

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.02.020

基于时差和压差的塑料熔体流变性能测试方法研究*

裴士轻,曹阳根,李晋昇,殷志鹏,马宏学

(上海工程技术大学材料工程学院,上海 201620)

摘要:利用注塑机、模具调温机、阿基米德螺旋槽模具模拟实际注射过程,借助在模具内置两个压力传感器和数据采集系统,获得了塑料熔体填充过程中的时间压力曲线,从中提取了熔体流经两个传感器的时间差(Δt)及两个传感器压力峰值之差(ΔP)。基于 Δt 与 ΔP 计算了高密度聚乙烯熔体的表观剪切速率、表观黏度,在此基础上计算了非牛顿指数(n);基于 ΔP 与 n 计算了充填长度,并与充填长度实验值作对比。结果表明,表观剪切速率随着注塑压力的增加基本呈线性增加;表观黏度与表观剪切速率呈指数关系,基于获得的表观黏度与表观剪切速率计算的 n 与标准值相差不大,表明获得的表观黏度与表观剪切速率值较为可靠;基于压力差与 n 计算得到的充填长度在其小于1 170 mm时与实际实验值匹配良好,表明获得的 n 在充填长度小于1 170 mm时较为可靠。

关键词:注射成型;流变性能;时间差;压力差;测试方法

中图分类号: TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)02-0084-05

Rheological Properties Test Method of Plastics Melt Based on Time and Pressure Difference

Pei Shiqing, Cao Yanggen, Li Jinsheng, Yin Zhipeng, Ma Hongxue

(College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract : The practical injection process was simulated based on the injection machine, mold temperature controller and Archimedes spiral mold, the time-pressure curve in the process of melt filling was obtained by data acquisition system and two pressure sensors installed in the spiral mold, then the time difference (Δt) of melt flow through the two sensors and the peak pressure difference (ΔP) of the two sensors were extracted from the curve. The apparent shear rate and apparent viscosity of high density polyethylene were calculated by means of Δt and ΔP , and the non-newtonian index (n) was calculated based on the calculated apparent shear rate and apparent viscosity. Filling length based on ΔP and n were also calculated, and compared with experimental data. The results show that apparent shear rate increases linearly with the increase of injection pressure. The apparent viscosity and shear rate turned out to be exponential relationship. The n values based on the apparent shear rate and apparent viscosity are similar with the standard values, which indicates that the calculated apparent shear rate and apparent viscosity are reliable. Based on differential pressure and flow index, the calculated filling length is matched well with the experimental results when the filling length was less than 1 170 mm, which indicates that the calculated n values are reliable.

Keywords : injection molding ; rheological property ; time difference ; pressure difference ; test method

注射成型是应用最普遍的塑料加工方法,该方法可以高效地生产出各种具有严格公差、表面质量、复杂尺寸的零部件,因而广泛应用于汽车、机械、电子等行业^[1-4]。诸多研究都表明,在注射成型中塑料熔体的流变性能是影响塑料制品性能的关键因素^[5-7]。研究熔体流变性能一般有实验测定与注射成型CAE技术两种方法,这些方法都有各自的优点与局限性。实验测定的条件与实际注射过程有很大区别,因此这些方法只能间接衡量某种塑料的成型性能;注射成型CAE技术的应用在提高成品率、降低注射成本等方面有显著的效益,但在当前日益多元化的复合塑料制品与纤维增强制品生产过程中,

CAE模拟缺乏有用的参考数据^[8]。因此,开发一种基于实际注射生产的评价塑料流变性能的方法显得尤为必要。

瞿金平等^[9]分析了振动力场对聚合物熔体充模流动性的影响。廖秋慧等^[10]分析了阿基米德螺旋槽法测定热塑性塑料流动性能和模腔压力的原理。王道宏等^[11]在阿基米德螺旋槽与方形螺旋槽流动性测试模具中的流动性能,计算了两种塑料的流动比。而基于压力差和时间差研究塑料熔体的流

* 上海工程技术大学研究生创新项目 (2012yjs15)

