



超导磁分离技术综述

段晚晴,姜向东,王 豫,黄 庆
(西南交通大学,四川 成都 610031)

摘要:随着超导技术的发展,超导材料越来越多应用于工业领域,超导磁分离技术就是其中之一。本文对超导磁分离技术的原理、类型、优势和发展现状等方面做了简要介绍,并就不同类型的高温超导磁分离系统分别提出了自己的改进设计方案。

关键词:超导材料;磁分离;高温超导

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2014.01.001

中图分类号:TD924 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2014)01-0001-04

1 超导磁分离概述

1.1 磁分离原理

当对一个被磁化颗粒施加梯度磁场时,作用在它两级的磁场力不等,颗粒受到净力作用发生运动被分离出来,这就是磁分离的原理。

磁化颗粒在磁场中受到的净力与颗粒产生的磁化强度、颗粒体积、外磁场强度及其梯度有关。计算公式为 $F_M = \chi V H \frac{dH}{dx}$,式中 F_M 为磁场力, χ 为磁化强度, V 为颗粒体积, H 为磁场强度, dH/dx 为磁场梯度。由此可见,磁场强度越高磁场梯度越大,颗粒受到净力作用就越大,磁分离效果也就越好。

1.2 主要磁分离类型

按取得较高磁场梯度的方法,磁分离技术分为两类:一类是高梯度磁分离,形成相对均匀的高磁场区,在此区域中填充一定量的磁性介质,使得磁性介质周围的磁场发生畸变,形成磁分离需要的高梯度磁场;另一类就是开梯度磁分离,其可直接形成场强较高、磁场梯度也较高的区域,在此区域实现对磁性物质的分离,而不需使用磁性材料做介质。

在高梯度磁分离系统中,分选过程一般是湿式

的,流体通过分选区时,其中的磁性物质被吸附到磁性介质(一般为金属丝状物)上,从而达到分离的目的。它的优点是磁场梯度大,磁力密度可达 10^{12} N/m^2 ^[1],易于分选细颗粒、弱磁性的物质。缺点是处理量受空间限制,分选过程是湿式的,需设计专门的自动装置实现连续工作、避免堵塞;作用力程短,只有 0.1mm 左右。如果希望有尽可能的大磁选应用范围,即便是弱磁性物质也易被分选,可选择高梯度磁分离技术。开梯度磁分离系统的分选过程可以是湿式的,也可以是干式的。其分选原理是待分选物质通过分选区时,其中的磁性物质在磁力作用下发生偏转,而非磁性物质继续原来的运动轨迹,实现磁性与非磁性物质的分离。优点是单机处理量大;不易发生阻塞,可连续工作;作用力程较长,可达 10mm 左右。缺点是磁力密度较小,只有大约为 10^5 N/m^2 。主要适用于处理量大、大颗粒物质的分离。

1.3 超导磁分离技术

常规磁分离技术按照磁场来源分为永磁技术和电磁技术两种。永磁体产生的最大磁场较小,加铁芯的常规电磁体产生的最大磁场受到饱和磁化强度限制,很难超过 2T;而不用铁芯的常规电磁体要获得大磁场需要非常大的电能励磁,同时使用大量的

收稿日期:2013-05-06;改回日期:2013-06-27

基金项目:四川省科技支撑计划项目—高温超导磁分离装置关键技术研究(2008FZ0126-1)

作者简介:段晚晴(1984-),男,在读博士生,主要从事电工理论与新技术专业的研究。

冷却水来防止绕组熔化,运行成本极高。而超导磁分离技术是使用超导磁体作为磁分离磁场来源,无论超导磁体是使用超导块材还是超导线作,本身几乎不消耗电能,只需很小的维持低温条件的电能就能获得强磁场,不需铁芯,也没有水冷问题,有很大的发展前途。

超导磁分离技术按照使用超导材料不同,分为低温超导磁分离和高温超导磁分离。低温超导技术已经较为成熟,现有超导磁分离系统多使用低温超导磁分离技术。但是低温超导技术需要极低的环境温度,实现这个工作温度需要使用液氮冷却(4.2K),成本很高。

