

doi:10.3969/j.issn1671-9492.2019.05.021

永磁辊筒式强磁选设备的发展

胡永会^{1,2}, 冉红想^{1,2}

(1. 北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

2. 北矿机电科技有限责任公司, 北京 100160)

摘 要:节能降耗一直是磁选技术与装备的重要追求目标,而开放磁系式永磁强磁选是分离弱磁性矿石和非磁性脉石的高效、低成本、绿色技术,强磁永磁化技术发展潜力大、前景好。永磁强磁选设备得到广泛应用的主要有辊式与筒式两种结构形式,本文对其在弱磁性矿物的块矿干式预选、粗粒湿式预选、微细粒精选及非金属矿提纯等生产工艺流程中的应用情况进行了综述。

关键词:节能降耗;开放磁系;弱磁性矿物;强磁选;永磁化

中图分类号:TD457

文献标志码:A

文章编号:1671-9492(2019)05-0000-00

Development of Permanent Roll and Drum High-Intensity Magnetic Separators

HU Yonghui^{1,2}, RAN Hongxiang^{1,2}

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. BGRIMM Machinery & Automation Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: Energy saving has always been the pursuit of magnetic separation technology and equipment, while the high-intensity permanent magnetic separation with open magnetic system is a efficient, low-cost and green technology in separating weak magnetic minerals from non-magnetic gangues. So high-field permanent magnetization has a good and potential development prospects. Generally, two types of roll and drum high-intensity permanent magnetic separators were widely applied, and their applications in production processing such as lump ore dry preconcentration, coarse ore wet preconcentration, fine particle concentration and nonmetallic ore purification were summarized in this paper.

Key words: energy saving; open magnetic system; weak magnetic mineral; high-intensity magnetic separation; permanent magnetization

能耗一直是制约矿产资源高效开发、选矿厂经济运营及技术成果工程转化的主要因素。在磁选技术与装备的发展过程中,解决能耗问题的一个重要发展方向是超导磁选,但超导设备投资巨大、管理维护难度大,只在某些行业或领域得到应用;而另一个发展方向即是强磁永磁化,采用永磁体取代电磁励磁线圈,数十年来取得较好发展。

强磁场磁选机主要采用闭合磁系和一定形状的感应磁极或磁介质,并在其选分区产生较强的磁场力,从而能够有效地分选弱磁性矿物。20 世纪对于强磁场磁选机的研制工作一直是国内外磁选行业的热点,但多为电磁强磁场磁选机,其中针对感应辊强磁选机研制较早且较有名的是西德 KHD 公司 WN

型、美国 Carpco 公司、斯洛伐克科学院 VMR 型、苏联黑色金属选矿研究院 ЭBM 型、英国 Boxmag-Rapid 公司 IRB 型、澳大利亚 Reading 型等^[1,2]。我国自 20 世纪 80 年代以来也自主研发出多种干、湿式电磁强磁场磁选机,如长沙矿冶研究院于 70 年代末研制出 Shp 湿式强磁选机,沈阳矿山机器厂、马鞍山矿山研究院与中国地质科学院矿产综合利用研究所于 70 年代末 80 年代初也分别研制出 OGD、CS、SSQ 湿式感应辊强磁选机,北京矿冶研究院于 90 年代初研制出 GCG 干式感应辊强磁选机,等^[3-5]。

电磁强磁场磁选机普遍存在运行能耗高、台时效率低、维护成本高等问题,随着永磁材料不断发展,大型科研院所对强磁永磁化路线的坚持,国内外

收稿日期:2019-07-11

修回日期:2019-08-09

作者简介:胡永会(1985—),男,江苏徐州人,硕士,高级工程师,从事科研项目管理工;电子邮箱:huyonghui@bgrimm.com,工作电话:010-63299269

陆续研制出一系列采用挤压磁系结构的磁选机,按工业成功应用的设备结构形式的不同主要分为辊式和筒式两种强磁选机。该结构磁选机不仅具有很高的磁场强度,还具有很大的磁场梯度,对弱磁性颗粒的作用力大大提高。

