

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.05.015

基于拉格朗日的单螺杆销钉挤出机混沌混合分析

李飞,朱向哲,刘俭

(辽宁石油化工大学,辽宁抚顺 113001)

摘要:从拉格朗日理论的新视角,分析了高分子聚合物熔体在单螺杆销钉挤出机内的流型结构以及流动行为,揭示了销钉强化聚合物熔体输运和混沌混合的机理。使用有限元软件 Polyflow 计算了流场的速度分布和混合指数;借助 Matlab 数学软件进行自主编程对速度场进行积分得到了三种不同销钉挤出机模型的有限时间李雅普诺夫指数。结果显示,在加入销钉之后,单螺杆销钉挤出机流域中出现了圆柱绕流现象,绕流产生的尾迹将撞击螺棱,销钉和螺棱的这种相互作用将加剧聚合物熔体的拉伸作用。每个销钉都将产生尾迹,随着销钉数量的增加,导致流域中产生了更多的尾迹。尾迹与销钉相互作用得到了增强,导致流域中产生了更多的涡结构,说明流域中的大部分熔体处于混沌混合的状态。混沌混合使销钉挤出机内的流体拉伸作用得到了增强,流体的混合指数得到增加,混合效率也逐渐增大。

关键词:拉格朗日;单螺杆销钉挤出机;混合指数;有限时间李雅普诺夫指数;混沌混合

中图分类号:TQ320.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2018)05-0072-05

Chaotic Mixing Analysis of Single Screw Extruder Based on Lagrangian Viewpoint

Li Fei, Zhu Xiangzhe, Liu Jian

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract : The flow pattern of high molecular polymer fluid in a single screw extruder was analyzed from the new viewpoint of Lagrange theory, which revealed the mechanism of the pin strengthening polymer melt transport and chaotic mixing of the flow field. The velocity distribution and mixing index of the flow field were calculated by the finite element software Polyflow. Besides, with the help of Matlab software, autonomous programming was used to integrate the velocity field and then the finite time Lyapunov exponent of three pin screw extruder models was obtained. The results show that after the pin is added, the flow around the circular cylinder appear in the basin of the extruder of the single screw pin. The wake generated by the flow will impact the spiral, and the interaction between the pin and the screw will aggravate the tensile effect of the polymer melt. Each pin will generate the wake and with the increase of pin number, more wakes will be generated in the basin. The interaction between the wake and the pin is enhanced, resulting in more vortex structure in the basin which suggest the polymer melt is in a state of chaotic mixing. Chaotic mixing enhances the fluid stretching effect, mixing index and the mixing efficiency in the pin screw extruder.

Keywords : lagrange ; single screw extruder ; mixing index ; finite time Lyapunov exponent ; chaotic mixing

单螺杆挤出机在聚合物加工过程中有广泛的应用,具有结构简单,生产能力强,挤出特性优良,能实现工业自动化生产等优点。随着高分子合成领域的深入发展,塑化、混合、填充等技术的不断完善,传统的单螺杆挤出机已经不能满足工业的需求。在此基础上设计出更高效的螺杆销钉挤出机。该挤出机

是在螺杆挤出机的基础上增加销钉,使流体在销钉的扰动作用下流动。螺杆销钉挤出机显著提高了混合效率,缩短了混合时间,减少了加工的能源消耗,一定程度上满足了聚合物加工业的要求。

为设计出性能更加优良的挤出机,众多学者从不同角度对螺杆销钉挤出机进行了理论研究。魏新

基金项目:国家自然科学基金项目(51473073, 50903042)

通讯作者:李飞,硕士,主要从事化工过程机械专业研究 E-mail: f100911@aliyun.com

收稿日期:2018-03-02

引用格式:李飞,朱向哲,刘俭. 基于拉格朗日的单螺杆销钉挤出机混沌混合分析[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(5): 72-76.

Li Fei, Zhu Xiangzhe, Liu Jian. Chaotic mixing analysis of single screw extruder based on lagrangian viewpoint[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(5): 72-76.