而高温超导材料临界温度高,使用液氮(77K)制冷即可。空气的主要成分是氮气,将空气冷却至77K便液化,因而液氮成本很低。高温超导磁体的临界磁场和临界电流密度与温度有关,只要使用制冷机降温至20K左右,就能大幅提高其产生的磁场,使得性能大幅提高。高温超导磁分离技术国内外研究基本处于实验室阶段,但因其具有低温超导磁分离技术无法比拟的优势,必将取代低温超导磁分离技术。

2 国内外研究现状

2.1 低温超导磁分离技术研究现状

多年前美国伊利磁学公司就研制了用于提纯高岭土的超导高梯度磁分离机,处理量为20t/h,此高梯度磁分离机磁体为NbTi线绕制的超导螺管,工作电流840A时中心磁场可达2T,磁体绕组内径为2.36m,外径2.61m,高0.508m^[1-3]。

英国CCL公司也曾为南非Foskor磷灰矿研制了一台开梯度超导磁分离机,用于弱磁性中等粒度磷灰石的分选,分选磁场强度为3.5T,处理量达60t/h^[1-3]。

德国KDH公司为土耳其伊斯坦布尔菱镁矿制作了一台鼓筒形开梯度低温超导磁分离机,可进行干式磁选,对弱磁性粗粒蛇纹石有很好的分选效果,分选区磁场大于3T,处理能力最高可达100t/h^[1-3]。

80年代捷克也曾研制出一台磁场强度达5T的往复式高梯度超导磁分离机,用于提纯高岭土,仅在矿山做试运行^[1-3]。我国多个研究单位先后开展了超导磁分离技术的研究工作,为了实现对赤铁矿石的分选,北京有色金属研究院和北京大学联合研制

磁场强度达6T的超导高梯度磁分离装置并进行试验。北京大学和北京自动化研究所也联合研制了一台分选区直径10cm,中心磁场约为5T的超导高梯度磁分离装置,对金刚石尾矿进行分选试验。北京有色金属研究院还利用一台超导开梯度磁分离机分别进行了一系列干式、湿式分选试验^[1,3]。

中国科学院电工研究所1990年建成了我国第一台工业化的超导高梯度磁分离装置。其分选口径80mm,有效分选长度400mm,超导磁体为NbTi线绕制的螺管磁体,可产生5T的磁场。分选试验结果是高岭土的白度提高了4度,高硫煤的无机硫和总硫脱除率分别可达60%和50%^[1,3-5]。

中国科学院电工研究所与低温技术实验中心合作研制了处理量达3t/h的试验用超导高梯度磁分离工业样机,用于分选高岭土。其中心磁场达3.5T,装置孔径为0.5m,有效分选长度达1m。试验结果表明,高岭土的白度提高3.7~5.3度^[1,3]。

2008年11月,高能物理研究所与企业合作,成功研制我国首台低温超导除铁器。除铁器是将混在物料中的磁性金属杂质清除的设备,可提高原料品质,主要应用于港口、矿山,是磁分离装置的一种。这台除铁器底部表面最高磁场大于2T,设备直径2.3m,高2.3m,重11.8t,可达到较好的除铁效果^[6]。

2.2 高温超导磁分离技术研究现状

美国超导公司研制了一台高温超导高梯度磁分离机,分离机装置内直径2.5cm。高温超导磁体使用624mBi-2223高温超导线材绕制而成,其外直径18cm,内直径5cm,高度为15.5cm,线圈匝数为1830匝,有双饼线圈17个。磁体分别在12~29K温度下进行了测试,测试结果表明其在27K时能产生1T以上的磁场,后又使用此磁分离机进行了高岭土磁分离试验^[7-8]。

阿跨法恩公司、住友商事电气工业公司和杜邦公司联合完成了一项高温超导高梯度磁分离研究,所使用磁分离装置内直径4cm。高温超导磁体使用宽3.5mm、厚0.24mm的Bi-2223高温超导线材绕制,线圈内直径6cm,外直径18cm,高15cm,有19个双饼线圈,匝数为2600匝,总重27kg,电感0.31H。此磁体在21K时能产生3T的磁场,试验结果表明将其用于去除高岭土中磁性物质,高岭土亮度可明显提高^[9]。

