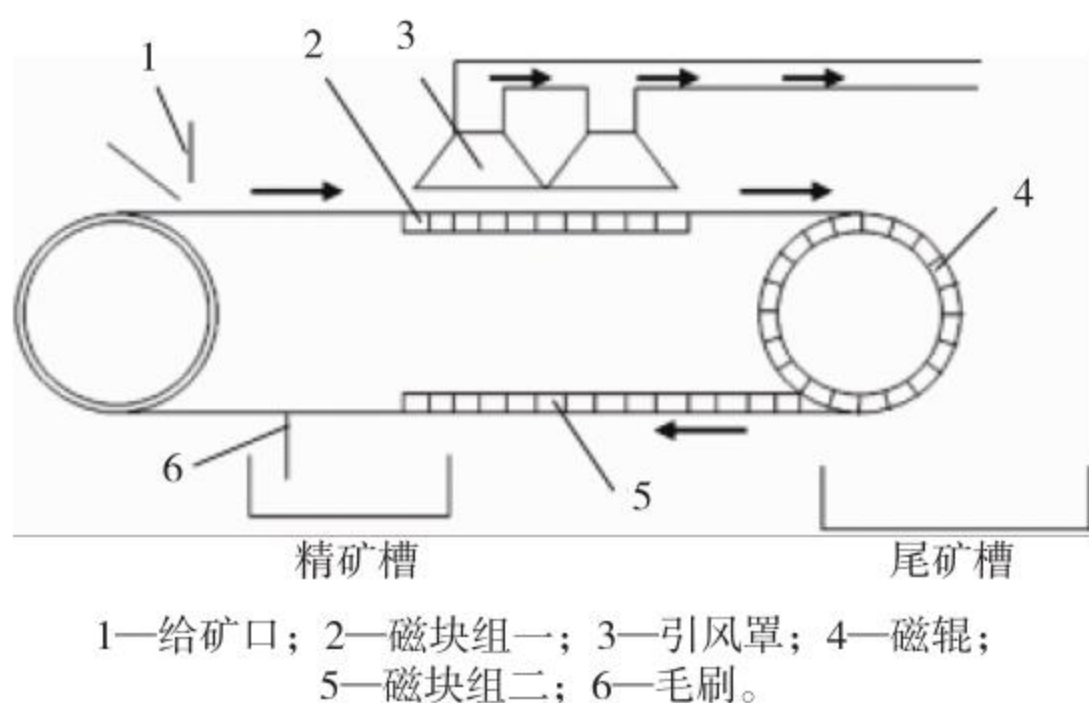


图 12 改进的风磁联合干式磁选机

Fig. 12 Improved wind-magnetic combined dry separator

对附着在输送带上的残存颗粒进行清理。这种磁选机与图 11 相比,非磁性料夹杂大大减少,精矿品位较高。设备适用于细粒磁性物料的除杂选别作业以及细粒级磁性矿的预选抛尾。

图 13 是卢东方等^[20]发明的风力带式磁选机,设备设计了两组固定磁系,第一磁系由相邻极性相反的磁块排列而成,扇形第二磁系的相邻磁块也极性相反。将待选矿料均匀给到输送带上后,矿料随输送带向左端移动,在移动过程中,第一磁系使矿料不停翻滚,同时上吹风装置喷吹高压风,首先将一部分细粒非磁性物料分离出来,被气流吹送向输送带右端运动,进入第一尾矿口,实现矿料的初选。余下矿料随输送带运动至滚筒 6 处,在第二磁系的作用下,矿料不停翻转,磁性颗粒被吸附在输送带表面并绕滚筒 6 转动,非磁性颗粒被抛落进入第二尾矿口,磁性颗粒随着滚筒转动至脱离第二磁系的磁场区域后,被抛入精矿出口,实现物料的精选。该设备可用于细粒级磁性矿的预选及精选作业,也可用于扫选。

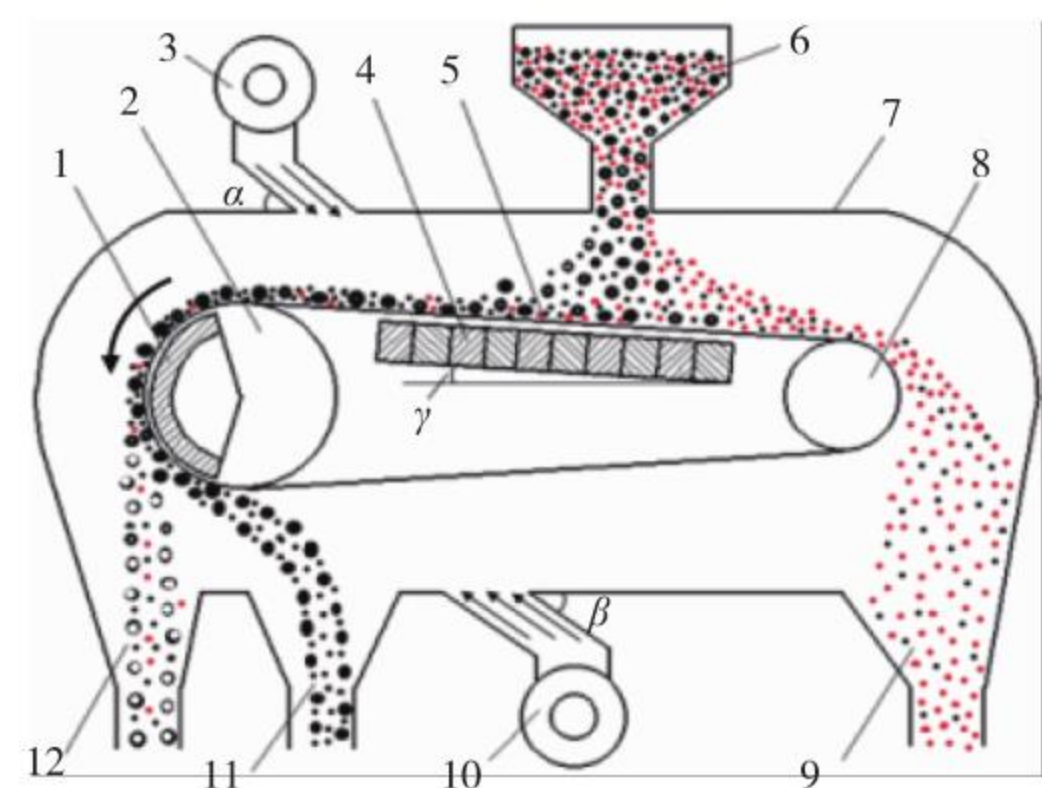


图 13 风力带式磁选机

Fig. 13 Wind belt magnetic separator

2.3 筒式流态化干式磁选机

图 14 磁选机的磁选过程为^[21]:鼓风机将空气给入到稳压罐中,通过流量计调节气流量进入磁选机的流化分选槽。被选物料从磁选机一端经料仓给料进入到下部的流化床分选槽,被选物料在气流曳力作用下流化松散,并向排料端流动。磁性颗粒被磁极吸引向上运动到滚筒表面上并随滚筒旋转到弱磁场区进入精矿槽,而非磁性物沿流化分选槽流动到尾矿口排出,实现磁性颗粒和非磁性颗粒的分离。这种磁选机物料在分选区内成流态化状态,物料松散度高,夹杂较少,由于风力作用磁团聚现象也能得到一定缓解,但微细粒磁性物在风力下会有一定跑尾。设备适用于细粒级磁性矿的精选。

