应用研究

DOI：10.19902/j.cnki.zgyz.1003－7969.240594

大豆低温粕不同冷却筛分方式的对比分析

房志学，孙连强，赵树超，刘　娜

（济宁市机械设计研究院有限公司，山东 济宁 272000）

摘要：旨在为大豆低温粕加工厂冷却筛分工段工艺优化、设备选型及产品质量的提高提供参考，针对低温粕水溶性蛋白含量高、黏度大的特点，介绍了目前 3 种主要的大豆低温粕冷却筛分方式，即过桥冷干与旋振筛相结合的冷却筛分方式、圆锥滚筒筛冷却筛分方式、翻板冷却与圆筒筛相结合的冷却筛分方式，对这 3 种方式的工艺、主要设备结构及特点进行了阐述，并从大豆低温粕的冷却效果、筛分效果、粕片状保持度与碎料形成、水分损失、设备维护周期等方面进行了对比分析。根据 3 种冷却筛分方式的主要经济技术指标，采用评分法优选出翻板冷却与圆筒筛相结合的方式为最佳冷却筛分方式；该冷却筛分方式以其结构简单、处理量大、维修方便、冷却筛分效果良好等优点，可作为投资者的优先选择。

关键词：大豆低温粕；冷却筛分；翻板冷却机；旋振筛；圆锥滚筒筛

中图分类号：TS203；TS229　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1003－7969(2025)12－0147－06

Comparative analysis of different cooling and screening methods for low－temperature soybean meal

FANG Zhixue, SUN Lianqiang, ZHAO Shuchao, LIU Na

(Jining Machinery Design and Research Institute Co., Ltd., Jining 272000, Shandong, China)

Abstract: The aim is to provide reference for the optimization of the cooling and screening process, equipment selection, and improvement of product quality in low－temperature soybean meal processing plants. In view of the high water－soluble protein content and high viscosity of low－temperature meal, three main cooling and screening methods for low－temperature soybean meal were introduced, namely combination of bridge－type cooler and dryer with vibrating screen, conical trommel screen cooling and screening, and combination of flip－flop cooler with trommel screen. The processes, main equipment structures and characteristics of these three methods were elaborated, and a comparative analysis was conducted from the aspects of cooling effect, screening effect, meal sheet retention and crushing formation, moisture loss of low－temperature soybean meal, and equipment maintenance cycle, etc. Based on the main economic and technical indicators of the three cooling and screening methods, the combination of flip－flop cooler with trommel screen was selected as the optimal cooling and screening method through a scoring method. The combination of flip－flop cooler with trommel screen has the advantages of simple structure, large processing capacity, easy maintenance, and good cooling and screening effect, and can be a preferred choice for investors.

Key words: low－temperature soybean meal; cooling and screening; flip－flop cooler; vibrating screen; conical trommel screen

随着大豆低温脱溶技术的快速发展，大豆低温粕可作为各种蛋白制品的原料，用于生产组织蛋白、浓缩蛋白、分离蛋白等[1]。大豆在预处理车间经过清理、色选、调质、脱皮、软化、轧坯等工段后进入浸出车间，在浸出器内部大豆坯片被溶剂多次浸泡、沥干，分离出油脂，含溶湿粕经低温脱溶设备脱除溶

收稿日期：2024－10－13；**修回日期**：2025－07－16

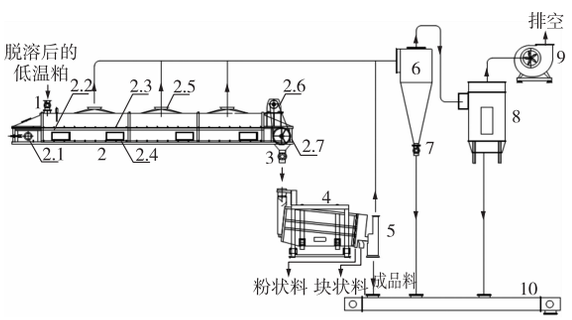
作者简介：房志学(1973)，男，高级工程师，主要从事大豆低温粕与植物蛋白工程的设计、安装及调试工作(E-mail)Fang_zhixue@163.com。

