

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.04.012

注塑过程中注射保压阶段最小运行时间控制方法^{*}

王立敏¹, 朱城杰¹, 于晶贤¹, 高福荣²

(1. 辽宁石油化工大学理学院, 辽宁抚顺 113001; 2. 香港科技大学化学与生物分子工程系, 中国香港)

摘要: 针对注塑成型过程中的主要阶段注射段与保压段, 提出了最小运行时间控制方法, 在保证控制系统性能基础上使运行时间最小。考虑注射段与保压段系统模型维数不同, 将注射段与保压段看做一个不同维切换系统并将其转化为等价二维系统。利用平均驻留时间方法, 在二维系统理论框架内, 研究系统指数稳定与最小运行时间问题。仿真结果证明所提出方法的有效性与实用价值。

关键词: 注塑成型; 不同维切换系统; 迭代学习控制; 平均驻留时间方法

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)04-0053-04

Minimum Running Time Control Method for Filling and Packing Stages of Injecting Modeling

Wang Limin¹, Zhu Chengjie¹, Yu Jingxian¹, Gao Furong²

(1. College of Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China; 2. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: Aimed at the filling and packing-holding phase of injecting modeling, a novel minimum running time method was proposed, meanwhile, the control performance was guaranteed. The filling and packing-holding phase were treated as a different dimensional switched system considering that the model of the two phases are different dimensional and were transformed into an equivalent two-dimensional (2D) system. Under 2D system framework, the exponential stability and minimum running time problems were studied by using an average dwell time method. Simulation demonstrated the effectiveness and merits of the proposed method.

Keywords: injection molding; different dimensional switched system; iterative learning control; average dwell time method

注塑过程在每个批次内, 一般需要经历合模、注射、保压、冷却及开模等五个阶段。其中注塑、保压两个相邻阶段对最终产品品质影响最大, 且需要实现的控制策略及目标均不相同。在注射阶段, 所需要控制的关键变量是注射速度; 在保压阶段, 其目标是控制保压压力。因而, 称这两个阶段的切换为速度/压力切换。由于需要实现不同的控制策略及目标, 这两个阶段将相互影响且两阶段模型维数不同。以往研究成果, 仅考虑单一阶段的高精度控制^[1-7]。单阶段的最优控制并不能保证全局最优和生产的整体高效运行。此外, 在实际工业过程中, 各阶段的运行时间多由实际经验或估计得到, 这也在一定程度上延长了注塑过程实际运行所需要的时间, 给注塑成型的高效运行带来了本质困难。为得到注射保压段最小运行时间寻求新的控制方法极其迫切。

在2008年, Wang Youqing等^[8]针对注塑过程相邻阶段就其切换条件与切换时间的控制问题做了初步研究, 但此文研究的注塑过程阶段运行时间, 只求得了注射阶段时间。为了解决上述问题, 笔者提

出了与系统状态相关的切换条件结合平均驻留时间方法, 利用注塑过程本身具有的特性如重复性、二维特性等本质特性, 设计混杂迭代学习控制律, 确保系统运行时间最小, 同时保证系统最优控制性能。

1 等价模型再描述

如文献[8]中描述, 在注塑过程中, 注射与保压两个阶段表示成切换系统模型, 利用迭代学习控制方法, 得到等价二维误差系统模型如下:

$$\bar{x}(t+1, k) = \bar{A}_1^{\sigma(t, k)} \bar{x}(t, k) + \bar{A}_2^{\sigma(t, k)} \bar{x}(t+1, k-1) + \bar{B}^{\sigma(t, k)} r(t, k) \quad (1)$$

其中, k, t 分别表示批次及在批次内运行时刻; $\bar{x}(t, k), r(t, k)$ 分别代表系统状态、迭代更新律; $\sigma(t, k) \in \{1, 2\}$ 代表间歇过程的切换信号, 表示间歇过程在批次 k 的时刻 t 发生切换, 具体的取值表示所

^{*} 国家自然科学基金项目(61227005), 中国博士后面上基金项目(2014M560972), 辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2014039), 广东省科技计划项目(2013B011301012)

