

干法选煤：新一代煤炭分选技术

迈克尔·凯瑟 杰拉尔德·勒特雷尔

采矿和矿物工程-弗吉尼亚理工大学的布莱克斯堡，弗吉尼亚州 24061

查尔斯·d·鲁斯

矿物分离技术股份有限公司，煤炭中心，宾夕法尼亚州 15423

DRIJET

论文发表于：

第 30 届年度国际选煤展览发布会

列克星敦郡，肯塔基州

2013 年 4 月 29 日-5 月 2 日

联系信息：

宾夕法尼亚州 15423 煤炭中心，矿物分选技术股份有限公司技术部 400 号

电话：(724)260-8730

干法选煤：新一代煤炭分选技术

迈克尔·凯瑟 杰拉尔德·勒特雷尔

采矿和矿物工程-弗吉尼亚理工大学的布莱克斯堡，弗吉尼亚州 24061

查尔斯·d·鲁斯

矿物分离技术股份有限公司，煤炭中心，宾夕法尼亚州 15423

摘 要

在 20 世纪 40 年代末，电子矿石分选器被首次应用于矿物加工工业中，从那以后快速微型处理器、先进的传感器以及低成本的分选设备促使了这种独一无二的分选技术得到快速发展，并且在各种应用领域中变得更具有商业吸引力，近期的评估表明，目前接近 300 种工业规模的分选器在全球被广泛应用于选矿中。电子分选器利用一种特别设计的传感器来鉴别分布于移动的传送带表面上的细颗粒的品质，高速微处理器利用传感器数据来控制位于输送机底部的气动执行器，经数据测试的气动执行器将接近目标品质的矿物颗粒转移到产品流中。本文主要描述了专门为煤炭洁净应用而设计的 DriJet™ 煤炭分选技术，该种系统为粗颗粒煤的品位提升提供了结构简单、高容量、低成本和环境影响最小的多种分选优势，近期，从原煤和尾煤的品位提升应用中得到的测试数据将会发表给出。

前 言

选煤提供了很多可能有吸引力的好处包括更低的运输费用、提高煤炭的利用属性以及减少了煤的悬浮颗粒和气态污染物的排放(埃克斯，1996，库奇，1995)。然而，这个行业中也面临着由增加固体废物处理装置和对工艺用水的需求和要求更高所带来的诸多相关方面的挑战(米南，2005，库奇，2000，奥尔，2002，加德纳等人，2003)。针对对于这些热点问题，一些研究小组便开始积极地去开发能够不利用水而去提高原煤的品位的新技术(勒特雷尔，2008)，其中有一种特别有发展前途的分选方法便是电子分选。在 20 世纪 40 年代末，电子矿石分选器被首次应用于矿物加工工业中，从那以后快速微型处理器、先进的传感器以及低成本的分选设备促使了这种独一无二的分选技术得到快速发展，并且在各种应用领域中变得更具有商业吸引力，近期的评估表明，目前接近 300 种工业规模的分选器在全球被广泛应用于选矿中。电子分选器利用一种特别设计的传感器来鉴别分布于移动的传送带表面上的细颗粒的品质，高速微处理器利用传感器数据来控制

制位于输送机底部的气动执行器，经数据测试的气动执行器将接近目标品质的矿物颗粒转移到产品流中。本文主要描述了专门为煤炭洁净应用而设计的 DriJet™ 煤炭分选技术，该种系统为粗颗粒煤的品位提升提供了结构简单、大容量、低成本和环境影响最小的多种分选优势。此外，在利用综合了能使表面废物处理和对水的需求最小化的生产流程工艺系统的条件下，小型化和较低的单位分选器技术成本改善了从尽可能接近工作面的原煤中分离矸石的可行性。

其中一种最新的并且极具先进的煤炭分选技术是由矿物分离技术股份有限公司已用于商业销售的 DriJet™ 分选机，这一创新技术的基本工作特性如图 1 所示。在操作过程中，煤以一层薄膜层的形式给到一条传送带上，传送带上的材料床层通过设有专有的使数以百计粒子经过 X 射线扫描的双能 X 射线分析仪，通过固体床层传输的 X 射线与存在于每一个颗粒的组分的原子序数是成比例的。由图 2 中显示所示，这种现象可以从矸石(由各种像 Si 和 Al 具有较高的原子序数的元素组成的无机矿物质)中区分煤(大部分是由低原子序数碳元素组成的有机物)，扫描仪的分辨率和扫描速度以及与之相关的电子设备都具有足够好的质量要求，能够在几分之一秒内将每一颗粒子的组成成分的剖面进行重建分析。一旦在粒子流中鉴别出煤和矸石，由气动驱动的在水平方向阵列的压缩空气的喷嘴瞬间喷射出受控制的高压空气冲向粒子流，将不需要的矸石颗粒转移到废品中，而煤炭颗粒按照正常的运行轨迹运动到洁净煤产品流中。