剂,得到温度为75 ℃左右、水分约10%的低温粕,然后进入冷却筛分工段,此工段是大豆低温粕加工工艺的最后工段,也是极其重要的环节,由于湿热低温粕水溶性蛋白含量高,黏度大,冷却筛分效果好坏直接影响大豆低温粕产品的质量指标(如水分、粉末度、粘连片、片状保持度等),同时也影响大豆低温粕的包装、运输和安全储存,如温度和水分处理不当,会引起物料板结,降低产品质量。目前大豆低温粕冷却筛分方式主要有3种:过桥冷干与旋振筛相结合方式,圆锥滚筒筛冷却筛分方式,翻板冷却与圆筒筛相结合方式。本文对这3种冷却筛分方式工艺、主要设备结构及特点进行了阐述,从大豆低温粕的冷却效果、筛分效果、粕片状保持度与碎料形成、水分损失、设备维护周期等方面对3种冷却筛分方式进行了对比分析,根据3种方式的主要技术经济指标,采用评分法优选出最佳冷却筛分方式,以期为新建和改扩建大豆深加工项目工艺优化、设备选型和产品质量的提高等方面提供参考。

1 大豆低温粕冷却筛分方式介绍

1.1 过桥冷干与旋振筛相结合方式

过桥冷干与旋振筛相结合方式示意图见图1。



注:1. 进料关风器; 2. 过桥冷干机;2.1. 机尾;2.2. 栅板;2.3. 刮料板;2.4. 进风口;2.5. 出风口;2.6. 传动机构;2.7. 机头;3. 出料关风器;4. 旋振筛;5. 垂直吸风道;6. 旋风除尘器;7. 关风器;8. 脉冲除尘器;9. 风机;10. 包装机分料刮板

Note: 1. Feed airlock; 2. Bridge - type cooler and dryer; 2.1. Machine tail; 2.2. Grid plate; 2.3. Scraper; 2.4. Air inlet; 2.5. Air outlet; 2.6. Transmission mechanism; 2.7. Machine head; 3. Discharge airlock; 4. Vibrating screen; 5. Vertical air duct; 6. Cyclone dust collector; 7. Airlock; 8. Pulse dust collector; 9. Fan; 10. Packaging machine distribution scraper conveyor

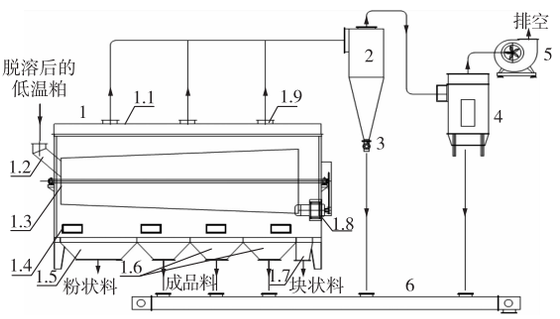
图1 过桥冷干与旋振筛相结合方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the combination of bridge - type cooler and dryer with vibrating screen

如图1所示:脱溶后的低温粕经进料关风器进入过桥冷干机的栅板,在刮料板的作用下向前移动,冷风从机体的侧下方进入,穿过栅板和物料,使物料冷却;冷却后的物料进入旋振筛进行筛分,上层筛板分离出块状料,从出口排出进行粉碎,下层筛板分离出粉状料,从出口排出装袋,合格物料经垂直吸风道进入包装机分料刮板;与物料交换后的热风同垂直吸风道的风一起进入旋风除尘器,然后经脉冲除尘器净化后通过风机排到室外。

1.2 圆锥滚筒筛冷却筛分方式

圆锥滚筒筛冷却筛分方式示意图见图2。



注:1. 圆锥滚筒筛;1.1. 机体;1.2. 进料管;1.3. 圆锥滚筒;1.4. 进风口;1.5. 粉状料收集斗;1.6. 成品收集斗;1.7. 块状料收集斗;1.8. 传动机构;1.9. 出风口;2. 旋风除尘器;3. 关风器;4. 脉冲除尘器;5. 风机;6. 包装机分料刮板

