

# 基于双向渐进结构优化方法的双螺杆榨油机榨笼优化设计

黄莎莎, 薛强, 郝孝其

(天津科技大学 机械工程学院, 天津 300222)

**摘要:**双螺杆榨油机中榨笼作为压榨部分的关键部件,其对榨膛内挤油压力的形成和对两根螺旋轴的支撑起到关键作用。针对目前传统经验设计的榨笼尺寸和质量偏大,造成制造材料浪费的问题,将双向渐进结构优化方法(Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization, BESO)应用到榨笼的设计中。以榨笼的刚度最大化为目标,以体积为约束条件,在Abaqus环境下,采用Python程序实现BESO优化算法,设计出新的榨笼结构。通过优化设计前后的对比分析表明,新的结构在满足强度要求的条件下,质量减少了35.1%。该优化分析方法为后续的榨笼设计提供了一种新思路。

**关键词:**双螺杆榨油机;榨笼;拓扑优化;双向渐进结构优化方法

中图分类号:TQ643;TS223

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2018)05-0149-05

## Optimization design of bar - cage of twin - screw press based on BESO

HUANG Shasha, XUE Qiang, HAO Xiaoqi

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Bar - cage of twin - screw press is the key component, which plays a key role in forming the pressure of squeezing oil and supporting the two screw shafts. According to present problems of the traditional experience design, the size and weight of bar - cage are too large, which causes material waste. The bi - directional evolutionary structural optimization method (BESO) was applied to the design of the bar - cage. The optimization objective of design was the maximum stiffness for the bar - cage subjected to a volume constraint. The BESO was implemented with Python program in the Abaqus. Finally, a new bar - cage structure was designed. The comparative analysis of the new structure and original structure showed that the weight of new structure reduced by 35.1%, and it could also meet strength requirement. And a new thinking of the design of bar - cage was offered by this optimization analysis method.

**Key words:** twin - screw press; bar - cage; topology optimization; bi - directional evolutionary structural optimization

机械压榨是最常用的油料分离方法之一,双螺杆榨油机作为机械压榨的一种方式在大型油脂企业中得到了比较广泛的使用。双螺杆榨油机的压榨原理是:一方面,两根相向旋转的螺旋轴不断推进物料向前;另一方面,螺旋轴与榨笼共同构成的榨膛空余体积逐渐减小,对物料起到挤压作用<sup>[1]</sup>。因此,榨

膛是双螺杆榨油机压榨出油的关键,其结构设计的合理性直接影响到双螺杆榨油机的压榨性能。而榨笼作为榨膛的关键组成部件,对其强度要求比较高。针对榨笼的设计目前主要还是依据经验,这种经验设计在一定程度上缺乏科学性,设计周期长,设计结果不理想,导致榨笼的外形尺寸较大,质量偏重,结构也不尽合理,最终导致材料成本偏高。且榨笼作为螺旋轴的包裹部件,当榨膛内部出现问题需要拆卸榨笼进行维修或对榨膛内部进行清洗时,均需要打开榨笼,利用外物支撑榨笼进行维修,榨笼的质量和结构无疑对榨膛的清理和维修拆卸造成很大的困

收稿日期:2017-09-05;修回日期:2018-02-08

作者简介:黄莎莎(1993),女,在读硕士,研究方向为CAD/CAM集成技术及其应用(E-mail)18722109512@163.com。

通信作者:薛强,教授,硕士(E-mail)qxue@tust.edu.cn。

难。因此,在保证榨笼功能的前提下,寻求一种新的设计方法,能够在设计过程中剔除不必要的结构,实现榨笼设计的轻量化至关重要。

结构拓扑优化是继尺寸优化和形状优化之后,发展起来的一种更加经济实用的结构设计方法,现已被广泛应用于工程领域<sup>[2]</sup>。所谓结构拓扑优化,即在给定载荷和边界条件的基础上进行有限元分析,通过不断删减设计域中贡献小的单元,以寻求结构最佳传力路线<sup>[3-6]</sup>。目前比较成熟的算法主要有均匀化法、变密度法、双向渐进结构优化法(BESO)和水平集法等。其中 BESO 是启发式算法,易于编程,易于与 Abaqus 结合,且在优化过程中不断有实体单元转换成空壳单元,每一迭代步中进行有限元分析的单元越来越少,因此计算效率相对较高,是工程领域中应用最为广泛的算法之一。虽然 BESO 方法在其他工程领域中已得到广泛应用,但利用 BESO 方法对榨油机零部件进行优化设计还鲜有研究。