1 永磁辊式强磁选机

20世纪70年代末,芬兰 Kone 公司根据 Erkki A. Laurila 教授永磁磁路设计思想研制出 Hips 挤压磁系磁选机,可得到高达 1.5 T 的磁场强度^[6]。自 80 年代初以来,南非 Bateman 公司也研制出 Permroll 永磁干式强磁选机,磁力辊由高性能钕铁硼稀土磁铁薄圆盘与更薄的钢圆盘交替布置所构成,磁力辊表面磁场强度超过 1.2 T,表面磁场梯度大于 0.8 T/mm^[7]。90 年代初,美国 INPROSYS 公司研制出 HS 型永磁辊式强磁机,采用钕铁硼磁体可在皮带表面达到 1T 以上磁场强度,辊最大规格达到(300 mm(2 000 mm^[8]。南京梅山铁矿于 1998 年进口一台 HS-30 三辊强磁机对 75+12 mm 粗粒级进行干式预选作业,皮带表面磁场强度高达 770 mT,辊规格为(100/300 mm(1 230 mm,处理量 50~60 t/(h(台),较现场重介质振动溜槽实现选矿回收率与选矿效率双提高,但由于超薄皮带使用寿命比较短限制了其后续推广应用^[9]。之后美国 ERIEZ 公司、英国 Boxmag-Rapid 公司等也陆续推出 RE 型、Magnarool 型稀土永磁强磁辊式磁选机,(100 mm(1 500 mm 为常见规格,工作区磁场强度高达 1.2 T 以上,如图 1 所示。

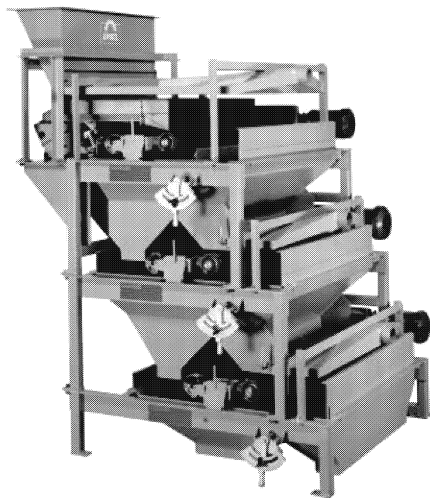


图 1 ERIEZ 公司 RE 型三辊永磁强磁机

Fig. 1 RE type magnetic separator from Eriez

早在 20 世纪 70 年代初,沈阳矿山机器厂即自行研制出国内第一台对辊永磁强磁选机并在坂潭锡

矿投入生产,辊尺寸(650 mm(200 mm,磁系由锶铁氧体磁块组成,闭合磁路处磁场强度可达 2.6 T^[10]。70 年代中期,北京矿冶研究总院采用锶铅铁氧体磁块研制出工业型永磁湿式感应辊强磁选机,辊尺寸(250 mm(1 050 mm,感应辊表面齿尖处磁场强度为 1T,并在云锡集团卡房选厂完成粗粒级锡石的回收^[11]。如图 2 所示,之后该院又推出 RGC 型干式永磁辊式强磁选机用于 10 mm 粒级弱磁性矿选别或非金属矿除铁提纯,例如新疆某红柱石选厂将矿石破碎至 5 mm 并采用 2RGC-150(1000 双辊强磁选机进行两次分选,可以获得 Al₂O₃ 品位 55%~58% 的红柱石精矿,其中 Fe₂O₃ 含量小于 1%^[12]。90 年代初,长沙矿冶研究院研制出 CRIMM-100(1000-1/2 干式单/双辊稀土永磁辊式强磁选机,磁辊由高性能钕铁硼磁盘和 DT 工业纯铁盘组成,磁辊表面磁场强度 1.2 T、表面磁场梯度 0.3 T/mm^[13]。CRIMM 型干式强磁机针对马钢姑山赤铁矿、酒钢桦树沟镜铁矿、湖南桂阳铅锌锰矿等弱磁性矿选别,及红柱石、蓝晶石等非金属矿除铁提纯等领域完成探索试验。

