

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.03.010

液滴撞击有机玻璃固壁的实验和数值研究^{*}

李长宁^{1,2}, 夏振炎^{1,2}, 李建军^{1,2}, 伊吉明³

(1. 天津大学力学系, 天津 300072; 2. 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072; 3. 天津大学内燃机国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 通过实验和数值模拟相结合的方法, 探究了液滴撞击有机玻璃固壁的运动过程以及铺展和振荡规律。数值模拟提出了新的分段式动态接触角 (SDCA) 模型, 模拟结果与实验结果吻合良好。研究结果表明, 有机玻璃壁面受到液滴撞击时最大压力出现在气液固三相交界线上。

关键词: 液滴; 有机玻璃; 接触角模型

中图分类号: O359+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)03-0039-05

Experiments and Numerical Simulations of Droplet Impacting on PMMA Solid Surface

Li Changning^{1,2}, Xia Zhenyan^{1,2}, Li Jianjun^{1,2}, Yi Jiming³

(1. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China; 3. State Key Laboratory of Internal Combustion Engine, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Experiments and numerical simulations of droplet impacting on solid surface were combined to analyze the droplet's variation process and its spreading and oscillation. A new segment-based dynamic contact angle was proposed and applied in simulation, the simulate results were consistent well with experimental results. The results show that maximum pressure on PMMA surface exists in the line of the gas-liquid-solid three phase boundary.

Keywords: droplets; PMMA; contact angle model

有机玻璃学名聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 由甲基丙烯酸甲酯聚合而成。PMMA 具有轻质、高韧的特点^[1], 透光性极好, 在人类生产生活中应用极为广泛, 包括飞机上用作座舱盖、风挡和弦窗、电视和雷达的屏幕、高速列车的车窗、仪器、仪表的防护罩和外壳、眼镜镜片等。在这些应用领域中, PMMA 经常被各类液滴包括雨水、油滴、溶液等撞击, 给人们的生活带来不便甚至经济损失, 因此对液滴撞击 PMMA 研究有着现实意义。

笔者通过实验和数值模拟相结合的方法对液滴撞击 PMMA 固壁的全过程进行了研究, 探究了液滴撞击 PMMA 固壁的形貌变化过程以及铺展、振荡特性, 并分析了 PMMA 固壁受到的压力变化规律。

1 实验部分

实验装置如图 1 所示, 主要实验仪器包括产生液滴的注射器和平头针头、高速相机、被液滴撞击的平板、调节支架、水平仪、背景光源以及图像采集计算机。

撞击平板采用水平仪来调节为水平位置。

用来记录撞击过程的高速相机型号为 Photron FASTCAM SA1.1, 在侧面沿水平方向对液滴撞击

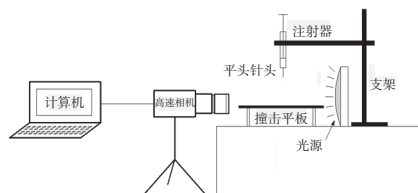


图1 实验装置示意图

固壁的过程进行拍摄。拍摄速度为 4 000 f/s, 图像分辨率为 1 024 × 1 024。整个实验过程采用背光法拍摄, 用 LED 灯作为照明光源。与相机连接的计算机实时采集、存储高速图像, 采用图像处理软件 (PFV), 实时观测撞击过程。

按图 1 安装好实验装置后, 缓缓推动注射器, 使平头针头产生液滴, 当液滴体积逐渐增大直到临界值, 液滴就会从针头脱离落下。液滴到达平板时的速度称为撞击速度。由于重力加速度的原因, 撞击速度由其距固壁的高度决定。为了减小误差, 通过对实验图像的像素级精度分析计算撞击速度数值大小, 具体方法如下^[2]。

^{*} 国家自然科学基金项目 (11372219, 11172205, 51176136)