利等^[1,2]用数值模拟和实验手段,研究销钉螺杆挤出机的螺杆圆周展开面和螺杆端面内物料混沌混合的效果和作用尺度,验证了数值模拟和实验结果具有较好的一致性。徐百平等^[3]利用 Poincare 截面呈现嵌入式行星螺杆挤出机的混沌行为,揭示了挤出机存在的混沌对流行行为有助于提高分散混合和分布混合。毕超等^[4]对往复式单螺杆销钉挤出机停留时间分布进行了研究。刘倩楠等^[5]研究了往复式单螺杆销钉挤出机往复运动传动机理与混炼性能的关系。陈晋南等^[6,7]对比有销钉模型和无销钉模型混合段内胶料的三维等温流场,揭示了销钉的存在有利于强化流体的分散混合。

在混沌理论提出后, Kim 和 Kwon^[8,9]将混沌理论引入到螺杆中,提出“混沌”螺杆概念,该概念首次将混沌理论应用于单螺杆挤出机。在单螺杆挤出机螺槽展开方向上加入周期间断的销钉,通过实验和理论计算都证明了销钉对提高流体的混合效率有显著作用。Lee 和 Kwon^[10]采用了 Poincare 截面和修正的 Lyapunov 指数,对螺杆挤出机螺槽展开面进行混沌混合的分析。Hwang 等^[11]通过实验和模拟手段研究单独的销钉对流体粒子在整个区域运动的作用和销钉的配置参数对流体流动的影响。

近年来,国外研究学者基于混沌动力学,提出了拉格朗日拟序结构(LCS)的动力学分析方法。Haller^[12]通过从速度场求得的 FTLE 场中识别出了 LCS,揭示了 LCS 对分析流体流动的作用。综观国内外研究,很少有学者基于拉格朗日理论对螺杆销钉挤出机进行流场分析。笔者对模型进行简化,基于拉格朗日体系的动力学分析方法,使用拟序结构分析流场的动力特性和混合特性,揭示流体流动的行为特征,为研究提高挤出机的混合效率提供理论知识。

1 拉格朗日拟序结构

由动力学得知,平面二维流场的瞬时速度场可表示为:

$$\frac{dx}{dt} = u(x, y, t); \quad \frac{dy}{dt} = v(x, y, t) \quad (1)$$

式中, $V=(u(x, y, t), v(x, y, t))$, 表示 x 和 y 方向关于 t 变化的速度函数。对速度场积分得到流函数: $F_{t_0}^{t_0+T}: x(t, t_0, x_0) \rightarrow x(x+t, t_0, x_0)$, 沿轨迹 $x(t, t_0, x_0)$ 在 $[t_0, t]$ 上的柯西-格林应变张量为: $C_{t_0}^{t_0+T} = [\nabla F_{t_0}^{t_0+T}]^* \nabla F_{t_0}^{t_0+T}$ 。其中, A^* 为 A 的转置, $C_{t_0}^{t_0+T}(x_0)$ 的最大特征值为 $\lambda_n(x_0, t, 0, t)$ 。

有限时间李雅普诺夫指数 (FTLE) 定义为:

$$A_{t_0}^{t_0+T}(x_0) = \frac{1}{T} \ln \|\nabla F_{t_0}^{t_0+T}(x_0)\| = \frac{1}{2T} \ln \lambda_n(x_0, t_0, T) \quad (2)$$

式中, $\|\nabla F_{t_0}^{t_0+T}(x_0)\|$ 表示变形梯度 $\nabla F_{t_0}^{t_0+T}$ 的算子范数,数值上等于特征值 $\lambda_n(x_0, t_0, T)$ 的平方根,表示物质受到的最大拉伸值。

由 FTLE 的定义可知,当 $T > 0$ 时,有限时间稳定流形称为排斥 LCS,其表示的是 FTLE 值越大,则该位置上的物质被拉伸的越大。当 $T < 0$ 时,有限时间不稳定流形称为吸引 LCS,表示的是物质被压缩的性质。最大排斥度的物质线和最大吸引度的物质线的交点叫做鞍点^[13],当流体粒子运动到鞍点附近时,会沿着非稳定流形方向进行拉伸,同时沿着稳定流形方向压缩。利用 LCS 可以把不同特性的流动区域分割开来,有利于揭示流场内潜在的流动特性和动态力学特性。

2 物理模型

工程实际中使用的销钉螺杆挤出机大多为双头螺杆。为了使数值模拟更接近工程应用的混合现象,将销钉按一定坐标位置固定在流域中,流域的几何模型形状,如图 1a 所示。笔者分析了三种销钉螺杆挤出机展开面模型:1) 无销钉模型;2) 三排三个销钉模型;3) 三排六个销钉模型。

