

# 单螺杆挤出机喂料段螺旋沟槽衬套的流场分析

李成宇<sup>1</sup>, 吕晓龙<sup>2\*</sup>, 吕柏源<sup>1</sup>, 汤岷<sup>1</sup>

(1. 青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛 266100;

2. 青岛科技大学中德科技学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 运用 Solidworks 三维建模软件建立喂料段沟槽衬套的实体模型。利用 ANSYS/FLUENT 进行有限元流场分析, 针对单螺杆挤出机制备再生胶时喂料段螺旋沟槽衬套的沟槽深度, 沟槽宽度, 沟槽个数对胶料固体输送速率的影响进行了分析。本文还对挤出机喂料段螺旋沟槽衬套的沟槽深度, 沟槽宽度及沟槽个数等参数进行了优化。其研究结果对单螺杆挤出机制备再生胶时喂料段沟槽衬套的设计及参数选取有一定的指导意义。

**关键词:** 单螺杆挤出机; 衬套沟槽; 流场分析; 输送速率

**中图分类号:** TQ320.663

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-797X(2024)01-0047-06

DOI:10.13520/j.cnki.rpcte.2024.01.010

## 0 前言

在橡胶工业中, 螺杆挤出机是橡胶加工的重要设备, 它广泛应用于轮胎制造、胶管制造、密封胶胶条制造、电线电缆和再生胶制造等等<sup>[1-3]</sup>。长期以来, 挤出机研究发展的焦点都集中在螺杆构型的不断改进中, 这确实使挤出机的生产能力和塑化能力获得了巨大的提高, 但是塑化能力与喂料能力也是紧密相连的, 只有喂料段输送能力与塑化能力相匹配时, 才能保证高质量和高生产率的挤出<sup>[4-6]</sup>。而提高喂料段输送能力, 需要在一定范围内提高喂料段机筒衬套的内摩擦系数, 即加大胶料与衬套内壁的摩擦力, 使得胶料可以最大量的向前输送<sup>[7-9]</sup>。而为了保证胶料与料筒内壁之间有较大的摩擦力, 提高挤出产量, 最简单的方法就是在料筒上加工若干个纵向沟槽。除了直线形沟槽外, 还有一种螺旋形沟槽, 其螺旋方向与螺杆螺槽的螺旋方向相反, 相比纵向沟槽, 可以进一步加强物流的输送能力<sup>[10]</sup>。喂料段沟槽衬套设计过程中, 影响生产效率的参数主要有沟槽宽度, 沟槽深度和沟槽数量。利用 FLUENT 模块, 对  $\Phi 150$  单螺杆挤出机喂料段三维流场进行模拟分析, 并针对物料流动行为与速度的关系, 对沟槽宽度, 沟槽深度和沟槽数量进行了优化分析, 同时总结了各个参数对胶料输送速率的影响。

## 1 建立模型

### 1.1 几何模型

本文基于单螺杆挤出机, 一种用于制备再生橡胶的设备。挤出机参数为: 螺杆直径  $d=\Phi 150$  mm, 喂料段长度比=4 (长 600 mm 等距等深), 喂料段螺槽深度  $h=27$  mm, 螺杆导程  $S=170$  mm, 螺棱宽度  $e=10.5$  mm。)通过改变沟槽深度、沟槽宽度和沟槽个数, 模拟物料的最大流动速度, 并分析了沟槽深度、沟槽宽度和沟槽个数对物料输送速率的影响。喂料段衬套沟槽几何模型如图 1 所示, 喂料段螺杆衬套装配体如图 2 所示。



图 1 单螺杆挤出机喂料段沟槽衬套模型图

### 1.2 数学模型

在进行流场模拟计算时, 考虑到流场的几何形状、物料性质、流动状态、加工条件等因素造成的流场复

作者简介: 李成宇(1998-), 男, 读硕士研究生, 主要从事高分子材料加工技术与设备的研究。

\* 为通讯作者

收稿日期: 2022-03-15

杂性,同时流动过程能满足工程的近似要求,做以下基本假设<sup>[11-12]</sup>:



图2 单螺杆挤出机喂料段沟槽衬套螺杆组装图

- (1) 聚合物为非牛顿流体;
- (2) 聚合物熔体假定为紊流流动;
- (3) 忽略惯性和重力的影响;
- (4) 聚合物在流道中假定为全部充满。

描述流场的连续性方程、运动方程和能量方程如下:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{v} &= 0 & (1) \\ -\nabla p + \nabla \cdot \tau &= 0 & (2) \\ \tau &= 2\eta(\dot{\gamma})D & (3) \end{aligned}$$

