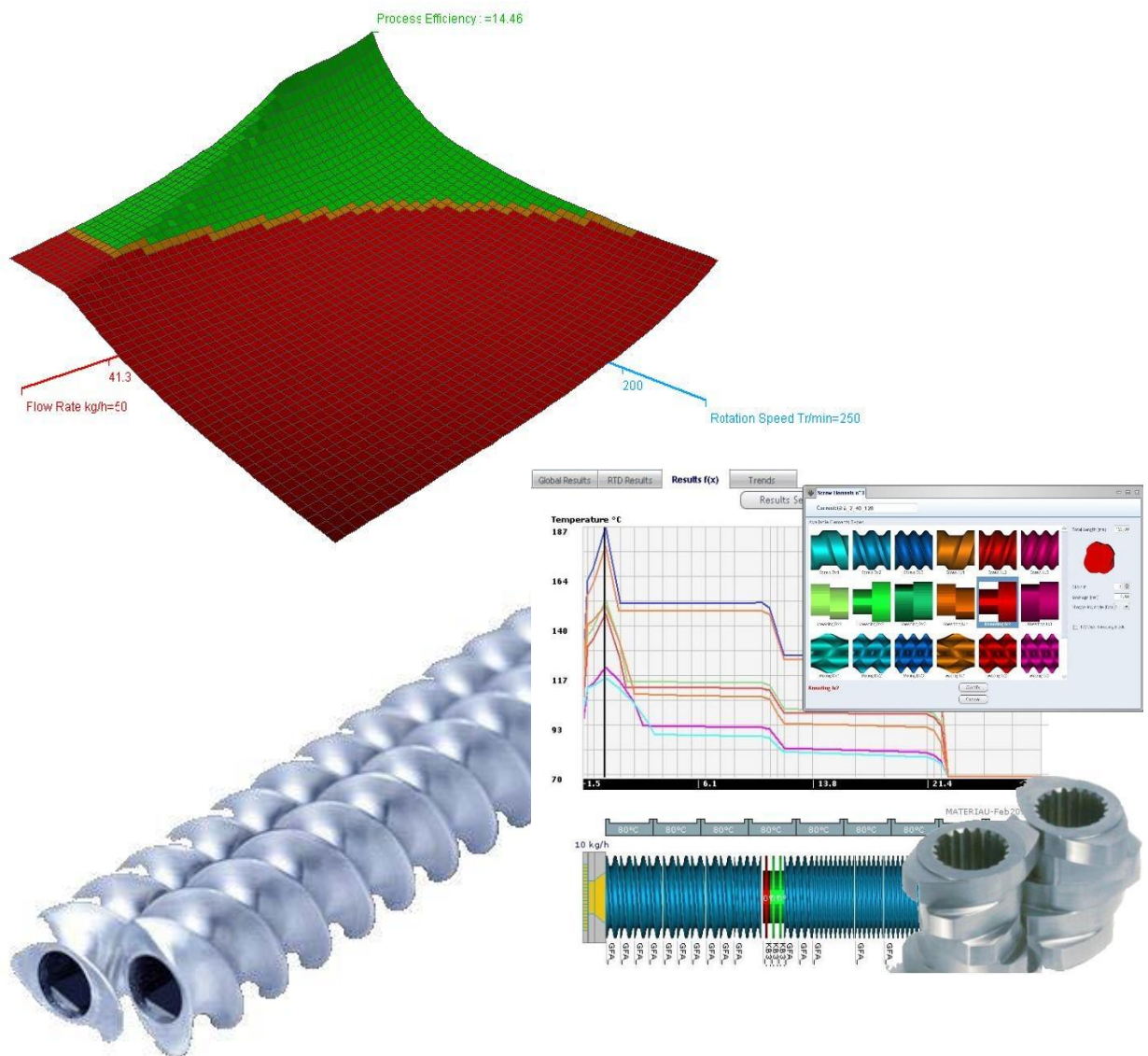


双螺杆挤出工艺模拟软件 Ludovic

基于工艺过程控制→实现产品质量控制



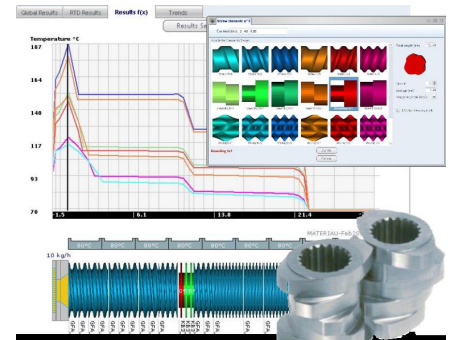
北京创联智软科技有限公司

虚拟挤出机实验平台

虚拟的挤出实验室

双螺杆挤出工艺模拟软件 Ludovic 是一间虚拟挤出工艺实验室，1998 年由法国科学计算咨询 SCC 公司（Sciences Computers Consultants）联合法国国家实验室国立巴黎高等矿业学院材料成形研究中心（CEMEF）、法国农业科学研究院（INRA）联合开发。

Ludovic 软件用于模拟计算同向双螺杆挤出机内固体粒子输送、熔融、熔体输送的完整物料输送过程；再现挤出工艺配置，包括螺杆几何、材料配方和工艺条件；支持挤出实验方案调度，致力于挤出过程的材料流变学性能研究和工艺参数优化。



减少实际物理实验

应用 Ludovic 软件，可以降低真实物理实验。Ludovic 软件可以方便地模拟挤出工艺过程的材料流变行为和工艺条件参数的影响因素，分析挤出材料沿螺杆长度方向的温度、压力、剪切粘度和停留时间分布等参数的变化规律。应用 LUDOVIC 软件可以提高产品研发周期和降低成本：

- 节省 50%产品配方实验
- 节省 50%材料资源成本
- 节省 30%产品研发时间

这个虚拟挤出实验室允许进行上百个挤出配置的结果比较，无论是螺杆组合、工艺条件、产品配方，材料演变行为的分析结果一目了然。

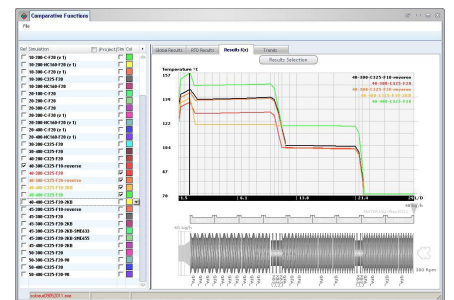
时间验证计算模型

Ludovic 是一款基于一维物理模型的同向双螺杆挤出工艺模拟软件。软件计算基于 NS（Navier-Stokes）流体物理方程，模拟挤出材料在挤出机流道内的流动过程。Ludovic 能够准确模拟物料挤出全过程，包括喂料、输送、混合、排气等，揭示从原材料到产品的中间过程的各种物理现象。螺纹元件是客户可以自己定义的自洁元件，包括螺纹元件、捏合块、混合元件等。软件主要功能包括前处理器、后处理器和求解器：