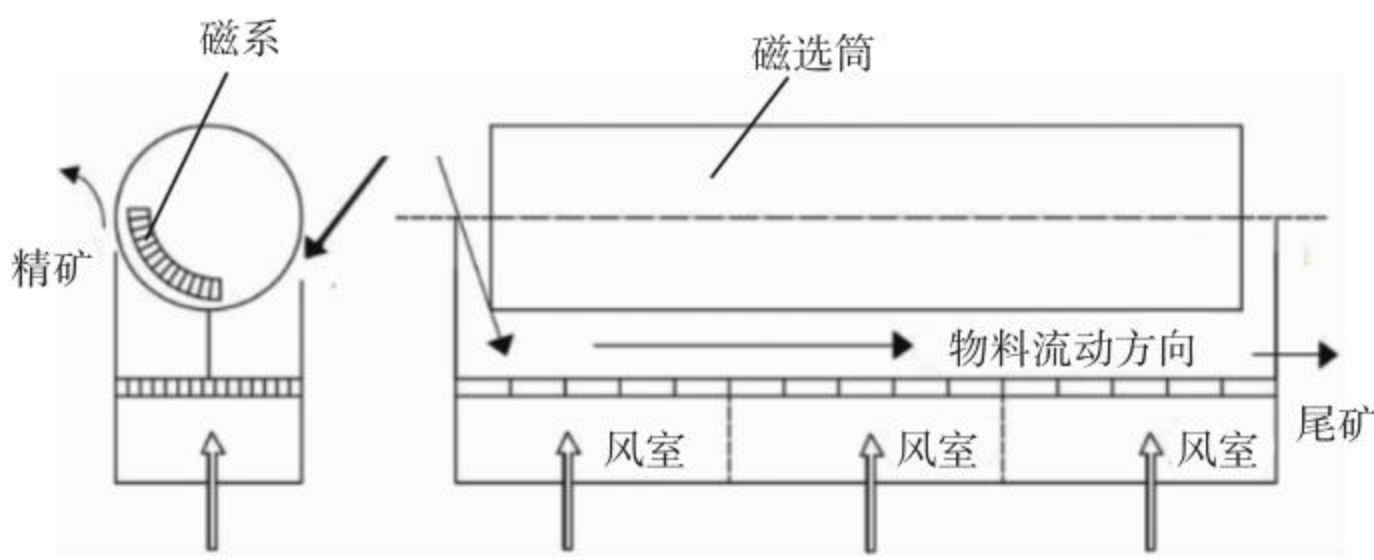
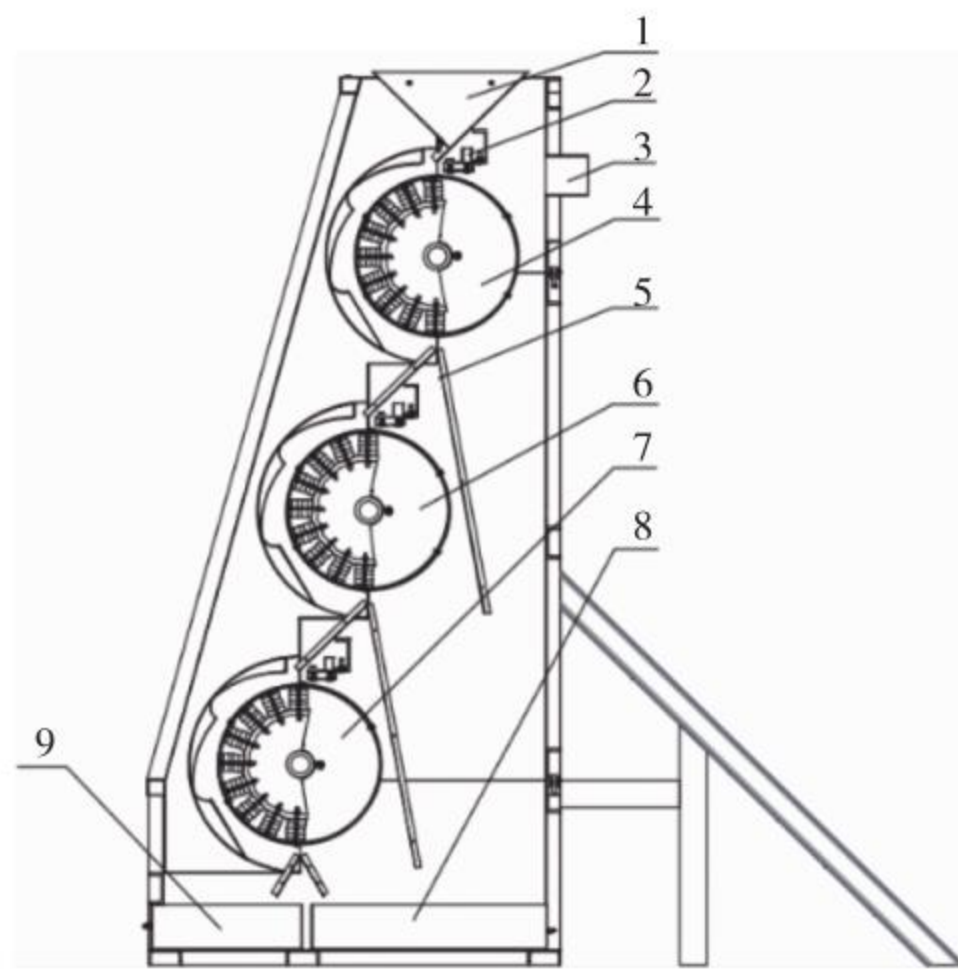


图 14 筒式流态化干式磁选机

Fig. 14 Drum fluidized dry magnetic separator

2.4 三级干式永磁筒式磁选机

新型三级干法筒式磁选机由汪建新等研发^[22-23],如图 15 所示。设备由给料装置、供风装置、磁滚筒等部分组成。分选时,矿料由给矿装置给入到第一级磁滚筒表面,矿料受到筒面切线方向的风力作用,在分选空间中形成气固两相流,磁性颗粒受到磁场力作用被吸附在筒体表面并随筒体转动,当其离开磁场区域时,在重力和离心力作用下脱落进入到精矿槽,未被选出的磁性颗粒与其他颗粒一起进入下一级分选区继续进行磁选。分选过程中,沿筒面切线上的风将物料吹散,可有效破坏磁团聚,有助于提高精矿品位。该设备用于某原矿 TFe 品位 13.51% 的预选作业中,获得了精矿铁品位 34.62%、尾矿铁品位 10.95% 的良好指标,精矿富集比接近 3,效果显著,但作业的总体 TFe 回收率仅为 27.71%,跑尾较为严重^[17]。设备主要用于干粉铁矿石的预富集磁选,也可用于铁矿石精选。



1—给料装置; 2—供风装置; 3—除尘口; 4—一级磁滚筒;
5—分料板; 6—二级磁滚筒; 7—三级磁滚筒;
8—精矿槽; 9—尾矿槽。

图 15 三级干式永磁筒式磁选机

Fig. 15 Three-stage dry permanent magnet cylinder separator

2.5 风磁耦合干式磁选机

图 16 是由卢东方等^[24-25]研发的一种风力与磁场力耦合作用的新型干式磁选机。工作时,矿料从

上部给入滚筒表面,滚筒内部布置有固定的扇形磁系,磁块间留有空隙用于通风,风由筒内向筒外吹出,磁性颗粒受到磁力作用被吸附在滚筒表面并随滚筒转动,离开磁场后脱落进入精矿槽;非磁性颗粒在径向气流与离心力的作用下抛落进入到尾矿槽。磁选机的磁系设计为多磁极、大包角,能保证磁场的作用强度和深度,径向气流从筒内穿过筒面的微孔向外吹出,这种结构可以高效地利用气流破坏磁聚团,大大提高了设备的分选效率。气流能够使矿料保持良好的松散度,可以有效分离夹杂的脉石和连生体。利用该设备对云南大红山-3 mm 粒级磁铁矿进行了磁选作业,获得了精矿铁品位 54.59%、铁回收率 71.75% 的良好指标。该设备适用于细粒级磁性矿的预选作业,但磁性矿的总体回收率偏低。