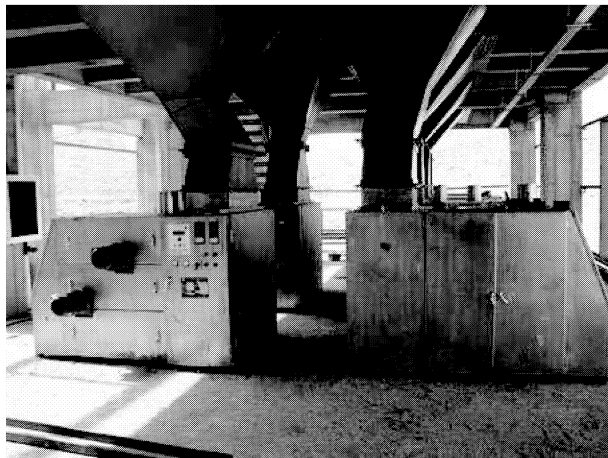


图 2 2RGC 双辊强磁选机应用现场

Fig. 2 On-site application of 2RGC magnetic separator

2002 年初,马鞍山矿山研究院也研制出工业型 YCG-(350 mm(1 000 mm 粗粒永磁辊式强磁选机,辊表磁场强度高达 1.3T,处理矿石粒度上限为 30~50 mm。2003 年宝钢集团梅山矿业有限公司采用该设备选别 20+2 mm 粒级矿石,且选别指标明显优于美国 INPROSYS 公司进口的(300 mm(1 000 mm 双辊式强磁机^[14]。同年,四川会东满银沟矿业集团公司新建选厂也选用 4 台该规格设备对 40+15 mm 粒级矿石进行干式预选,可以提前获得产率约 20%、铁品位大于 50% 的合格块矿。近年,YCG

系列粗粒永磁辊式强磁选机已推广至湖北地区鲕状赤铁矿、安徽地区磁—赤混合铁矿、河北地区氧化矿、南非铬铁矿等多个弱磁性矿种的粗粒干式预选,如图3所示。YCG系列永磁辊式强磁选机的磁辊采用积木化结构,常用磁辊直径350 mm且可以加大至目前最大的600 mm,同时增大处理物料的粒径和台时处理量,目前工业应用规格最大的YCG-600(1500永磁辊式强磁选机最大台时处理量达100t,选别粒度达75 mm。



图3 YCG粗粒辊式强磁机应用现场

Fig. 3 On-site application of YCG magnetic separator

2 永磁筒式强磁选机

永磁辊式强磁选机表面磁场力大、卸料难,因而采用超薄皮带输送物料到磁场区进行分选;而辊表磁场强度大,但沿径向衰减非常严重,磁辊表面运输皮带会使场强衰减,故应尽量降低皮带厚度为宜。高强度薄型运输带寿命很短价格却高昂,造成设备频繁停机、维护成本高等实际难题,在很大程度上限制了该类磁选机的推广使用。为解决该难题,国内外研究人员利用新型挤压型磁路方式并参照常规筒式磁选机磁系结构,设计出磁场强度高、扇形磁系结构的永磁筒式强磁选机。

上世纪80年代初,美国ERIEZ公司研制出RE型稀土筒式强磁选机,最大规格为(914 mm(1 500 mm。磁系结构由极性交变的稀土磁条和作为磁极的软铁条组合而成,磁系包角120°,软铁磁极被感应产生高磁场和高梯度磁场,转筒表面峰值磁场达到0.7T,能有效除去多种顺磁性物料^[15]。

90年代初,长沙矿冶研究院也研制出PD型稀土永磁筒式中强磁场磁机,筒径有400 mm和600 mm两种,筒长400~1 800 mm,筒面峰值磁场最高可达0.8T。1994年又研制出一台适合非金属除铁

的PD-400(800三筒永磁中强磁场磁选机,并于同年11月在贵阳第七砂轮厂取代电磁选机选别刚玉物料^[16]。同年,该院研制出的PMHIS-600(1200型永磁中磁机在文山州斗南锰矿针对-30mm锰矿石干式预选完成工业试验与设备考核,获得令人十分满意的结果^[17]。1999年该院又研制出筒表磁场强度达0.95T的PMHIS-300(1000型永磁强磁机并在马钢姑山铁矿完成-12+5 mm粒级粗粒预选试验,之后现场选用数台套PMHIS-300(1000与PMHIS-600(1000型强磁机完成选厂设备改造^[18]。