Note: 1. Conical trommel screen; 1.1. Machine body; 1.2. Feed pipe; 1.3. Conical trommel; 1.4. Air inlet; 1.5. Powdered material collection hopper; 1.6. Finished product collection hopper; 1.7. Lump material collection hopper; 1.8. Transmission mechanism; 1.9. Air outlet; 2. Cyclone dust collector; 3. Airlock; 4. Pulse dust collector; 5. Fan; 6. Packaging machine distribution scraper conveyor

图2 圆锥滚筒筛冷却筛分方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of conical trommel screen cooling and screening

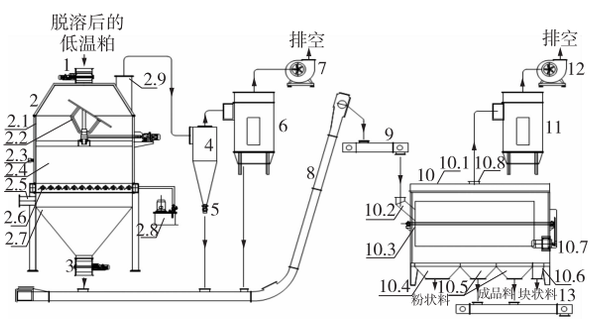
如图2所示:脱溶后的低温粕经圆锥滚筒筛的进料管进入圆锥滚筒,物料在滚筒的转动下利用圆锥的倾角向前运动,粉状料首先通过滚筒内部前段的不锈钢筛网进入粉状料收集斗装袋;成品料随着滚筒的旋转陆续下落,进入成品收集斗,然后进入包装机分料刮板;块状料随着滚筒转动,被推到滚筒的尽头,进入块状料收集斗然后进行粉碎。物料在滚筒内旋转运动时,冷空气从机体侧面下方进入,自下而上穿过物料经出风口进入旋风除尘器,再经脉冲除尘器净化后通过风机排到室外。

1.3 翻板冷却与圆筒筛相结合方式

翻板冷却与圆筒筛相结合方式示意图见图3。

如图3所示:脱溶后的低温粕经进料关风器进入翻板冷却机,在布料器的作用下物料均匀平铺在冷却仓内,当物料在翻板上的高度触碰到侧壁的料位传感器时,料位传感器随即发出信号液压缸推动

曲柄连杆机构动作，底部翻板快速动作致使物料排入出料斗，当料位高度低于料位传感器高度时底部翻板停止动作[2]；冷空气从出料斗侧面的进风口进入，穿过物料层，从壳体上方的出风口排出；冷却后的物料经出料关风器、埋刮板输送机和水平刮板进入圆筒筛；在圆筒筛内部，物料随着筛筒的旋转，在导向板的作用下向前运动，细粉穿过不锈钢筛网进入粉状料收集斗装袋打包，成品料随着筛筒的旋转陆续下落，进入成品收集斗，然后进入包装机分料刮板，而块状料在导向板的推动下从筛筒尽头下落，进入块状料收集斗然后进行粉碎；从翻板冷却机排出的热风进入旋风除尘器除尘，然后进入脉冲除尘器净化，为了避免湿气黏布袋，脉冲除尘器底部可以用热水管伴热，同时脉冲除尘器及连接管道全部保温，净化后的热风通过冷却风机排到室外；圆筒筛吸出的风直接进入脉冲除尘器净化后通过除尘风机排到室外。



注：1. 进料关风器；2. 翻板冷却机；2.1. 上壳体；2.2. 布料器；2.3. 料位传感器；2.4. 冷却仓；2.5. 进风口；2.6. 翻板组装机构；2.7. 出料斗；2.8. 液压系统；2.9. 出风口；3. 出料关风器；4. 旋风除尘器；5. 关风器；6. 脉冲除尘器；7. 冷却风机；8. 埋刮板输送机；9. 水平刮板；10. 圆筒筛；10.1. 机体；10.2. 进料管；10.3. 筛筒；10.4. 粉状料收集斗；10.5. 成品收集斗；10.6. 块状料收集斗；10.7. 传动机构；10.8. 出风口；11. 脉冲除尘器；12. 除尘风机；13. 包装机分料刮板