- 快速求解计算（求解器一分秒级的计算时间）
- 数据结果分析（后处理器）
- 初始参数设置（前处理器）

所有 TSE 挤出工艺

Ludovic 适用于所有类型的 TSE 挤出机和螺杆设计，可以分析任意挤出材料及共混复合材料（包括填料和添加剂），适用材料包括聚合物、聚合物母料、复合材料、农产食品、医药和化妆品、炸药和建筑材料等等。



软件的功能—产品研发的得力助手

支持全流程的产品开发

Ludovic 是物理实验的有效补充手段，它可以为工艺设计方案优化、工艺过程故障排除、挤出机模型缩放提供技术支持，帮助工程师应对解决熔融共混、反应挤出的技术挑战。

软件简单易用，具有工程化操作界面，不需要工程师具有深厚的有限元仿真经验；计算速度快，分秒级的计算量；这使得 Ludovic 成为强大的仿真工具，替代传统资源密集型的物理实验。

Ludovic 软件可以在整个工艺开发过程中，针对不同层次的细节和复杂问题进行模拟分析，提供有价值的参考和快速反馈。

Jane SPIKOWSKI,
process engineer

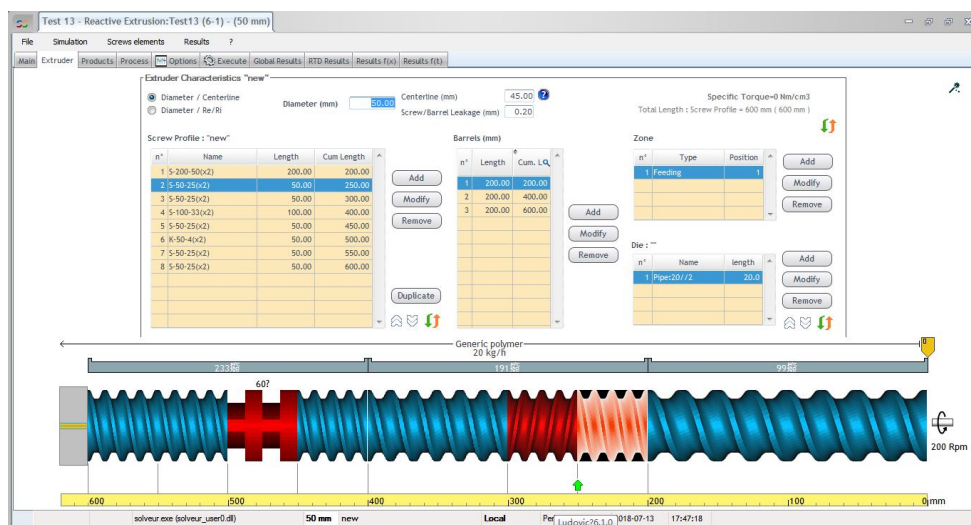


探索宽泛工艺条件窗口

Ludovic 具有软件前后处理器和求解器一体化环境，具有结果比较、参数相关性趋势分析、虚拟实验设计 DOE 等不同工具和操作导航，可以在很短时间内，帮助工程师探索宽泛的工艺条件窗口。新用户可以在 1—2 天时间内掌握 Ludovic 软件，达到快速积累工艺知识的目标。

导航用户设置界面

导航式工程化用户图形界面，用户只需要按导航指示，逐次进行参数设置、提交计算和结果分析即可。用户设置导航分为 10 个步骤：首先，建立模拟项目数据库（Simulation Project）；第 1 步，建立新模拟案例（Simulation Case），案例注解说明；第 2 步，设置挤出机几何参数（螺杆组合、分段式机筒、喂料口、排气口、口模）；第 3 步，设置挤出产品配方、材料参数；第 4 步，设置工艺参数（螺杆转速、螺杆温度、机筒温度、喂料速度、模具温度）；第 5 步，设置求解问题选项（熔融模型、挤出膨胀、滑移模型、反应挤出、用户自定义、玻纤挤出）；第 6 步，设置求解精度参数、粘度耦合选项、设置传感器（扭矩报警、温度报警、压力报警）；第 7—10 步，后处理分析窗口，包括全局结果分析、停留时间分析、螺杆位置—物理参数曲线分析结果（实验结果比较分析）、挤出时间—温度/压力曲线分析。

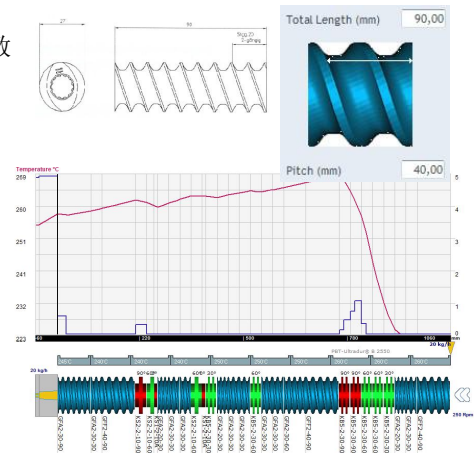


高效导航建模功能

软件用户界面（GUI）中包含 4 个标签对话窗口，可以在几分钟内完成所需数据输入，建立模拟模型。

- 几何数据—设置挤出机、螺杆组合的几何参数
- 材料数据—设置产品配方、材料和填料等材料参数
- 工艺条件—设置螺杆转速、螺杆温度等工艺参数
- 计算参数—设置反应挤出、玻纤挤出等计算数据

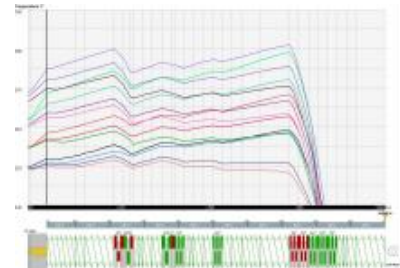
值得一提：Ludovic 建立一个完整的仿真模型平均时间只需要 10 分钟，平均计算时间只需要 15 秒，而实际实验准备至少需要 4 小时。