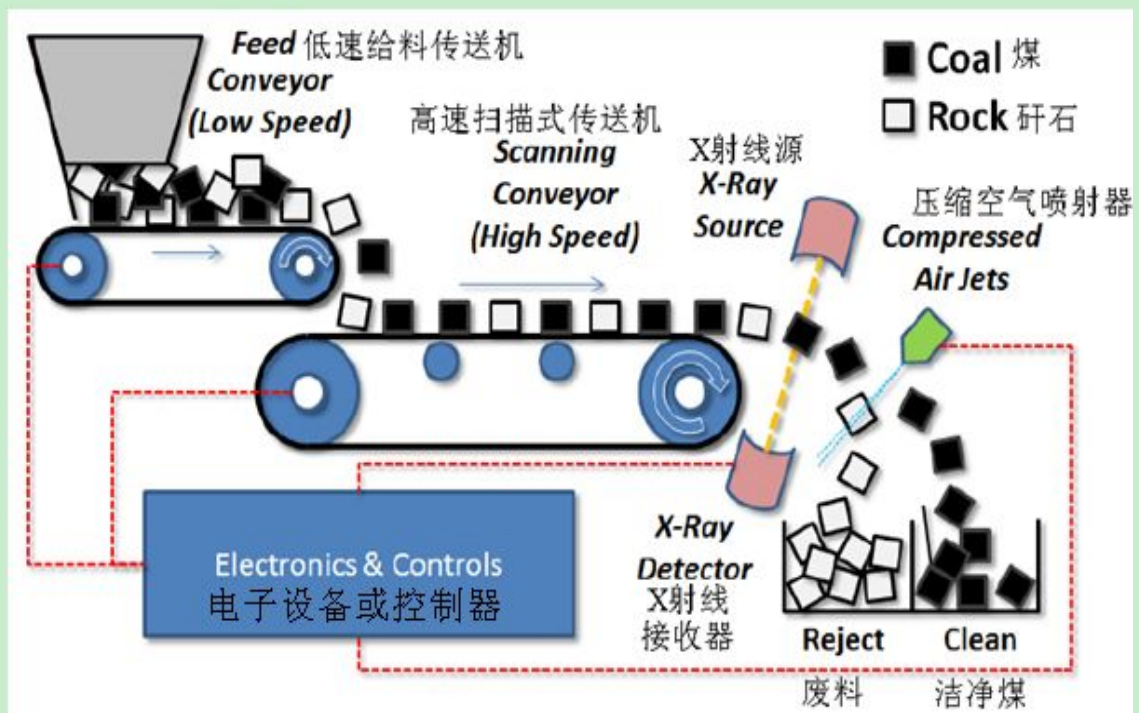


图 1 X 射线分选过程示意图

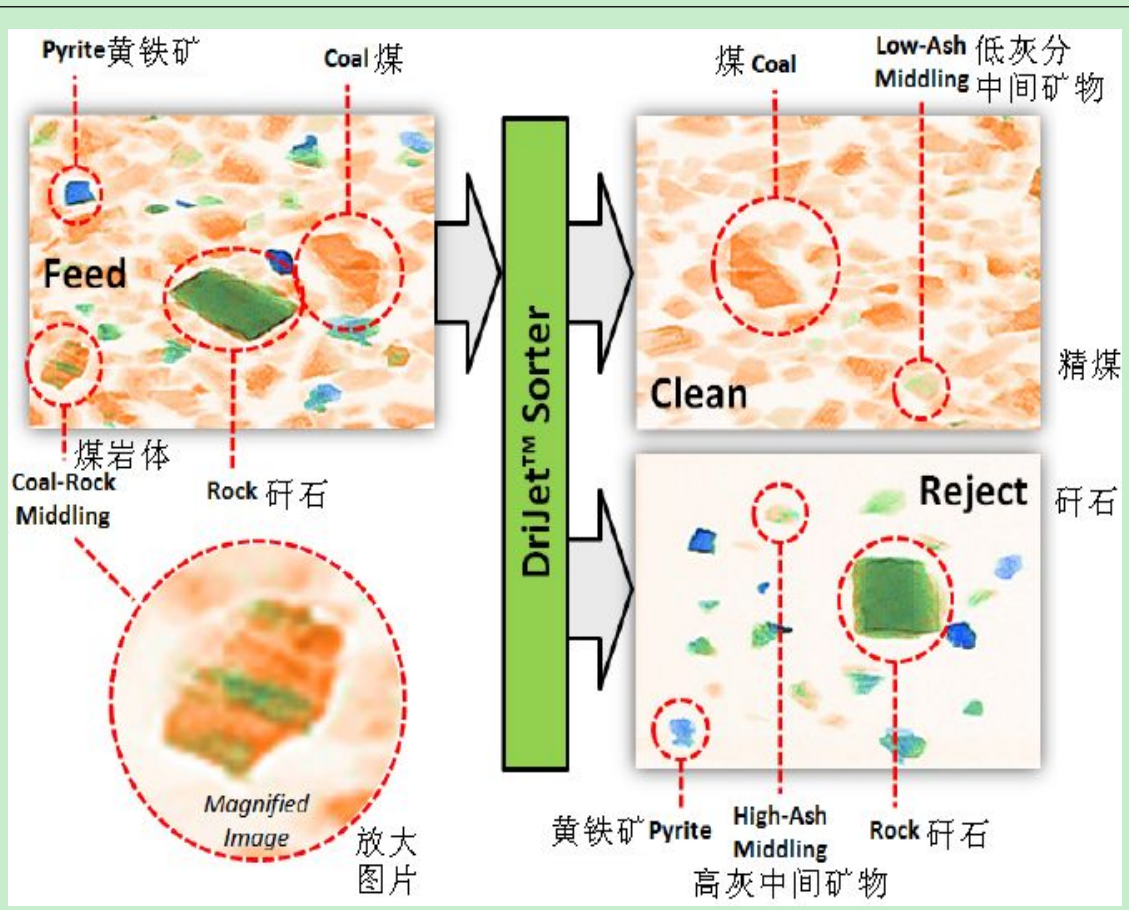


图 2 给料原矿、尾矿及洁净煤的 x 射线图

分选机测试

对于 DriJet™ 技术在进行标准半工业规模试验条件下，几组煤的洁净测试数据已被统计出来，这些探索性实验是在使用了位于美国东部一个生产矿的、具有高灰(大约灰分含量 40%)的原煤的样品条件下完成的。由于生产的限制，给料样本的尺寸大小使用半工业规模筛分系统中标称为 2 x 1/4 英寸的粒度级进行计算。具有固定尺寸的物料通过一个进料漏斗经传送皮带给到分选机中，给料传送带将物料传送到一条移动速度更快的检测传送带上，目的是让物料均匀地以薄膜层的形式平铺在检测传送带上，以利于 X 射线检测系统进行检测，同时，为了完善设备的性能极限，使用了多级式分选来完成试运行(例如，一级精煤产品是从第二级分选再加工得到的)。每一组测试后，混合后的精煤和尾矿产品被分别收集起来并存放在独立的容器中，以便于运送到煤炭分析实验室中进行分析。在实验室中，每个产品尺寸被划定为 2 x 3/4, 3/4 x 1/2, 1/2 x 1/4, 1/4 英寸 x 4 网和小于 4 网的粒度级，这些粒度级中的每一个粒度级都会被破碎，粉碎成较小的粒度级，然后进行灰分分析。

图 3 提供一个从两级 DriJet™ 循环电路测试中得到的按尺寸大小结果分析出的图解

综述图。为便于比较，从测试结果中获得的按尺寸大小结果的回收率，分别以精煤灰分函数和尾煤灰分含量的形式绘制在图 4 和图 5 中，回收率值代表了给料中洁净煤中可燃物的百分含量，从纯数学的角度上分析，这种性能指标计算作用公式为：