Note：1. Feed airlock；2. Flip – flop cooler；2.1. Upper shell；2.2. Distributor；2.3. Level sensor；2.4. Cooling bin；2.5. Air inlet；2.6. Flip – flop assembly mechanism；2.7. Discharge hopper；2.8. Hydraulic system；2.9. Air outlet；3. Discharge airlock；4. Cyclone dust collector；5. Airlock；6. Pulse dust collector；7. Cooling fan；8. Enclosed scraper conveyor；9. Feed pipe；10. Trommel screen；10.1. Machine body；10.2. Feed pipe；10.3. Screen drum；10.4. Powdered material collection hopper；10.5. Finished product collection hopper；10.6. Lump material collection hopper；10.7. Transmission mechanism；10.8. Air outlet；11. Pulse dust collector；12. Dust removal fan；13. Packaging machine distribution scraper conveyor

图 3　翻板冷却与圆筒筛相结合方式示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the combination of flip – flop cooler with trommel screen

2　大豆低温粕不同冷却筛分方式主要设备结构及特点

2.1　过桥冷干与旋振筛相结合方式的主要设备结构及特点

该方式的冷却设备是过桥冷干机，主要由进料口、机尾、冷干段、机头、传动机构组成，冷干段分别由壳体、栅板、刮料板、进风口、出风口等组成；该方式的筛分设备是旋振筛，主要由机架、筛体、出料箱、偏心驱动装置、电动机、万向节悬挂吊杆等组成，由于偏心驱动装置处于机器的中心位置，从而使筛面上各个部位获得相同的筛分效果；旋振筛设有两层筛板，上层筛板为长方形筛孔，下层筛板为不锈钢筛网。旋振筛振动频率一般设置为 150 ~ 180 r/min，在高频率的旋转振动下，物料筛分效率和筛分质量均得到大幅度提高。

该冷却筛分方式的特点：过桥冷干机代替了浸出出料水平刮板，低温粕在过桥冷干机内部输送的同时也得到了冷却，节省了动力和设备占地面积；过桥冷干机的冷却风管通常比较长且在室外，冬季时管内热空气容易在管壁结露。

2.2　圆锥滚筒筛冷却筛分方式的主要设备结构及特点

圆锥滚筒筛作为集冷却、筛分为一体的设备，主要由机体、圆锥滚筒、传动机构、进料管、粉状料收集斗、成品收集斗、块状料收集斗、进风口、出风口等组成。主体结构采用中心轴穿过圆锥滚筒，其两端用大型轴承座进行支撑的形式，圆锥滚筒的倾角在 3° ~ 5°之间，转速控制在 15 ~ 18 r/min；圆锥滚筒内部前段设置不锈钢筛网，后段为长条形筛孔。

该冷却筛分方式的特点：圆锥滚筒筛整机处于风机形成的负压环境，冷却与筛分在同一设备中进行。由于冷却筛分效果与物料在滚筒内的停留时间，滚筒的长度、直径相关，因此为了达到最佳的冷却筛分效果，滚筒的长度通常在 6 m 以上，这样滚筒与两端轴承的强度要求加大，否则设备运行不稳定，故障率会上升。

2.3　翻板冷却与圆筒筛相结合方式的主要设备结构及特点

该方式的冷却设备是翻板冷却机，主要由上壳体、冷却仓、出料斗、翻板组装机构、布料器、料位传感器、液压系统等组成[3]，进风口设置在出料斗一侧，出风口设置在上壳体一侧，布料器在冷却仓的上方，料位传感器在冷却仓侧壁，可在外侧调整料位高度，翻板组装固定在底架上；该方式的筛分设备是圆筒筛，其结构基本与圆锥滚筒筛相似，主要由机体、

筛筒、传动机构、进料管、粉状料收集斗、成品收集斗、块状料收集斗、出风口等组成。筛筒的转速控制在 12 ~ 14 r/min。筛筒内部设置了导料板，推动物料向前运动。