1995年,长沙矿冶研究院研制的PMHIS-1000(2400型湿式永磁中磁机在武钢矿业金山店选厂正式投入使用,筒表最高磁场强度550 mT,处理能力120 t/(h(台)^[19]。2002年该院又研制成功DPMS型广义分选空间湿式永磁强磁选机,首次采用上部给料的给矿方式,以补偿磁场的不足,同时将分选箱密封后装满水,从而使给入的物料在水的浮力作用下得以分散,强化了磁选机的选别过程^[20]。2005年在广西大新锰矿碳酸锰完成新型设备工业考察,2006年正式在福建连城锰矿投产,之后迅速推广至多家选矿厂^[21]。生产实践表明,DPMS型广义分选空间湿式永磁强磁选机对于-6 mm弱磁性矿物磁选效果较为显著。

90年代末,北京矿冶研究总院推出RTG(X)系列稀土永磁筒式强磁选机,磁系为挤压式扇形结构,磁系结构采用疏导与阻止相结合的磁路设计方法,在原双面挤压磁系结构基础在内侧增加第三面堵漏磁极,提高磁通密度并延长磁力线闭合路径,从而大幅度提高磁场强度及其作用深度实现粗粒分选。设备磁系磁极表面场强达到1.7 T,采用不锈钢分选筒,筒表磁场强度达到0.9 T且磁场梯度大,用振动给料器或给料斗将物料给到分选筒表面上分选,克服了辊式磁选机超薄皮带易磨损的问题,用于分选中、弱磁性矿物,如石英砂、钾长石、蛭石、金红石、锡石等矿物除铁提纯,从海滨砂矿中回收钛铁矿,石榴子石富集等等。

1996年底,第一台RTG0406稀土永磁筒式强磁选机在江苏东海县工业应用,用于水晶质石英砂除铁提纯,取得很好的分选指标。新疆某蛭石有限公司使用RTG0615稀土永磁筒式强磁选机提纯蛭石矿,分选粒度10 mm,处理能力10 t/(h(台),也取得了很好效果^[22]。深圳赛格三星彩显股份公司两条生产线全部从美国进口,所用磁选机为美国ERIEZ公司生产,由于除铁效果差影响了玻壳的质量和成

品率,该厂购买了两台 RTG 型磁选机取代现场磁选机回收废料,大大提高了玻壳的质量和成品率,延长了熔炼炉的使用寿命。如图 4 所示,2012 年马钢集团姑山铁矿采用 2 台套 RTGX0612 磁选机用于 $\phi 45+6$ mm 粒级赤铁矿预选作业,处理量 $50\sim 60$ t/(h (台))^[23]。工业应用实践证明,RTGX 永磁筒式强磁选机磁场特性尤其适于弱磁性块状矿物的预选作业,处理能力大、粒级范围宽,分选效果显著。

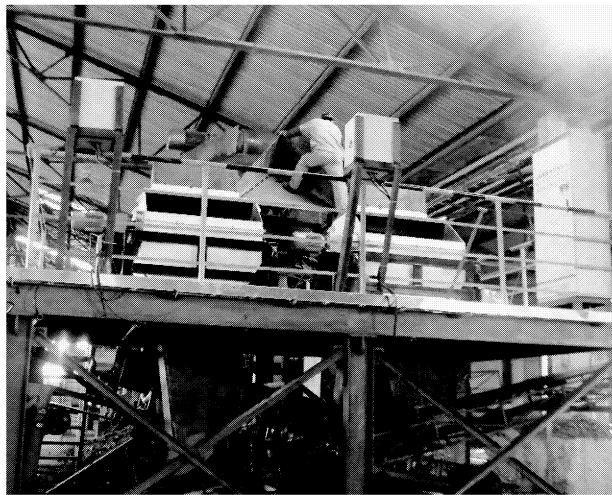
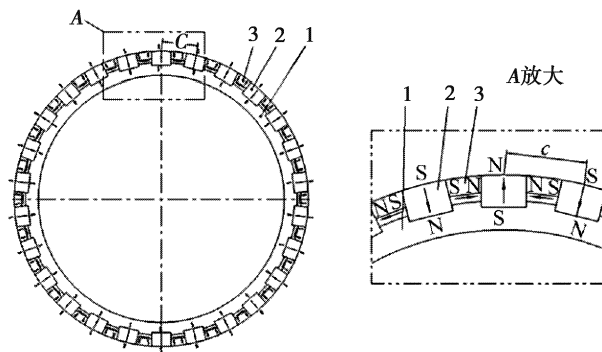