式中,  $v$  为速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $p$  为压力, Pa;  $\tau$  为应力张量, Pa;  $\eta(\dot{\gamma})$  为剪切速率作用黏度值, Pas;  $D$  为形变速率张量,  $s^{-1}$ 。

为了既能描述在高剪切速率下的假塑性流体的流变性质,又可描述在低剪切速率下牛顿流体的流变性质, Carreau 模型为:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + \lambda(\dot{\gamma})^2]^{n-1/2} \quad (4)$$

式中,  $\eta_{\infty}$  为无穷剪切黏度, Pas;  $\eta_0$  为零剪切速率时的黏度, Pas;  $\lambda$  为胶料的黏弹性特征时间, s;  $n$  为非牛顿指数。

### 1.3 网格划分

通过 workbench 平台运用布尔运算生成流体域。并采用智能网格划分模式,同时使用线尺寸控制单元格大小,并且对必要位置进行网格加密,以达到均匀划分网格、提高计算精度的目的<sup>[13]</sup>。喂料段流体域网格实体模型如图3所示:

### 1.4 边界条件的确定

物料与衬套内表面为无滑移边界,即与衬套内表面接触的物料相对于衬套内表面的速度为零;且物料与螺槽底部和螺棱侧面分别接触的物料随螺杆作圆周运动<sup>[13-14]</sup>。螺杆表面的速度随螺杆转速的变化而变化,本工作假定螺杆转速为  $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

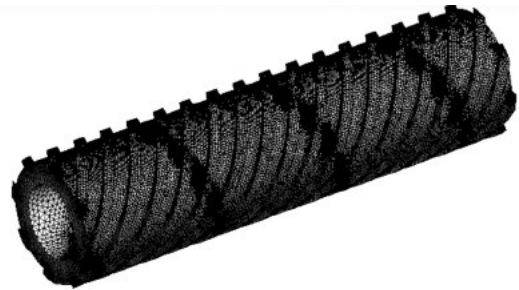


图3 单螺杆挤出机喂料段流体域网格划分

## 2 模拟结果分析

### 2.1 沟槽深度对喂料段物料输送速率的影响

在沟槽宽度和沟槽个数不变的情况下,利用数值模拟研究手段,分析了沟槽深度对单螺杆挤出机喂料段物料输送速率的影响,沟槽深度变化范围如表1所示。

表1 沟槽深度变化表及截面图例

沟槽宽度	15 mm			
个数	12 个			
螺旋升角	30°			
沟槽深度	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
截面图例				

运用 workbench 软件 fluent 模块对胶粉的输送过程进行数值模拟,接着采用 CFDPOST 模块进行后处理分析,得到4种不同沟槽深度的截面速度矢量云图,如图4所示。

根据图4可以看出,沟槽深度从4 mm提升至6 mm,速度矢量提升明显,从6 mm提升至8 mm,速度矢量略微提升,沟槽深度从8 mm提升至10 mm,速度矢量下降明显。随着沟槽深度的增加,意味着沟槽截面积增加,同样意味着衬套内表面摩擦系数增大,根据固体输送理论可知,衬套内表面摩擦系数越大,物料的输送速度越快。但同时过大的沟槽深度,虽然增大了物料对机筒内壁的摩擦因数与物料对螺杆螺槽摩擦因数的差,但因衬套沟槽深度过大,胶料向前输送时严重受阻,甚至部分胶料卡在沟槽内,此时导致速度下降严重。所以对于  $d=150 \text{ mm}$  的挤出机喂料段沟槽深度应在6~8 mm的区间内进行选择,在增大摩擦因数差的同时避免沟槽深度过小导致挤出机喂料段的喂料容积降低,又可以避免沟槽深度过大导致沟槽内发声堵料现象。沟槽深度的增加可以提高挤出机喂料段的喂料容积,可以进一步提高输送效率,因此在