该冷却筛分方式的特点：翻板冷却机结构简单，维护方便，处理量大；圆筒筛长度比圆锥滚筒筛短，所需的吸风量比圆锥滚筒筛小，只需在机体内部形成负压、粉尘不外逸即可。

3 大豆低温粕不同冷却筛分方式的效果对比分析

3.1 大豆低温粕冷却效果对比分析

过桥冷干与旋振筛相结合方式中，由于过桥冷干机代替了浸出出料水平刮板，输送距离一般较长，物料在过桥冷干机内的冷却时间也较长，但在过桥冷干机实际运行中栅板上的物料很难分布均匀，经常出现薄厚不均现象和风走短路现象严重，再加上过桥冷干机出风口的沉降空间有限，如果冷却风量过大，容易带走大量的细粉，因此必须控制风量。冬季物料的冷却效果较好，夏季气温高时出口物料温度有时会高达 55 ℃左右，冷却效果不太理想。

圆锥滚筒筛冷却筛分方式中，圆锥滚筒筛作为冷却筛分设备时，冷空气从机体侧面下方进入，自下而上穿过下落中的物料、滚筒底部、滚筒内的物料、滚筒顶部，由于设备内部空间大，风机可以大风量地冷却吸风，使物料热量充分交换。由于筛筒的长度较长，先出滚筒的物料与后出滚筒的物料在冷却时间上有几分钟的差异，最终的出料温度会略有不同。同样，如果在炎热的夏季，先出滚筒的物料温度会高达 50 ℃左右，而最后出滚筒的物料温度则比较理想，但从生产实践来看整体冷却效果还是不错的。

翻板冷却与圆筒筛相结合方式中，翻板冷却机采用逆流冷却原理，冷却仓内物料自上而下经历了由热逐渐变冷的均匀冷却过程；均匀布料是物料进入翻板冷却机的第一步工作，布料不均引起的气流差异是影响冷却效果的关键因素之一[3]。布料器选择合理的倾角和转速，物料在冷却仓内可以实现均匀布料。冷却仓内物料高度是影响冷却效果的另一关键因素，通过调节料位传感器的位置来实现。冬季气温较低时，在满足出料温度情况下可以适当降低物料高度；夏季气温较高时，提高物料高度以延长冷却时间，从而降低出料温度。从生产实践来看，采用翻板冷却机冬季低温粕温度可降至 25 ℃以下，夏季低温粕温度可降至比室内温度高 5 ℃左右，冷却效果比较理想。

3.2 大豆低温粕筛分效果对比分析

过桥冷干与旋振筛相结合方式中，旋振筛的进料口通常为两个，进料口下方设有分料板，低温粕冷却效果不好时会含有大量热气、黏度大，物料容易粘在分料板上造成进口堵塞；旋振筛上层筛孔较大不易堵塞，块状料容易分离；但是下层筛板为不锈钢筛网，容易发生堵塞，影响粉状料的筛分效果。从生产实践来看，旋振筛的筛分效果不理想。

圆锥滚筒筛冷却筛分方式中，脱溶设备中出来的湿热脱溶低温粕直接进入圆锥滚筒筛，首先与不锈钢筛网直接接触，容易堵塞筛网，使得细粉无法筛分；随着筒体的旋转物料向前推移，水汽减少，黏度降低，筛网堵塞现象逐渐好转，细粉逐渐分离。因此，选择合适的筛筒直径与长度是筛分效果好坏的关键。筛筒过短，部分合格低温粕会与块状料一起进入块状料收集斗，影响产品得率；筛筒过长则会增加设备成本。从生产实践来看，根据产量选择合适的筛筒直径与长度，筛分效果较好。

翻板冷却与圆筒筛相结合方式中，由于低温粕在翻板冷却机中已降温，黏度降低，首先粉状料顺利通过圆筒筛前段的不锈钢筛网分离，块状料在导向板的推动下向前运动，通过圆筒筛后段的长方形筛孔实现分离。从生产实践来看，筛筒不易堵塞，细粉与块状料分离彻底，筛分效果理想。

3.3 大豆低温粕片状保持度和碎料形成对比分析

过桥冷干与旋振筛相结合方式中，进料关风器与出料关风器内部转子旋转时对物料形成一定的剪切作用；低温粕在栅板上运行，刮料板与上百根栅板条的长时间相互摩擦，使栅板条的边缘与物料形成剪切作用，容易造成碎料；当低温粕进入旋振筛后物料在筛板上不断振动和移动，特别是在下层不锈钢筛网上，如果低温粕韧性差更容易造成碎料。因此，该冷却筛分方式下低温粕片状保持度不好。