图 4 RTGX 强磁选机现场应用

Fig. 4 On-site application of RTGX magnetic separator

常规永磁开放磁路分选区域的磁场强度难以超过 6 000 Gs,且磁极中心对应磁筒表面处的磁场强度小于 5 000 Gs,选别铬铁矿、钛铁矿等微细粒弱磁性矿物效果差,因此开放磁系高梯度磁选为微细粒弱磁性矿石与非磁性脉石高效、低成本磁分离提供了一种途径。如图 5 所示,近年长沙矿冶研究院研制了一种开放磁系圆筒型湿式强磁选机,其分选筒表面峰值磁场强达到 1.03 T,强磁力捕收线分布密度达到 $125\text{ m/m}^{[24]}$ 。通过对钛铁矿的磁选试验表明,该机可有效分选微细粒级弱磁性矿物,分选指标与电磁立环强磁选机相当。

矿冶集团也研制出一种开放磁系永磁湿式高梯度磁选机,可在筒体表面分选区产生 (8 000 Gs) 的磁场强度,分选区磁场梯度比常规开放磁系提高 10 倍以上^[25]。某钽钛磁铁选厂采用强磁—浮选工艺流程选别钛铁矿,但现有电磁立环高梯度强磁选机精矿夹杂较严重,为此研制一台如图 6 所示的 RTGJ0404 (规格为 (400 mm (400 mm)) 试验样机开展了分选钛铁矿的技术尝试,实验结果表明设备分选区磁场力满足钛铁矿捕收要求,同时易于抛出钛辉石等弱磁性脉石矿物,可以提高入浮前粗精矿的 TiO_2 品位。



1—磁轭;2—主磁极;3—副磁极

图 5 开放磁系圆筒型永磁湿式强磁选机磁系结构

Fig. 5 Magnetic system of wet drum high-intensity permanent separator with open magnetic system

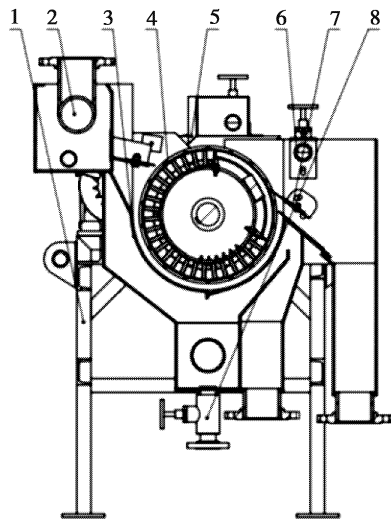


图 6 RTGJ0404 试验样机结构示意图

Fig. 6 Schematic structure of RTGJ0404 experimental prototype

3 结论

矿产资源开发史即是与能耗的斗争史,节能降耗也一直是矿山装备的重要革新方向。截至 20 世纪 70、80 年代,在世界范围内分选弱磁性矿物只能选择电磁强磁选机,严重制约了矿产高效、经济、规模化开发利用。随后高性能稀土磁性材料的市场化得到了广大矿业工作者的充分重视,加之磁选理论、磁路设计等基础知识的迅速更新,强磁永磁化技术一度成为研发热点,陆续研制出辊式、轮式、带式、筒式等多种结构形式的永磁强磁选设备,在工业应用中得到广泛应用的主要是辊式与筒式磁选机。辊式有效磁场强度大,适用于细粒级分选但设备规格小、卸矿难度大;而筒式磁场深度大,适用于分选磁性稍强的粗粒弱磁性矿物,对细粒级、磁性较弱的矿物分

选效果很差。目前,针对赤铁矿、锰矿、钛铁矿等弱磁性矿的块矿干式预选与粗粒湿式预选已基本实现磁选设备永磁化,而针对微细粒弱磁性矿物的粗、精选虽然持续努力,实验室探索与工业小试也取得一定进展,但与常规的电磁立环高梯度、电机平环强磁机等电磁设备仍存在较大差距,在有效磁场力的持续增强、矿物性质波动的适应性、磁分离精度的稳定性等多个方面仍有诸多难题需攻克,强磁永磁化任重而道远。