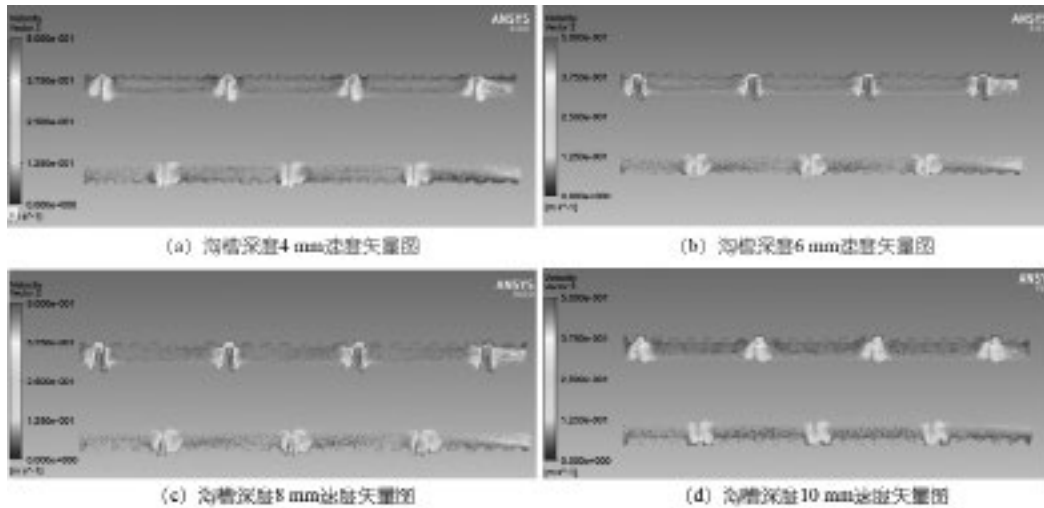






图 4 不同沟槽深度的截面速度矢量图云图

一定范围内自强制喂料挤出机喂料段机筒沟槽深度数值应尽量大一些。同时为了保证衬套的强度，具体的沟槽深度可以在  $(0.4\sim 0.5)h$  进行选取 ( $h$  为衬套的厚度)。

### 2.2 沟槽宽度对喂料段物料输送速率的影响

在沟槽深度和沟槽个数不变的情况下，利用数值模拟研究手段，分析了沟槽宽度对单螺杆挤出机喂料段物料输送速率的影响，沟槽宽度变化范围如表 2 所示。

表 2 沟槽宽度变化表及截面图例

沟槽深度	8 mm			
沟槽个数	12 个			
螺旋升角	30°			
沟槽宽度	10 mm	12.5 mm	15 mm	17.5 mm
图例				

运用 workbench 软件 fluent 模块对胶粉的输送过程进行数值模拟，接着采用 CFDPOST 模块进行后处理分析，得到 4 种不同沟槽宽度的截面速度矢量云图，如图 5 所示。

根据图 5 可以看出，沟槽宽度从 10 mm 提升至 12.5 mm，速度矢量提升明显，从 12.5 mm 提升至 15 mm，速度矢量下降明显，从 15 mm 提升至 17.5 mm 速度矢量变化不明显。从上述结论我们可以分析出沟槽宽度与沟槽个数的乘积取值为衬套内壁周长的 1/3 左右时，胶料的输送效率更高。