联系人: 夏振炎, 副教授, 主要从事实验流体力学研究工作

收稿日期: 2014-01-02

将液滴即将撞击前的一幅图像取出,编号为0;取撞击之前2.5 ms和5 ms的图像,分别编号为1和2;使用Matlab软件编程对三幅图像进行像素分析,确定三幅图中液滴中心所在像素坐标 y_0, y_1, y_2 (见图2);根据标定图像算出三个液滴之间的实际距离 h_1, h_2 ,然后根据自由落体物理公式 $v_0=(h_1+h_2)/0.005\text{ s}+9.8\text{ m/s}^2 \times 0.0025\text{ s}$,计算出液滴撞击速度 v_0 。

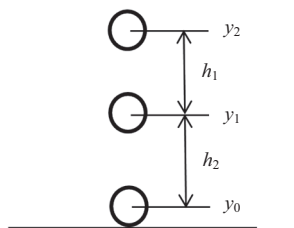


图2 液滴撞击速度计算示意图

液滴直径由针头内径决定,通过选用不同型号的针头来调节液滴直径的大小。由于表面张力的作用,液滴滴落时其直径 D_0 远远大于针头的内径,形状近似为椭球形,故采用名义直径 D_0 定义滴落液滴的平均直径,计算公式为^[3]:

$$D_0 = (D_h^2 \cdot D_v) \quad (1)$$

式中: D_h, D_v 分别为水平和垂直直径。 D_h 和 D_v 通过对液滴撞击固壁图像以及标定图像进行像素分析获得^[2],图像的像素分析采用Matlab编程计算处理。

为了更好地对液滴撞击固壁的运动过程和流场特性进行分析,需要定义几个无量纲参数:

铺展因子: $\beta = d/D_0$

无量纲高度: $H = h/D_0$

式中: d 为PMMA固壁上液滴润湿范围的直径, h 为液滴上表面最高点与PMMA固壁之间的相对高度,定义液滴撞击固壁的时刻为 $t=0$ 。

2 数值模拟部分

笔者对液滴撞击PMMA固壁的现象进行了三维数值模拟。采用蒸馏水液滴,实验在21℃下进行,液滴的物性参数见表1。

表1 液滴物性参数

密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度 $\mu /$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)	表面张力 $\sigma /$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	直径 $D_0 /$ mm	撞击速度 $v_0 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
996	1.01×10^{-3}	0.073	2.26	1.23

计算模型采用大涡模拟(LES)湍流模型,既能通过控制网格的尺寸及时间步长来控制内存和计算时间,也能保证获得足够详细的流场瞬时变化信息。自由界面捕捉采用流体体积(VOF)方法。

2.1 控制方程

液滴撞击固壁为气液两相流问题,气相为空气,液相为蒸馏水。假设二者均不可压缩,只存在动量传递,无传质传热。自由界面的捕捉采用VOF方法,并采用基于VOF方法的连续表面张力模型^[4],表面张力作为在自由界面处的一个非零体积力^[5]。控制方程^[6-7]包括连续性方程(2)和动量方程(3)。

连续性方程:

$$\nabla v = 0 \quad (2)$$

动量方程:

$$\rho(\partial v / \partial t + v \nabla v) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \sigma k \nabla F + \rho g \quad (3)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; v 为速度矢量, m/s ; t 为时间, s ; p 为压力, Pa ; μ 为动力黏度系数; σ 为表面张力系数; g 为重力加速度; k 为界面曲率,其表现形式如下:

$$k = -(\nabla \cdot \hat{n}), \hat{n} = n/|n| \quad (4)$$

式中: n 为法向矢量。

$F(x, y, z, t)$ 为VOF方法中定义的流体体积标量函数,定义如下:

$$\partial F / \partial t + v \nabla F = 0 \quad (5)$$

当单元网格中充满气相时, $F(x, y, z, t)=0$;当单元网格中充满液相时, $F(x, y, z, t)=1$;当单元网格中既有气相又有固相时,此处为气液交界面, $0 < F(x, y, z, t) < 1$ 。

密度和黏度的加权平均值由下式得出:

$$\rho = (1-F)\rho_{\text{气}} + F\rho_{\text{液}} \quad (6)$$

$$\mu = (1-F)\mu_{\text{气}} + F\mu_{\text{液}} \quad (7)$$

2.2 计算域、网格、边界条件

计算域和网格如图3所示。计算域在 X, Y, Z 方向的范围为 $12\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,坐标原点在计算域的中心位置。重力加速度 $g=9.8\text{ m/s}^2$,方向为 Z 轴负方向。