$$R = Y \times \left(\frac{100 - A_c}{100 - A_f} \right) \quad [1]$$

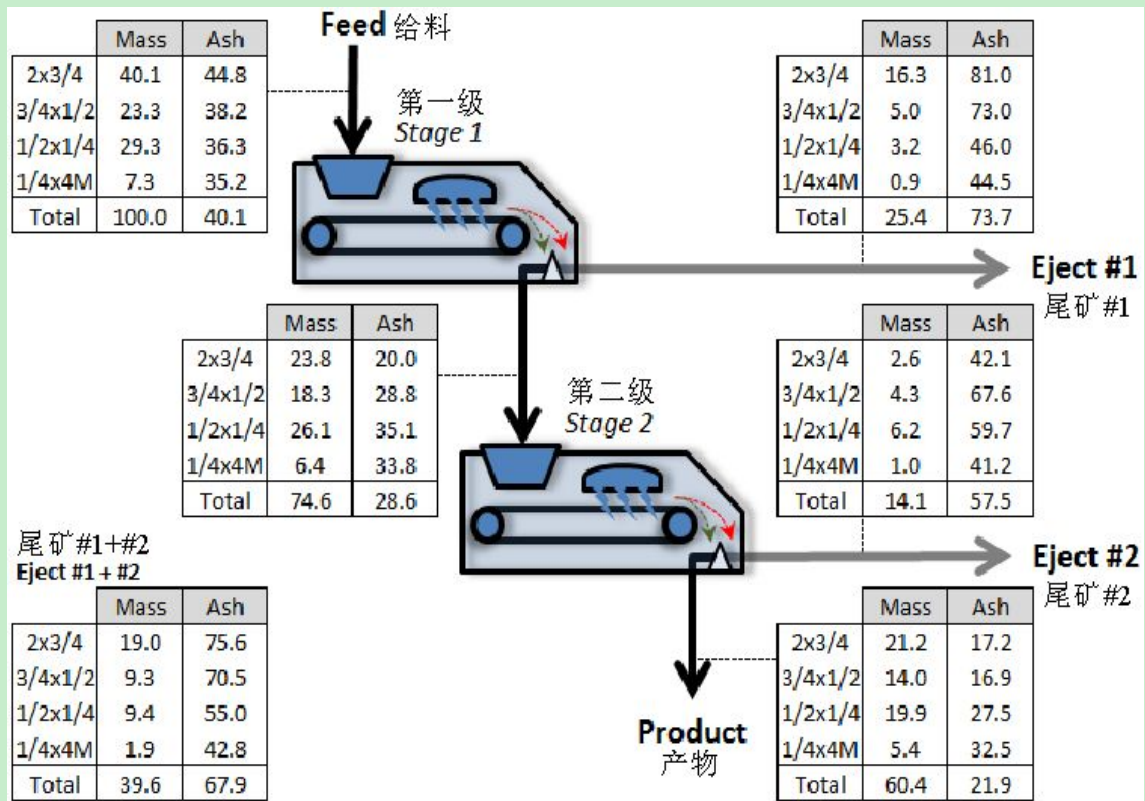


图 3 循环电路应用于 DriJet™ 分选机的第一轮测试结果图

其中，Y 为洁净煤产率(%)，A_c 为洁净煤灰分含量(%)，A_f 为给料灰分含量(%)。表示给料中尾矿流的灰分含量百分数的尾矿含量(J)，利用以下公式计算：

$$J = (100 - Y) \times \left(\frac{A_r}{A_f} \right) \quad [2]$$

其中，A_r 表示就尾矿流中固体灰分的百分含量。在回收率与尾矿曲线图中的对角虚线表示一个完全非选择的分选过程，如材料分配器，表示回收率和尾矿含量在任意点时达到 100% 所对应的值。

图 4 和图 5 中提供的测试数据表明，这种分选机在 1/2 英寸以上的两个较大的尺寸级中对矿物的品位提升具有非常好的分选效果。这一结果并不令人感到意外，因为电子分选器次应用于矿物分选时就是用来分选粒度较粗的固体颗粒的对于 2 x 3/4 英寸的组

分而言，分选器给料灰分在第一阶段分选过程中从 44.8%降低到 20%，并且在第二阶段分选过程中将灰分降到 17.2%。最重要的是，尾矿组分的灰分含量经过第一阶段分选过后获得了预想的高灰分(灰分达到 81.0%)，这同时也表明，在第一阶段分选过后，有非常少的含碳物质错配到尾矿中。而事实上，在第一阶段分选后，有非常少量的尾矿组分存在于 2 x 3/4 英寸尺寸级中，正如第二阶段的分选所指出的显著地降低了尾矿的灰分(灰分含量为 42%)一样。相比之下，存在于 3/4 x 1/2 英寸尺寸级的较细的矿物组分在后续的额外分选过程中被进一步分选，一阶段分选后，分选机将这个尺寸百分比中的灰分从 38.2%降到 28.8%，并且经过两个阶段的分选后降到 16.9%，与之相对应的尾矿灰分值在第一阶段和第二阶段分别为 73%和 67.6%。两个尾矿灰分值之间的极其小的差别表明，单级分选器对 3/4 x 1/2 英寸级中的固体颗粒的品位提升没有达到理想配置，而两级分选却能在最小程度上解决这种问题。

绘制在图 4 和图 5 中的数据还表明，在两个较小尺寸级(1/2 x 1/4 英寸和 1/4 英寸 x 4 网)中的较细颗粒在最初的两级分选测试项目中品位并没有得到很大的提升。正如前