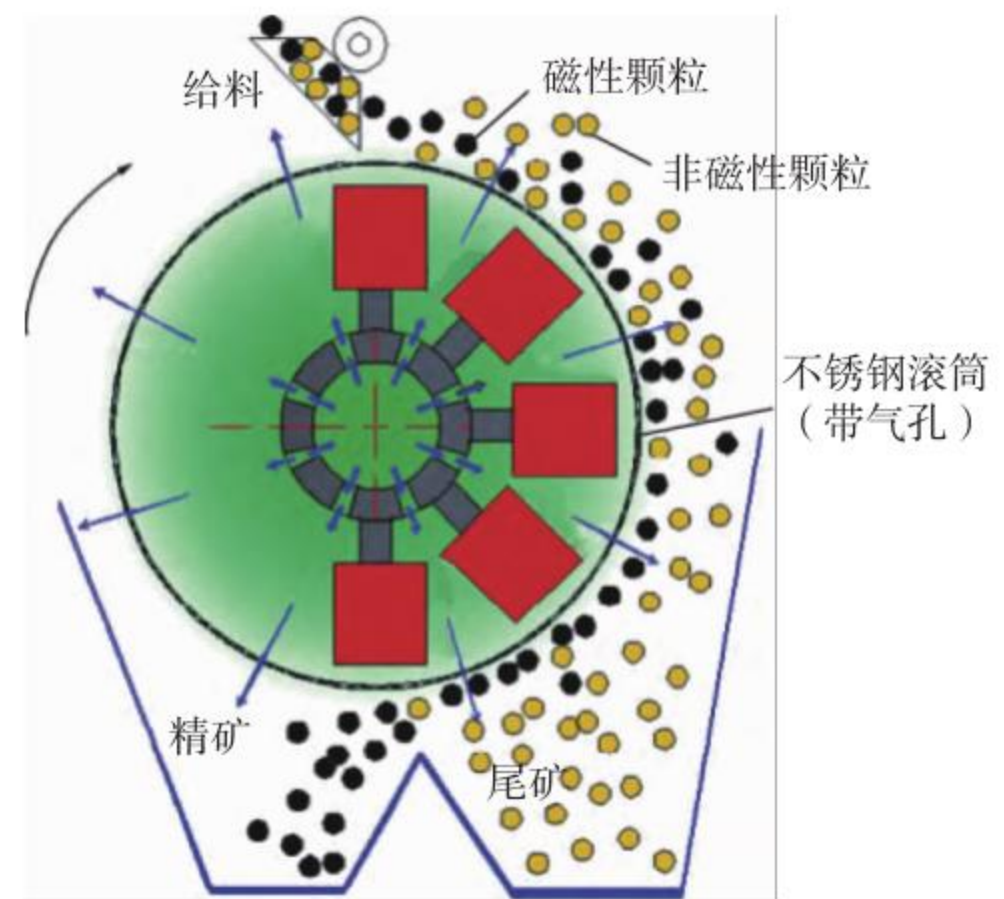
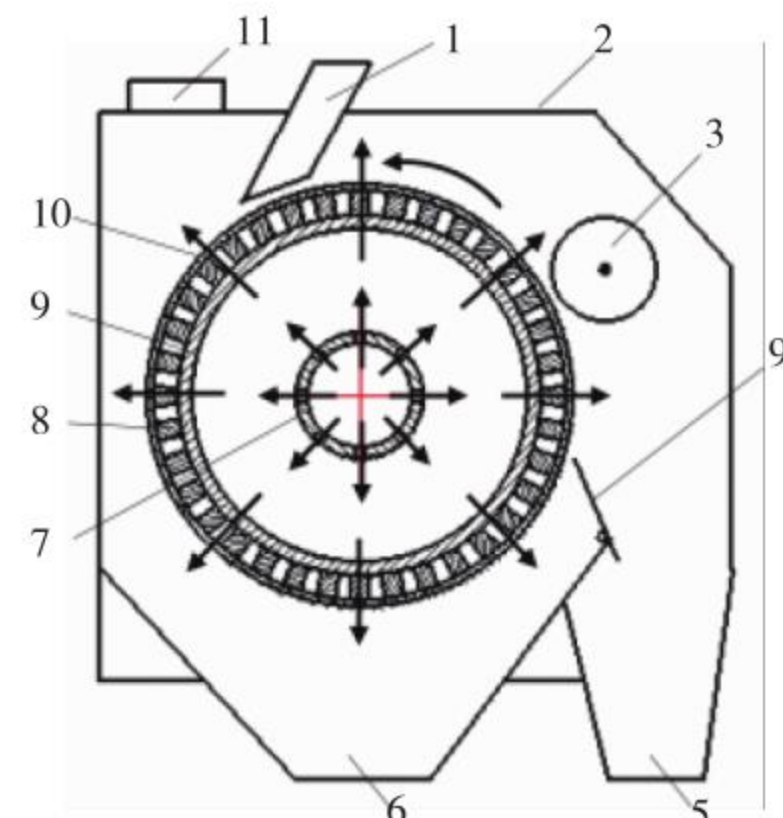