联系人:裴士轻,硕士,主要研究方向为注射成型

收稿日期:2013-12-08

变性能鲜有报道。

笔者基于注塑机和内置压力传感器的阿基米德螺旋槽模具,利用模内传感器采集的压力差和时间差研究注射成型过程中塑料熔体的流变性能。该方法在真实的注射成型条件下探讨塑料熔体流变性能,更接近于实际生产过程,可以直接指导生产,并为性能未知的塑料合金或纤维增强塑料 CAE 模拟提供数据参考,同时为注塑模具模内监控的智能化发展提供参考依据。

1 实验部分

1.1 实验材料及设备

笔者所用的原料为 SABIC 公司的高密度聚乙烯 (PE-HD), 牌号为 PCG80063, 其性能参数如表 1 所示。PE-HD 的成型性能适中, 注塑温度的可调区间为 180~230℃, 具有较广的代表性, 因此以 PE-HD 为例, 探讨新方法的可行性。

表 1 PCG80063 PE-HD 性能参数

固态密度 / (g·cm ⁻³)	热导系数 / [W·(m·k) ⁻¹]	熔化潜热 / (J·g ⁻¹)	熔点 / °C
0.963	0.2625	264.8	132

所用的主要设备为震雄公司的 EM-150V 型注塑机, 理论注射量为 332 cm³, 最大注塑压力 138 MPa; 在注塑机上配备如图 1 所示的阿基米德螺旋槽模具, 其型腔截面为矩形, 尺寸为 10 mm×4 mm; 在模具中内置瑞士 Kistler 公司的压力传感器, 如图 2 所示, 两个传感器之间的螺旋槽中线距离为 77.8 cm; 同时配备模具调温机和瑞士 Kistler 公司的 CoMo Injection 数据采集系统。

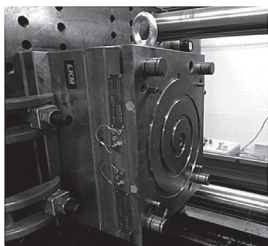


图 1 阿基米德螺旋槽模具

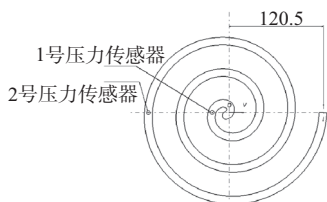


图 2 压力传感器内置位置

1.2 实验方法

借助模具内置压力传感器及数据采集系统分析螺旋槽流动过程中获得的时间压力曲线, 提取注

射循环中的熔体流经两个传感器的时间差 Δt 及两个传感器压力峰值之差 ΔP , 如图 3 所示。建立熔体在螺旋槽中流动模型, 计算表观剪切速率与表观黏度。并将计算值与旋转流变仪测试黏度值作对比。

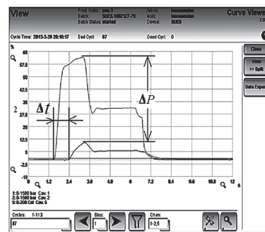


图 3 从时间压力曲线获得的 Δt 与 ΔP

2 结果及讨论

本实验模具表面温度控制在 $40 \pm 1^\circ\text{C}$, 熔体温度为 205, 210, 215℃, 熔体充填速度用注塑压力控制, 注塑压力以最大注塑压力 (138 MPa) 的百分数来表示, 取值范围 60%~74%, 注射时间 2 s。

2.1 表观剪切速率计算

螺旋模具型腔简化为直条状, 二维流场中塑料熔体的流动方向为 x 轴, 在水平面内与 x 轴垂直的为 y 轴, 如图 4 所示。

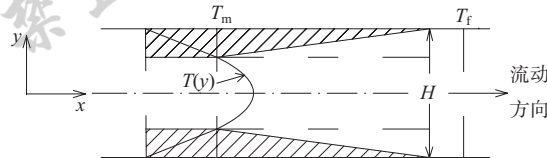


图 4 熔体在模具型腔中的流动模型

根据模型, x 方向的流动速度 $u_x = u(y)$, y 方向速度 $u_y = 0$, 根据如式 (1) 所示的流体方程^[12] 可以得出沿 x 方向熔体流动的动量方程, 如式 (2) 所示。

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dx} = \eta \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (2)$$

式中: t ——时间;

g ——流体受到的重力;

ρ ——流体密度;

p ——流体所受压力;