本文引入 BESO 对榨笼进行轻量化设计。以保证榨笼刚度最大(即应变能最小)为目标,利用有限元分析软件和 Python 程序对榨笼进行拓扑优化设计。

## 1 榨笼的结构与载荷分析

### 1.1 榨笼的结构

以 ZYX-20 × 2D 型双螺杆榨油机作为研究对象,对其榨笼进行分析。图 1 为该双螺杆榨油机压榨部分的剖面图。如图 1 所示,榨笼整体由完全对称的两半榨笼构成。两半榨笼通过螺栓与两侧的机架相连接,两半榨笼间通过榨笼下侧的铰支连接,榨笼闭合后再通过上下两侧的数个螺栓紧固连接。榨笼内包裹着两根相向旋转的螺旋轴,其中,螺旋轴通过花键芯轴连接。榨笼内壁安装有榨条,榨条间用垫片隔开,垫片的厚度决定了榨条间隙的大小。榨笼的作用,一方面促使物料在榨膛内运动时建立挤油压力,另一方面使流至榨笼内侧的油滴顺利流出榨膛<sup>[7]</sup>。

由于完整的榨笼体由完全相同的两榨笼组成,如图 2 所示为其一半(在此忽略连接两榨笼的铰支的影响)。从图 2 可看出,每个榨笼本身也为对称结构,故在此仅对图 2 中榨笼的一半进行分析。榨笼的内圈与外圈间相隔有多个方形孔,用以散热和便于油液的渗出。榨笼内壁呈半“8”字形,沿榨料移动方向(图 2 中箭头方向)由大小孔径不等的双阶结构构成,大孔段为喂料段,小孔段为主压榨段和成饼段。该双螺杆榨油机中榨笼的内腔尺寸,喂料段内腔直径为  $\Phi 322$  mm,压榨段和成饼段内腔直径

为  $\Phi 282$  mm,榨笼总长为 1 846 mm。在分析过程中忽略连接两榨笼的铰支的影响。

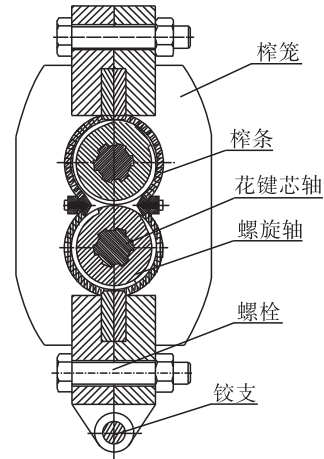


图 1 压榨装置剖面图

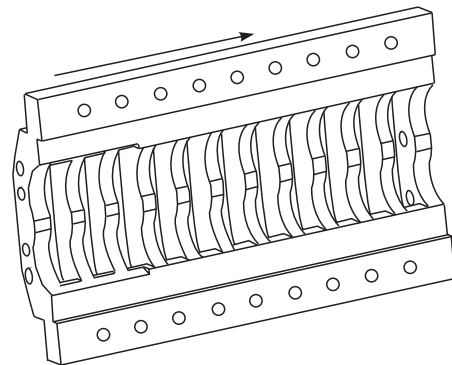


图 2 榨笼结构示意图

### 1.2 榨笼的受力分析

双螺杆榨油机在工作过程中,榨笼的受力主要取决于内部包裹的两根螺旋轴的受力。两根螺旋轴在工作过程中会受到油料给其的沿周向、轴向和径向的力。同时,这些力也会直接作用在榨条上,但榨条上的力最终转移到榨笼内壁上。并且,最终作用在内壁上的力主要为径向力。径向力的计算与螺旋轴压榨中作用于榨料的单位压力  $P^{[8]}$  有关,  $P$  的经验公式如下式(1),单位径向力<sup>[9]</sup>  $P_r$  与单位压力  $P$  的关系如下式(2)。

$$P = \frac{2.47\varepsilon \varepsilon_n^{5.5}}{e^{0.022w}} \quad (1)$$

$$P_r = P(0.428\cos\alpha \cdot \cos\beta + \sin\beta) \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon$  为压榨时榨料的温度和水分的系数,以一次性热榨脱壳葵花籽仁为例,取  $\varepsilon = 0.00045$ ;  $\varepsilon_n$  是熟胚的实际压缩比,本文中双螺杆榨油机的实际压缩比  $\varepsilon_n = 10.32$ ;  $w$  是榨料水分,以葵花籽仁为例,取  $w = 2.5\%$ ;  $e$  为自然对数底值;  $\alpha$  是螺旋轴螺旋纹升角;  $\beta$  是螺旋轴螺旋纹侧面倾斜角。经计算榨笼各段受力情况见表 1。