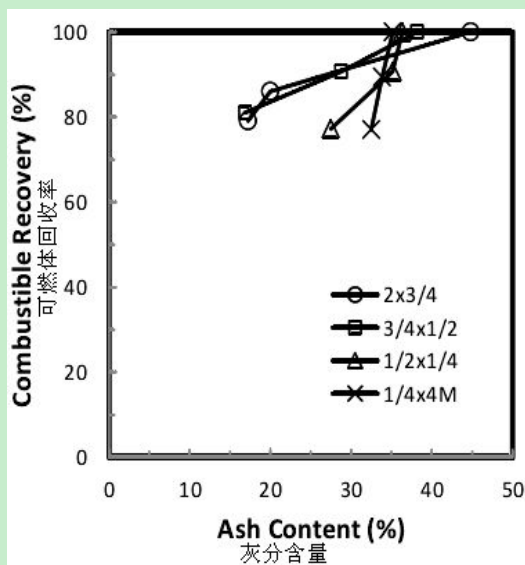


Figure 4. Size-by-size combustible recovery and clean coal ash obtained while the sorter was configured for coarse coal cleaning.

图 4 当分选机分选粗颗粒煤，按尺寸大小分级时，可燃体回收率和洁净煤煤灰含量的关系图

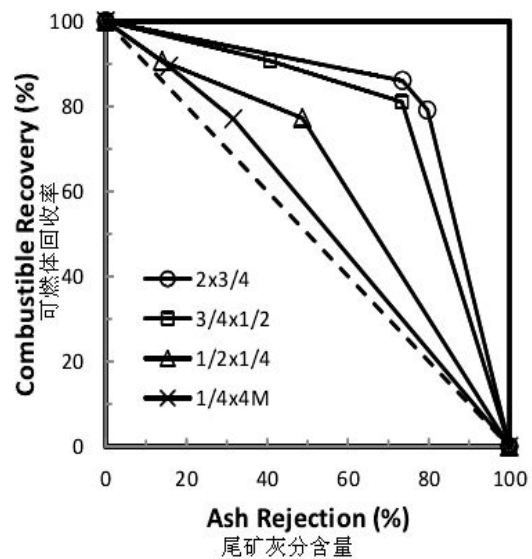


Figure 5. Size-by-size combustible recovery and ash rejection obtained while the sorter was configured for coarse coal cleaning.

图 5 当分选机分选粗颗粒煤，按尺寸大小分级时，可燃体回收率与尾矿煤灰含量的关系图

面指出的，这一发现也是很正常的，因为，此种电子分选机最初是对粗颗粒的煤进行分选而设计的。因此，为了缓解这一缺点，进行了第二轮的半工业规模测试，在此过程将机器重置，旨在于使机器更适合于提升较细颗粒的煤，对细料煤进行有效分选。这些实验的给料原料，主要是对第一轮在 3/4 英寸尺寸级内测试所得的洁净煤进行筛分得到(参见图 6 所示)。将尺寸大于 3/4 英寸的物料收集并预留出来，同时，尺寸小于 3/4 英寸的

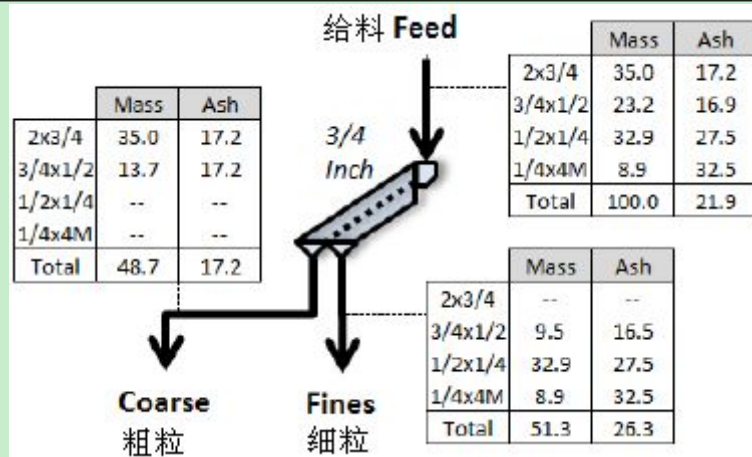


图 6 从第一轮洁净煤产品在 3/4 英寸尺寸级内，通过筛分为第二轮测试所得的给料图
 物料在使用新的操作条件的条件下，进行另外两个阶段的分选。测试结果数据总结在图 7 中，如图 7 所示。