先进结果比较功能

Ludovic 软件不仅可以针对单个模拟工况进行结果分析，而且还可以采用模拟结果比较功能进行多个模拟工况的结果分析，以及与真实物理实验的结果进行比较。通过先进结果比较功能，可以非常明显地观察各模拟方案的优劣，帮助我们在开发产品和工艺设计艺时找到更优工艺配置方案。

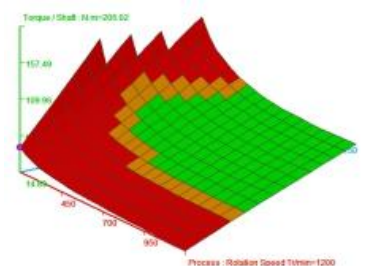
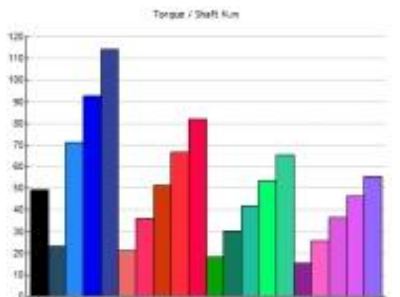
值得一提：如果采用物理实验方法，测试不同螺杆组合设计、改变不同工艺参数和结果分析可能需要几天时间。而采用 Ludovic 数值模拟技术，它只需要几个小时的工作量。



虚拟实验设计功能

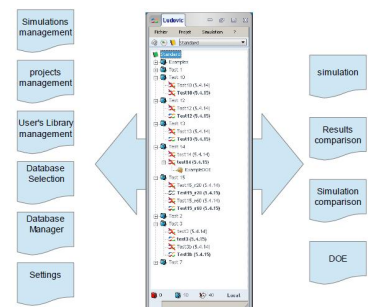
虚拟实验设计 DOE 功能（Design Of Experiments），主要用于掌握材料/工艺条件等输入参数变量的影响敏感性。输入参数变量由用户自定义，包括不同螺杆转速、螺杆温度等。Ludovic 软件，一次可以模拟上百个工况的模拟案例（Simulation Case），对应着潜在上百个工艺配置方案，帮助我们了解材料流变性能趋势。DOE 可以同时考虑挤出产品、挤出机等输入参数变量的影响趋势，平均计算时间约为 1 小时。

值得一提：如果采用物理实验方法，在一台挤出机完成上述作用域（functioning domain）的输入参数变量的结果影响实验，可能需要几周甚至几个月时间。



先进仿真数据管理

Ludovic 软件基于数据库模式的软件框架结构，包含模拟项目、模拟案例、用户资料组件等数据库（如材料数据、螺杆单元等）；软件可以使用多种方式的索引查询功能（如模拟项目、模拟案例、模拟日期）。



软件高级功能—虚拟实验设计

虚拟实验设计 DOE

Ludovic 系统集成的实验优化设计 (DOE) 功能, 提供先进工艺分析工具。实验优化设计 DOE 是工艺优化工作中的一个关键内容。通过理解控制产品质量的关键工艺参数, 可以更好地了解挤出机的总体功能。

DOE 的主要功能

一个实验优化设计 DOE, 基于一个参考仿真算例用于准备参数设置, 然后执行 DOE 计算。一个实验优化设计 DOE 是一个二元规划, 一元选择输入变量 (工艺参数变量), 二元选择输出参数 (记录结果变量)。一个实验优化设计 DOE 可能产生大量模拟结果, 因此需要 DOE 模拟结果定义为所有常规模拟结果的子集。实验优化设计 DOE 分析功能, 用于寻找可变工艺参数与模拟结果之间的趋势或关系。

DOE 的演示算例

基于一个参考仿真算例, 如果用户想要跟踪螺杆转速 (实际转速为 200 转/分) 和喂料流量 (实际为 20 kg/h) 的变化的产品影响。用户感兴趣的是跟踪平均停留时间和扭矩, 以寻找这些工艺特性的灵敏度; 用户还希望了解物料离开捏合块时的温度变化。

一个 DOE 示例看起来如下:

- ◆ 选择输入参数 n1: 实际数值 200 (变化范围: 最小 100, 最大 300, 步数 21),
- ◆ 选择输入参数 n2: 实际数值 20 (变化范围: 最小 10, 最大 30, 步数 21),
- ◆ 选择输出结果: 平均停留时间, 螺杆扭矩, 温度
- ◆ DOE 模拟数量: 共 441 个模拟 ($21 \times 21 = 441$)

| | Input parameter n°1 | Input parameter n°2 |
|------------------|---------------------|---------------------|
| Simulation n°1 | 100 | 10 |
| Simulation n°2 | 100 | 11 |
| ... | 100 | ... |
| Simulation n°21 | 100 | 30 |
| ... | ... | ... |
| Simulation n°420 | 300 | 10 |
| Simulation n°421 | 300 | 11 |
| ... | 300 | ... |
| Simulation n°441 | 300 | 30 |

软件高级功能—仿真数据管理

Ludovic 软件基于数据库模式的软件框架结构，包含模拟项目、模拟案例、用户资料组元等数据库（如材料数据、螺杆单元等）；软件可以使用多种方式的索引查询功能（如模拟项目、模拟案例、模拟日期）。

Ludovic 仿真数据库

Ludovic 使用不同数据库的原因如下：

- 如果仿真算例分布在不同的仿真数据库中，每个仿真数据库包含合理数量的仿真算例，Ludovic 加载仿真算例更快
- 如果在特定仿真数据库中进行排序，则更容易找到仿真算例
- 当在多用户环境中使用 Ludovic 时，每个用户必须使用不同的仿真数据库
- 针对轻量型的仿真数据库，可以更快进行的加载、备份或恢复工作
- 针对轻量型的仿真数据库，可以更快地将仿真数据库作为一个整体进行归档。

用户组元资料库

Ludovic 用户组元资料库是软件基本功能，它包括收集整理模拟所需的仿真组件供以后使用。Ludovic 软件包含一个标准用户数据，它对于保存和使用用户定义数据是非常有用的。Ludovic 用户组元资料库包括：