圆锥滚筒筛冷却筛分方式中，滚筒筛旋转速度较慢，低温粕与筛筒内壁的相对滑落速度也很慢，与筒壁的摩擦相对较小，尽管筛筒较长但碎料程度比较轻，低温粕片状保持度较好。

翻板冷却与圆筒筛相结合方式中，翻板组装机构有效解决了翻板冷却机因排料而引起碎料的问题[2]，进料关风器与出料关风器内部转子旋转对物料有一定的剪切作用，设计时可以选用偏置式关风器，然后在满足产量的前提下尽量降低转速，减少对物料的剪切次数，以减少碎料的形成；圆筒筛的转速比圆锥滚筒筛的更慢，长度也相对较短，低温粕与筒壁的摩擦相对更小，所以碎料程度更轻，低温粕片状保持度更好。

3.4　大豆低温粕水分损失的对比分析

在低温粕生产中，脱溶后的低温粕水分约10%，而市场低温粕产品水分要求控制在9%左右即可。因此，在成品粕温度合格的情况下，水分损失越少，低温粕得率就越高，生产厂家的经济效益就越好。过桥冷干与旋振筛相结合方式中，过桥冷干机正常运行时水分损失在1.5百分点左右，当过桥冷干机冷却效果不好时，粕温度降低幅度相对较小，低温粕水分损失也更少；圆锥滚筒筛冷却筛分方式中，粕水分损失取决于筛筒的长度与物料的冷却时间，实践证明低温粕水分损失一般可以控制在1.0～1.5百分点；翻板冷却与圆筒筛相结合方式中，翻板冷却机是物料水分损失的主要设备，水分损失一般能控制在1～2百分点，在冷却风量不变的情况下，冷却仓内的料位越高物料水分损失越大，料位越低水分损失越小。有实验表明，导致冷却后水分变化的主要因素是冷却时间而非冷却风量，冷却时间的变化是由料位高度的变化引起的[4]。生产实践证明，料位高度保持在500～600 mm时，调整合理的冷却风量，低温粕在翻板冷却机中的水分损失可以控制在1.0～1.5百分点之间。

3.5　不同冷却筛分方式的维护周期对比分析

过桥冷干与旋振筛相结合方式中，过桥冷干机的栅板容易被湿热物料堵塞，过桥冷干机的冷却风管在室外部分内壁冬季容易结露，结露形成的水珠与沉积在管内部的物料混合而造成堵塞；夏季物料冷却效果不好时，旋振筛的进料口、下层不锈钢筛网容易堵塞，这些部位都需要定期检查、及时清理。

圆锥滚筒筛冷却筛分方式中，筛筒前段的不锈钢筛网容易被湿热物料堵塞，需要定期检查清理；筛板受物料的磨损也不容忽视；由于筛筒比较长，主轴两端的轴承磨损较大，需要定期检查，经常维护保养。

翻板冷却与圆筒筛相结合方式中，翻板冷却机结构简单，性能可靠，布料器、翻板组装机构等组装件运行平稳，料位传感器与液压系统运行状况需要定期检查，液压系统的液压油需要定期更换；圆筒筛的筛板需要根据磨损情况及时更换。

4　采用评分法对大豆低温粕冷却筛分方式优选

4.1　技术经济指标的选择

以500 t/d大豆低温粕脱溶车间为例，根据低温粕不同冷却筛分方式，将评价的主要经济指标确定为设备成本、生产操作难易程度、产品质量指标、动力消耗、维护周期、使用寿命。不同冷却筛分方式的主要技术经济指标如表1所示。

表1　不同冷却筛分方式的主要技术经济指标

Table 1　Main technical and economic indicators of different cooling and screening methods