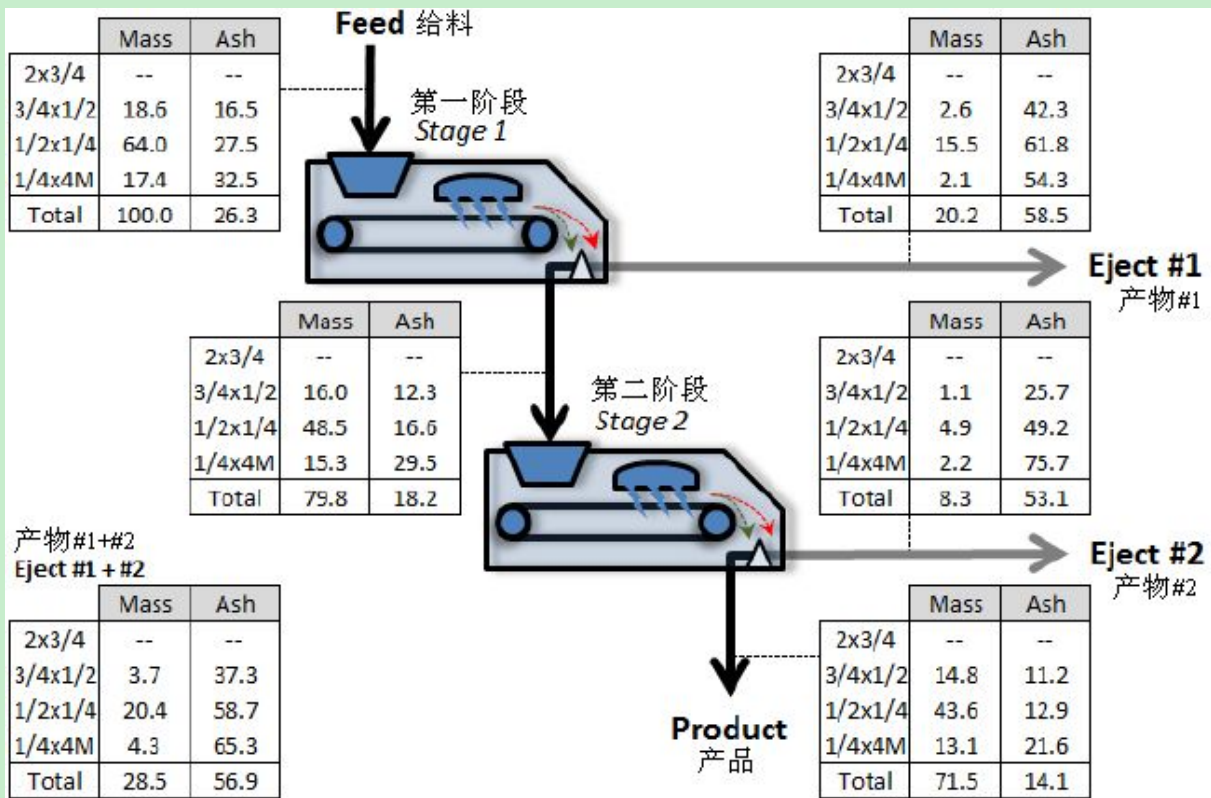


图 7 对 DriJet™ 分选机进行第二轮细颗粒煤进行测试的循环图

图 8 和图 9 提供的是从细颗粒煤的给料测试中获得的回收率与灰分及回收率与尾矿灰分含量数据的曲线图。正如预期设想，重新调配电子分选机的工作条件以使其适应于分选细颗粒的固体后，两个最细尺寸级(1/2 x 1/4 英寸和 1/4 英寸 x 4 网)的分选效果都得到的显著的提高。经过第一阶段的分选后，对于在 1/2 x 1/4 英寸百分比内的给料灰分含量由 27.5%降低到 16.6%，第二阶段的再选进一步降低了灰分含量至 12.9%。正如预期

设想，对灰分含量为 32.5% 的给料流进行两个阶段的分选后，分别获得了洁净煤的灰分值为 29.5% 和 21.6%，但在 1/4 英寸 x 4 网大小内的煤仍然没有任何的分选反应。然而，考虑到这种分选机技术主要是设计用来针对大于 1/4 英寸的固体颗粒进行分选的，那么以上的分选效果已经被认为算是比较好的了。