- 挤出机设备数据库 complete extruders,
- 产品材料数据库 products definitions,
- 添加剂材料数据库 additives definitions,
- 模具定义数据库 dies definitions,
- 螺纹单元数据库 screw elements or groups of screws elements,
- 动力学反应定义数据库 kinetic reactions definitions,
- 用户自定义结果数据库 user's results definitions.

| | |
|--------------------------------|----------------|
| User's Library (Extruders) | Extruder |
| User's Library (Products) | Product |
| User's Library (Additives) | Additive |
| User's Library (Dies) | Die |
| User's Library (Screw) | Screw |
| User's Library (Cinetics) | Kinetics |
| User's Library (Users Results) | User's Results |
| User's Libraries (All) | All... |

软件数据接口

- 仿真项目的附件文件夹：在创建仿真项目时，Ludovic 创建了一个特定的文件夹，称为仿真项目附件文件夹，其中所有文件都可以读取或写入。
- 报告输出保存：Ludovic 可以保存一个外部报告文件，报告输出文件中分别保存当前仿真算例或当前 DoE 的挤出机总结报告。
- 软件数据输入：软件可以将需要的不同数据文本文件加载到软件系统中。这些加载文件通常是采用特定[数据输入]窗口的扫描图片文件，加载数据期间具备选择分隔符和预览数据功能。

行业应用—共混改性挤出

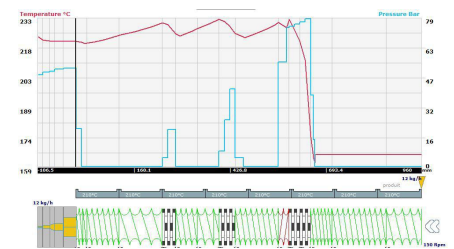
聚丙烯（PP）共混改性

1970 年以后，随着人们认识到通过塑料加工成型可以改变聚合物的内部结构，提高材料的性能；聚合物加工成型逐步从一项实用技术发展成一门材料科学，塑料改性成为重要的科研方向。普通的聚丙烯（Polypropylene）可以通过接枝改性、共聚改性、交联改性、共混改性等化学改性方法和物理改性方法来扩大使用范围，在性能上和工程塑料相媲美。在聚丙烯共混改性挤出过程中，关键工艺参数的量化分析，对于产品研发和工艺参数确定非常重要。



聚丙烯的材料性能

聚丙烯作为典型的热塑性材料，通常为无色、半透明固体、无臭无毒，是较轻的通用塑料；突出优点是具有在水中耐蒸煮的特性，耐腐蚀、强度、刚性和透明性都比聚乙烯好。在挤出过程中，聚丙烯容易控制材料成型性能；近些年来，聚丙烯树脂改性技术发展迅速，通过塑料改性克服低温冲击性差、易老化的材料缺点，应用日趋广泛。



评估沿螺杆长度方向的温度及压力的变化

挤出过程技术挑战

聚丙烯共混改性是一种简单而有效的改性方法，可以将其它塑料、橡胶或热塑性弹性体与聚丙烯共混挤出，可制备兼具这些聚合物性质的高分子化合物。鉴于不同的挤出成型工艺配置条件，将得到不同的产品材料性能。因此，如何快速地判断出聚丙烯共混挤出工艺的关键参数（key parameter）和关键域（key zones）至关重要，以便更好地进行固体输送区域、熔融区域、熔体区域的螺杆组合设计。

Ludovic 可以做什么

Ludovic 软件考虑了物料在螺杆 C 型腔内的真实流动情况，可以更好地进行聚丙烯的力学性能预测。通过这种方式，可以很方便地在分析结果中，看到**压升、温升的关键区域**。采用 Ludovic 软件，可以帮助我们回答这些问题，同时帮助我们确定得到不同材料特性的正确工艺参数配置。

通过数值模拟分析技术，可以快速地量化挤出工艺的关键区域和关键参数：

- 啮合盘—45° 错列角，会使温度上升多少？
- 反向螺纹—小导程螺距，会使压力升高多少？

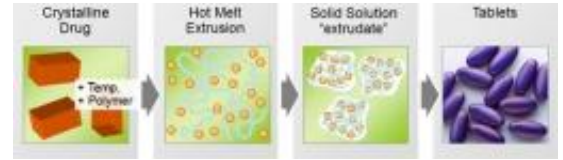
参考文献： "Experimental and theoretical study of twin screw extrusion of polypropylene"

O.S. Carneiro, J.A. Covas, B. Vergnes

行业应用—药物热熔挤出

药物热熔挤出（HME）

药物热熔挤出（Hot Melt Extrusion）技术正在成为一种新型的药物传递技术,创造性地将加工技术与药学结合起来进行药物传递研究。该技术可在高分子材料玻璃化转变温度之上对其进行处理，促使热塑性粘合剂和聚合物、活性成分 API（Active Pharmaceutical Ingredient）达到分子水平的有效混合。采用药物热熔挤出技术，难溶性药物熔融后晶型发生改变，药物处于亚稳状态，比一般制剂中的稳定状态更容易溶出，比晶型生物利用度高；当然也可以根据要求选择填充剂使得药物的溶出变慢甚至达到控释。

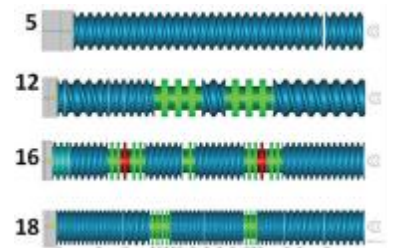


早期药物产品开发

药品开发过程中，主要关注 API 活性药物成分的剂量，用以制造片剂和药品。因此，有必要确定一种策略来成功地开发药物热熔挤出产品，在早期药物产品开发中进行优化开发。

挤出过程技术挑战

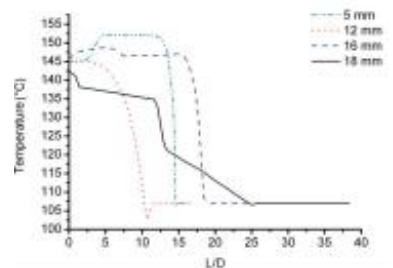
API 高温敏感性是药物热熔挤出工艺成功的关键因素。如果将早期药物研发的实验室小型挤出机扩展到中试生产、药厂量产的大型挤出机，需要增大挤出机的螺杆直径，模型缩比（scale-up）将强烈地影响到挤出机内的温度变化。应用 Ludovic 软件，采用不同挤出机直径可以快速方便地预测到 API 温度响应，选择出合适的挤出机直径尺寸，保证 API 的产品特性，从而减少测试及实验工作。