参考文献

- [1]刘承帅,王晓明.磁选技术应用进展[J].现代矿业,2017(7):38-44.
- [2]冉红想.永磁强磁选技术的发展[J].有色金属(选矿部分),2013(z1):50-53.
- [3]梁治安,夏青,伍红强.我国几种磁选设备的发展和应用[J].金属矿业,2017(2):128-134.
- [4]刘永振,王晓明.近几年我国永磁磁选设备的技术发展[J].有色金属(选矿部分),2017(z1):68-73.
- [5]冉红想,罗林,周岳远.国内粗粒弱磁性矿石选矿设备现状与发展方向[J].金属矿业,2017(2):128-134.
- [6]袁罗生.永磁强磁选机[J].江西冶金,1983,3(4):48-50.
- [7]孙仲元.永磁体及某些磁选机的发展[C].2006年全国金属矿节约资源及高效选矿加工利用学术研讨与技术成果交流会论文集,2006:52-59.
- [8]黄华越,胡明振.国内外永磁磁选机研究进展及发展趋势[J].矿山机械,2011,39(10):1-6.
- [9]吴世清,圣洪,赵光宇,等.YCG系列粗粒永磁辊式强磁选机的研制及现场生产应用[C].2006年全国金属矿节约资源及高效选矿加工利用学术研讨与技术成果交流会论文集,2006:225-229.
- [10]坂潭锡矿.对辊永磁强磁选矿机选矿实践[J].有色金属(冶炼部分),1973(2):19-21.
- [11]云锡公司中心试验所.湿式强磁场磁选机在我司的试验[J].云南冶金,1976(1):28-33.
- [12]冉红想,卢刚.强磁选设备在非金属矿除铁中的应用[C].第六届全国选矿设备及自动化技术学术会议论文集,2011:150-154.
- [13]李明德,李涛,王明才.CRIMM型稀土永磁辊式强磁选机研制[J].矿冶工程,1993,13(1):32-34.
- [14]张祖刚.永磁辊式强磁选机在梅山选厂的使用[J].矿业快报,2004(9):37-38.
- [15]D A 诺尔格兰,冯定五.强磁场稀土鼓式磁选机的工业应用[J].国外金属矿选矿,1994(9):15-19.
- [16]曹志良.筒式永磁中强磁场磁选机的研制[J].矿冶工程,1994,14(4):31-34.
- [17]王子燕,张真才,曹志良,等.(600mm(1200mm 永磁中强磁场磁选机在斗南锰矿的应用[J].中国锰业,1995,13(1):28-29,37.
- [18]杨庆林,钱士湖.筒式永磁强磁选机分选粗粒赤铁矿的工业试验[J].金属矿山,2000(4):37-40.
- [19]曹志良,陈淳,朱俊士,等.PMHIS-(1000(2400 湿式永磁中磁机在金山店铁矿的应用[J].金属矿山,1997(2):17-18,29.
- [20]曹志良.粗粒弱磁性矿物磁选设备及工艺新进展[C].2008年全国金属矿山难选矿及低品位矿选矿新技术学术研讨与技术成果交流暨设备展示会论文集,2008:379-383.
- [21]张裕发.DPMS湿式永磁磁选机在福建省连城锰矿的应用[J].中国锰业,2008,26(3):42-43.
- [22]刘永振.RTG稀土永磁强磁力筒式磁选机的研究及应用[C].全国选矿设备学术会议,2001:104-107.
- [23]冉红想,王芝伟,魏红港.RTGX型永磁强磁选机在弱磁性铁矿石预选中的应用[J].矿冶,2015,24(增刊1):23-25.
- [24]刘石梅.开放磁系圆筒型永磁湿式强磁选机研制与试验研究[J].矿山机械,2017,45(9):45-48.
- [25]成磊,史佩伟,尚红亮,等.一种采用开放磁路永磁高梯度磁系的强磁选机:201811245510.X[P].2019-02-15.