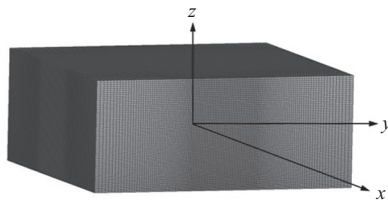


图3 计算域网格示意图(坐标原点在计算域中心位置)

液滴各项物性参数与实验一致(见表1);将液滴设为球体,圆心初始位置在坐标原点,设置初始速度方向为 Z 轴负方向,比表1中撞击速度略小,为 1.22 m/s ,这是因为考虑到重力加速度的作用,经计算当液滴撞击壁面时达到的撞击速度为 1.23 m/s 。

/s,与实验工况一致。

计算网格采用结构化非均匀网格,近壁面和计算域中心处进行了加密。针对网格总数分别为45万、168.75万、245万、300万的工况进行网格无关性验证模拟,结果显示后两者的液滴界面变化、流场特性等基本一致。故采用网格数为245万进行数值模拟计算。

边界条件的设置中,除底面($Z = -2.5 \text{ mm}$)为壁面外,其余的面均为压力进出口边界条件。

对于液滴撞击固壁的数值模拟,需要设置壁面的接触角(CA)。CA是影响模拟结果的重要参数。其定义为在气、液、固三相交点处所作的气-液界面的切线与固-液交界线之间的夹角 θ 。之前的文献[8-9]中做液滴撞击固壁的数值模拟一般采用静态接触角(SCA)模型,即设置CA固定不变(一般取值为平衡接触角)。但是实际上在液滴撞击固壁过程中,其CA是不断变化的,SCA模型在计算液滴撞击亲水性壁面时会出现较大的误差^[10]。笔者提出一种新的分段式动态式接触角(SDCA)模型,定义如下:

$$\theta = \begin{cases} \theta_0 & t < t_0 \\ \theta_0 + (\theta_e - \theta_0)(\lg t - \lg t_0) / (\lg t_e - \lg t_0), & t_0 < t < t_e \\ \theta_e & t > t_e \end{cases} \quad (8)$$

式中: θ_0 为初始铺展平均接触角, θ_e 为平衡接触角。

图4为液滴撞击PMMA固壁实验和SDCA模型的动态接触角。

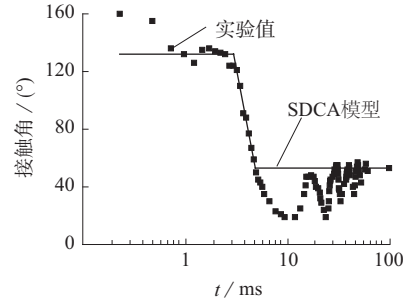


图4 液滴撞击PMMA固壁实验和SDCA模型的动态接触角

图4中黑色方点为本实验中液滴的动态接触角变化数据,通过对高速相机拍摄的照片进行图像处理得到,图中的直线为数值模拟中所采用的SDCA模型。结合式(8)和图4可以看出,SDCA模型由三段直线组成,首段和末段接触角取值为初始铺展平均接触角和平衡接触角,中间段接触角为对接触角进行对数线性拟合而成。 θ_0 和 θ_e 以及对应的时间 t_0 和 t_e 从实验得来。本实验中, $\theta_0 = 132^\circ$, $t_0 = 3 \text{ ms}$, $\theta_e = 53^\circ$, $t_e = 4.9 \text{ ms}$ 。

3 结果与讨论

3.1 液滴撞击PMMA固壁过程分析

图5为实验和数值模拟得到的液滴撞击PMMA固壁形貌变化过程对比,图6为液滴的 β 随时间变化的实验值和模拟值的对比,图7为液滴无量纲高度 H 随时间变化的实验值和模拟值的对比。从图5、图6、图7可以看出,水滴撞击PMMA固壁的数值模拟结果与实验结果吻合良好,因此证明了所采用的SDCA模型的正确性。