4 种螺杆组合构型设计

Ludovic 可以做什么

制定固体分散挤出的模型缩比的策略时，需要强调不同模型缩比的结果一致性，尤其需要关注能量分布、平均停留时间、螺杆长度方向温度分布等结果。Ludovic 模拟结果可以方便地得到这些重要结果信息，发现潜在的高温高能转变点；这样，可以高效地进行产品质量优化和进行模型缩比放大的可行性评估。



温度与螺纹直径的关系

另一方面，采用 Ludovic 软件，可以将黑盒子的挤出机变得透明，使得我们更好地设计工艺。

参考文献: "Modeling of the Impact of Extruder Configuration on the HME Process and Product

Characteristics during Scale Up" 2013 – AAPS San Antonio, by K.G. Wagner, D.E. Zecevic

行业应用—反应挤出工艺

聚丙烯 PP 反应挤出

聚丙烯反应挤出工艺，是把挤出机作为连续化反应器，使欲反应的混合物在熔融挤出过程中同时完成指定的化学反应。反应挤出是塑料改性的重要方法和手段，它具有利用挤出机处理高粘度聚合物的独特功能，对挤出机螺杆料筒上的各个区域进行独立的温度控制、物料停留时间控制和剪切强度控制，使物料在各个区域传输过程中完成固体输送、增压熔融、物料混合、熔体加压、化学反应、排除副产物和未反应单体、熔体输送和泵出成型等一系列化工基本单元操作，因此它是理想的高粘度聚合物熔融态反应方法。

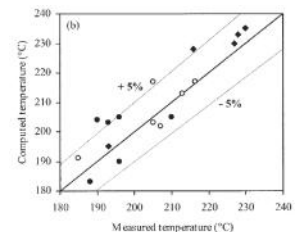


聚丙烯的氧化降解

聚丙烯 PP 聚合时，生成高分子量组分 MW (molecular weight)，表现出高粘度特性，这将带来棘手的加工成型问题。为了改善加工性，通常情况下可以通过反应挤出方式（氧化降解）来降低分子量(MW)、降低粘度，解决加工成型性问题。

挤出过程技术挑战

为精确预测分子量(MW)演变模型，我们需要进行沿挤出机轴向的“热-力学性能和化学反应的耦合计算”。作为第一个关注点，温度是粘度的关键影响因素；准确的温度变化分析，直接影响到反应挤出模型的建立，以期进行精确的模拟计算。



测量温度与计算温度的比较曲线图

Ludovic 可以做什么

第一步，采用 Ludovic 软件进行温度变化分析，计算结果与实验测量进行对比；一致的温度场对比结果，它是获得反应趋势的第一个答案。

第二步，完成“材料粘性—反应速率的耦合计算”，考虑反应速率变化对于材料粘性的影响，建立成反应挤出的模型方程。

因此，Ludovic 预测分析了沿螺杆长度方向的耦合复合粘度（温度和反应速率）与 PP 平均分子量（MW）变化关系。这种耦合计算分析，同时考虑热-力学问题（温度对粘度影响）和化学反应问题（反应速率对粘度影响），更能精确地计算出聚丙烯 PP 粘度。

参考文献: "Evolution of the Peroxide-Induced Degradation of Polypropylene along a Twin Screw Extruder:

Experimental Data and Theoretical Predictions" by F. Berzin, B. Vergnes, S.V.

Canevarolo, A.V. Machado, J.A. Covas

行业应用—聚酯挤出工艺

饱和聚酯 PBT 挤出工艺

饱和聚酯 PBT 是一种热塑性聚酯，非增强型的 PBT 与其它热塑性工程塑料相比，加工性能和电性能较好。PBT 玻璃化温度低，模具温度在 50℃ 时即可迅速结晶，加工周期短。PBT 被广泛应用于电子、电气和汽车工业中。由于 PBT 的高绝缘性及耐高温性可用作电视机的回扫变压器、汽车分电盘和点火线圈、办公设备壳体和底座、各种汽车外装部件、空调机风扇、电子炉灶底座、办公设备壳件。



材料隐蔽演化过程

在挤出工艺中，材料在挤出机封闭式螺槽（黑箱）内流动，很难实时测量挤出机不同螺杆长度位置的压力、温度、剪切率和粘性等。这就是为什么在模具出口处采取一些措施的原因。但是，这些测量值有时与在整个过程中的实际材料行为不相关；尤其，针对饱和聚酯 PBT 这种敏感材料，更是如此。

挤出过程技术挑战

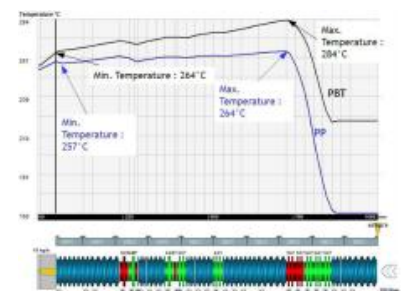
在饱和聚酯 PBT 挤出过程中，完成的测量与整个材料历史并不总是相关。事实上，经常在口模/螺杆出口位置测量温度。但是，这往往忽略了 PBT 在熔融区域可能达到的最高温度，可能导致对产品性能的错误评估。特别是，PBT 在用于照明继电器和连接器等电器产品时，需要保持较高产品性能（热阻性能）。



通过 Ludovic 验证实验与仿真结果高度一致

Ludovic 可以做什么

应用 Ludovic 软件，可以用来验证材料的热-力学性能。结果表明，出口温度（264℃）比熔融区域温度（284℃）低很多。作为比较，聚丙烯 PP 表现出更规则的温度曲线。这种结果说明，不仅要关注模具的测量温度，还要关注整个加工过程中的温度。在这方面，Ludovic 软件可帮助分析 PBT 工艺条件的无形影响，以保证材料性能。