销钉螺杆挤出机几何参数如下:螺杆直径 $\varnothing 40$ mm,销钉直径 $\varnothing 5$ mm,螺棱倾斜角 17° ,螺棱沿水平方向宽度 7 mm,螺槽宽度 77 mm,螺棱切槽宽 10 mm。为了便于研究,做出如下假设:1) 流动为层流且忽略惯性力的影响;2) 流体为等温、不可压缩流动;3) 边界无滑移、无穿透;4) 聚合物流体为非牛顿流体。

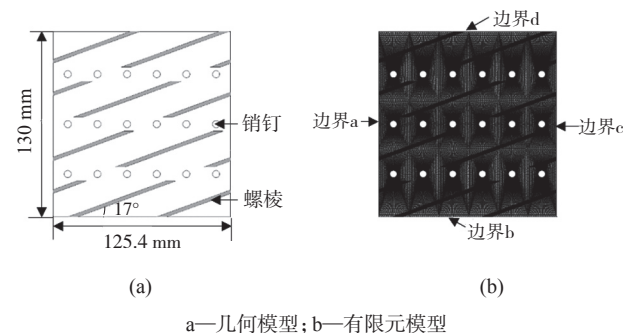


图 1 三排六个销钉的几何模型和有限元模型

数值模拟采用等温瞬态模型,不考虑流体的耗散热。使用 Solidworks 软件绘制几何模型, Workbench 软件进行划分,为了捕捉销钉周围流体速度的瞬时变化,对销钉周围进行局部网格加密,采

用 Ployflow 软件、通过网格叠加技术求解流场的控制方程。

边界条件的设置如图 1b 所示,具体为:边界 a 为周期性入口;边界 b 为入口,给定体积流率;边界 c 为周期性出口;边界 d 为出口;销钉圆周的边界条件为法向力和切向力等于零。同时在做混合任务时,也要将相应的边界条件设置为周期性。此外还需保证对应周期性边界上节点个数相同,保证计算的准确性。

在螺杆圆周展开面中,螺棱水平位移速度 V_x 等于螺杆圆周速度,如式 (3) 所示:

$$V_x = \omega R = 2\pi NR \quad (3)$$

式中, ω 为螺杆旋转角速度, rad/s; N 为螺杆转速, r/min; R 为螺杆外径, 27 mm。

采用高密度聚乙烯材料进行模拟计算, Bird-Carreau 模型表征:

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

式中, η 为流体黏度; η_{∞} 为无穷剪切黏度; η_0 为初始剪切黏度, 1.0×10^4 Pa·s; γ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为牛顿指数, 0.5; λ 为松弛时间, 0.4 s。

3 计算结果及分析

3.1 流场分析

图 2 为两种模型的速度矢量图。由图 2 可知, 无销钉模型中的流体流动较为规整, 只是在螺旋方向上螺棱间的缺口处, 有部分流体从下流道分流到上流道。而有销钉模型中的流体流动较为混乱, 通过销钉附近的速度放大图观测到, 由于销钉和螺棱的距离较近, 阻碍了流体的流动, 从而形成漩涡 1。当流体流经销钉时, 流体发生了圆柱绕流现象, 导致从销钉下壁面脱落的流体形成漩涡 2。有销钉模型中呈现的漩涡和分流现象, 说明在销钉的作用下流体发生了不规则的流动, 凸显了销钉对增强流体混合效率的重要性。

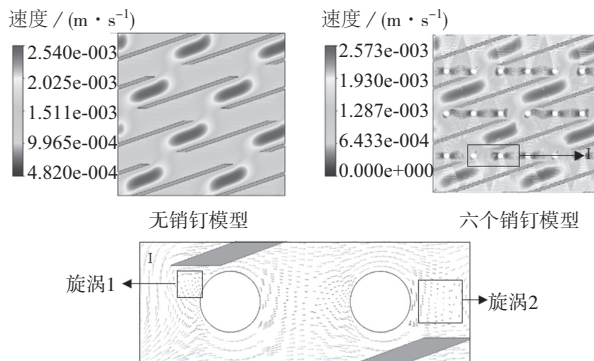


图 2 流域的速度矢量图

3.2 混合指数分析

混合指数 λ 是评价流场中流体分散混合的重要参数, 是评价流体流动形式的指标。混合指数计算公式为:

$$\lambda = \frac{|D|}{|D| + |\Omega|} \quad (5)$$

式中, $|D|$ 是应变速率张量, $|\Omega|$ 是涡旋量。

图 3 为三种模型不同时刻混合指数的概率分布。 λ 的范围为 $[0, 1]$, 其中 $\lambda=0$ 时, 流体流动表现为纯旋转流动; $\lambda=0.5$ 时, 表示流体为简单剪切流动; $\lambda=1$ 时, 表示流体为纯拉伸流动。