联系人: 王立敏, 教授, 主要从事间歇过程的先进控制、故障诊断与容错控制研究

收稿日期: 2016-02-03

处阶段,表示的含义均如文献[8]所示。

迭代学习更新律设计为:

$$r(t, k) = k_1^i \bar{x}(t, k) + k_2^i \bar{x}(t+1, k-1) \quad (2)$$

其中 $i \in \{1, 2\}$ 。

笔者主要考虑的问题是设计迭代学习更新律,使得上述两个阶段系统运行时间最小。笔者要考虑的问题均基于此模型。下面给出 2D 条件下两个新的定义。

定义(1): 对任意 $\bar{t} + k = D \geq z = \bar{T}_i^z + k_i^z$ ($\bar{t}$ 代表总的运行时间), 令 $N_\sigma(z, D)$ 表示 $\sigma(\cdot, \cdot)$ 在间隔 (z, D) 的切换次数, 若对于任意给定的 $\tau_a > 0$, $N_\sigma(z, D) \leq \frac{D-z}{\tau_a}$ 成立, τ_a 称为平均驻留时间。

定义(2): 在任意给定初始条件下 $\{x_{t,0} = \mu_{tk}, x_{0,k} = v_{tk}\}$, 定义 $\chi_l = \sup\{\|x_{t,k}\|: \bar{t} + k = z, \bar{t}, k \geq 1\}$, 对于给定 $z \geq 0$ 和 $D \geq z$, 一定存在正数 c 和 ζ 使得 $\lim_{l \rightarrow \infty} \chi_l \leq \xi \chi_z e^{-c(D-z)}$ 成立, 则闭环系统(1)在满足切换信号条件下, 指数稳定。其中 $\|\cdot\|$ 代表欧式范数。

2 主要结果

2.1 混杂迭代学习控制器设计

定理 1. 给定 $0 < \eta < 1$, 正定对称矩阵 $Q^k = \text{diag}\{Q_h^k, Q_v^k\}$ 和 R^k , 若存在正定对称矩阵 P^k, P_h^k, P_v^k , 控制器增益 $K^k = [K_1^k \ K_2^k]$, $k = \{1, 2\}$ 及数 $\mu \geq 1$, 使得下式成立,

$$\begin{bmatrix} (\bar{A}_{1m}^k)^T \\ (\bar{A}_{2m}^k)^T \end{bmatrix} P^k [\bar{A}_{1m}^k \ \bar{A}_{2m}^k] - \eta \text{diag}\{P_h^k, P_v^k\} \quad (3)$$

$$Q^k + (k^k)^T R^k K^k = 0$$

$$V^i(t, k) \leq \mu V^j(t, k), \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

则对于满足式(1)的切换信号下, 闭环系统稳定。

$$\tau_a \geq \tau_a^* = -\frac{\ln \mu}{\ln \eta} \quad (5)$$

证明. 假设第 k th 子系统被激活, 对于 k th 子系统, 选择如下的 Lyapunov 泛函:

$$V^k(t, k) = (x_{t,k})^T P^k x_{t,k} + (x_{t,k}^h)^T P_h^k x_{t,k}^h + (x_{t,k}^v)^T P_v^k x_{t,k}^v \quad (6)$$

其中 $x_{t,k} = \bar{x}(t, k)$, P^k, P_h^k, P_v^k 为待求的正定矩阵。

定义:

$$\Delta V^k = (x_{t+1,k}^h)^T P_h^k x_{t+1,k}^h + (x_{t+1,k}^v)^T P_v^k x_{t+1,k}^v - \eta (x_{t,k}^h)^T P_h^k x_{t,k}^h - \eta (x_{t,k}^v)^T P_v^k x_{t,k}^v \quad (7)$$

代入(3), 得:

$$\begin{aligned} \Delta V^k &= \begin{bmatrix} x_{t,k} \\ x_{t+1,k-1} \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} (\bar{A}_{1m}^k)^T \\ (\bar{A}_{2m}^k)^T \end{bmatrix} P^k [\bar{A}_{1m}^k \ \bar{A}_{2m}^k] - \eta \text{diag}\{P_h^k, P_v^k\} \right\} \begin{bmatrix} x_{t,k} \\ x_{t+1,k-1} \end{bmatrix} \\ &= - \begin{bmatrix} x_{t,k} \\ x_{t+1,k-1} \end{bmatrix}^T [Q^k + (K^k)^T R^k K^k] \begin{bmatrix} x_{t,k} \\ x_{t+1,k-1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中 $Q^k = \text{diag}\{Q_h^k, Q_v^k\}$, $K^k = [K_1^k \ K_2^k]$ 。由定理 1 得, $\Delta V^k \leq 0$ 成立, 对任意 $x_{t,k} \neq 0$, 下面不等式成立:

$$V_h^k(t+1, k) + V_v^k(t+1, k) < \eta V_h^k(t, k) + \eta V_v^k(t+1, k-1) \quad (8)$$