PP 和 PBT 温度变化对比



From an application performed in collaboration with Proplast - Italia

行业应用—食品挤出工艺

农产食品挤出：挤压过程中淀粉产品降解的预测

生物高分子聚合物原料的加工在本质上是被加工原料中各种物质的高分子在加工过程中所发生的结构性能上一系列物理化学变化。生物高分子聚合物的挤压加工大致过程是：生物高分子原料按不同的配方要求混合，先经过预处理后，再进入螺杆挤压机中。在螺杆的综合作用下，将物料转化成具有非牛顿流体特性的面团，连续受到剪切和加热，在模头形成较大的压力，同时使生物高分子聚合物原料的淀粉糊化、蛋白质变性、酶失活、细菌等微生物减少。整个挤压过程在 30 — 300 秒内完成，所需的加热温度由不同的产品而定，一般在 50 — 180℃ 范围内。在挤压加工时，模头处物料压力可达 10MPa 以上，所以目前又把挤压蒸煮(extrusion cooking)过程称为高温、高压、短时加工过程。食品挤压技术集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、膨化及成型等过程为一体，具有高效率、低能耗，少排放、低成本，高温短时、营养损失小等特点。

淀粉产品的降解

淀粉制品的挤出工艺是一个复杂的工艺过程，因为它改变了材料的基本结构（晶粒结构的损伤失效、直链淀粉和支链淀粉的降解……）。

挤出过程技术挑战

最终目标，通过 Ludovic 软件预测淀粉转化，基于比机械能 SME（Specific Mechanical Energy）对粘性的影响规律。事实上，这两个数值被认为判断淀粉反应的可靠指标。

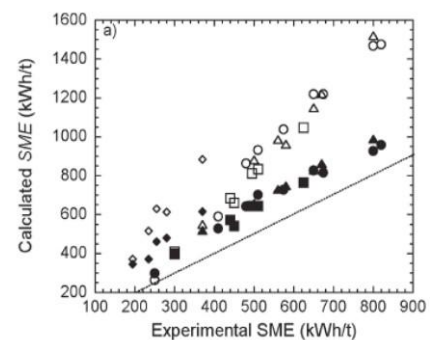
Ludovic 可以做什么

首先，采用耦合和不耦合的两种情况算法，进行了 SME 和特性粘度的计算；然后与实验结果进行了比较。在这些图中清楚地显示出，考虑比机械能对粘性影响的耦合算法的优势非常明显。在各工艺条件下，耦合算法的模拟误差都小于 10%，而不考虑耦合的计算误差可能会超过 30%。

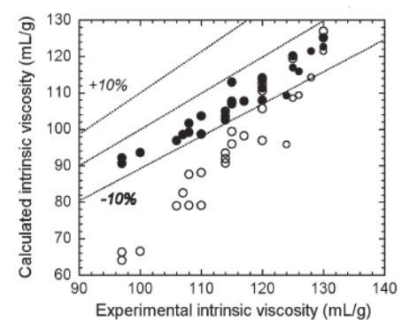
参考文献：

"Importance of coupling between Specific Energy and Viscosity in the Modelling of Twin Screw Extrusion of Starchy Products" by

F. Berzin, A. Tara, L. Tighertz and B. Vergnes



测量与计算结果的比较：比机械能



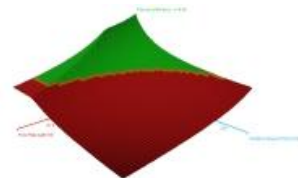
测量与计算结果的比较：粘性

行业应用—纳米粘土复合材料的挤出工艺

纳米粘土材料 PCN

纳米粒子可以提高材料的机械性能、电传导性能、热性能、阻隔性能和燃烧性能等。纳米粘土（Nanoclay）作为一种特殊的纳米材料，目前聚合物/纳米粘土复合材料 PCN（Polymer/Clay Nanocomposite）是纳米粘土较多的应用研究方向。1991 年日本丰田中央研究所和 UBE 公司共同开发的用作汽车定时器罩的 PA6/蒙脱土纳米复合材料，是世界上较早的 PCN 工业化应用，并从此拉开了 PCN 快速发展的序幕。鉴于纳米粘土的阻隔性能和燃烧性能，在欧洲有一些建筑物使用掺混有纳米粘土的难燃聚合物；日本的汽车制造商则运用填充纳米粘土的聚合物用于引擎零件生产。

但是，在纳米粘土的制备、加工和应用中都存在一个比较棘手的问题，即 [纳米微粒的团聚问题](#)。纳米微粒由于具有很高的表面活性而容易团聚，分散性差，这是纳米材料在实际应用中存在的一个普遍问题。从纳米粒子掺杂手段看，运用广泛的是机械共混法，尽管这种方法很容易使粒子与聚合物基材相容，然而操作并不简便，很多研究表明共混过程中加料量，加料顺序，螺杆转速，挤出压力都将影响纳米粒子与材料的混合程度。

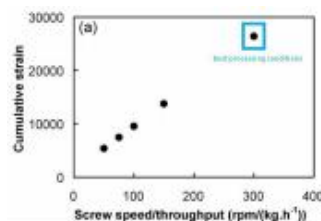


纳米粘土性能增强

采用机械共混法，应用双螺杆挤出工艺制备的热塑性树脂/纳米粘土复合材料，可以增强材料机械性能。纳米粘土复合材料在汽车和航空工业中特别适用于增强材料，同时使材料更轻。通过几十年的科学研究表明，这些纳米粘土填料在热塑性基质中的 [分散程度](#) 决定了材料的最终性能，决定了最终用户材料的机械性能增强。

挤出过程技术挑战

纳米粘土填料在热塑性基质中的分散程度决定了材料的最终性能，如何应用 Ludovic 软件确定优化工艺参数（螺杆组合设计、加料量，加料顺序，螺杆转速，挤出压力），最终目标使纳米粘土更好地分散在复合材料中。这是制造具有优异机械性能纳米复合材料的途径。



累积应变随螺杆转速/喂料速率的变化

Ludovic 可以做什么

采用 Ludovic 软件，可以非常方便地计算出 [累积应变与最终材料机械性能](#) 之间的相关性。另外，也可以给出了产品性能与工艺参数（螺杆转速）的相互关系。如果应用 Ludovic 软件的实验设计 DOE 功能，可以同时考虑螺杆转速和喂料速度对于累积应变的影响。这样分析可得，在高螺杆转速和低喂料速度情况下可以达到最大累积应变，达到更好的机械力学性能。

参考文献： "Optimization of Extrusion Parameters for Preparing PCL-Layered Silicate Nanocomposites supported by Modelling of Twin-Screw Extrusion", by N. Watzeels, H.E. Miltner, C. Block, G. Van Assche, B. Van Mele, H. Rahier, K. Van Durme, B. Bogdanov