η ——动力黏度。

设边界条件 $y = \pm b$ (b 为型腔厚度的一半), $u = 0$, 两次积分式 (2), 可得式 (3)。

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} (y^2 - b^2) \quad (3)$$

体积流量 $Q = 2 \int_0^b u w dy$ (其中 w 为模具型腔宽度), 将其代入式 (3) 可得式 (4)。

$$Q = \frac{2}{3} \frac{wb^3}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

剪切速率用式(5)表示。

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy} = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} y \quad (5)$$

边界处剪切速率为表观剪切速率 $\dot{\gamma}_a$, 故由式(5)可得:

$$\dot{\gamma}_a = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} b = \frac{3Q}{2wb^2} \quad (6)$$

图4中阴影部分为熔体凝固层, 厚度为 $h^{[13]}$, 其用式(7)表示。

$$h = \sqrt{\frac{2\lambda_s t}{Q_E \rho_s} (T_m - T_f)} \quad (7)$$

式中: λ_s ——凝固层导热系数;

Q_E ——塑料熔化潜热;

ρ_s ——凝固层密度

T_m ——塑料熔点;

T_f ——模具表面温度。

时间 t 取熔体流至两传感器中间位置对应的时间, 由于第一个传感器的位置非常接近浇口, 可以认为 t 等于熔体流经两个传感器的时间差值的中间值, 即 $t = \Delta t / 2$, 则可用式(8)表示凝固层厚度中间值。

$$\bar{h} = \sqrt{\frac{\lambda_s \Delta t}{Q_E \rho_s} (T_m - T_f)} \quad (8)$$

则 Q 可用式(9)表示。

$$Q = \frac{(H - 2\bar{h})w\Delta l}{\Delta t} \quad (9)$$

式中: H ——型腔厚度;

Δl ——两个压力传感器之间沿型腔中线的距离。

Q 用注塑压力进行控制, 而 Q 与 $\dot{\gamma}_a$ 呈线性关系, 再结合式(6)、式(8)和式(9)可得 $\dot{\gamma}_a$ 与注塑压力的关系, 如图5所示。

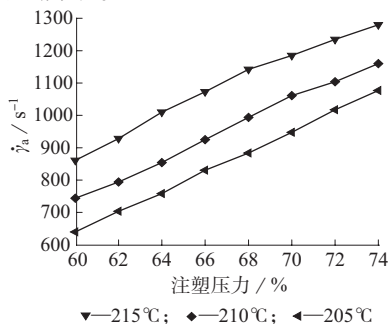


图5 不同熔体温度下 $\dot{\gamma}_a$ 与注塑压力的关系

由于 Q 是流经两个压力传感器之间的熔体流

量的平均值, 图5中的 $\dot{\gamma}_a$ 也是平均值。从图5可知, 在其它参数一定的情况下, $\dot{\gamma}_a$ 随着注塑压力的增加基本呈线性增加, 这是因为注塑压力与 Q 呈正比例关系。同一注塑压力下, $\dot{\gamma}_a$ 随着熔体温度的提高有所增加, 因为温度高的熔体分子链之间的缠绕降低, 分子之间的距离增大, 利于快速流动。

2.2 熔体表观黏度计算

熔体表观黏度 η_a 以式(10)表示。

$$\eta_a = \frac{2wb^3 \Delta p}{3Q\Delta l} \quad (10)$$

根据式(6)和式(10)分别得到相同注射条件下的 $\dot{\gamma}_a$ 与 η_a , 两者关系如图6所示。

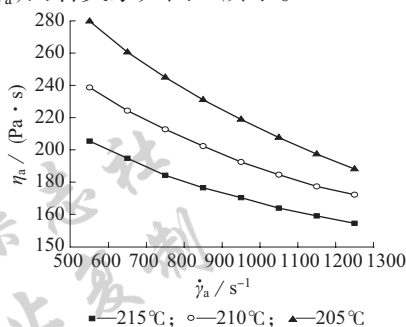


图6 不同熔体温度下 η_a 与 $\dot{\gamma}_a$ 的关系

从图6可知, 3种熔体温度下, 随着 $\dot{\gamma}_a$ 的提高, η_a 均呈下降趋势, 熔体有明显的剪切变稀现象, 符合非牛顿流体的典型特征, 3种温度下熔体的 η_a 与 $\dot{\gamma}_a$ 呈现指数关系。相同的剪切速率下, 温度越高的熔体的 η_a 越低。这是因为温度升高使聚合物内的自由体积增大, 大分子互相缠绕的程度降低, 黏度下降。