表1 榨笼各段(图2中沿箭头方向)圆柱面上  
施加载荷大小

榨笼长度段/mm	$P_r$ /MPa	榨笼长度段/mm	$P_r$ /MPa
0~187	0	1 184~1 262	4.480
187~467	0.014	1 262~1 407	23.444
467~737	0.128	1 407~1 489	10.110
737~784	0.290	1 489~1 613	52.509
784~979	1.183	1 613~1 731	27.880
979~1 034	1.070	1 731~1 846	176.933
1 034~1 184	4.442		

## 2 榨笼的拓扑优化

### 2.1 榨笼优化数学模型的建立及优化过程

以榨笼静态应变能最小为目标(即刚度最大),以单元密度  $x_e$  为设计变量,以设计域优化后占初始设计域的体积分数为设计约束进行拓扑优化,其拓扑优化设计的数学模型如下:

$$\min: C(X) = \frac{1}{2} F^T U = \frac{1}{2} U^T K U$$

$$\text{subject to: } X = \{x_e\}, x_e = 1 \text{ or } x_{\min} \quad \forall e = 1, \dots, N$$

$$F = K U$$

$$V(X) = \sum_X x_e v_e = V^*$$

式中: $C$ 为目标函数; $X$ 为单元相对密度矢量,对于实体单元取  $x_e = 1$ ,空壳单元取  $x_e = x_{\min}$ ,为避免矩阵奇异性此处取  $x_{\min} = 0.001$ ;  $F, U$  分别为全局力向量,全局位移向量;  $K$  为全局刚度矩阵;  $V$  为结构总体积,  $v_e$  为单元体积;  $V^*$  为约束体积;  $N$  为单元总个数。

设计变量  $x_e$  在每个迭代步中是基于该单元的灵敏度(删除该单元后,整体结构应变能的变化)更新的。而当第  $i$  个单元从结构中删除后,所引起的应变能的变化就等于该单元的应变能<sup>[10]</sup>,即有

$$\alpha_i = \Delta C = \frac{1}{2} \{u_i\}^T [K_i] \{u_i\} \quad (3)$$

式中: $u_i, [K_i]$  分别为第  $i$  个单元的节点位移向量和单元刚度矩阵。在 BESO 优化的过程中通过判断某个单元的灵敏度与阈值灵敏度(所有单元灵敏度的中间值)的大小关系,决定该单元的增添与删除,若该单元灵敏度大于阈值灵敏度,则该单元转换成实体单元,若该单元灵敏度小于阈值灵敏度,则该单元转换成空壳单元。而在文献[11]中表明,若直接使用上式计算的原始灵敏度进行判断,最终结果中会出现棋盘格现象(实体单元与空壳单元交替出现的现象)。因此,在实际计算中必须对该原始灵敏度进行处理。此处,在计算第  $i$  个单元灵敏度时,同时考虑与该单元相邻的所有单元原始灵敏度的影

响<sup>[10]</sup>,即如下式:

$$\alpha_i = \sum_j \left( \frac{w(r_{ij})}{\sum_j w(r_{ij})} \alpha_j \right) \quad (4)$$

$$w(r_{ij}) = \max(0, r_{\min} - r_{ij}) \quad (5)$$

式中: $r_{ij}$  为单元  $i$  与单元  $j$  的中心距;  $\alpha_j$  为  $j$  单元的原始灵敏度;  $w(r_{ij})$  为  $j$  单元对  $i$  单元的影响程度,即权重;  $r_{\min}$  为过滤半径。