### 2.3 沟槽个数对喂料段物料输送速率的影响

在沟槽深度和沟槽宽度不变的情况下，利用数值模拟研究手段，分析了沟槽个数对单螺杆挤出机喂料段物料输送速率的影响，沟槽个数变化范围如表 3 所示。

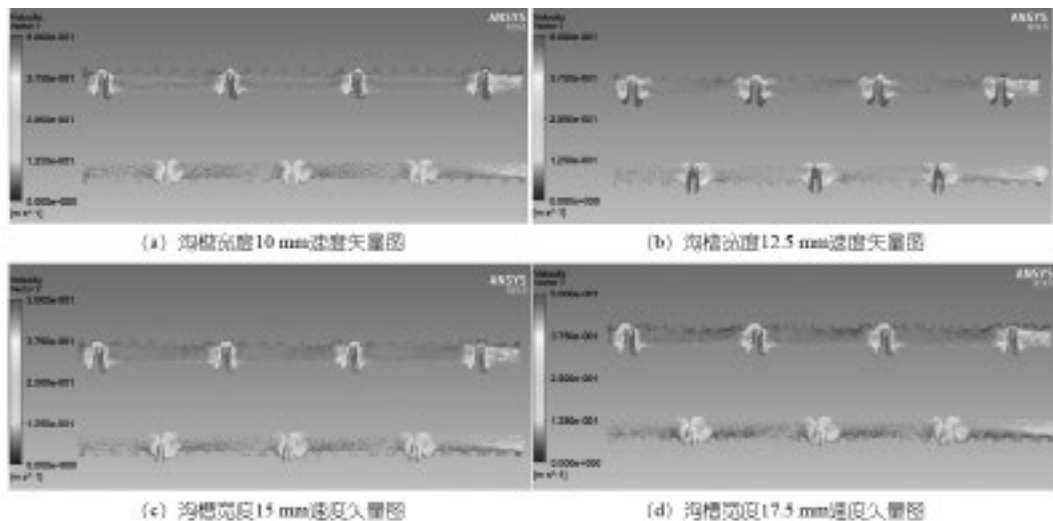






图 5 不同沟槽宽度的截面速度矢量图云图

表 3 沟槽数量变化表及截面图例

沟槽深度	8 mm			
沟槽宽度	12.5 mm			
螺旋升角	30°			
沟槽个数	8	10	12	14
图例				

运用 workbench 软件 fluent 模块对胶粉的输送过

程进行数值模拟,接着采用 CFDPOST 模块进行后处理分析,得到 4 种不同沟槽宽度的截面速度矢量云图,如图 6 所示。

根据图 6 可以看出,沟槽数量由 8 变为 10,速度矢量略有提升,沟槽数量由 10 变为 12,速度矢量提升明显,沟槽数量由 12 变为 14,速度矢量下降明显。因此喂料段螺旋沟槽衬套时沟槽数值选择 12 个,物料的流动速率最好。

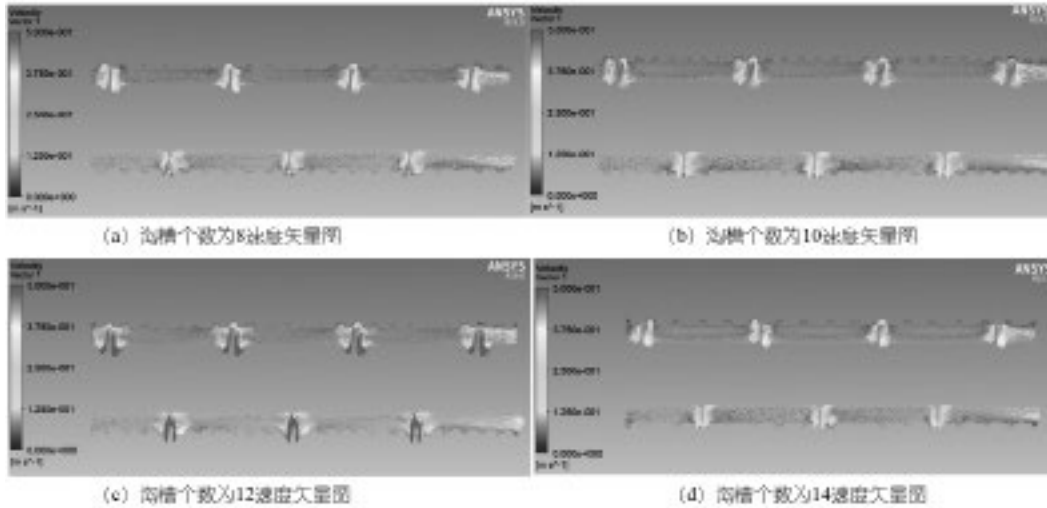


图 6 不同沟槽数量的截面速度矢量图云图

### 3 正交试验与最优方案确定

#### 3.1 正交实验

本工作采用正交试验方法<sup>[17]</sup>对挤出机喂料段沟槽

衬套各个参数进行优化,正交试验表如表 4 所示,其中因素代号 A、B、C 分别代表沟槽深度(mm),沟槽宽度(mm)和沟槽个数。

表 4 正交试验表

模型	A	B	C	流体域平均速度 $V/(m \cdot s^{-1})$
1	4	10	8	0.092 81
2	4	12.5	10	0.096 64
3	4	15	12	0.098 47
4	4	17.5	14	0.108 68
5	6	10	10	0.098 58
6	6	12.5	8	0.138 49
7	6	15	14	0.085 47
8	6	17.5	12	0.092 48
9	8	10	12	0.187 28
10	8	12.5	14	0.134 26
11	8	15	8	0.137 32
12	8	17.5	10	0.104 73
13	10	10	14	0.087 49
14	10	12.5	12	0.115 81
15	10	15	10	0.097 65
16	10	17.5	8	0.132 56
$\bar{V}_1$	0.100 5	0.116 54	0.125 29	
$\bar{V}_2$	0.103 76	0.121 3	0.099 4	
$\bar{V}_3$	0.140 89	0.104 73	0.123 51	
$\bar{V}_4$	0.108 38	0.109 61	0.103 89	
极差	0.040 39	0.016 57	0.024 11	