指标	方式1 （过桥冷干与旋振筛相结合）	方式2 （圆锥滚筒筛冷却筛分）	方式3 （翻板冷却与圆筒筛相结合）
设备成本/万元	55	35	60
生产操作难易程度	难	易	适中
产品质量指标	成品粕片状保持度不好，容易碎料；夏季粕温度在50～55 ℃	成品粕片状保持度较好，略有碎料；夏季粕温度在45～50 ℃	成品粕片状保持度好；夏季粕温度在40～45 ℃
动力消耗/kW	53	59	55
维护周期（月）	3	6	9
使用寿命/年	8～10	6～8	10～12

4.2　优选方法

应用模糊数学中意见集中排序法，通过设定决策论域和参数指标集合，对不同的冷却筛分方式进行评分和排序。决策论域 **U** 是3个优选方式的集合，有 **U** = {方式1，方式2，方式3}，**U** 中元素方式1、方式2、方式3分别记为 u_1、u_2、u_3；设优选方式的参数指标的集合 **V** = {设备成本，生产操作难易程度，产品质量指标，动力消耗，维护周期，使用寿命}，设备成本、生产操作难易程度、产品质量指标、动力消耗、维护周期、使用寿命指标分别记为 V_1、V_2、V_3、V_4、V_5、V_6。

4.3　排序原则

排序时应遵循原则：①当参数指标 V_i（i = 1，2，3，4，5，6）为正指标（即指标 V_i 值越大的元素，方案越优）时，对 **U** 中元素 u_j（j = 1，2，3）按其对应参数指标 V_i 的值，从大到小进行排序。②当参数指标 V_i 为负指标（即指标值 V_i 越小的元素，方案越优）时，对 **U** 中元素 u_j 按其对应参数指标 V_i 的值，从小到大进行排序[5]。

按 **V** 中各单一参数指标对 **U** 中元素排序的结果：对于 V_1（负指标），为 u_2，u_1，u_3；对于 V_2（正指标），为 u_2，u_3，u_1；对于 V_3（正指标），为 u_3，u_2，u_1；对

于 V_4(负指标)，为 u_1,u_3,u_2;对于 V_5(正指标)，为 u_3,u_2,u_1;对于 V_6(正指标),为 u_3,u_1,u_2。

4.4 采用评分法进行优选

针对新建或扩建大豆深加工项目(包含大豆预处理车间、低温浸出车间、浓缩蛋白或分离蛋白车间等),通过调研企业生产经营者对各技术经济指标的重视程度和市场对低温粕产品指标的关注程度,确定参数指标的重要程度模糊集 $\mathbf{A}=(a_1,a_2,a_3,a_4,a_5,a_6)=(0.13,0.10,0.25,0.20,0.18,0.14)$。

结合排序结果进行赋分,排序第一位记为 2 分,排序第二位记为 1 分,排序第三位记为 0 分。u_1 在 $V_i(i=1,2,3,4,5,6)$中的得分 $B_1(u_1)=1$, $B_2(u_1)=0$, $B_3(u_1)=0$, $B_4(u_1)=2$, $B_5(u_1)=0$, $B_6(u_1)=1$,因此 u_1 的加权 Borda 数 $B(u_1)=0.13\times1+0.10\times0+0.25\times0+0.20\times2+0.18\times0+0.14\times1=0.67$;$u_2$ 在 $V_i(i=1,2,3,4,5,6)$中的得分 $B_1(u_2)=2$, $B_2(u_2)=2$, $B_3(u_2)=1$, $B_4(u_2)=0$, $B_5(u_2)=1$, $B_6(u_2)=0$,因此 u_2 的加权 Borda 数 $B(u_2)=0.13\times2+0.10\times2+0.25\times1+0.20\times0+0.18\times1+0.14\times0=0.89$;$u_3$ 在 $V_i(i=1,2,3,4,5,6)$中的得分 $B_1(u_3)=0$, $B_2(u_3)=1$, $B_3(u_3)=2$, $B_4(u_3)=1$, $B_5(u_3)=2$, $B_6(u_3)=2$,因此 u_3 的加权 Borda 数 $B(u_3)=0.13\times0+0.10\times1+0.25\times2+0.20\times1+0.18\times2+0.14\times2=1.44$。