最终,为了获得收敛解,在进行迭代的过程中,还需考虑历史信息的影响<sup>[10]</sup>,即

$$\alpha_i^k = \frac{\alpha_i^k + \alpha_i^{k-1}}{2} \quad (6)$$

式中: $\alpha_i^k$  为第  $k$  迭代步中计算的单元  $i$  的灵敏度,  $\alpha_i^{k-1}$  为上一迭代步中计算的单元  $i$  的灵敏度。

对于体积约束,在每一迭代步中,删除或增加单元前要确定下一迭代步的目标体积  $V_{k+1}$ 。即有  $V_{k+1} = V_k(1 \pm ER)$ ,  $ER$  为进化率。迭代过程一直进行,直到满足体积约束,并满足收敛条件时结束。

### 2.2 榨笼的拓扑优化

#### 2.2.1 有限元模型的建立与加载

榨笼的有限元模型通过在 Catia 中建立三维几何模型,并对该几何模型进行必要的简化,保存为 stp 格式,导入 Abaqus 中。榨笼的材料为 45Cr,其弹性模量  $E$  为  $2.11 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\mu$  为 0.277,将其划分为 24 173 个 C3D8R 的六面体单元。

对于边界约束,根据其连接方式,选择对其左右两侧面上的螺孔进行全约束,如图 3 中 I 所示。由于榨笼体由完全对称的两半榨笼构成,故对榨笼中如图 3 中 II 所示的侧面添加对称约束。并且由于每个榨笼本身也是对称结构,故仅对其一半进行分析,在图 3 中 IV 所示的面上添加对称约束。并根据表 1 中计算的载荷值对榨笼各段圆柱面施加均布载荷,如图 3 中 III 所示。

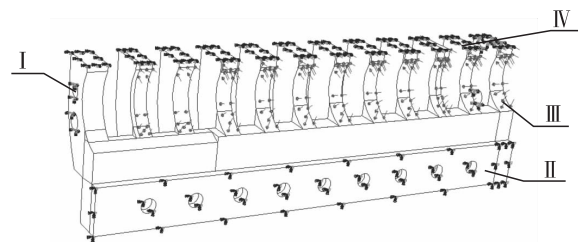


图3 载荷边界示意图

#### 2.2.2 拓扑优化结果

拓扑优化参数设定时,由于榨笼形状比较复杂,在其他参数相同( $ER, r_{\min}$ )的情况下,分别取体积分数为 0.3, 0.4, 0.6。经过拓扑优化,当体积分数取 0.4 时,其优化结果较好,结果见图 4。从图 4 可以

看出,榨笼的进料端(右端)删减的单元较多,榨笼的出料端(左端)删减的单元较少,榨笼下侧螺栓连接处的长度减短,榨笼上起支撑作用的圆柱面板上有不规则孔洞的出现,且出料端相比进料端不规则孔洞的尺寸较小。

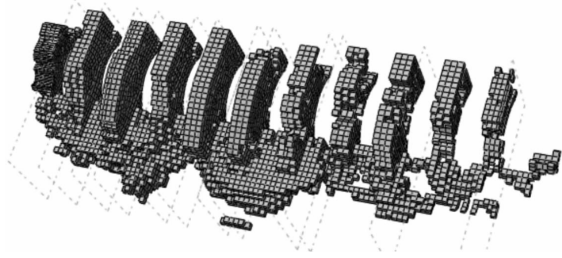


图4 BESO 优化结果

2.3 榨笼结构再设计与强度校核

BESO 的优化结果一般为理论计算结果,不能直接进行实际加工制造。因此,需在拓扑优化结果的基础上进行榨笼结构再设计。从图4的优化结果可以看出:起主要支撑作用的圆柱面板上出现不规则孔洞,且由于榨笼在工作时自进料端向出料端所载荷不断增大,因此相比出料端,进料端删减的单元偏多,导致所留的最终结构不完全相同。综合考虑榨笼的制造因素,榨笼整体造型不宜太复杂,故在

进行榨笼再设计时,尽量能够保证榨笼进料端和出料端的结构相同,并由于出料端所受载荷偏大,故着重参考榨笼出料端的结构。最终榨笼新结构的三维模型如图5所示。从图5可以看出,新榨笼与原榨笼相比,其尺寸减小,整体结构更加轻巧。当榨膛内部出现塞膛需要维修时,可以减轻操作者的操作难度。