由图 3 可知, λ 为 0.5 时, 无销钉模型的概率为 0.27, 三个销钉模型为 0.35, 六个销钉模型为 0.4; λ 在 0.5 ~ 1.0 之间, 在相同混合指数的情况下, 六个销钉模型的概率大于其他两种模型的概率。说明在增加销钉后, 流体受到的拉伸作用在增强; 销钉个数越多, 流域中拉伸区域越多, 促使流体具有更高的混合效率。

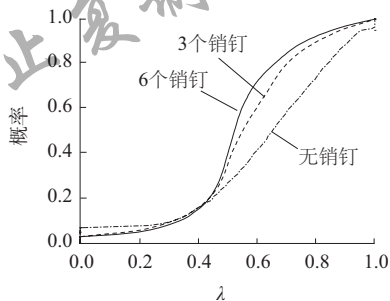


图 3 混合指数显示图

3.3 FTLE 分析

(1) 积分时间的选取。

FTLE 是定量描述流场中混沌现象的物理量, 表示非线性动力系统在相空间中相邻轨道之间的平均收敛程度和发散程度。FTLE 值越大, 表示相邻的流体粒子受到拉伸作用越强。采用 4 阶 Runge-Kutta 法积分速度场, 得到了离散化流体粒子在任意时刻的位置, 再利用公式 (2) 求得流场的 FTLE 值。

FTLE 场中形态特征的形成是一个渐变过程。在积分的初始阶段, 只显示流场中细微的流动信息, 只有设定优质的积分时间, 才能了解流场中包含的全部流动信息。但积分时间过长, 流场包含的信息过多, 也不利于对流动信息的提取和分析。不同模型积分时间的选取为“脊”结构显示完整的时间长度, 也为运动周期的整数倍, 这样才能保证不同模型具有相同的动力系统。通过试算选取积分时间 $T=10$ s。

(2) 三种模型的 FTLE 场。

由拉格朗日理论可知,当相邻的流体粒子以不同的运动特性运动时,将导致 FTLE 场中出现凸出的“脊”结构,如图 4 所示,在无销钉模型的螺棱周围和有销钉模型的销钉周围存在“脊”结构。由流场分析可知,在无销钉模型中,流体流经缺口时将分流,分流后的流体和原流道的流体共同流动,但流道的宽度不变,导致流体速度变大。此外,因为螺棱近壁区流体的速度小,导致在螺棱附近的流体的速度梯度很大,从而在该处的流体进行拉伸流动,具体表征是该处的 FTLE 值较大。在有销钉模型中,流体流经销钉时会发生圆柱绕流现象。部分圆柱尾迹会撞击螺棱,导致出现“发辫涡”结构^[14-15],这些结构是尾迹被螺棱前缘切割后留下的残余部分,将加剧流体的混沌混合,所以需要通过对尾迹撞击螺棱的角度对流体混沌混合进行分析。

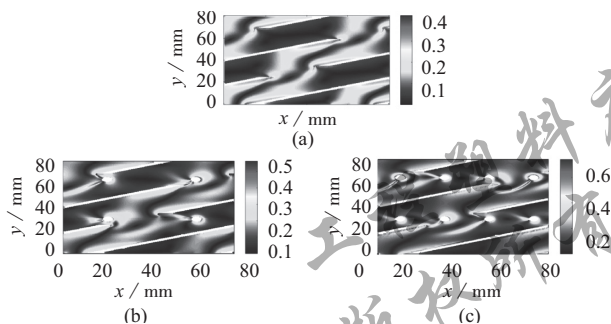


图 4 不同模型 $t=5$ s 积分时间的时间向前 FTLE 场

为了深入研究销钉对流体混合的作用,对销钉周围的计算提高了分辨率,如图 5 所示。圆柱尾迹撞击螺棱分为直接相互作用和间接相互作用。螺棱处于尾迹范围之内的是直接相互作用,而尾迹中的扰动被螺棱边界层内部流体感觉到的是间接相互作用^[14]。所以由于销钉和螺棱相对位置的变化,导致销钉和螺棱之间在直接作用与间接作用相互转化,这种转化导致流场中的拟序结构一直变化。在图 5a 中,三个销钉模型中销钉和螺棱之间是间接相互作用,右侧销钉只引出一条脊线与螺棱相连,说明销钉对流体有扰动作用,但是由于距离螺棱较远,所以不易被感知到。在六个销钉模型中,左侧第二个销钉和螺棱就是直接相互作用,脊线由销钉尾部引出,遇到螺棱的边界层,导致脊线结构演变为“发辫涡”。由于销钉个数增加,尾迹也会和销钉进行相互作用。图 5b 中左侧两个销钉就是直接相互作用,其中左边销钉在右边销钉尾迹的范围之内,所以脊线