对于任意的非负整数 D 及 $D > \max(z_1, z_2)$, 利用上式可得:

$$\sum_{t+k=D+1} V^k(t, k) < \eta \sum_{t+k=D} V^k(t, k) \quad (9)$$

假设初始批次及结束批次分别为 k_{k-v+1}, k_k , 定义 $m_p^1 = T_p^1 + k_p$, $m_{p-1}^1 = T_{p-1}^1 + k_{p-1}$, $p = k-v+1, \dots, k-1, k$, 对于 $D \in \{m_k^1, m_{k+1}^1\}$, 有:

$$\sum_{t+k=D} V^{\sigma(T_k^1, k_k)}(t, k) < \eta^{D-m_k^1} \sum_{t+k=m_k^1} V^{\sigma(T_k^1, k_k)}(t, k) \quad (10)$$

在切换时刻 $m_k^1 = T_k^1 + k_k$, 有:

$$\sum_{t+k=m_k^1} V^{\sigma(T_k^1, k_k)}(t, k) \leq \mu \sum_{t+k=(m_k^1)^-} V^{\sigma(T_{k-1}^1, k_{k-1})}(t, k) \quad (11)$$

从定义 2 可知:

$$\sum_{t+k=D} V^{\sigma(T_k^1, k_k)}(t, k) \leq e^{\frac{\ln \mu}{\tau_a} + \ln \eta (D-z)} \sum_{t+k=z} V^{\sigma(T_{k-v+1}^1, k_{k-v+1})}(t, k) \quad (12)$$

考虑 $V^{\sigma(t, k)}$ 定义, 下式成立:

$$a \|x_{t,k}\|_D \leq V^{\sigma(t, k)}(t, k) \leq b \|x_{t,k}\|_Z \quad (13)$$

因此

$$\|x_{t,k}\|_D \leq \sqrt{\frac{b}{a}} e^{\frac{\ln \mu}{\tau_a} + \ln \eta (D-z)} \|x_{t,k}\|_Z \quad (14)$$

定理 2. 给定 $0 < \eta < 1$, $t_1 + t_2 = 1$, $t_1 > 0$, $t_2 > 0$, 正定对称矩阵 $\bar{Q}^k = \text{diag}\{\bar{Q}_h^k, \bar{Q}_v^k\}$ 和 R^k , 若存在正定对称矩阵 X^k , 矩阵 Y_1^k, Y_2^k , $k = \{1, 2\}$ 及数 $\mu \geq 1$ 使得下式成立:

$$\begin{bmatrix} -\eta t_1 X^k + \bar{Q}_h^k & 0 & X^k \bar{A}_1^{kT} + Y_1^{kT} \bar{B}_1^{kT} & Y_1^{kT} \bar{B}_1^{kT} \\ 0 & -\eta t_2 X^k + \bar{Q}_v^k & X^k \bar{A}_2^{kT} + Y_2^{kT} \bar{B}_2^{kT} & Y_2^{kT} \bar{B}_2^{kT} \\ \bar{A}_1^k X^k + \bar{B}_1^k Y_1^k & \bar{A}_2^k X^k + \bar{B}_2^k Y_2^k & -X^k & 0 \\ \bar{B}_1^k Y_1^k & \bar{B}_2^k Y_2^k & 0 & -R^{-k} \end{bmatrix} < 0$$

$$V^i(t, k) \leq \mu V^j(t, k), \quad i = \{1, 2\} \quad (15)$$

则对于满足式(15)的切换信号下, 闭环系统经由控制器律(17)镇定。

$$\tau_a \geq \tau_a^* = -\frac{\ln \mu}{\ln \eta} \quad (16)$$

$$r^k(t, k) = Y_1^k (X^k)^{-1} x_{t,k}^k + Y_2^k (X^k)^{-1} x_{t+1,k-1}^k \quad (17)$$