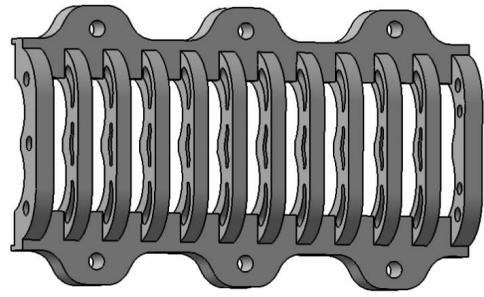


图5 新榨笼示意图

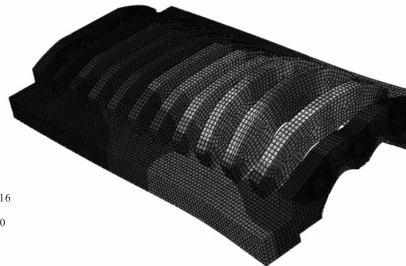
对新榨笼和原榨笼取相同的边界约束,并施加相同的载荷,进行静力学分析。图6为原榨笼的Mises应力分布图。从图6可以看出,原榨笼平稳工作时的最大综合应力为388.0 MPa,最大综合位移为0.623 mm。

S, Mises  
(Avg: 75%)  
+3.880e+02  
+3.557e+02  
+3.233e+02  
+2.910e+02  
+2.587e+02  
+2.263e+02  
+1.940e+02  
+1.617e+02  
+1.293e+02  
+9.700e+01  
+6.467e+01  
+3.234e+01  
-1.067e-02  
Max: 3.880e+02  
Elem: PART-1-1.34886  
Node: 4888  
Min: -1.067e-02  
Elem: PART-1-1.26991  
Node: 22968



(a)原榨笼Mises应力云图

U, Magnitude  
+6.234e-01  
+5.715e-01  
+5.195e-01  
+4.676e-01  
+4.156e-01  
+3.637e-01  
+3.117e-01  
+2.598e-01  
+2.078e-01  
+1.559e-01  
+1.039e-01  
+5.195e-02  
-0.000e+00  
Max: 6.234e-01  
Node: PART-1-1.1116  
Min: 0.000e+00  
Node: PART-1-1.400



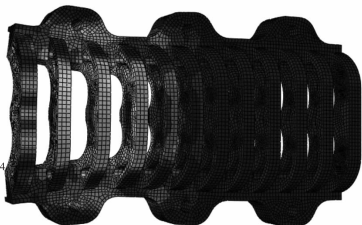
(b)原榨笼综合位移云图

图6 原榨笼有限元分析

图7为新榨笼在平稳工作时的应力分析图。从图7可以看出,新榨笼的最大应力为450.5 MPa,最大综合位移为1.32 mm。相比于原榨笼,新榨笼的最大应力值增加了15.87%,但仍远小于榨笼的屈服极限785 MPa。虽然新榨笼的综合位移比较大,

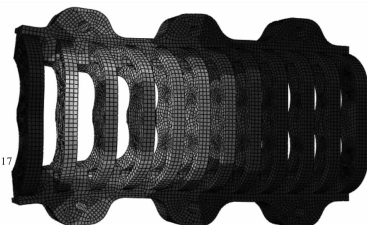
但最大综合位移出现在起支撑作用的圆柱面板上,不影响榨笼正常工作。新榨笼的质量为1 011.86 kg,相比于原榨笼的质量1 559.79 kg,降低了35.1%,其成本必然会相应降低,故新榨笼的结构比较合理。

S, Mises  
(Avg: 75%)  
+4.505e+02  
+4.129e+02  
+3.754e+02  
+3.379e+02  
+3.003e+02  
+2.628e+02  
+2.252e+02  
+1.877e+02  
+1.502e+02  
+1.126e+02  
+7.508e+01  
+3.754e+01  
+4.399e-01  
Max: 4.505e+02  
Elem: ZHALONG1-1.15794  
Node: 4750  
Min: 4.399e-03  
Elem: ZHALONG1-1.9456  
Node: 16097



(a)新榨笼Mises应力云图

U, Magnitude  
+1.320e+00  
+1.210e+00  
+1.100e+00  
+9.907e-01  
+8.797e-01  
+7.697e-01  
+6.598e-01  
+5.498e-01  
+4.398e-01  
+3.299e-01  
+2.199e-01  
+1.100e-01  
+0.000e+00  
Max: 1.320e+00  
Node: ZHALONG1-1.19917  
Min: 0.000e+00  
Node: ZHALONG1-1.480