图 16 新型风力干式磁选机

Fig. 16 New wind dry magnetic separator

图 17 为何亚民等^[26]发明的引进风力的干式磁选机,该设备为图 16 磁选机的变种,其分选原理与图 16 所示磁选机类似,但与其的主要区别在于:磁



1—料装置; 2—外壳; 3—卸料辊; 4—分料挡板;
5—精矿斗; 6—尾矿斗; 7—空心轴; 8—磁芯;
9—磁辊筒; 10—透气辊筒; 11—收尘系统。

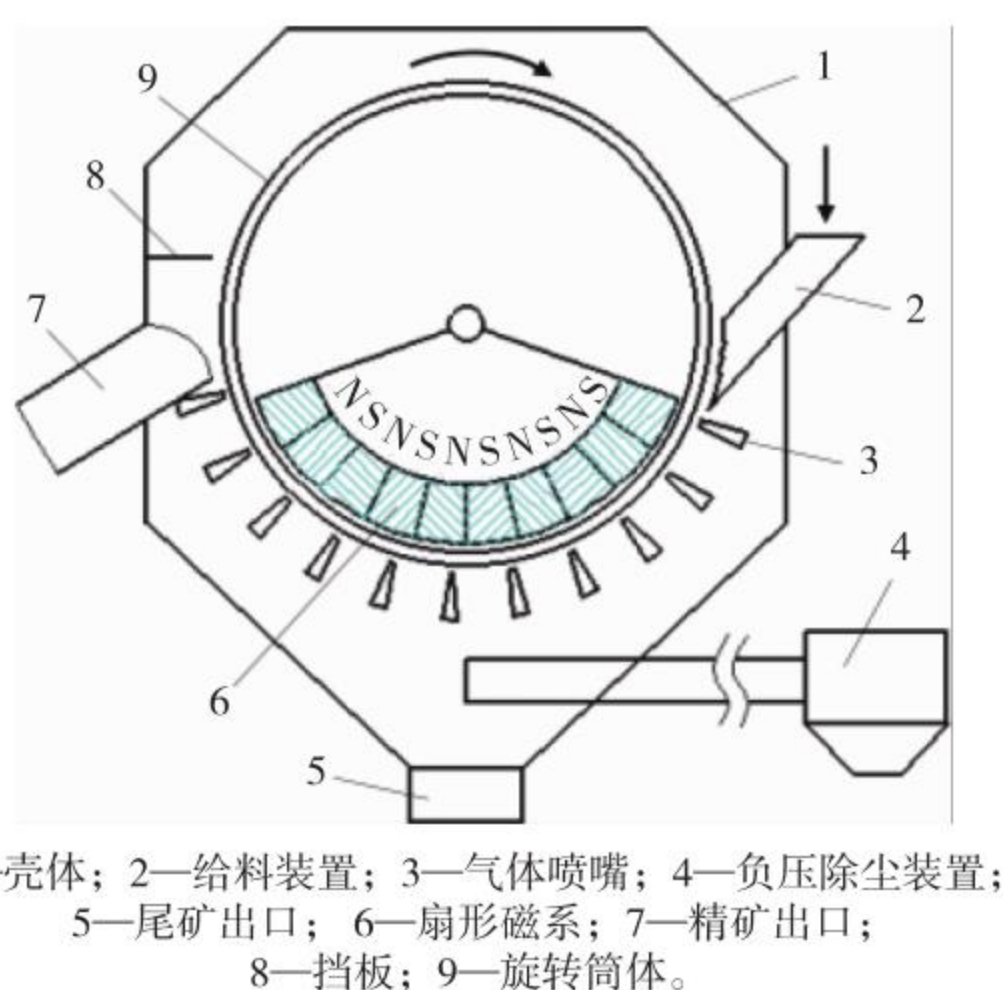
图 17 一种引进风力的干式磁选机

Fig. 17 A dry magnetic separator with introduced wind power

系采用为 360° 交变电磁磁系,磁场强度与交变频率可根据物料性质调节;磁性物料利用卸料辊卸料,卸料辊表面设计为梯形螺纹可形成高梯度磁场;分料挡板倾角及水平位置可调。该磁选机适用于磨后磁性矿物的分选,尤其适用于 $0\sim 5\text{ mm}$ 粒级矿料的磁选。

2.6 干式风力磁选机

图 18 为孙春树^[27]发明的一种干式风力磁选机,工作时滚筒 9 顺时针旋转,扇形磁系 6 固定,给矿装置将细粉矿料均匀给到滚筒表面,磁性颗粒受磁系的磁场力作业吸附在滚筒表面,非磁性物料受重力作业掉落进尾矿槽,经由尾矿口排出。高压气体经由气体喷嘴对滚筒表面的磁性物料进行喷吹,可以使磁性物料不断翻滚、分散,有效破坏磁团聚,减少非磁性夹杂,提高精矿品位。离开磁场范围的磁性物料随气流经精矿口排出。磁选机下部设置有负压除尘装置,除尘得到的固体物理排入尾灰槽。设备适用于磨后细粒级磁性矿的分选作业。



1—壳体; 2—给料装置; 3—气体喷嘴; 4—负压除尘装置;
5—尾矿出口; 6—扇形磁系; 7—精矿出口;
8—挡板; 9—旋转筒体。

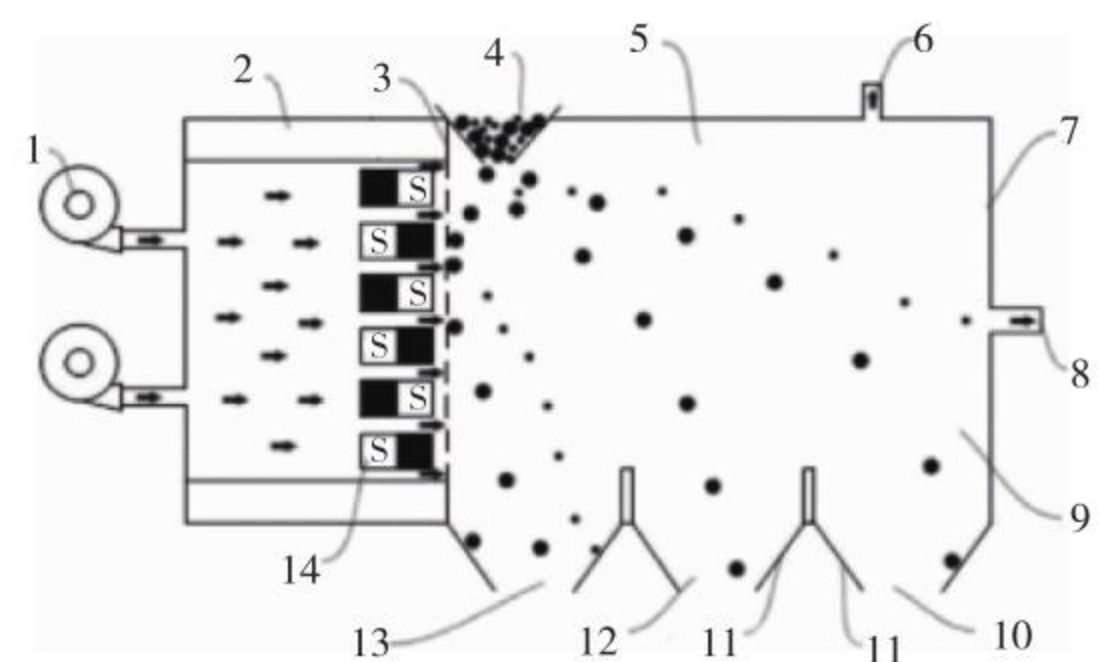
图 18 干式风力磁选机

Fig. 18 Dry wind magnetic separator

2.7 风重磁联合力场磁选机

图 19 为刘剑军等^[28]发明的基于风重磁联合力场磁选机示意图。多孔隔板 3 将腔室 9 分隔成第一腔室 5 和第二腔室 2。待选物料从进料口进入腔室 5,在重力作用下下落并从下部出料口流出。电磁组件产生的磁场对物料产生吸引力,气流组件产生的气流对物料产生与吸引力相反的吹力,以便物料在磁场和气流作用下分层。物料在磁场中受到的磁场吸引力从大到小依次为磁性颗粒、连生体颗粒、非磁性颗粒。三种颗粒在气流下受到的风力相等,调节风速和磁场可以使磁性颗粒受到的风力等于其受到的吸引力,连生体颗粒受到的风力大于吸引力,非磁性颗粒只受风力,从而可将三种颗粒区分开来。

设置电磁组件和气流组件,使物料自上而下随重力自然下落。通过重力、吸引力和风力的耦合,对不同密度和粒度的物料具有分级作用,使物料具有不同的落点位置。由于吸引力与风力相互竞争,磁性颗粒的落点位置离电磁组件更近;非磁性颗粒的落点位置离电磁组件更远;连生体则落在中间位置;从而得到精矿、中矿和尾矿。可将精矿送入下一道精选工序,中矿通过再磨再选处理以保证回收率,尾矿直接抛弃或回收利用。设备尤适用于细粒级磁性矿的分选。