其中: $(X^i)^{-1} = P^i$, $P_h^i = t_1 P^i$, $P_v^i = t_2 P^i$ 。

定理 2 的获得需将定理 1 转化不等式, 然后利用矩阵转换便可得到, 在此省略。

2.2 最小运行时间计算

求解定理 2, 得到控制律增益为:

$$K_1^1 = [-0.0937 \ -0.9855 \ -0.0031 \ -0.0000]$$

$$K_2^1 = [-0.0001 \ -0.0001 \ -0.0000 \ 0.0580]$$

$$K_1^2 = [-0.0052 \ -0.0035 \ 0], \quad K_2^2 = [0 \ 0 \ 0.0027]$$

得两阶段最小运行时间均值为 $\tau_a^* = 85$, 则两阶

段总的运行时间便是 170 步 (1 步为 0.05 s)。利用文献 [8] 条件 $x_3^1(t, k) > 350$, 求出第一阶段运行时间 T_k^1 , 则第二阶段运行时间便可获得。

3 控制效果分析

由于运行环境复杂多变, 在实际注塑过程中, 扰动是不可避免的, 在本部分将考虑重复扰动与非重复扰动两种情况, 对笔者所提出方法的控制效果进行验证。为评价控制效果, 引入如下评价指标:

$$DT(k) = \left| \sum_{i=1}^n e(t, k) \right| \quad (18)$$

3.1 重复扰动

在注射段扰动设为 $w = \cos(t) \times [0.1 \ 0.2 \ 0.3]^T$, 在保压段, 扰动设计为 $w = \cos(t) \times [0.1 \ 0.2]^T$ 。图 1 ~ 图 3 显示了控制效果。图 1 为所有批次评价指标与切换时间。图 2 为部分批次的输出曲线, 图 3 为所有批次的输出结果。经过几个批次的不稳定运行, 系统可以跟踪到设定值。

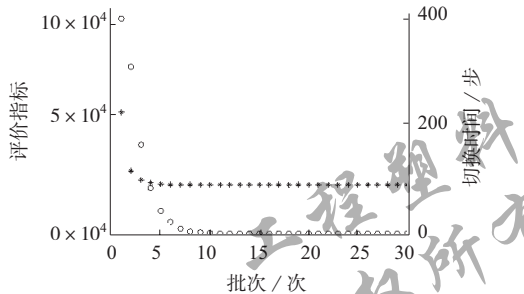


图 1 各批次评价指标与切换时间

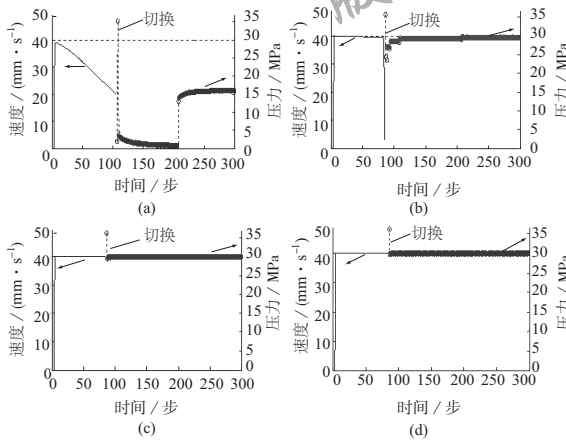


图 2 部分批次输出曲线

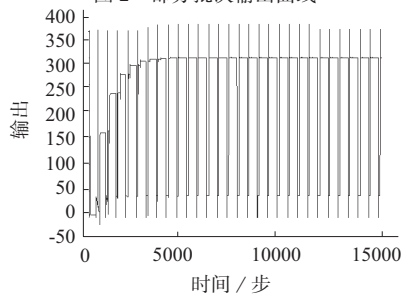


图 3 所有批次输出曲线

从图 1 可以看出, 控制效果可很快收敛到设定值, 且运行时间较根据经验得到的时间^[6]大幅减小, 验证了所提出方法的实用价值。

3.2 非重复扰动

在这一部分, 研究非重复扰动下系统控制性能。在注射段, 扰动设计为 $w(t, k) = 0.5 \times [\Delta_1 \ \Delta_2 \ \Delta_3]^T$; 在保压段, 扰动设计为 $w(t, k) = 0.5 \times [\Delta_1 \ \Delta_2]^T$, 其中 $\Delta_i (i=1, 2, 3)$ 均为 $[0, 1]$ 内的随机数。图 4 为所有批次残差与切换时间, 由于非重复扰动的影响, 残差有所提高, 这是可以接受的。而从控制效果看, 系统可以达到满意的控制效果。由于扰动为非重复, 因而切换时间会有小幅变化, 这是可以理解的。图 5 为部分批次的输出曲线, 图 6 为所有批次的输出结果。