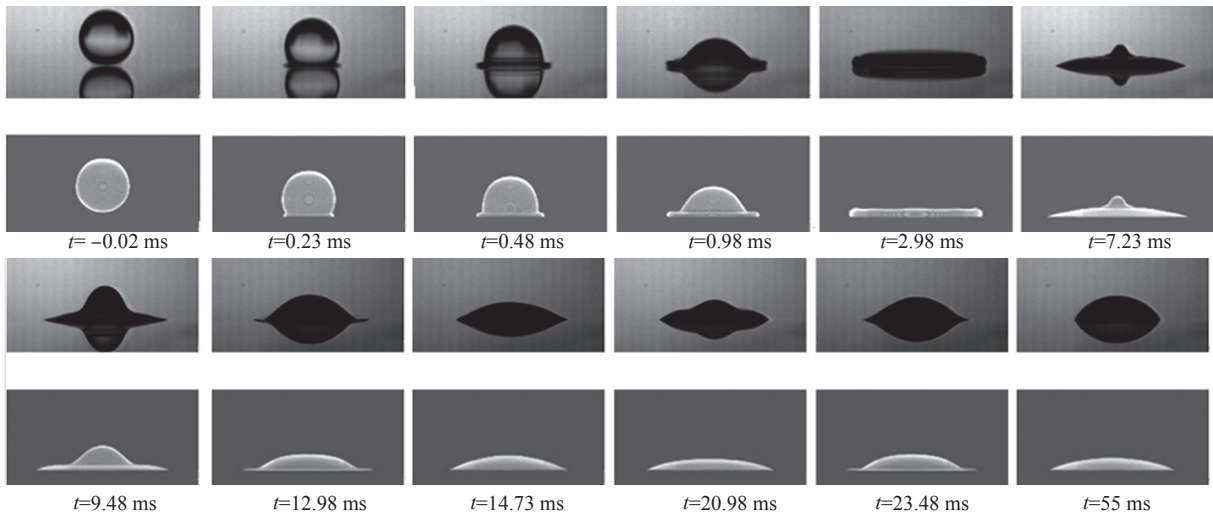


图5 液滴撞击PMMA固壁实验和数值模拟的形貌变化时间序列

从图5可以看出,液滴撞击PMMA固壁的全过程可以分为四个阶段:运动阶段、铺展阶段、松弛阶段、平衡阶段。液滴撞击PMMA固壁前其形貌近似

球形($t = -0.02 \text{ ms}$),撞击后,液滴进入运动阶段,其运动状态发生剧烈变化,液滴下表面撞击到固壁后其纵向速度迅速减为零,但液滴上部依然向下降落,

液滴内部出现挤压,使得液滴表面不再保持之前较为圆滑的状态,开始出现不断振荡的表面波,此时的液滴类似一个切了一部分的球体($t=0.23$ ms)。运动阶段时间很短,液滴随即进入铺展阶段,液滴下表面以液膜的形式向外铺展($t=0.48, 0.98$ ms 前后)。液滴向外铺展的动能来自于下落过程的重力势能的转化,开始铺展时动能较大,铺展速度较快,但是液滴的铺展受到内部黏性力和液滴表面张力以及壁面摩擦力的阻碍,其铺展速度越来越慢,最终在铺展的边缘形成一个环状凸起($t=2.98$ ms 前后),此时液滴铺展范围达到最大。由于表面张力的作用,液滴开始回缩,进入松弛阶段($t=7.23$ ms 前后)。液滴的回缩会使液滴在撞击点处再次凸起达到最高点($t=9.48$ ms),随后液滴再次下降并铺展($t=12.98$ ms 前后),与此同时,液滴的润湿范围也开始回缩。当液滴铺展到最大值时($t=14.73$ ms),其铺展范围比上一次($t=2.98$ ms)要小。随后,液滴会重复出现回缩-铺展-回缩现象,但由于液滴内部黏性力以及与 PMMA 固壁之间的壁面摩擦力一直消耗液滴的能量,其变化的幅度越来越小($t=20.98$ ms)。最终,液滴进入平衡状态($t=23.48 \sim 55$ ms)。