行业应用—玻纤增强复合材料的挤出工艺

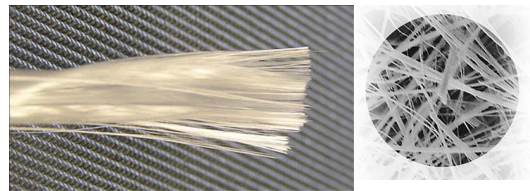
玻纤增强复合材料

玻纤增强复合材料在现代生活中应用日益广泛。玻纤是目前塑料工业中用量大而广的增强剂，几乎所有树脂都可以用玻纤来进行增强改性。玻纤增强树脂基复合材料能大幅度提高材料的强度、模量及耐热性能而使其具有抗损伤能力强、成本低等优点，不过玻纤的加入会使材料的脆性增大、密度发生较大的变化。因此大规模生产中，为避免玻纤增强复合材料性能的波动，其玻纤含量的准确控制非常重要。

双螺杆挤出生产玻纤增强复合材料过程中，玻纤加入方式可分为长玻纤加入和短玻纤加入两种。其中，短玻纤加入方式通常通过侧向喂料装置准确称量来精确控制玻纤含量；但用长玻纤加入方式生产增强复合材料时，玻纤含量的控制主要是依据多次测试结果并调整设备的各项工艺参数来实现。

玻纤力学性能增强

玻纤增强复合材料的制备就是将玻璃纤维添加到聚合物中，以增强最终材料的力学性能。这项技术自 1960 年代起就开始应用，最终增强技术性能与玻纤长度直接关系。事实上，玻璃纤维越长，复合材料的强度越高。在双螺杆挤出加工过程中，工艺关键点是控制留存在挤出材料中的纤维长度。

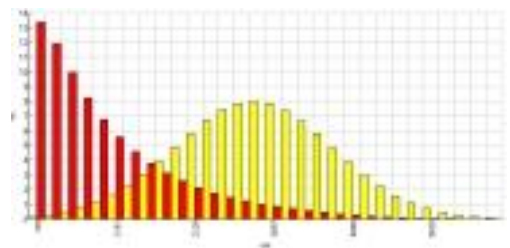


挤出过程技术挑战

Ludovic 软件集成了双螺杆挤出机中的玻纤断裂模型，用于玻纤长度预测；通过监测分析挤出机中的玻纤断裂情况，进行玻纤长度预测。

Ludovic 可以做什么

Ludovic 软件集成了特有的玻纤演化计算模型，它能够评估每个螺杆单元内的纤维长度。计算模型基于初始纤维长度，最终计算出沿螺杆长度方向的玻纤长度分布。



螺杆单元内的纤维长度变化

这个玻纤模型允许控制沿螺杆长度方向的纤维大小，然后调整工艺参数/螺杆设计，以获得具有更佳力学性能的复合材料。如图所示，螺杆长度方向的纤维长度变化曲线图。黄色代表初始的纤维大小分布，红色代表最终的纤维大小分布。

From an internal SCC application, coming from the FONLIMICS FP7 project

行业应用—木质纤维复合材料的挤出工艺

木质纤维复合材料：保持纤维特性的同时优化混合效率

近年来，木质纤维作为一种新的环境友好材料，用来生产木质纤维复合材料 WFC（Wood Fibers Composites）愈加受到关注。木质纤维不仅来源丰富，加工成本低，也是可再生资源，在聚合物复合材料中是优良的增强材料，常用的有木材、麻类植物、椰子壳等，以代替那些昂贵的而又不可再生的合成纤维。塑料工业中，木质纤维/塑料复合材料发展很快，汽车内饰用木纤维/麻纤维/聚丙烯纤维复合材料属于此类复合材料。

在木塑复合材料挤出成型过程中,工艺条件的选择及控制是保证挤出顺利进行和成型产品质量的关键,其中较为重要的影响因素有挤出机温度、机头压力、螺杆转速和定型与冷却等。如何保持 WFC 木塑复合材料的纤维特性同时，*优化混合效率是工艺设计的重要目标*。

木质纤维挤出目标

木质纤维复合材料不仅具有木纤维的高强度和弹性，还具有聚合物基体的高韧性和耐疲劳强度，但是其易燃性大大限制了其应用范围。然而，采用双螺杆挤出工艺来生产木质纤维复合材料具有巨大的挑战，难度在于既要获得纤维良好的分散性能，又要避免由于高温导致木质纤维燃烧。

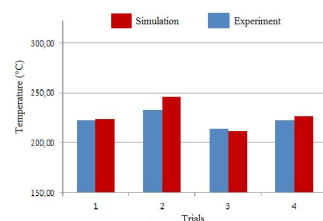
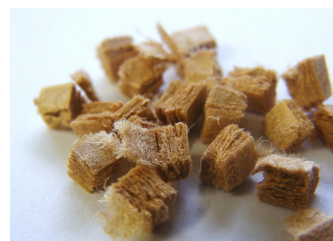
挤出过程技术挑战

首先，采用 Ludovic 软件模拟寻找到极限加工条件：木纤维足够混合（分散良好），材料温度不超过木质纤维的燃耗点。接着应用软件结果对比功能，将模拟计算结果与实验测量数值进行对比，以验证适应的工艺条件，匹配复合挤出工艺要求。然后，推导优化工艺条件。

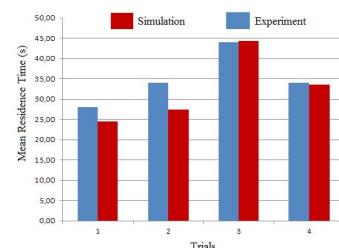
Ludovic 可以做什么

完成上述工作后，针对数值结果与实验数值，进行温度和停留时间对比，进行最终实验验证。如图所示 Ludovic 数值结果与测量数值非常接近。这种虚拟试验软件工具有助于降低测试和试验方法所产生的成本（约 50%）。

From a collaborative work performed with ICMA SG, Woodforce and Scion Research



测量与计算结果比较:温度



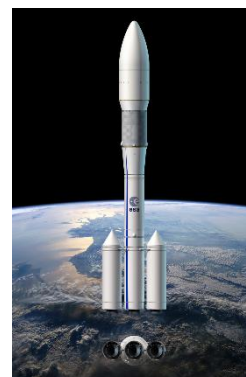
测量与计算结果比较:平均停留

行业应用—含能材料双螺杆挤出工艺技术

含能材料柔性制造技术

20 世纪 70 年代，就已开始双螺杆挤出工艺在火炸药行业的应用研究和工业化生产。首先是德国采用几台双螺杆挤出机联合起来组合式双螺杆挤出机，分别完成了双基药制备过程中的造粒和成型工艺，使双基药的制备实现了连续化；美国于雷德福兵工厂采用双螺杆挤出技术已建成了单、双、三基药生产线。美国聚硫橡胶公司采用双螺杆挤压工艺生产 LOVA 发射药，多种含能材料的生产加工。