讨论

半工业规模的测试项目提供了一些关于针对煤炭洁净应用的干法分选器技术的操作特征的重要信息。例如，数据表明，当分选单元对特定的尺寸比例范围进行调置时，分选技术表现的最好。事实上，数据显示，高效率的筛分性能可以通过对给料进行预先分级，将其分成不同粒度级然后用对各粒度级进行专门特定的处理来实现，然而，这个预先处理步骤不被认为是一个重要的问题；是由于煤的筛分是所有煤碳加工操作过程中的正常过程。同时，这种类型的大小尺寸的筛分模式将确保每个分类器是一个给定的粒径级，可保证最大吞吐量可以使该设备的投资达到最低的全面优化。

从测试数据中得到的另一个有趣的现象是，粒径显著低于一个临界值时，分选性能开始恶化。这一发现支持了制造商的建议，只有粒径大于 1/4 英寸的颗粒最适合使用当前的煤炭分选工艺配置。从工程的角度出发，考虑到单粒子层需要的 X 射线扫描仪要求粒

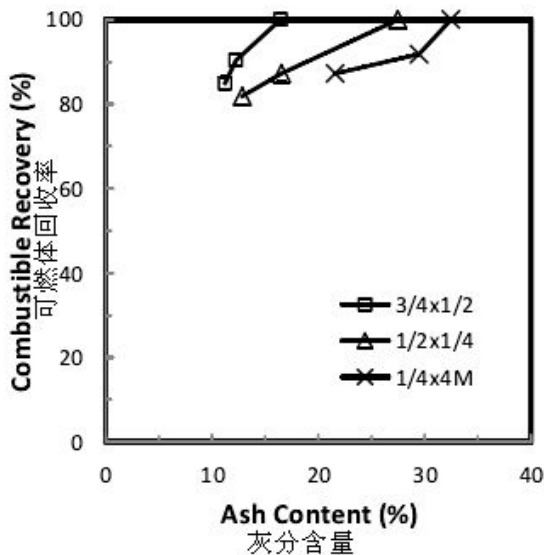


Figure 8. Size-by-size combustible recovery and clean coal ash obtained while the sorter was configured for fine coal cleaning.
图8 当分选机分选细颗粒煤，按尺寸大小分级时，可燃体回收率和洁净煤灰含量关系图

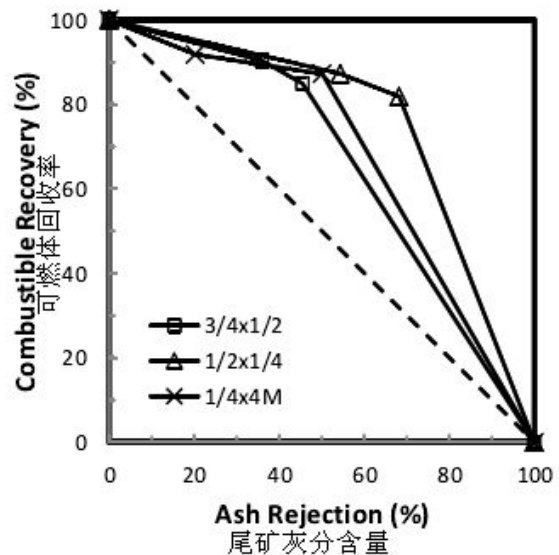


Figure 9. Size-by-size combustible recovery and ash rejection obtained while the sorter was configured for fine coal cleaning.
图9 当分选机分选细颗粒煤，按尺寸大小分级时，可燃体回收率与尾煤灰分含量的有关系图

度约束是正常的。通过介绍粒子所施加的限制使得理论最大产量可以通过使用新的分选技术进行评估。通过扫描仪的有效通过量(Q)可以使用下式进行计算：

$$Q=W \times D_p \times V \times \beta \quad [3]$$

W 表示扫描仪带宽度, D_p 表示粒径(即床层高度), V 表示带的速度, β 表示颗粒的填充效率。球形单个粒子大小放回后沿传送带, β 不能超过一个值, 即 $\pi / 6$ (以立方体的体积即球比)。从这些表达式知, 可以通过分离器的单层颗粒最大流通量(M)的计算式为:

$$M= \rho \times Q \quad [4]$$

式中 ρ 表示的是通过筛板的组成密度, 通常此密度值将对应东部生产矿的燃料煤观察灰分水平 SG 曲线上的的 1.5 到 1.9 的密度比重值。

图 10 表示的理论筛分能力与提供的不同物料密度组成的粒度之间的关系曲线, 曲线的生成是根据使用额定的皮带速度 10ft/s。根据曲线, 大于 2 英寸的颗粒, 对应的理论上最大的筛分能力下降为扫描的每英寸皮带宽度的 60 至 120 TPH 的范围内, 而这取决于给料的固体的比重..