### 3.2 最优方案分析

极差的大小直接反映了该因素对挤出机喂料段流体域平均速度的影响大小,根据表4可已看出极差大小: $A > D > C > B$ ,也就是说沟槽深度对流体域平均速度影响最大。

根据表4可知,L9即沟槽深度为8 mm,沟槽宽度为10 mm,沟槽个数为12个流体域平均速度和流体域单位面积流量最大。与上文单因素试验最优解沟槽深度为8 mm,沟槽宽度为12.5 mm,沟槽个数为12个,进行对比发现上文最优解的流体域平均速度更大,因此在设计 $\Phi 150$ 单螺杆挤出机制备再生胶螺旋沟槽时选择沟槽深度为8 mm,沟槽宽度为12.5 mm,沟槽个数为12个。

## 4 结论

采用FLUENT软件,对 $\Phi 150$ 单螺杆挤出机喂料段螺旋沟槽衬套三维流场进行模拟,可得出以下结论:

(1)螺旋沟槽深度对喂料段的物料输送速率影响较大,随着喂料段衬套螺旋沟槽深度的增加,流场内流体平均流动速度先上升后下降,及输送速率先上升后下降。螺旋沟槽深度取值应取决于衬套的直径与厚度,在一定范围内尽可能选取更大的螺旋沟槽深度,以增大物料对机筒内壁的摩擦因数与物料对螺槽表面的摩擦因数差,但同时也要保证沟槽的自洁性。

(2)挤出机喂料段中,随着喂料段螺旋沟槽宽度的增加或沟槽数量的增加,流场内流体平均流动速度都是呈现出先上升后下降的趋势,同时输送速率随之先上升后下降。这都体现在物料对机筒内壁的摩擦因

数与物料对螺槽表面的摩擦因数差需保持在一定的范围内,可以提高输送能力。在对螺旋沟槽宽度取值时应关注螺旋沟槽的个数,应保证螺旋沟槽宽度与螺旋沟槽个数的乘积取值为衬套内壁周长的1/3左右。

### 参考文献:

- [1] 吕柏源,郑晓斐,闵鹏峰.等.橡胶挤出机螺杆构型分析及几何参数的确定(上)[J].橡塑技术与装备,2011,37(10):18-24.
- [2] 艾罡. $\Phi 90$ 机筒销钉式冷喂料橡胶挤出机的设计[J].橡塑技术与装备,2020,46(01):32-36.
- [3] 吕贤滨,巩家伟,范之海.等.喂料方法与喂料量对挤出机生产能力的影晌[J].橡胶工业,2011,58(08):499-501.
- [4] 范之海,宋广军,吕贤滨.等.橡胶冷喂料挤出机螺杆结构几何参数分析与选择[J].橡塑技术与装备,2011,37(01):5-11.
- [5] 蒋欣.单螺杆挤出机螺杆的设计与改进[J].橡塑技术与装备,2016,42(20):72-74+78.
- [6] 吕炜帅,刘红彬.挤出机喂料段动态流场分析[J].轮胎工业,2015,35(01):50-56.
- [7] 刘彦昌,于芳,马冲.等.冷喂料橡胶挤出机的喂料行为[J].高分子材料科学与工程,2020,36(10):103-108.
- [8] 贾明印,余斌,张勇.等.沟槽机筒单螺杆挤出机挤出特性的研究[J].塑料工业,2015,43(05):31-34.
- [9] 张惠敏,周桂莲.可提高挤出产量的沟槽加料段[J].上海塑料,2004(02):28-31
- [10] 钱欣,许王定,金杨福.POLYFLOW基础及其在塑料加工中的应用[M].北京:化学工业出版社,2010.
- [11] 刘浩.ANSYS15.0有限元分析从入门到精通[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [12] Xu B.P.,He L.,Wang M.G.,et al Numerical Simulation of Chaotic Mixing in Single Screw Extruders with Different Baffle Heights[J]. International Polymer Processing,2016,31(1).
- [13] 吕炜帅.橡胶挤出机喂料装置有限元分析与优化[J].轻工科技,2019,35(05):42-43+47.