双螺杆挤出工艺是火炸药柔性制造技术发展的重点，双螺杆挤出工艺可实现加工制备、**推进剂、炸药和烟火剂**等多种不同产品，并实现连续化、自动化，减少生产环节和运输步骤，缩短了生产周期。现代在线检测和自动控制技术在双螺杆挤出工艺上的应用，显著提高了双螺杆挤出工艺的效率和安全性。



含能材料挤出目标

1) 绿色的柔性化、连续化制备工艺。双螺杆挤出工艺制备火炸药过程中废液、废气排放量减少，降低了环境污染。这种工艺适用于表观黏度 $102 \sim 107 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的物料均匀混合，可生产发射药、推进剂、和烟火剂等多种含能材料的柔性生产。

2) 效率高、成本低。一是指双螺杆挤出工艺的混合效率高；二是指双螺杆挤出工艺的生产效率高。双螺杆机具有高剪切作用，可以打破超细材料的团聚势能并达到均匀分散的效果。双螺杆挤出机集捏合、塑化、干燥、成形等功能于一体，与传统火炸药制备适合使用的单机设备相比，效率可提高数十倍。

3) 工艺安全性高。物料在线量少，制备过程可以实现自动化、连续化，提高了火炸药生产安全性。

挤出过程技术挑战

绿色柔性安全制造技术是火炸药制造技术发展的重点，鉴于具有爆炸危险的高含能火药来说，火药制备生产过程中的温度控制对于发射药双螺杆挤出工艺的安全生产十分关键。但是火炸药制造工艺涉及双螺杆挤出机结构设计、安全设计、制备工艺等方面的技术难度，制约了双螺杆挤出工艺在火炸药自动化制备中的应用。

Ludovic 可以做什么

虽然使用低剪切的双头螺纹与双头啮合块的同向啮合双螺杆挤出机可以提供加工工艺的安全性，但是影响物料温度工艺参数很多，包含筒温、螺杆转速、螺杆构型等多个参数。如何根据物料的温度性能和制品均匀性要求，结合螺杆元件的输送性能和混合性能更好地进行螺杆组合设计以及整根螺杆构型设计，选择各螺杆功能段的螺杆组合，是一项任务量巨大的工作。采用 Ludovic 软件可以轻松化解这些问题。



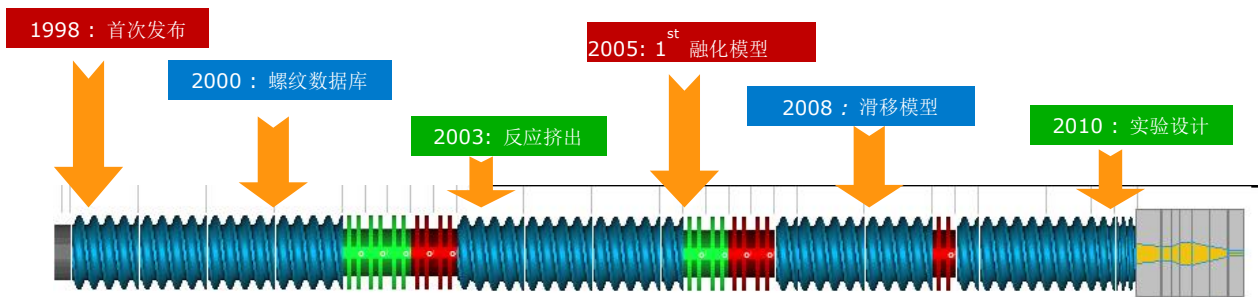
软件应用客户和公司背景

软件公司背景

法国科学计算咨询 SCC 公司成立于 1989 年，专注于材料成形和材料转化行业的科学研究和咨询服务。公司聚焦聚合物加工成型技术，技术涵盖反应加工、混合与共混、脱挥、型材挤出技术，为聚合物混合挤出工艺、塑料改性、火箭推进剂配方、火炸药安全生产提供咨询服务和软件解决方案。



1998 年，法国科学计算咨询 SCC 公司发布了双螺杆挤出工艺模拟软件的商业化 1.0 版本。后续推出三维混合和挤出仿真软件 XimeX (for Mixing and extrusion simulation software)、单螺杆注塑挤出过程工艺模拟软件 Monomax (for Single Screw for injection/extrusion)、连续混捏挤出软件 LucoMax (for co-kneader extrusion)。三维混合和挤出仿真软件 XimeX 是一个功能强大 CFD 计算流体动力学 (Computational Fluids Dynamics) 三维仿真软件，致力于复杂的工业过程混合和挤出工艺优化。单螺杆注塑挤出过程工艺模拟软件 Monomax，用于单螺杆注塑挤出过程的温度/熔体输送控制、混合均匀性改善的常用分析目的 2D 模型快速分析工具。连续混捏挤出软件 LucoMax，基于复杂运动学模型和特定螺杆单元模型、用于混合配方的温度/剪切/压力分析的常用分析目的分析工具。



软件应用客户

Ludovic 软件的应用客户包括法国阿科玛化学品公司 Arkema、德国勃林格殷格翰生物制药医药公司 Boehringer Ingelheim、法国道达尔石油及天然气公司 Total、美国普力万化工公司 POLYONE、瑞士雀巢食品制造商 Nestle、美国艾伯维生物制药公司 Abbvie、法国米其林集团轮胎生产商 Michelin、韩国三星集团 Samsung、德国默克医药化工企业 Merck、法国克莱斯特罗工业双螺杆挤出系统提供商 Clextrel、法国耐克森电缆生产厂商 Nexans、日本三菱化学公司 Mitsubishi Chemical、韩国能源化工公司 SK Innovation、法国利马格兰食品加工业 Limagrain、奥地利泰森同向双螺杆挤出机制造商 Theysohn、法国赛峰 Safran。



联系服务电话

北京创联智软科技有限公司 电话: 010-84470288 邮箱: info@iuitgroup.com

地址: 北京市朝阳区东三环北路辛 2 号迪阳大厦 902B 室 邮编: 100027