1—气流组件; 2—第二腔室; 3—多孔隔板; 4—进料口;
5—第一腔室; 6—第一除尘口; 7—壳体; 8—第二除尘口; 9—腔室;
11—可调隔板; 10,12,13—出料口; 14—电磁组件。

图 19 风重磁联合磁选机

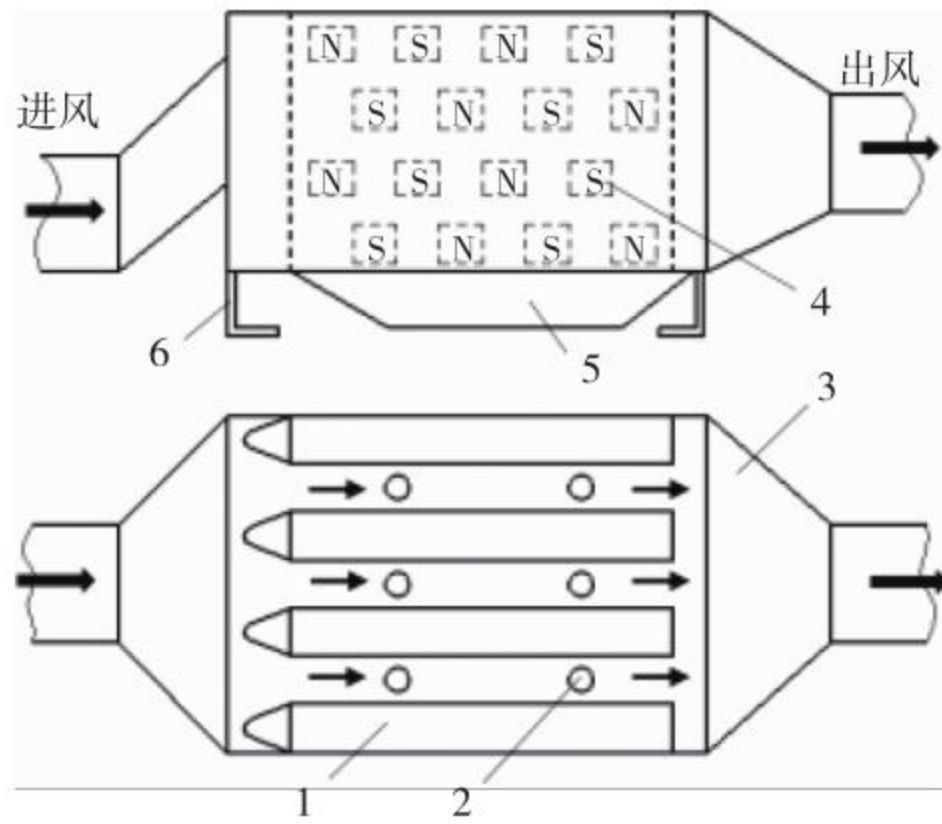
Fig. 19 Wind-gravity-magnetic combined magnetic separator

3 风力送料干式磁选机

3.1 风力送料板式磁选机

图 20 为风力送料板式磁选机^[29],壳体内布置有竖直平行排列的多个磁板,磁板上的磁极布置如图所示,相邻磁板对应位置处磁块的极性相反。风力带动细粉矿料经进风口给入磁选机,相邻两磁板间的空间为分选区。矿石颗粒在分选区内受到磁场吸引力、风力和重力的联合作用。磁性颗粒在分选区内飞行一段距离后被捕捉到磁板表面;非磁性颗粒不受磁力,在风力作用下飞离分选区由出风口排出磁选机,随后经旋风分离器分离和布袋除尘器收尘后落入尾矿槽;连生体颗粒受到的磁力较小,大部分在分选区内飞行较远距离后被捕捉到磁板表面,也有一部分飞离分选区经出风口排出磁选机。磁系的场强可以根据物料性质调整,为了使磁板上吸附的料层分布均匀,应调节磁系使磁场强度由左向右逐渐增大。卸料时,按照水平横排从上至下依次关闭和接通磁块的电流,使磁性物料逐层掉落直至落入底部的精矿槽中。整流柱能改变分选区内的流场,增加磁性颗粒被捕捉的概率。若要获得高纯度的精矿,可以对精矿产品再进行 $2\sim 3$ 次

精选;可以提高磁场强度对尾矿扫选 1~2 次,以提高回收率。



1—磁板; 2—整流柱; 3—壳体; 4—电磁块; 5—精矿槽; 6—机架。

图 20 风力送料板式磁选机

Fig. 20 Wind feeding plate magnetic separator

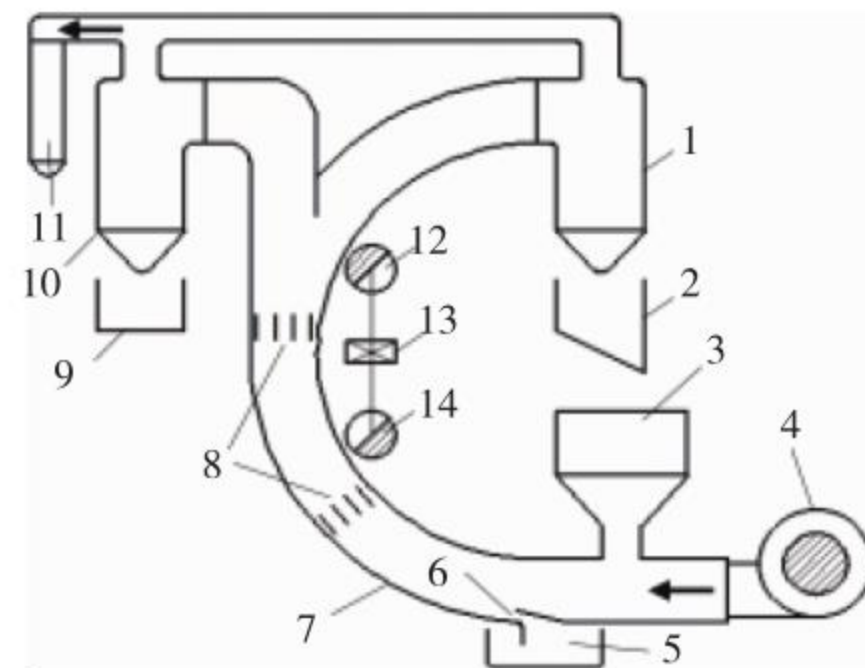
磁选机的主要特点:风力给料,物料充分分散,磁团聚少,非磁性夹杂少,精矿品位高;分选区数量随磁板数量增多,磁选机单机处理量大;分选区为封闭磁场,场强大,磁场作用深度大,分选效率高;一些粗粒非磁性和连生体颗粒可能会落入精矿槽,降低精矿品位,为此可底部布置向右上方喷吹的补风装置;一些极微细的磁性颗粒会被吹离磁选机,造成一定跑尾,为此可先对矿料分级,再单独磁选微细粒矿料,控制风速和磁场强度,即可有效回收微细粒磁性料。设备尤适用于-1 mm 磁性矿的分选。

3.2 新型干式风磁联合磁选机

磁选机如图 21 所示,设备通过鼓风机给风,带动原料形成气固两相流,通过磁辊和导流板的作用,有效破坏磁团聚,使物料充分暴露在风力、重力、磁力的作用中,对细粒级矿物进行有效分选。磁辊组件包括电机 13 和两组形状一致的磁辊 12,电机带动两组磁辊同向同速转动;每组磁辊对称设置有磁性段和非磁性段,当一组磁辊的磁性段靠近分选腔时,另一组磁辊的磁性段远离分选腔,可以保证在同一时间至少有一个磁辊处于工作区域,从而对磁性颗粒进行吸附;上侧磁辊的磁场强度大于下侧磁辊,其差异可更好捕捉磁性颗粒,提升磁选效率^[30]。磁性料斗底部倾斜,一侧设有可拆卸的挡板,挡板拆除后可将筛选的颗粒返回至分选腔内进行重复筛选,便于物料连续多次选别,提高磁性颗粒的纯度。