比较 $B(u_1)$、$B(u_2)$、$B(u_3)$,可以看出方式 3(翻板冷却与圆筒筛相结合的冷却筛分)方式最优。

5 结束语

通过对比 3 种大豆低温粕冷却筛分方式发现,翻板冷却与圆筒筛相结合的方式,使得大豆低温粕冷却温度更加符合要求,筛分效果更好,片状保持度更优,碎料形成率更低,水分损失较少,设备使用周期更长,生产运行更加平稳。生产实践证明,翻板冷却机与圆筒筛以其结构简单、性能可靠、故障率低、维修保养方便、物料流动均匀、冷却筛分效果良好等优点在大豆低温粕生产线中得到广泛应用。

参考文献:

[1] 冷进松,戴媛.大豆粕低温脱溶概论及技术研究[J].粮油加工,2006(9):48-49.

[2] 申燕,吴畏,杨爱国.翻板冷却器在大豆低温粕脱溶技术装备中的应用[J].中国油脂,2018,43(1):158-160.

[3] 闾宏.逆流冷却器中撒料器撒料不均匀原因分析[J].中国油脂,2011,36(1):71-72.

[4] 林云鉴,杨昌高,蒋蕴珍,等.逆流式冷却器冷却效果与颗粒质量的研究[J].饲料工业,2004,25(9):8-10.

[5] 张伟.圆锥滚筒筛主结构传动的优化设计[J].煤矿机械,2009,30(5):15-17.

(上接第 130 页)

[5] 李泽昆, 马骁, 杨俊体. 高密度脂蛋白胆固醇脂质构成对多种冠心病风险的影响研究[J]. 中国医药, 2024, 19(7): 970-974.

[6] LEE W J, ZHANG Z, LAI O M, et al. Diacylglycerol in food industry: Synthesis methods, functionalities, health benefits, potential risks and drawbacks[J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 97: 114-125.

[7] SUN X, ZOU S, XIE X, et al. Immobilization of Lecitase® Ultra for production of flaxseed oil-based diacylglycerols by glycerolysis and its operational stability[J/OL]. LWT-Food Sci Technol, 2023, 183: 114964[2024-10-28]. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114964.

[8] 周子旋, 苏菁菁, 韩艳萍, 等. 瓜蒌籽甘油二酯油的酶法甘油解制备研究[J]. 中国油脂, 2025, 50(1): 38-42.

[9] 孙敏甜. 酶法制备甘油二酯的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.

[10] 高丰琴, 曹妙泷, 韩玮炜, 等. 双模型介孔硅固定化脂肪酶研究[J]. 化学工程师, 2023, 37(3): 5-7.

[11] REYES-REYES A L, VALERO BARRANCO F, SANDOVAL G. Recent advances in lipases and their applications in the food and nutraceutical industry[J/OL]. Catalysts, 2022, 12(9): 960[2024-10-28]. https://doi.org/10.3390/catal12090960.

[12] 唐慧. 脂肪酶/硫酸氧钒动态动力学拆分制备西汀类药物手性中间体研究[D]. 山东 青岛: 青岛科技大学, 2021.

[13] TOLDRÁ-REIG F, MORA L, TOLDRÁ F. Developments in the use of lipase transesterification for biodiesel production from animal fat waste[J/OL]. Appl Sci, 2020, 10(15): 5085[2024-10-28]. https://doi.org/10.3390/app10155085.

[14] 冯小倩, 徐晴, 张立慧, 等. 金属有机框架材料固定化酶的研究进展[J]. 生物加工过程, 2022, 20(5): 490-499.

[15] DE SOUZA T C, DE SOUSA FONSECA T, DE SOUSA SILVA J, et al. Modulation of lipase B from *Candida antarctica* properties via covalent immobilization on eco-friendly support for enzymatic kinetic resolution of racindanyl acetate[J]. Bioprocess Biosyst Eng, 2020, 43(12): 2253-2268.

[16] 李薇, 石爱民, 焦博, 等. 乙酰化花生球蛋白载酶颗粒的制备及表征[J]. 生物技术进展, 2023, 13(5): 771-778.

[17] 孙周权. 多孔纤维素-壳聚糖微球载体的制备及其应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.