2.3 非牛顿指数计算与验证

通用的非牛顿指数 n 的规律表达式^[5]为:

$$\eta_a = m(\dot{\gamma}_a)^{n-1} \quad (11)$$

式中: m ——黏度系数。

对式(11)取对数, 可以得到 $\ln \eta_a$ 与 $\ln \dot{\gamma}_a$ 的关系曲线图, 如图7所示, 由此可求出 n 。

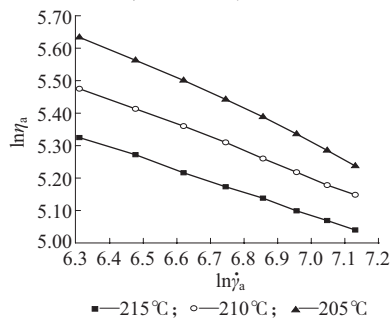


图7 $\ln \eta_a$ 与 $\ln \dot{\gamma}_a$ 关系曲线

从图7可知, 3种温度下的 $\ln \eta_a$ 与 $\ln \dot{\gamma}_a$ 呈线性

关系。温度为 205, 210 和 215℃ 时熔体对应的 n 为 0.51, 0.58 和 0.66, 平均值为 0.58。标准值^[13] 范围为 0.56~0.61 (熔体温度 200~220℃, 剪切速率 100~1 000 s⁻¹)。用线性插值可知这 3 种 n 与标准值相差分别为 10.9%, 0.9% 和 10.5%, 与标准值匹配良好。

另外, 熔体温度升高, n 随之增加, 说明非牛顿特性减弱, 剪切变稀作用减弱; 反之, 熔体温度降低, n 值减小, 反映剪切变稀作用增强。

通过式 (6) 计算得到的 $\dot{\gamma}_a$ 与式 (10) 计算得到的 η_a 而计算出的 n 与标准值匹配良好, 说明笔者基于通过压力传感器获得的 Δt 与 ΔP 而计算得到的 $\dot{\gamma}_a$ 与 η_a 是可靠的。

2.4 充填长度计算与验证

熔体充填长度 L 在注射成型中是衡量聚合物流动能力的重要指标。PE-HD 熔体在阿基米德螺旋模具中的充填长度表达式^[13] 如式 (12) 表示。

$$L_n^{1+1} = K \left(1 - \frac{H}{2w} \right) H_n^{1+3} (\Delta P_{\max})^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

式中: K ——成型系数;

$\Delta P_{\max}$ ——注塑压力与熔体末端压力差, 约等于 1 号传感器压力。

n 为常数的情况下式 (12) 可以简化为:

$$L_n^{1+1} = K' (\Delta P_{\max})^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

式中: K' ——修正系数。

将温度为 205, 210, 215℃ 的 3 种熔体对应的 n 代入式 (13), 与实验熔体螺旋长度比对, 可得 K' 分别为 0.69, 0.72 和 0.74。由此可得 L 实验值与计算值对比如图 8 所示

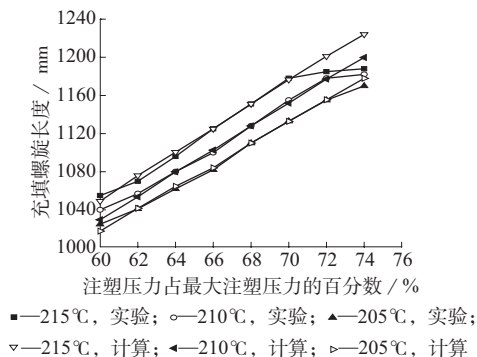


图 8 L 实验值与计算值对比

由图 8 可以看出, 利用 n 计算得到的不同温度下的 L 值与实际实验值在 L 小于 1 170 mm 时匹配良好, 由此证明笔者计算得到的 n 是可靠的。且在该范围内, L 随注塑压力的升高而快速增加, 这