结构也会变成“发辫”状。这种现象加剧了流体的拉伸作用,促进了流体的混合效率。

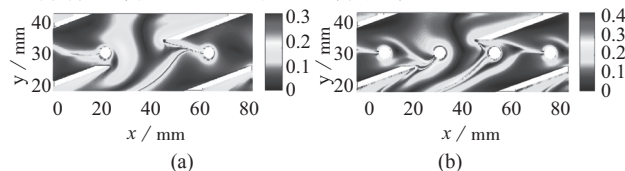


图 5 $t=8$ s 局部流域的时间向前 FTLE 场

3.4 平均拉伸对数

挤出流体在销钉的作用下,导致流场的 FTLE 值增加,流体受到的拉伸作用在增强,促进了流体混合效率的提高。图 6 给出了三种模型的平均拉伸对数随时间的变化。在流动的初始阶段 ($0 \sim 2$ s),三种模型受到的拉伸作用都比较小。随着运动时间的增加,平均拉伸对数数值变得越来越大。其中六个销钉模型的平均拉伸对数的数值最大,并且数值的增速最大。而无销钉模型的平均对数拉伸数值最小,数值的增速也最小。通过上述可知,FTLE 和平均对数拉伸对描述流体混合效率具有一致性,这说明由于销钉数量的增加,将促进销钉挤出流体混合效率的提高。

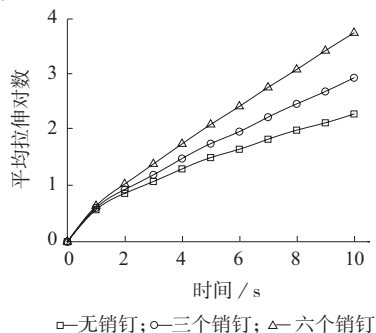


图 6 三种模型的平均拉伸对数

4 结论

(1) 以拉格朗日新的视角,把拉格朗日拟序结构理论应用到销钉机筒挤出机流体输运和混合机理的研究中,为挤出机的设计优化提供了新的理论分析方法和参考依据。笔者的研究方法也可以应用到其他聚合物加工设备流场的分析中。

(2) 拉格朗日拟序结构能很好的描述流体流动的机理。在无销钉模型中,流体只沿着螺棱侧面进行拉伸;在有销钉模型中,发生圆柱绕流产生的尾迹会和螺棱相互作用,导致产生“发辫涡”,加剧了流体的混合;在六个销钉模型中,销钉个数增加,导致尾迹和销钉相互作用,导致产生更多的涡结构,促进了流体的混合。

(3) FTLE、混合指数和平均对数拉伸对评价流体混合效率具有一致性。模型中的销钉个数越多, FTLE 值越大,脊线结构越复杂,导致流体的混合指数变大,平均对数拉伸值增加。