澳大利亚卧龙岗大学也使用Bi-2223线材研制

了一款高温超导高梯度磁分离机,磁体由12个单元组成,在30K时能产生3T的磁场^[10]。

日本九州电力公司和日立公司则联合研制了一款高温超导开梯度磁分离装置,使用已充磁的边长33mm、厚20mm的YBCO方形高温超导块材作为分选磁体,进行湿式分选。此装置可用于分选湖泊中的富营养物质,也可从高岭土与水的混合物中去除高岭土,试验表明提取高岭土的去除比例可以达到92.7%^[11]。

中国科学院电工研究所也研制了高温超导高梯度磁分离机,磁体使用Bi-2223线材绕制,内外直径分别为12cm和21.2cm,高11.18cm,冷却至10K时可以产生3.22T的磁场。电工所将其用于钢铁厂工业废水的处理的实验结果表明,其分离效率可达84.1%^[12]。

3 对高温超导磁分离技术设计改进方案

高温超导磁分离技术分为高梯度与开梯度磁分离两种。就这两类模式,本课题组分别进行了调查、研究,对现有技术的缺陷提出自己的设计方案,此两项方案相比现有技术都有很大改进。

3.1 高温超导高梯度磁分离系统设计

上述高温超导高梯度磁分离装置都是使用螺管形高温超导磁体产生一个高强度的匀强磁场,在匀场区填充磁性介质实现磁场发生畸变,形成高梯度磁场。但螺管磁体只有中心部分磁场较为均匀,这就缩小了分选区。为了扩大分选区,实现对现有磁分离系统的改良,我们提出给螺管磁体加补偿线圈来提高磁场均匀度。

3.1.1 高温超导材料选择

用高温超导技术实现磁分离,可以选用高温超导块材或线材,块材在77K最高可产生3T以上的磁场。由于临界电流密度限制,线材制作的磁体则只能产生略高于1T的磁场,相比处于劣势。但块材的磁场作用距离小,不适宜高梯度磁分离对分选空间的要求,本研究选用线材,二代YBCO线材性能好,为研究首选。运行状态则考虑使用制冷机降至20K以下温度,以提高磁场至3T以上。

3.1.2 磁体绕组改进方案

经过研究发现高梯度磁分离系统设计中分选区外磁场强度最好要有一定的均匀度。这是因为磁分

离效果与磁场强度、磁场梯度均有关。当流体流过分选区时垂直于流向的截面上各处外磁场强度不同会导致在不同位置流动的流体分离效果不同,影响分离效果。而流向上各处外磁场强度不同则会导致分离效果在流体经过分选区时前后不一,特别是是需要较高外磁场才能分离的小粒度颗粒只短时间经历高外磁场,可能需要多次磁分离才能达到分离效果。至于需要多大的磁场均匀度,就已有的一些装置的设计要求来看,最高要求达到95%。

对于高梯度磁分离系统而言,一般要求在一个圆柱体内受到轴向磁场作用并有均匀度要求。这通常使用螺管绕组来实现,并在绕组内部解决磁场均匀度问题。有限长直螺管磁体长度与直径比越大,其内部磁场均匀度就越高。这样的磁体可以保证在其中中心相当大范围的与其同轴的圆柱体空间内磁场的均匀度。例如中科院电工研究所建成的我国第一台低温超导高梯度磁分离装置的磁体即为螺管磁体,其内径为136mm,长度560mm。为满足磁分离的要求该装置在口径为80mm,有效分选长度为400mm,分选区内磁场均匀度达到95%^[4]。但是实际设计中有时要求分选区口径较大,以增加处理量。为节约超导磁体制造成本也可能使用较短分选长度的分离装置多次分选来达到效果。这样就可能出现磁体长度与直径比较小,从而分选区内磁场均匀度较小。

因此,我们提出通过在螺管磁体两端加补偿线圈来提高磁场均匀度,它只用增加少量的带材消耗就能扩大匀场分选区范围,可使用相关磁体设计软件完成设计。但作为超导磁体要考虑磁体两端径向磁场较大,可能导致临界电流密度下降,可以在这里使用两根带材并联或厚度高、临界电流密度大的带材取代原有带材来解决。

3.2 高温超导开梯度磁分离系统设计

现有超导开梯度磁分离装置多使用超导线圈制作,也有使用单块高温超导块材的,但尚未有使用多块高温超导块材的。高温超导块材性能优于超导线圈,但体积较小,产生磁场范围小。而使用多块高温超导块材可以提供较大范围的磁场,可提高磁分离效果,所以我们提出制作包含多块高温超导块材的开梯度磁分离系统的方案,以达到相比现有技术更好的分离效果。