是因为随着熔体剪切速率的提高熔体黏度降低, 抵消了熔体冷却作用, 因此 L 增加较快; 在 L 大于 1 170 mm 以上时, 与计算得到的数据相比, 实际的 L 增加趋势明显变缓, 这是因为熔体在充填后期与模具型腔之间的热传递效果逐渐显现, 导致实验值与计算值出现偏差。另外, 相同注塑压力下, 温度高的熔体有更低的黏度, 因此有更长的 L 。

综上所述, 在 L 小于 1 170 mm 时, 笔者基于通过 $\dot{\gamma}_a$ 与 η_a 而计算得到的 n 是可靠的, 也验证了笔者在阿基米德螺旋槽模具中利用 Δt 与 ΔP 计算聚合物熔体流变参数的方法的可靠性。

3 结论

(1) 基于压力传感器之间的 Δt 与 ΔP 而计算的 3 种熔体温度 (205, 210, 215℃) 下的 PE-HD $\dot{\gamma}_a$ 与注塑压力呈线性关系, 而 η_a 与 $\dot{\gamma}_a$ 呈指数关系。

(2) 基于得到的 η_a 与 $\dot{\gamma}_a$ 而计算得到的 n 与标准值相差不大, 表明计算得到的 η_a 与 $\dot{\gamma}_a$ 是可靠的。

(3) 当充填长度小于 1 170 mm 时, 基于获得的 n 值计算得到的 L 值与实验值匹配良好, 表明计算得到的 n 值是可靠的。

参考文献

- [1] Kurt M, Kamber O S, Kaynak Y, et al. Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products [J]. Materials and Design, 2009, 30(8): 3 217-3 224.
- [2] 黄虹. 塑料成型加工与模具 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 10-45.
Huang Hong. Plastic processing and mold [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 10-45.
- [3] Chen C P, Chuang M T, Hsiao Y H, et al. Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 10 752-10 759.
- [4] Chen W C, Fu G L, Tai P H, et al. Process parameter optimization for MIMO plastic injection molding via soft computing [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 1 114-1 122.
- [5] 周持兴. 聚合物流变实验与应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 1-13.
Zhou Chixing. Polymer rheological experiments and applications [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003: 1-13.
- [6] 单岩, 王刚. MoldFlow 模具分析技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 45-77.
Shan yan, Wang gang. Moldflow mold analysis technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 45-77.

- [7] 宋厚春. 高聚物流变学的原理、发展及应用[J]. 合成技术及应用, 2004, 19(4):28-30.
Song Houchun. The principle, development and application of polymer rheology [J]. Synthetic Technology and Application, 2004, 19(4):28-30.
- [8] Martinez A, Castany J, Mercado D. Characterization of viscous response of a polymer during fabric IMD injection process by means a spiral mold[J]. Measurement, 2011, 44:1 806-1 818.
- [9] 瞿金平, 岑丹涛, 冯彦洪, 等. 脉动注射对螺线槽模腔熔体流动性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2008, 36(4):30-33.
Qu Jinping, Cen Dantao, Feng Yanhong, et al. Influence of pulsating-pressure-induced injection molding on rheologic property of polymer melt in spiral cavity[J]. Application of Engineering Plastics, 2008, 36(4):30-33.
- [10] 廖秋慧, 曹阳根. 塑料流动性能的阿基米德螺线测定法研究[J]. 模具工业, 2004(11):41-44.
Liao Qiuhui, Cao Yanggen. Study of Archimedean spiral method for testing thermoplastics fluidity[J]. Mold industry, 2004(11):41-44.
- [11] 王道宏, 蒋炳炎, 申瑞霞, 等. 注射成型螺旋模具中熔体流动比[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(6):1 251-1 256.
Wang Daohong, Jiang Bingyan, Shen Ruixia, et al. Melt flow ratio in spiral mold of injection molding[J]. J Cent South Univ: Science and Technology, 2008, 39(6):1 251-1 256.
- [12] 吴其晔, 巫静安. 高分子材料流变学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002:159-172.
Wu Qiye, Wu Jing'an. Polymer rheology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002:159-172.
- [13] 王兴天. 注塑成型技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1989:163-235.
Wang Xingtian. Injection molding technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1989:163-235.