工作时物料由入料斗进入分选腔,在风力带动下向上进入弧形分选腔,粗料在重力作用下滑落,由粗料排料口进入粗料斗。气固两相流在导流板内碰撞,有效破坏了磁团聚,使其充分暴露在下方磁辊的选别区中,磁性颗粒被吸附在管壁上;非磁性颗粒则

在风力作用下垂直向上进入非磁颗粒收集器;磁性颗粒在下方磁辊转至非磁性区域后脱落后亦向上经过导流板进入二次分选区,被磁力吸引,从向上的气流中脱离出来,吸附在管壁上,待上方的磁辊转至非磁性区域后,被风力带动进入磁性颗粒收集器。设备适用于细粒级磁性料的分选。



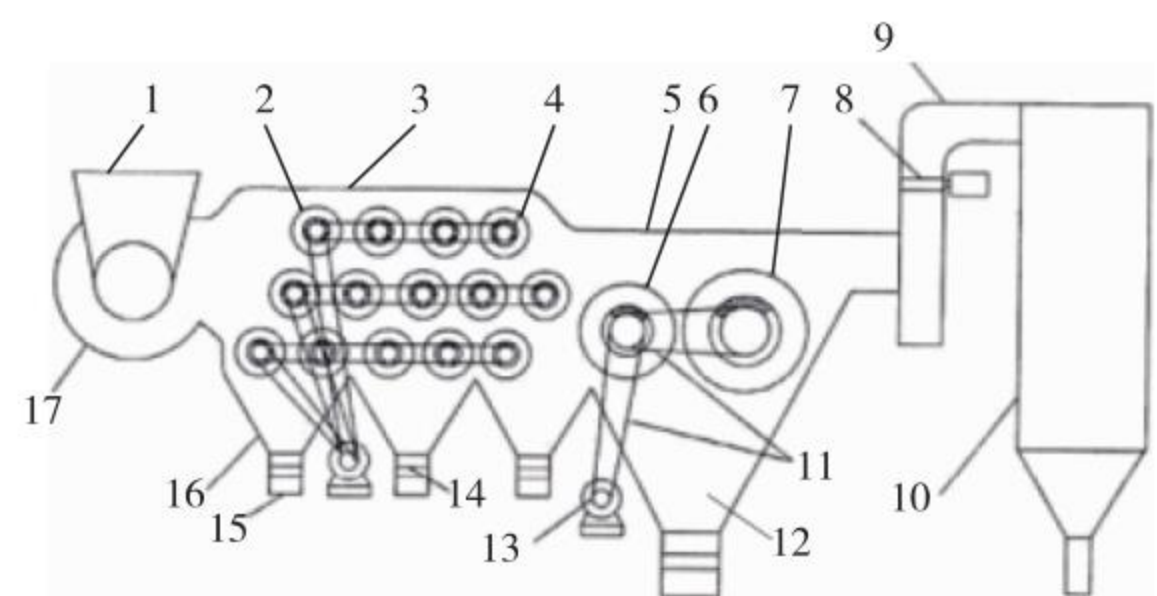
1, 10—旋风分离器; 2—磁性料斗; 3—给料仓; 4—鼓风机; 5—粗料斗; 6—粗料排料口; 7—分选腔; 8—导流板组件; 9—非磁性料斗; 11—袋式除尘器; 12—磁辊; 13—电机; 14—磁辊。

图 21 新型风磁联合干式磁选机

Fig. 21 New wind-magnetic combined dry magnetic separator

3.3 干式风力永磁精选矿机

图 22 是隋鑫^[31]发明的 16 辊干式风力永磁精选矿机。设备通过两个干式磁选装置进行双次多磁辊磁选,使得出料率更高,产品品位更高,抛尾率更低。第一磁选装置内固装 14 个永磁辊 4,在永磁辊外套装能够转动的滚筒 a,永磁辊所形成的磁系包角为 100°~340°;14 个滚筒按上、中、下三排相错排列,滚筒 a 分别通过传动机构 11 与同一台调速电机 13 连接,且每排滚筒彼此通过传动机构进行传动,对应三个料仓 16,调速电机驱动 14 个滚筒同步转动。第二磁选装置内有两个永磁辊,在两个永磁辊上分别套装直径不等的滚筒 b 和滚筒 c,调速电机驱动两个滚筒同步转动。



1—喂料器; 2—滚筒a; 3—第一磁选装置; 4—永磁辊; 5—第二磁选装置; 6—滚筒b; 7—滚筒c; 8—抽气机; 9—风道; 10—储杂仓; 11—传动机构; 12—料仓; 13—调速电机; 14—锁风阀; 15—出料口; 16—料仓; 17—吹料风机。

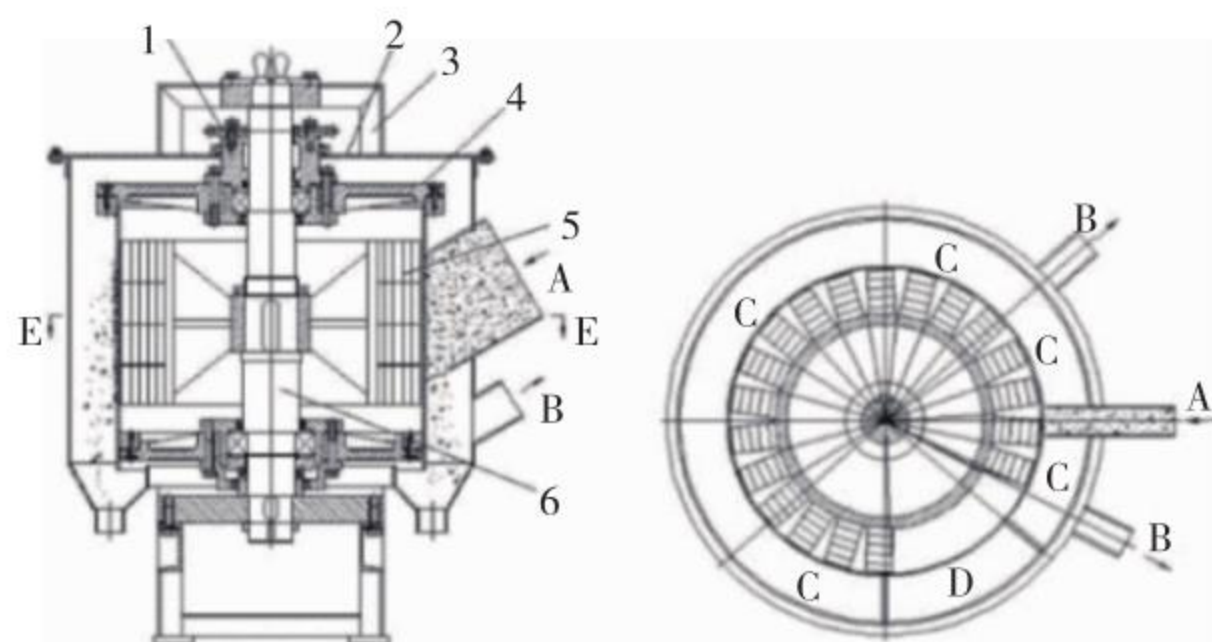
图 22 干式风力永磁精选矿机

Fig. 22 Dry wind-driven permanent magnet concentrator

喂料器下部开口安装吹料风机,从喂料器吹入的矿料进入第一磁选装置内,矿料中的磁性物质被筒内的永磁辊吸附在滚筒 a 的外壁上,被吸附的磁性物质随滚筒转动至脱离永磁辊的磁系范围时,在重力作用下自然掉落至料仓 16 中,料仓下部装有锁风阀,防止风倒吹入磁选装置。剩余的矿料在风力作用下进入第二磁选装置,进行二次磁选,经磁选后的磁性物料落入下方的料仓 12 中,非磁性杂料在抽气机作用下,经风道被送入储杂仓。设备适用于细粒级磁性矿的精选。