3.2.1 高温超导材料选择

开梯度磁分离系统有不同类型,比如线形、偏移形、鼓筒形、对极形等。其中鼓筒形装置效果好、使用普遍,这里主要对其进行研究。

用高温超导实现磁分离,可以选用高温超导块材或线材。块材需进行充磁但不需直流电源,在 77K 临界电流密度限制下最高可产生 3T 甚至更高的磁场。而同样由于临界电流密度限制,YBCO 线材制作的磁体则只能产生略高于 1T 的磁场,相比处于劣势。而开梯度磁分离不存在块材磁场范围小的问题,所以这里主要考虑使用块材制作的鼓筒形开梯度磁分离系统。运行状态则考虑节约制冷成本,设计在液氮温区。

日本有使用单块高温超导块材制作湿式鼓筒形开梯度磁分离系统^[11],但其磁力作用面较小,这里考虑使用多块高温超导块材制作鼓筒形开梯度磁分离系统。

3.2.2 与高梯度磁分离相结合的方法

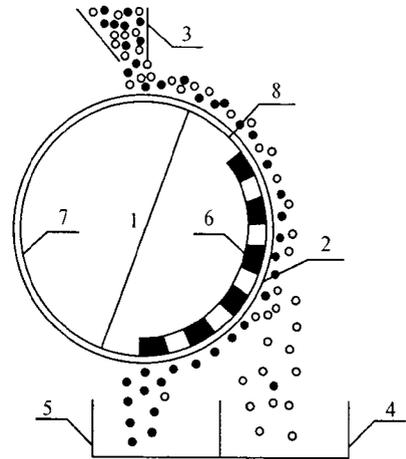
开梯度磁分离系统可以结合高梯度磁分离技术提高磁场梯度,改善分离效果。办法是在其外壳上覆盖钢毛,提高对磁性物质的吸附效率。钢毛宜选用软磁材料,避免旋转之后磁性物质不易脱落。钢毛长度应设计在开梯度磁分离系统的作用范围内,过短没有完全起作用,过长则没有意义。粗细、密度等应按高梯度磁分离的要求综合考虑。钢毛均应垂直于外壳,有一定硬度,避免带分离粉状物过多附着,不易脱落。

3.2.3 鼓筒形干式超导开梯度磁分离机设计方案

依照上述设计思想,本课题组设计了一种鼓筒形超导开梯度磁分离机(见图 1),已获得国家发明专利。其主要由中心恒磁源、可环绕中心恒磁源旋转的转筒、置于转筒上方的矿粉漏斗和置于转筒下方的非磁性物质收集箱及磁性物质收集箱构成。所述中心恒磁源由一液氮温区杜瓦瓶和贴合在杜瓦瓶内表面的高温超导块材贴块组成的有磁区构成。

其基本结构与常规永磁、电磁或超导鼓筒形开梯度磁分离机基本相同。矿粉从矿粉漏斗下落,然后随附着钢毛的转筒沿中心恒磁源有磁区的外侧运动,非磁性或弱磁性物质(图中白色颗粒)直接下落至非磁性物质收集箱,而较强磁性物质(图中黑色颗粒)则被磁场吸附,继续随附着钢毛的转筒运动,当运动至中心恒磁源的非磁性区时磁性物质下落至较强磁性物质收集箱。这样就将磁性与非磁性物质

或强磁性与弱磁性物质分离。



1-中心恒磁源;2-可环绕中心恒磁源旋转的转筒;
3-置于转筒上方的矿粉漏斗;4-置于转筒下方
的非磁性物质收集箱;5-磁性物质收集箱;
6-中心恒磁源有磁区;7-中心恒磁源非磁性区;
8-液氮温区杜瓦瓶