参考文献

- [1] 魏新利,董卫刚,李培宁,等. 销钉机筒挤出机螺杆圆周展开面内物料流动与混合的数值分析与实验[J]. 化工学报,2003,54(11):1 619-1 626.
Wei Xinli, Dong Weigang, Li Peining, et al. Numerical and experimental analysis of flow and distributive mixing in unfolded surfaces of screw in pin barrel extruder[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China),2003,54(11):1 619-1 626.
- [2] 魏新利,董卫刚,李培宁,等. 销钉机筒挤出机螺槽横截面内流体流动与混合的研究[J]. 高校化学工程学报,2003,17(3):254-260.
Wei Xinli, Dong Weigang, Li Peining, et al. A study of fluid flow and mixing in the cross section of the screw slot of the pin barrel extruder[J]. Journal of chemical engineering of Chinese universities,2003,17(3):254-260.
- [3] 徐百平,瞿金平,刘跃军,等. 单螺杆挤出机中三维流动有限体积数值模拟[J]. 化工学报,2008,59(12):3 055-3 060.
Xu Baiping, Qu Jinping, Liu Yuejun, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow in single screw extruder by finite volume method[J]. Journal of chemical industry and engineering(China),2008,59(12):3 055-3 060.
- [4] 毕超,江波. 往复单螺杆销钉挤出机停留时间分布研究[J]. 工程塑料应用,2007,35(12):72-76.
Bi Chao, Jiang Bo. Study on residence time distribution of reciprocating single screw pin screw[J]. Engineering Plastics Application,2007,35(12):72-76.
- [5] 刘倩楠,毕超. 往复单螺杆销钉挤出机往复运动传动机理与混炼性能关系的研究[J]. 工程塑料应用,2013(8):66-71.
Liu Qiannan, Bi Chao. Study of drive mechanism of reciprocating motion and mixing performance of reciprocating single screw pin-barrel extruder[J]. Engineering plastics application,2013(8):66-71.
- [6] 陈晋南,姚慧,彭炯. 销钉机筒挤出机混合段的混合性能[J]. 北京理工大学学报,2008,28(1):90-94.
Chen Jinnan, Yao Hui, Peng Jiong. Mixing performance of the mixing section in a pin barrel extruder[J]. Transaction of beijing institute of technology,2008,28(1):90-94.
- [7] Chen Jinnan, Dai Pan, Yao Hui, et al. Numerical analysis of mixing performance of mixing section in pin-barrel single-screw extruder[J]. Journal of Polymer Engineering,2001,31(1):53-62.
- [8] Kim S J, Kwon T H. Enhancement of mixing performance of single-screw extrusion processes via chaotic flow: Part I .Basic concepts and experimental study[J]. Advances in Polymer Technology,1996,15(1):55-69.
- [9] Kim S J, Kwon T H. Enhancement of mixing performance of single-screw extrusion processes via chaotic flow: Part II .Numerical study[J]. Advances in Polymer Technology,1996,15(1):55-69.
- [10] Lee T H, Kwon T H. A new representative measure of chaotic mixing in a chaos single-screw extruder [J].Advances in Polymer Technology,1999,18(1):53-68.
- [11] Hwang W R, Jun H S, Kwon T H. Experiments on chaotic mixing in a screw channel flow[J]. Aiche Journal,2002,48(8):1 621-1 630.
- [12] Haller G. A variational theory of hyperbolic Lagrangian Coherent Structures[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena,2011,240(7):574-598.
- [13] 陆启韶. 常微分方程与动力系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010.
Lu Qishao. Ordinary differential equations and dynamic systems[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2010.
- [14] Wu Jun, Pan Chong, Li Tian. Experimental investigation on coherent structures at early stage of boundary layer bypass transition induced by wake impingement[J]. Science China Technological Sciences,2012,55(11):2 981-2 989.
- [15] 崔光耀,潘翀,高琪,等. 沟槽方向对湍流边界层流动结构影响的实验研究[J]. 力学学报,2017,49(6):1 201-1 212.
Cui Guangyao, Pan Chong, Gao Qi, et al. Flow structure in the turbulent boundary layer over directional riblets surfaces[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2017,49(6):1 201-1 212.

新型柔性激光薄膜可用于安全验证

像“超人”一样从眼睛里发射出激光? 科幻电影中的“超能力”已经向现实迈进了一步。英国科研人员开发出一种超薄柔性激光膜,可以附着在隐形眼镜等光学元件表面,作为独一无二的识别标志用于安全验证。

近年来,随着柔性电子技术的迅速发展,有机半导体材料因可延展、拉伸性好,在柔性可穿戴设备、生物医疗等领域获得广阔的应用前景。英国圣安德鲁斯大学一个研究小组利用有机半导体聚合物制作出的柔性薄膜激光器,厚度仅为

200 nm,在光源照射下,聚合物能受激发射出激光。

研究人员介绍说,如果改变薄膜的材料、调整激光的栅形光束,发射的激光可在平面背景上显示一系列特定的线条,类似0和1组成的条形码,这样就获得了一个独特的安全标识,可用安全扫描仪读取。研究负责人马尔特·加特说,这种激光薄膜可以像超薄贴纸一样粘贴在不同表面,例如纸币等。实验证明,这种柔性激光膜不仅弹性好,而且光学性质稳定,适用于钞票防伪。研究成果发表在最新一期英国《自然·通讯》杂志上。

(中塑在线)