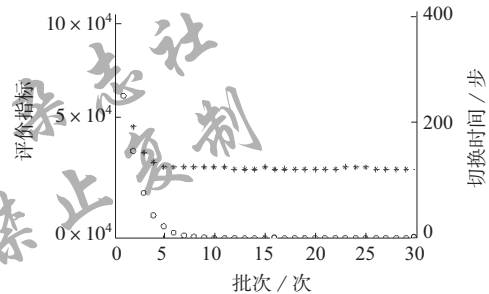


图 4 各批次评价指标与切换时间

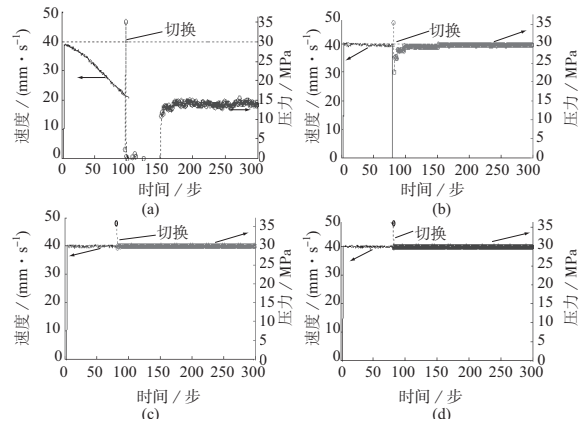


图 5 部分批次输出曲线

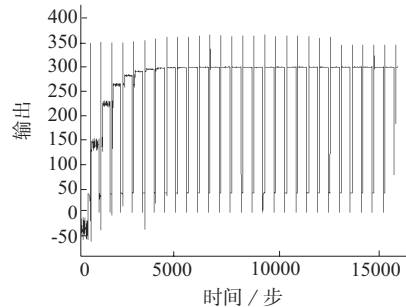


图 6 所有批次输出曲线

4 结论

阶段运行直接影响批次时间, 进而影响注塑成

型工业的生产效率,笔者利用平均驻留时间方法,研究注射段与保压段这两个不同维系统的最小运行时间控制问题。在保证控制效果的前提下,相比于通过经验或给定方法,大幅减小了运行时间。为实际注塑成型过程提供了一种行之有效的办法,具有很好的使用价值。

参考文献

- [1] Mo Shengyong, Wang Limin, Yao Yuan, et al. Two-time dimensional dynamic matrix control for batch processes with convergence analysis against the 2D interval uncertainty[J]. Journal of Process Control, 2012, 22: 899-914.
- [2] Wang Limin, Mo Shengyong, Zhou Donghua, et al. Delay-range-dependent guaranteed cost control for batch processes with state delay[J]. AIChE Journal, 2013, 59(6): 2033-2045.
- [3] Wang Limin, Mo Shengyong, Zhou Donghua, et al. H_{∞} design of 2D controller for batch processes with uncertainties and interval time-varying delays[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21: 1321-1333.
- [4] Wang Limin, Mo Shengyong, Zhou Donghua, et al. Delay-range-dependent robust 2D iterative learning control for batch processes with state delay and uncertainties[J]. Journal of Process Control, 2013, 23: 715-730.
- [5] Liu Tao, Gao Furong. Robust two-dimensional iterative learning control for batch processes with state delay and time-varying uncertainties[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65: 6134-6144.
- [6] Wang Limin, Mo Shengyong, Zhou Donghua, et al. Robust delay dependent iterative learning fault-tolerant control for batch processes with state delay and actuator failures[J]. Journal of Process Control, 2012, 22: 1273-1286.
- [7] Wang Limin, Mo Shengyong, Zhou Donghua, et al. Delay-range-dependent method for iterative learning fault-tolerant guaranteed cost control for batch processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52: 2661-2671.
- [8] Wang Youqing, Zhou Donghua, Gao Furong. Iterative learning model predictive control for multi-phase batch processes[J]. Journal of Process Control, 2008, 18: 543-557.