3.2 液滴的铺展和振荡

图6为水滴撞击 PMMA 的 β 随时间变化的实验值和模拟值的对比,反映了水滴在 PMMA 上润湿范围的变化规律。

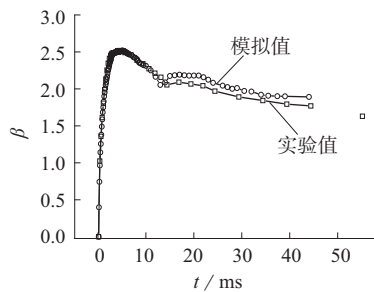


图6 液滴撞击 PMMA 的 β 随时间的变化

从图6可以看出,液滴撞击 PMMA 后其 β 迅速增长,在 $t=3.73$ ms 时达到最大值 2.50。在达到最大值前后一小段时间液滴的 β 比较稳定,此时正对应液滴从铺展阶段转变为松弛阶段。随后液滴回缩,其 β 也开始减小。当 $t=9.48$ ms 时,液滴回缩到最大值之后再次铺展,此时 β 仍然在减小。由此得出,在液滴二次铺展阶段,其中心铺展和边缘回缩同时存在。当 $t=14.23$ ms 时,液滴中心铺展与边缘回缩碰在一起,随后 β 增大少许,在 $t=16.73$ ms 时再次达到峰值,随后 β 缓慢减小,直到进入平衡状态,

β 稳定在 1.63 左右。

图7为液滴无量纲高度 H 随时间变化的实验值和模拟值的对比。当液滴撞击 PMMA 固壁后, H 迅速减小,其重心下降,重力势能转化为动能促使液滴向外铺展。由于表面张力的作用,液滴铺展到一定范围就开始回缩,使得液滴的中心部分下降到最低点后再次凸起, H 再次增加,此时液滴的动能开始转化为重力势能。在液滴的运动过程中,黏性力和壁面摩擦力一直在消耗能量,所以液滴不会回到 $t=0$ 时的高度。达到最高点后,液滴再次下降并向外铺展, H 再次减小。由于水的黏度相对较小,所以液滴运动时黏性力较小;而且 PMMA 壁面亲水性不强,接触角较大,所以其铺展范围缩小导致壁面摩擦力做功减少,所以液滴能量消耗较慢,会出现多次振荡,直到液滴动能和势能都消耗干净达到平衡状态。

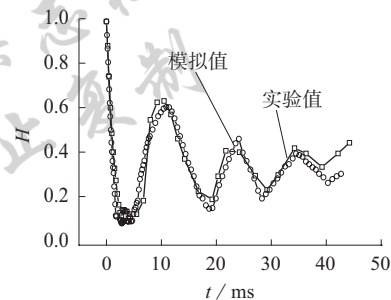


图7 液滴撞击 PMMA 无量纲高度 H 随时间的变化

3.3 PMMA 壁面压力分析

图8为数值模拟获得的不同时刻 PMMA 壁面上沿直线 ($Y=0, Z=-2.4$ mm) 的压力曲线分布。

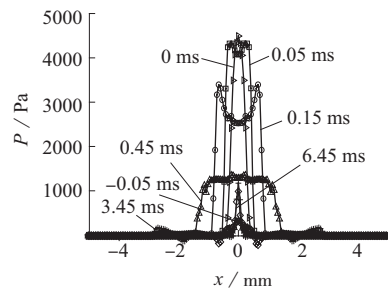


图8 不同时刻 PMMA 壁面上沿直线的压力曲线分布

通过对液滴撞击 PMMA 固壁过程进行数值模拟,可以得到实验难以获得的内部瞬态流场信息。从图8可以看出,在撞击过程的运动阶段壁面所受压力最大。当液滴以 1.23 m/s 的速度临近 PMMA 壁面时, PMMA 壁面上即将撞击处(坐标原点)压力剧增,由撞击前($t=-0.05$ ms 时)的 360 Pa 增加到撞击时($t=0$ ms 时)的 4409 Pa。随后($t=0.05$ ms 时),最大压力位置稍微向外移动,撞