(b)新榨笼综合位移云图

图7 新榨笼有限元分析

### 3 结论

本文将拓扑优化方法引入到榨笼的设计中。通过建立拓扑优化的数学模型,以刚度最大化为目标,以体积为约束条件,利用双向渐进结构优化方法(BESO)对榨笼进行拓扑优化设计。参照优化结果对榨笼结构和尺寸进行再设计,并对新结构进行强度校核。通过分析,新结构在满足强度和刚度的前提下,其质量减少了35.1%。该优化分析方法为榨笼的工程设计提供了一种新的思路。

#### 参考文献:

- [1] 李诗龙,张永林,杨银初. SZX12×2型双螺杆榨油机的研制[J]. 中国油脂,2010,35(12):52-56.
- [2] 焦洪宇. 基于变密度法的周期性拓扑优化[J]. 机械工程学报,2013,49(13):132-138.
- [3] 杜春江. 连续体结构拓扑优化理论及其在炮塔结构设计中的应用研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- [4] 孙晓辉,丁晓红. 结构多目标拓扑优化设计[J]. 机械设计与研究,2012,28(4):2-9.
- [5] 郭中泽,陈裕泽,张卫红,等. 基于单元材料属性更改的结构渐进拓扑优化方法[J]. 机械科学与技术,2006,25(8):928-931.
- [6] 张建全,蒋春梅,陈磊,等. 载人离心机转臂拓扑优化设计[J]. 机械设计与研究,2015,31(3):91-93.
- [7] 张学阁,伍毅,阮竞兰. 双螺杆榨油机榨螺与榨笼结构的研究进展[J]. 包装与食品机械,2012,30(3):47-49.
- [8] 张麟,刘大川,刘金波,等. LYZX型低温螺旋预榨机的研制[J]. 农业工程学报,2006,22(8):125-128.
- [9] 谭耀林. 螺旋榨油机螺旋轴设计计算的探讨[J]. 油脂科技,1981,6(S1):287-324.
- [10] HUANG X, XIE Y M. Convergent and mesh-independent solutions for the bidirectional evolutionary structural optimization method [J]. Finite Elem Anal Des, 2007, 43:1039-1049.
- [11] LI Q, STEVEN G P, XIE Y M. A simple checkerboard suppression algorithm for evolutionary structural optimization[J]. Struct Multidisp Optim, 2001,22:230-239.

· 信息 ·

## 5月1日《玉米油》新国标正式实施

[本刊讯]2018年5月1日起,最新推荐性国家标准 GB/T 19111—2017《玉米油》将代替 GB/T 19111—2003《玉米油》正式实施。新标准适用于成品玉米油和玉米原油商品。

与2003版国标相比,新标准在许多方面进行了增加和调整:

- (1)修改了标签要求。采用转基因原料生产的玉米油应按国家有关规定标识;
- (2)修改了储存、运输要求,增加了销售要求。预包装的成品玉米油在零售终端不得脱离原包装散装销售;
- (3)修改了质量要求中成品玉米油的等级。由四级调整为三级;
- (4)取消了质量要求中折光指数、碘值、皂化值、不皂化物指标,过氧化值、溶剂残留量和其他;
- (5)修改了玉米油质量要求中的色泽、透明度、水分及挥发物含量、酸值、加热实验、含皂量、烟点;
- (6)增加了玉米油基本组成和主要物理参数章节;
- (7)增加了玉米原油中甾醇总量及组成;
- (8)修改了卫生指标为食品安全要求。

玉米油又叫粟米油、玉米胚芽油,是从玉米胚芽中提炼出的油。玉米胚芽脂肪含量在17%~45%之间,占玉米脂肪总含量的80%以上。玉米油中的脂肪酸特点是不饱和脂肪酸含量高达80%~85%。玉米油本身不含有胆固醇,对于血液中胆固醇的积累具有溶解作用,故能减少对血管产生硬化影响。

在生活水平不断提高的当下,食用油消费量也在不断攀升,但是严峻的食品安全形势让不少消费者对食用油的选择变得更加谨慎。玉米油新国标的正式实施,将有利于推动行业健康发展,增强消费者对玉米油食品安全的信心。