3.4 风力给料干式永磁磁选机

图 23 是郑广智等^[32]发明的风力给料干式永磁磁选机。在传动系统 6 驱动下,滚筒 3 围绕磁系 2 旋转,磁系的极性 N-S 交替排列,可使磁性矿物在随圆筒运动时不断翻转,破坏磁团聚,分选箱 5 上有进料口 A、出风口 B、尾矿口 C 和精矿口 D。工作时矿料随风力从进料口喷射到圆筒 3 表面,磁性颗粒随圆筒绕磁系 2 旋转,最终从精矿口 D 排出,非磁性矿物在重力作用下落入尾矿口 C 中,给入的风从排风口 B 排出。风力给矿可以使矿物高度分散,减少夹杂;被吸附到圆筒表面的磁性矿物,随着圆筒围绕磁系旋转,经过多次翻转将夹杂进一步排出,实现强磁矿物的干式精选。设备适用于细粒磁性矿的干式精选。



1—传动系统; 2—分选箱; 3—机架; 4—圆筒; 5—磁系; 6—主轴。

图 23 风力给料干式永磁磁选机

Fig. 23 Wind feeding dry permanent magnet separator

4 各类干式磁选机的优缺点分析

1)磁重联合干式磁选机的磁系多采用永磁体,磁系难以调整,但工作时磁系不发热,无需冷却,因而结构相对简单;磁系多为开放磁系,分选区深度小;料层薄,磁选机处理量小,一般可通过增大磁辊和输送带宽度以提高磁选机处理量;物料不够松散,磁团聚严重,非磁性夹杂多,精矿品位低。这类磁选机适用于矿料的强磁干式预选抛尾及扫选作业,亦

可用于细粉物料的干式除铁作业。这类磁选机若用于铁矿石干式弱磁精选作业,需要进行连续多次磁选才能得到高品位铁精矿。

2)直接给料风重磁联合干式磁选机的主要特点有:利用风力强化分选,物料松散度高,磁团聚被大量破坏,非磁性夹杂少,精矿品位较高;许多微细粒磁性料会随风进入收尘系统,造成一定抛尾,降低了磁性料的回收率;增加了鼓风机或引风机、管道及气固分离装置和除尘器,设备更复杂;有的磁选机采用电磁磁系,磁场可以根据物料性质调节,分选指标更好,但电磁磁系工作时发热,需要对磁系进行冷却,使设备结构复杂化。这类磁选机适用于细粒级铁矿石的弱磁精选作业及非磁性细粉物料的干式除铁作业,也可用于细粒铁矿石的强磁预选抛尾及扫选作业。

3)风力送料干式磁选机的主要特点是:待选物料通过风力输送,形成气固两相流,物料充分松散,磁团聚少,非磁性夹杂少,精矿品位高;许多微细粒磁性料会被风带着进入旋风筒和除尘器,最终进入尾矿,造成较多抛尾,降低了磁性料的回收率;需要增加鼓风机或引风机、管道及气固分离装置和除尘装置,使设备更复杂;有的磁选机采用电磁磁系,可以根据物料性质调节磁场,分选指标更好,但需要增加磁系冷却装置。这类磁选机主要用于细粒级铁矿石的干式弱磁精选作业。若要减轻微细粒磁性料的抛尾现象,提高回收率,需要在分选之前对物料进行分级,比如可采用旋风分级器对物料进行分级,再对微细物料单独磁选,调整风速和磁场强度,可以有效回收微细粒级磁性料。

5 结论

1)我国铁矿资源禀赋差、嵌布粒度细,而干式磁选工艺简单,选矿成本低,因而细粒级干式磁选机具有良好的发展前景。近年发展起来的铁矿石流态化磁化焙烧技术对于处理贫、细、杂铁矿石具有很大优势,已在酒泉钢铁、辽宁三和赞比亚铁矿、海南钢铁等地得到成功应用,大幅度提高了选矿指标。

2)经流态化磁化焙烧后的矿料具有粒度细、磁性强、物料干燥松散等特点,特别适合干式磁选。研究干式磁选机的磁选机理、结构特点及优缺点,有益于研究开发适用于各种场合的专用干选机,有利于干式磁选机的性能提升及应用推广。