## Flow field analysis of spiral groove liner in the feeding section of a single screw extruder

Li Chengyu<sup>1</sup>, Lv Xiaolong<sup>2\*</sup>, Lv Boyuan<sup>1</sup>, Tang Min<sup>1</sup>

(1.College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, Shandong, China;

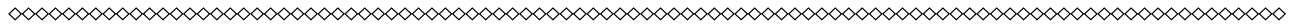
2.Chinesisch-Deutsche Technische Fakultät, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, Shandong, China)

**Abstract:** Solidworks 3D modeling software is used to establish a solid model of the feeding section groove liner, and ANSYS/FLUENT is used for finite element flow field analysis. This article analyzes the effects of groove depth, groove width, and number of grooves on the solid conveying rate of the rubber material during the preparation of recycled rubber using a single screw extruder. This article also optimized parameters such as

groove depth, groove width, and number of grooves for the spiral groove liner in the feeding section of the extruder. The research results have certain guiding significance for the design and parameter selection of the feeding section groove liner in the preparation of recycled rubber by single screw extruder.

**Key words:** single screw extruder; groove liner; flow field analysis; conveying rate

(R-03)



## 42 吨 / 时，全球领先塑料分选厂瑞典落成

42 t/h, the world's leading plastic sorting plant in Sweden was completed

近日，全球最大、分选效率最高的塑料包装分选厂 Site Zero 在瑞典举行了落成典礼，瑞典气候与环境部长 Romina Pourmokhtari 和来自欧洲塑料价值链的 350 多位嘉宾共同出席了开幕式，盛况空前。

### 分选厂项目概况

Site Zero 分选厂隶属于瑞典塑料回收公司 (Svensk Plaståtervinning)，于 2019 年开业，并在今年完成扩建。

工厂地点：瑞典，穆塔拉

占地面积：6 万 m<sup>2</sup>

处理能力：42 t/h，20 万 t/年

分选结果：可分离出 12 种不同种类的塑料及其他废弃物 (PP, HDPE, LDPE, PET 托盘, PET 瓶, PP 膜, EPS, PS, PVC, PO, 金属和非塑料废弃物)

纯度水平：98% 以上 2019 年至今，瑞典塑料回收公司已投入约 10 亿瑞典克朗的扩建资金 (约 6.8 亿元人民币)。瑞典塑料回收公司是全球知名的废弃物回收企业，以其领先的技术和先进的设备而闻名。他们在废弃物回收过程中不断尝试，持续创新，致力于实现零浪费、零降级回收、零排放。

完成扩建升级的 Site Zero 可完全实现净零排放，Site Zero 由可再生能源提供生产动力，回收过程中少量无法回收的塑料和其他废弃物会被送往能源回收站，为工厂提供再生能源，且通过碳捕获和封存技术 (CCS)，使过程中产生的温室气体不会排放到大气中；同时，工厂还计划在屋顶安装太阳能电池板，通过太阳能为工厂提供电力供应，清洁环保。

自 2024 年起，除了处理瑞典的塑料包装外，Site Zero 还将处理来自芬兰家庭产生的大部分废塑料。

### 60+ 陶朗设备支持

Site Zero 令人惊叹的分选能力背后，离不开强大的技术支持。整个工厂的送料皮带长达 5 km，配备了 60 多台陶朗 AUTOSORT™ 分选设备。工厂试运行期间的数据表明，入料中 95% 的塑料包装可被回收，分选后可实现高达 98% 以上的纯度。

此外，60 多台 AUTOSORT™ 被统一连接到陶朗云互联平台 (TOMRA Insight)，这让所有的日常管理和维护变得十分简单。该平台能近乎实时、安全可靠地获取大量的分选数据并提供报告，把分选从单纯的生产流程转化为具有战略意义的管理工具，提高产量及效率，降低运营成本。

未来，瑞典塑料回收公司将投入 Site Zero 的二期工程，计划于 2025 年实现塑料的清洗和造粒。目前，瑞典约有 33% 的塑料包装被回收，而 Site Zero 的目标是希望到 2025 年时，将瑞典的塑料回收率提升至 55%，并最终逐步实现 100% 回收。

摘编自“废塑料新观察”

(R-03)