理论能力将大幅下降至每英尺皮带宽度的 7-14 TPH 于颗粒比 1/4 英寸的直径。这些细颗粒容易在分离时在混杂粗颗粒中具有更高的生产率。

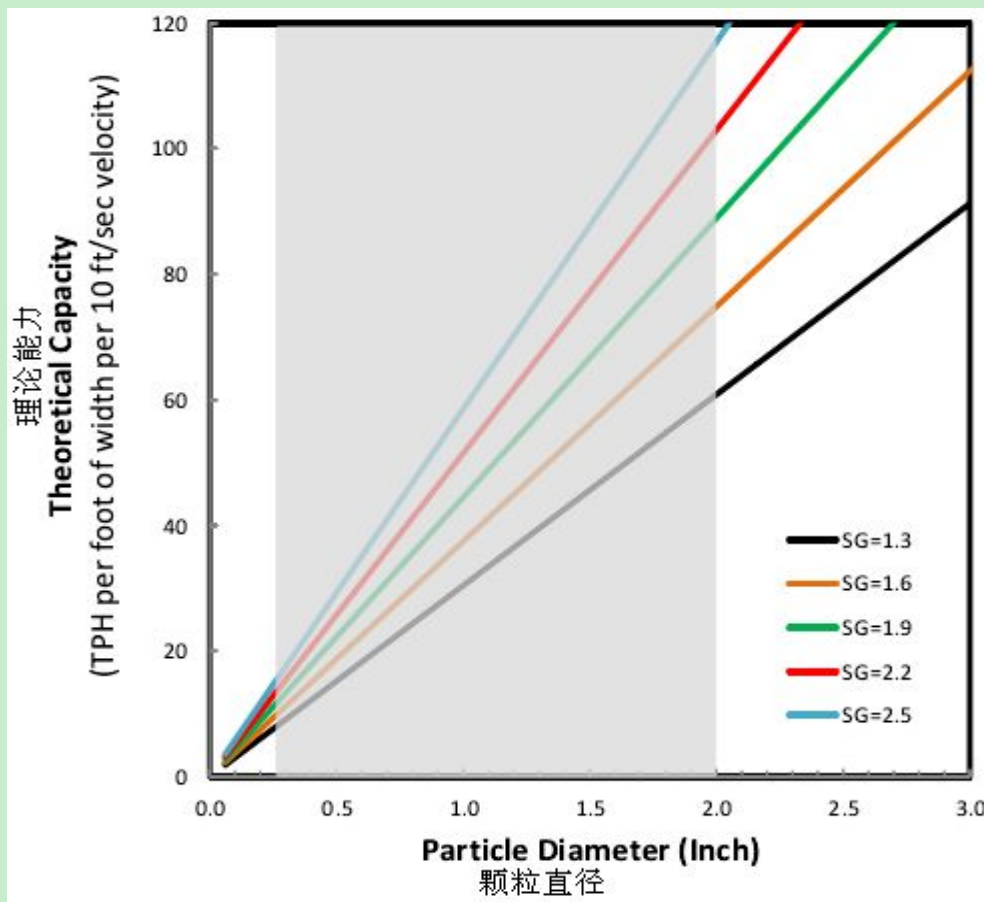


图 10 对单一尺寸不同密度的颗粒的理论最大分选能力

结论

几大系列实验的测试数据，为美国东部生产矿的煤炭开采后的原煤品位的提升，提供了潜在使用电子煤炭分选器的评估能力。测试数据表明，这种新型的分拣技术，能有效去除给矿中粗颗粒煤（ $2 \times 1/4$ 英寸）中所含的无用的矿物质杂质。由于固有的低资本和运营成本，这种独特的技术有可能为那些被水资源所限制，或者要求用低吨位水量来实现全面的煤炭分选提供可行的分选方法（例如，高边坡矿的应用，小合约矿用长卡车运输的等等）。作为一种干法分选，更重要的是，这种方法可以避免传统的以水为基础的选过程中所产生的与水有关的水的使用量以及废水处理问题。这个过程需要的空间很紧凑，可以使得这种技术能够被应用到采矿生产单位的地下矿井中，从而减少专门用来运输和处理废物所需要的场地。该分选方法正在迅速进入商业领域，近年来这种新技术的生产规模的安装就是很好的证明（如图 11 所示）。



图 11 近期 DriJet™ 分选机技术的生产规模的安装照片

致谢

作者非常感谢阿巴拉契环境科学研究计划 (ARIES) 和工业参与者对本论文工作的支持。

参考文献



**Mineral
Separation
Technologies**

DRIJET

Mineral Separation Technologies Inc.
400 Technology Drive
Coal Center, PA 15423
(724) 260-8730

www.mineralseparationtechnologies.com