参考文献

[1] 汪建新,李慧慧.国内干式磁选机的研究现状及发展趋

- 势[J]. 矿山机械, 2021, 49(8): 1-6.
- WANG Jianxin, LI Huihui. Research status and development trend of dry magnetic separators in China[J]. Mining & Processing Equipment, 2021, 49(8): 1-6.
- [2] 张博, 屈进州, 吕波. 干式磁选设备发展现状与分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(增刊 1): 155-158.
- ZHANG Bo, QU Jinzhou, LÜ Bo. Development status and analysis of magnetic separation equipments [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011 (Suppl. 1): 155-158.
- [3] 谢淑兰, 王克定. CTG 干式磁选机的结构与应用[J]. 矿冶, 2007, 16(4): 71-73.
- XIE Shulan, WANG Keding. Structure and application of CTG dry magnetic separator [J]. Mining and Metallurgy, 2007, 16(4): 71-73.
- [4] 尹晓飞, 马学毅, 王小宇, 等. CTG-1030 永磁干式磁选机的开发及应用[J]. 现代矿业, 2013, 29(10): 154-155.
- YIN Xiaofei, MA Xueyi, WANG Xiaoyu, et al. Development and application of CTG-1030 permanent magnetic dry separator [J]. Modern Mining, 2013, 29(10): 154-155.
- [5] 冉红想. 多筒干式强磁选机的研制及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2010(3): 42-45.
- RAN Hongxiang. Development and application of multi-cylinder dry high intensity magnetic separator [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2010(3): 42-45.
- [6] 王芝伟, 胡永会, 尚红亮, 等. 干式筒式磁选机联用技术研究及实践[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(2): 82-86.
- WANG Zhiwei, HU Yonghui, SHANG Hongliang, et al. Research and practice of combination technology of dry drum magnetic separator [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(2): 82-86.
- [7] 周鑫. 干式磁选机在金属矿磁选中的应用—干式对辊强磁选机[J]. 中国设备工程, 2021(1): 253-254.
- ZHOU Xin. Application of dry magnetic separator in metal ore magnetic separation-dry double roll high intensity magnetic separator [J]. China Plant Engineering, 2021(1): 253-254.
- [8] 徐银全, 赵宾, 王化军. 旋转磁场干式磁选机在板石选矿厂的应用[J]. 矿山机械, 2019, 47(8): 76-77.
- XU Yinquan, ZHAO Bin, WANG Huajun. Application of rotating magnetic field dry magnetic separator in slate stone concentrator [J]. Mining & Processing Equipment, 2019, 47(8): 76-77.
- [9] 王俊良, 袁喆, 圣洪, 等. CTFG 型粉矿干式磁选机及其应用[J]. 现代矿业, 2017, 33(4): 159-161.
- WANG Junliang, YUAN Zhe, SHENG Hong, et al. CTFG dry magnetic separator for fine ore and its application[J]. Modern Mining, 2017, 33(4): 159-161.
- [10] 赵海亮, 冉红想, 王小明, 等. 一种动态磁场干选机的研制[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(5): 64-68.
- ZHAO Hailiang, RAN Hongxiang, WANG Xiaoming, et al. Development of a dynamic magnetic field separator[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2017(5): 64-68.
- [11] 才莎莎. XGTF 型旋转磁系干式磁选机的研制及其应用[J]. 现代矿业, 2019, 35(12): 268-270.
- CAI Shasha. Development and application of XGTF dry magnetic separator with rotating magnetic system[J]. Modern Mining, 2019, 35(12): 268-270.
- [12] 侯新凯, 杨洪艺, 马孝瑜, 等. 双环形移动磁系干式细粉料磁选机的研制[J]. 金属矿山, 2016, 45(3): 139-142.
- HOU Xinkai, YANG Hongyi, MA Xiaoyu, et al. Development of double circular moving magnetic system dry-magnetic separator for fine powder[J]. Metal Mine, 2016, 45(3): 139-142.
- [13] 辛青, 王兆连, 刘凤亮, 等. 干式强磁板式磁选机的研制和试验研究[J]. 陶瓷, 2022(12): 45-47.
- XIN Qing, WANG Zhaolian, LIU Fengliang, et al. Development and experimental study of dry high-intensity magnetic plate magnetic separator [J]. Ceramics, 2022(12): 45-47.
- [14] 李明波. G 型干法筛式磁选机的研制与应用[J]. 山东冶金, 2021, 43(3): 79-81.
- LI Mingbo. Development and application of G type dry screen magnetic separator [J]. Shandong Metallurgy, 2021, 43(3): 79-81.
- [15] 许金越, 王伊琳, 宋少先. 干式振动高梯度磁选机的分选机理与试验研究[J]. 金属矿山, 2023, 52(2): 189-195.
- XU Jinyue, WANG Yilin, SONG Shaoxian. Separation mechanism and experimental study of dry vibration high gradient magnetic separator [J]. Metal Mine, 2023, 52(2): 189-195.
- [16] 王顺, 辛青. 新型粉矿风力干式磁选机的研制与应用研究[J]. 现代矿业, 2019, 35(4): 133-135.
- WANG Shun, XIN Qing. Development and application research of a new type of dry magnetic separator for pulverized ore [J]. Modern Mining, 2019, 35(4): 133-135.
- [17] 谢顺平, 胡志成, 卢东方, 等. 气流型干式磁选机在细粒磁铁矿中的应用及机理分析[J]. 有色金属工程, 2022, 12(9): 79-91.
- XIE Shunping, HU Zhicheng, LU Dongfang, et al. Application and mechanism analysis of air-flow dry magnetic separator on fine magnetite ore [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(9): 79-91.

- [18] 王欣,展仁礼,陈铁军,等. 风磁联合干式磁选机在粉煤灰提铁中的应用[J]. 矿山机械,2019,47(9):53-57.
WANG Xin, ZHAN Renli, CHEN Tiejun, et al. Application of wind-magnetic combined dry magnetic separator in iron beneficiation from fly ash[J]. Mining & Processing Equipment,2019,47(9):53-57.
- [19] 夏本玉. 一种干式磁选设备:CN217491709U[P]. 2022-09-27.
XIA Benyu. A dry magnetic separation equipment: CN217491709U[P]. 2022-09-27..
- [20] 卢东方,王毓华,胡岳华,等. 风力带式磁选机: CN205761746U[P]. 2016-12-07.
LU Dongfang, WANG Yuhua, HU Yuehua, et al. Wind belt magnetic separator: CN205761746U[P]. 2016-12-07.
- [21] 詹明哲. 流态化干式磁选颗粒流动特性及参数优化研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.
ZHAN Mingzhe. Study on particles flow characteristics and parameters optimization of fluidized dry magnetic separation[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2022.
- [22] 孙欢庆,汪建新,曹丽英. 一种干式多级风磁选机: CN108296015A[P]. 2018-07-20.
SUN Huanqing, WANG Jianxin, CAO Liying. A dry multi-stage air magnetic separator: CN108296015A[P]. 2018-07-20.
- [23] 汪建新,李慧慧,靳少康. 干式磁选机分选品位影响因素研究[J]. 有色金属(选矿部分),2023(3):144-151.
WANG Jianxin, LI Huihui, JIN Shaokang. Study on influencing factors of separation grade of dry magnetic separator [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2023(3):144-151.
- [24] LU D F, LIU J J, CHENG Z Y, et al. Development of an open-gradient magnetic separator in the aerodynamic field [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing,2020,56(2):325-337.
- [25] 刘剑军,卢东方,王毓华,等. 风力作用下的干式磁选机对铁矿预选的影响[J]. 中国有色金属学报,2020,30(10):2482-2491.
LIU Jianjun, LU Dongfang, WANG Yuhua, et al. Influence of dry magnetic separator under the action of wind on magnetite pre-separation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30 (10): 2482-2491.
- [26] 何亚民,魏勇,徐智平. 一种引进风力的干式磁选机以及矿物磁选方法:CN 104959226A[P]. 2015-10-07.
HE Yamin, WEI Yong, XU Zhiping. A dry magnetic separator with wind power and mineral magnetic separation method:CN 104959226A[P]. 2015-10-07.
- [27] 孙树春. 一种干式风磁选机及其使用方法:CN109847926A[P]. 2019-06-07.
SUN Shuchun. A dry type wind magnetic separator and its usage:CN109847926A[P]. 2019-06-07.
- [28] 刘剑军,付亚峰,满晓霏,等. 基于风重磁复合力场的磁选以及方法:CN114602649A[P]. 2022-06-10.
LIU Jianjun, FU Yafeng, MAN Xiaofei, et al. Magnetic separation based on wind-gravity-magnetic compound force field and method: CN114602649A [P]. 2022-06-10.
- [29] 孟祥志,李艳军. 一种采用风力送料的无动力电磁平板式干式磁选机:CN 114632619 A[P]. 2022-06-17.
MENG Xiangzhi, LI Yanjun. An unpowered electromagnetic plate type dry magnetic separator with wind feeding:CN114632619A[P]. 2022-06-17.
- [30] 吴其胜,苗晨,江铭,等. 一种新型干式风磁联合磁选机:CN113182070A[P]. 2021-07-30.
WU Qisheng, MIAO Chen, JIANG Ming, et al. A new type of dry wind-magnetic combined magnetic separator: CN113182070A[P]. 2021-07-30.
- [31] 隋鑫. 干式风力永磁精选矿机:CN102513206A[P]. 2012-06-27.
SUI Xin. Dry wind-driven permanent magnet concentrator: CN102513206A[P]. 2012-06-27.
- [32] 郑广智,任云鹏,姜磊,等. 风力给料干式永磁磁选机: CN102941156A[P]. 2013-02-27.
ZHENG Guangzhi, REN Yunpeng, JIANG Lei, et al. Wind feeding dry permanent magnet separator: CN102941156A[P]. 2013-02-27.

(本文编辑 刘水红)