击点处压力下降。分析认为,这是由于临近撞击时,液滴下表面与壁面快速接近,两个表面缝隙内的空气被压缩,压力剧增,使得液滴下表面向内凹陷。随着液滴的下降和撞击,液滴下表面凹坑里的空气成为液滴内的气泡,最大压力即出现在气泡边缘气液固三相交界线上。之后($t=0.15 \sim 3.45$ ms),壁面所受压力持续减小,最大压力位置转移到液滴外边缘接触线处,仍然处在气液固三相交界线上。

4 结论

(1) 建立了可视化实验平台,用高速相机记录了液滴撞击 PMMA 固壁全过程,分析了撞击过程中液滴的形貌变化以及铺展和震荡特性。

(2) 采用 LES-VOF 方法模拟了液滴撞击 PMMA 固壁的全过程,提出了新的分段式动态接触角(SDCA)模型,模拟结果与实验结果吻合良好,验证了计算模型的正确性。

(3) PMMA 固壁受到液滴撞击时,撞击初始的运动阶段受到压力最大,最大值出现在气液固三相交界线上。

参考文献

- [1] 侯学勤,范金娟,何玉怀.飞机侧窗 PMMA 裂纹分析[J].工程塑料应用,2011,39(001):31-34.
Hou Xueqin, Fan Jinjuan, He Yuhuai. PMMA cracks analysis of an aircraft side window[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(001):31-34.
- [2] 梁刚涛,沈胜强,郭亚丽,等.实验观测液滴撞击倾斜表面液膜的特殊现象[J].物理学报,2013,62:084 707.
- [3] Rioboo R, Marengo M, Tropea C. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces[J]. Experiments in Fluids, 2002, 33(1):112-124.
- [4] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2):335-354.
- [5] He Liping, Zhang Mengzheng, Du Qing, et al. Large eddy simulation of atomization process of non-newtonian liquid jet[J]. Advanced Science Letters, 2012, 8(1):285-290.
- [6] De Villiers E, Gosman A D, Weller H G. Large eddy simulation of primary diesel spray atomization[J]. SAE Transactions, 2004, 113(3):193-206.
- [7] Ishii M, Mishima K. Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations[J]. Nuclear Engineering And Design, 1984, 82(2):107-126.
- [8] Nikolopoulos N, Theodorakakos A, Bergeles G. Three-dimensional numerical investigation of a droplet impinging normally onto a wall film[J]. Journal of Computational Physics, 2007, 225(1):322-341.
- [9] 沈胜强,李燕,郭亚丽.液滴撞击等温固体平壁数值模拟[J].工程热物理学报,2009(12):2 116-2 118.
Shen Shengqiang, Li Yan, Guo Yali. Numerical simulation of droplet impacting on isothermal flat solid surface[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009(12):2 116-2 118.
- [10] Lunkad S F, Buwa V V, Nigam K D P. Numerical simulations of drop impact and spreading on horizontal and inclined surfaces[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(24):7 214-7 224.

美国环保新技术:温室气体变塑料

如何减少空气中的温室气体呢?相信很多人的答案都是减少排放,不过美国一家高科技公司开辟了一条减少温室气体的新思路——将温室气体废物利用。这家公司已成功运用温室气体制造出了塑料。美国一家科技公司不久前开发出了一名名为“空气碳”的新型塑料。普通塑料是由石油提炼的产品制成的,而“空气碳”的制作原料竟然是温室气体。生产“空气碳”塑料,首先要通过一个气体聚合反应装置,将空气中的二氧化碳和甲烷液化分离,并对它们的分子结构进行再造,以获得“空气碳”塑料。目前,这家公司已经用“空气碳”塑料制造了多种产品,包括椅子、塑料板、手机外壳等。世界知名的家具生产商 KI 公司还将推出用“空气碳”塑料制造的一系列家具,并取名为“碳阴性”。“空气碳”研发公司希望,未来能通过这一系列环保家具的推出,让“空气碳”塑料在全球范围内得到推广。(中国聚合物网)

美国建立安全标准确保塑料机械安全操作

据了解,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、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 三个层次。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事故滚距要求。

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,分为三方面: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。

(中国聚合物网)