青岛炼化携手美利肯开发薄壁注塑专用聚丙烯树脂

近年来,消费者对价格实惠、成分安全、透明度高的包装产品的需求显著上升,中国石化青岛炼化化工有限责任公司(简称“青岛炼化”)推出的使用美利肯化工 Hyperform® HPN20E 成核剂的薄壁注塑专用聚丙烯树脂 PPH-MM45, PPH-MM50, PPH-MM60 系列产品,正是顺应了这种趋势。

聚丙烯树脂是一种极为适宜制造一次性食品包装的塑料,完全可回收,能够减少碳足迹,质量也远较许多其它塑料、玻璃轻。随着消费者对环境保护、食品安全问题的关注度日趋上升,采用聚丙烯作为食品包装材料日益成为业内的普遍做法。

青岛炼化与美利肯化工于 2013 年 3 月份开始合作开发薄壁注塑专用料,通过研究讨论,采用美利肯 Hyperform® HPN20E 高效聚丙烯成核剂,与市场上的同类产品相比,Hyperform® 有别于传统成核剂,使加工过程更快更稳定,各向同性收缩量更大,提高生产率,减少热变形,因而能为加工企业大幅节省能耗和加工成本,从而带来价格优势。此外,Hyperform® 能够均匀分布于包括 PPH-MM45, PPH-MM50, PPH-MM60 在内的具有高熔体流动速率的聚丙烯树脂中,对许多薄壁注塑成型技术应用实例而言,这构成重大优势。

青岛炼化薄壁注塑专用聚丙烯树脂系列产品的熔体流动速率为 45 ~ 60 g/10 min,具有高透明度、快速成型、高刚性及较好耐冲击性等优点,达到甚至超过相似进口牌号的性能。历时半年,经过双方合作开发、测试、调试以及在下游相关行业领军企业试用,最终成功开发出薄壁注塑专用料系列产品,填补国内这一专用料市场的空白,成为国内相关应用领域的领导者。薄壁注塑专用料系列产品符合 SGS/FDA 等国内外相关卫生标准,适用于与食品接触的高速薄壁注塑产品(一次性饭盒,包装盒等)生产,是聚丙烯树脂材料在一次性餐盒用料的应用上的解决方案,从而使其在与传统材料

的竞争中脱颖而出。

目前 PPH-MM45, PPH-MM50, PPH-MM60 系列产品已在行业内多家知名企业试用成功,产品表现出的“高流动、透明、强韧性、低气味”特性,同比优于进口产品,得到了用户的广泛认可。(慧聪网)

美国发布塑料机械安全新标

美国塑料工业协会(SPI)和美国国家标准学会(ANSI)近期对两项塑料机械安全标准进行修正、批准并发布。这两项标准分别是 ANSI/SPI B151.20-2013 塑料片材生产机械安全要求和 ANSI/SPI B151.27-2013 机器人与注模机集成安全要求。

两项新标与上一版相比实质性改变较大,均达到 C 类标准。ISO 标准分 A, B, C 3 个层次。ISO A 类标准(基本标准)规定基本概念、设计原则和可应用于机械的通用特性。ISO B 类标准(通用安全标准)规定了更多可应用于机械的通用特性或安全标准。A, B 两类均属基础标准, C 类则是专业机械安全标准。

B151.20 规定了塑料片材生产机械在设计、保养和使用过程中对操作人员的伤害需降至最小化的要求,一般认为它最大的影响是要求旧板材轧辊束大范围地修复或替换以满足新的辊距要求。虽然 ANSI 并非政府机构,但其标准被 OSHA 检验人员作为指南,违背标准可能招来安全传讯或罚款。如果发生事故,违反安全标准的使用者可能付出更大的代价。

B151.27 规定了机器人与水平和垂直注模机一同使用的遥控设备集成、维护和使用的安全要求,分为 3 方面:通过设计标准消除公认的危险,建立标准的设计方法,确保操作点的安全以保护操作人员。

为了协助两项新标的落实,供应商、再制造商、修正者和使用者均需承担相应责任。(中塑在线)