图 1 鼓筒形干式超导开梯度磁分离机

Fig. 1 Drum and dry type superconducting open gradient magnetic separator

中心恒磁源由一液氮温区杜瓦瓶和贴合在杜瓦瓶内表面的高温超导块材贴块组成的有磁区构成。液氮杜瓦瓶设计为的圆柱形分离式杜瓦,便于块材取放。有磁区由在无磁支架支撑下按极性不同连续交错排列多块充磁后表面磁场达 3T 以上的高温超导块材贴块构成。有磁区高温超导块材贴块覆盖杜瓦瓶弧形内表面不低于三分之一圆周弧度,此列块材应为从杜瓦壁一侧中上部延伸至底部。排布单列块材也可扩大为排列多列块材,扩大分选区。块材先充磁 3T 以上后再放入杜瓦。块材充磁后,其两表面可分别形成 N 极与 S 极,相邻块材极性若相同产生的磁场空间分布稳定,但相邻块材间会有巨大的斥力,故将组成有磁区的各高温超导块材贴块设计为按充磁后的磁场极性连续交错排列。图 1 有磁区中黑白相间的块状物即代表按不同极性方向放置的高温超导块材贴块。

为改善分离效果,开梯度磁分离可以与高梯度相结合提高磁场梯度。这里可在转筒外侧附着钢毛,钢毛周围的磁场发生畸变,提高了磁场梯度,对磁性物质的吸附效率自然提高。

4 结 语

本文简要介绍了高温超导磁分离技术的原理和研究现状,并就高梯度和开梯度高温超导磁分离技术分别提出了自己的改进方案。相信随着科学技术的发展,高温超导材料高成本、低稳定性的缺陷必将得到改善。届时,依靠其独特的优势,高温超导磁分离技术将不再会只是实验室技术,实现实用化、产业化是其必然发展趋势。

参考文献:

- [1] 林良真,张金龙,李传义,等. 超导电性及其应用[M]. 北京:工业大学出版社,1958. 347-350.
- [2] Kopp J. IEEE Trans on Magnetics, 1988, MAG-24(2):745.
- [3] 严陆光,宋守森. 中国科学院电工研究所论文报告集[C]. 1992(24):152-161.
- [4] 王家素,王素玉. 超导技术应用[M]. 成都:成都科技大学出版社,1995.
- [5] Yan L G et al. . IEEE Trans on Magnetics, 1991, MAG-27(2):2276.
- [6] http://www.ihep.cas.cn/ydhz/hzxm/200908/t20090819_2421188.html.
- [7] J. A. SELVAGGI et al. . Applied Superconductivity, 1998, 6(1):31-36, .
- [8] M. A. Daugherty et al. . IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 1997, 1(2):650-653.
- [9] J. Iannicelli et al. . IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 1997, 7(2):1061-1064.
- [10] J. X. Jin et al. . Physica C, 2000, 341-348:2611-2612.
- [11] H. Hayashi et al. . Physica C, 2004, 412-414:766-770.
- [12] Oiuliang Wang et al. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 2007, 17(2):2185-2188.

Summary of Superconducting Magnetic Separation Technology

Duan Wanqing, Jiang Xiangdong, Wang Yu, Huang Qing
(Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: With the development of superconducting technology, more and more superconducting materials are used in the industrial field. The superconducting magnetic separation technology is one of them. The principle, types, advantages and development situation of the superconducting magnetic separation technology were briefly introduced in this article. Also, the improvement programs for different types of high temperature superconducting (HTS) magnetic separation systems were put forward.

Keywords: Superconducting material; Magnetic separation, High temperature superconducting (HTS)

(上接9页)

The Situation and Utilization of Mine Solid Wastes in China

Zhang Jiawen¹, Cui Ning¹, Yin Bing², Xu Tieren³, Chen Lianjin³, Xue Qiang⁴, Li Linjie⁴

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, China;

2. Shizhuyuan Nonferrous Metal Co., Ltd., Chenzhou, Hunan, China;

3. Slag Comprehensive Development Co., Ltd., Zhenxiong, Zhaotong, Yunnan, China;

4. Institute of Management Sciences, Chengdu University of Theconology, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: The paper analyzes the damage and exacerbation to mine environment, ecosystem and land Construction in China. It dissects the current situation and potential of typical mine tailings and slag, such as Tungsten, bismuth, molybdenum polymetallic ore in Shihuyuan of Hunan, copper mine in Dexing of Jiangxi, pyrite slag in Zhenxiong of Yunnan and so on. The paper introduces systematic the major policy initiatives of comprehensive utilization of mining resources and protecting the environment in our country, and then proposes policy recommendations for typical mining of solid waste utilization and environmental governance.

Keywords: Mine solid waste; Comprehensive utilization, Environment protection; Policy recommendation