巴斯夫率先在中国采用更安全阻燃剂

作为全球可发泡聚苯乙烯保温隔热材料的领先供应商,巴斯夫成为首个在中国采用更安全阻燃剂的材料供应商。

以创新高分子阻燃剂 PolyFR 代替之前的六溴环十二烷阻燃剂可提高 Neopor 保温隔热解决方案的环保性能,因此将有助于巴斯夫继续帮助客户满足日益严格的节能、消防法规和可持续建筑设计要求。PolyFR 高效阻燃剂目前已被巴斯夫在全球范围内用于其全部聚苯乙烯保温隔热材料系列产品中,包括欧洲、北美和中国客户使用的 Neopor 产品系列。继在欧洲和韩国率先成功切换为 PolyFR 之后,巴斯夫在中国也成为首家采用 PolyFR 的保温隔热材料供应商。

巴斯夫发明的 Neopor 在建筑行业已有近二十年的应用历史。这种灰色塑料颗粒材料是 Styropor(白色 EPS)的升级型号,它含有特制石墨颗粒,可像镜面一样反射热辐射,从而减少室内热量损失。巴斯夫的客户可将这种颗粒材料发泡后加工成保温板或各种模制品,用于立面、屋顶、地坪的保温隔热。Neopor 隔热材料符合被动房建筑标准,与传统白色 EPS 相比可减少材料用量达 20%。欧盟已从 2015 年起禁止使用 HBCD 阻燃剂,巴斯夫在全球范围内已将可发泡聚苯乙烯隔热产品中的阻燃剂全面改用 PolyFR 以代替 HBCD。在巴斯夫的支持下,经过多年测试和开发,结果表明, PolyFR 在保温板加工和使用过程中可提供更出色的环保性能。

巴斯夫全球发泡苯乙烯聚合物业务部门高级副总裁 Giorgio Greening 表示:“目前商用和住宅建筑领域对能源效率的要求提升到了前所未有的高度,可发泡聚苯乙烯保温隔热产品如 Neopor 可以很好地满足这一需求。尤其在改用 PolyFR 后,巴斯夫保温隔热解决方案将能够满足未来各种

可持续建筑项目的要求。随着市场对生活和工作空间节能的要求不断提高,这些优质材料可以帮助开发商在满足市场需求的同时确保产品合规。” (中塑在线)

兰州石化医用聚烯烃安全性达到国家标准

兰州石化公司乙烯厂研发生产的聚烯烃树脂 LD26D, PR260 通过国家食品药品管理总局专家组评审。专家组一致肯定这两种产品安全性评价方案的科学性,鉴定结果完全满足医用料相关标准要求。这意味着这种医用料正式投入生产后,不仅将成为兰州石化新的利润增长点,还将使我国医药包装摆脱对进口原料的依赖,推动国产医用聚烯烃产业链健康发展。国内医用聚烯烃树脂每年需求量达 10 万 t 以上,绝大部分依赖进口。乙烯厂以药包材料国产化为出发点,联合兰州化工研究中心和西南化工销售公司共同开展医用聚烯烃树脂项目研发。兰州石化聚丙烯装置 2013 年 2 月开始对牌号为 RP260 的医用聚丙烯专用料进行研发。截至 2015 年 12 月,共生产该牌号产品 21 批次 6079.75 t。聚丙烯装置有针对性地进行水力输送系统、气力输送系统和无菌包装设备系统改造,新增全自动包装检测流水线,配置辅助功能房间与微生物检测室,满足医用料成品包装标准。高压聚乙烯装置较早对医用料进行自主研发,2011 年 8 月至今,共进行 4 次工业性试验,逐渐摸索出一套科学健全的指标参数和操作方法。2013 年,这个装置首次将牌号 LD26D 作为医用料进行生产,累计生产 1010 t,产品测定结果与巴塞尔产品相当,满足医用料各项指标要求。2015 年,医用聚烯烃树脂 LD26D, PR260 相继通过中国食品药品检定研究院的医用聚烯烃毒理学安全性评估研究实验,为两种产品在医用聚烯烃市场上的推广再添砝码。 (中塑在线)