

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.10.008

# 同步转子密炼机混合效率的数值模拟研究<sup>\*</sup>

孙大鹏,朱向哲,程志飞,王阁

(辽宁石油化工大学机械工程学院,辽宁抚顺 113001)

**摘要:**利用CFD软件Polyflow对banbury转子和roller转子的两种密炼机内熔体流场进行二维数值模拟。利用粒子跟踪法对两种类型转子密炼机的分散混合性能、分布混合性能、线拉伸以及混合效率进行了统计和比较。结果表明,由于roller转子截面的棱数多于banbury转子,在相同周期内,roller转子密炼机对熔体的剪切与拉伸作用次数多于banbury转子密炼机,因而提高了拉伸速率和剪切速率,roller转子密炼机具有较高的分散性和分布性混合效率。

**关键词:**同步转子密炼机;混合效率;数值模拟;粒子跟踪

中图分类号: TQ320.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2012)10-0033-05

## Study on Numerical Simulation of Mixing Efficiency in Synchronous Internal Mixers

Sun Dapeng, Zhu Xiangzhe, Cheng Zhifei, Wang Ge

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

**Abstract:** The melt flow field in banbury rotor mixer and roller rotor mixer was 2D numerically simulated by using the CFD package polyflow. By using particle tracking method, the dispersive mixing performance, distributive mixing performance, line stretching and mixing efficiency between banbury rotors and roller rotors were compared statistically. The result showed that as there were more edges on roller rotors than that on banbury rotors, the melt in the roller rotor mixer experienced shear stress and elongation more frequently than that in the banbury rotor mixer during the same number of revolutions. So, the stretch rate and shear rate in the roller rotor mixer were higher than that in the banbury rotor mixer, the roller rotor mixer had more dispersive and distributive mixing efficiencies than those of banbury rotor mixer.

**Keywords:** synchronous rotor mixer; mixing efficiency; numerical simulation; particle tracking

密炼机是聚合物混炼的基本设备。随着聚合物工业的飞速发展,人们对密炼机混合性能的要求越来越高。密炼机转子是决定密炼机混合性能的决定性因素,其中转子端面形状、尤其是棱数的不同对同步转子密炼机的混炼效果有着很大的影响<sup>[1]</sup>。banbury转子和roller转子是目前广泛使用的两类密炼机转子。由于roller转子和banbury转子的端面棱数不同,二者对于密炼机内熔体的混合效果也会有所不同<sup>[2-3]</sup>。笔者以聚物流变学为基础,采用有限元法,利用CFD软件Polyflow对banbury转子密炼机和roller转子密炼机中的流场进行二维数值模拟,利用粒子跟踪法对两种类型转子密炼机的分散混合性能、分布混合性能、线拉伸以及混合效率进行了统计计算和对比分析,从理论上证明了roller转子密炼机的混合性能优于banbury转子密炼机。

### 1 理论模型

#### 1.1 物理模型

图1所示分别为banbury转子密炼机与roller

转子密炼机端面的几何模型。

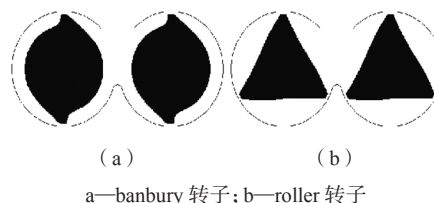


图1 两种转子密炼机端面的几何模型

两种类型转子密炼机的几何尺寸如下:密炼室内径均为40 mm,左右两个转子的中心距为41 mm,转子顶端与密炼室内壁间隙为1 mm。两转子的初始位置如图1所示,两转子相向转动,转速为60 r/min。为了提高计算的收敛性,将模型的尖角结构处理成平滑结构,并对混合区域进行局部细化。应用GAMBIT网格生成软件分别对流道和转

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(50903042)、辽宁省教育厅项目(L2010249)

联系人:朱向哲,博士,主要从事聚合物加工数值模拟研究  
收稿日期:2012-08-17

子进行网格划分,然后利用网格重叠技术将其组合,大大减小了网格的划分难度;两种类型转子密炼机的有限元网格的密度相同,有限元模型如图2所示。图2a中有限元模型的网格数为19170个,节点数为39700个。图2b中的网格数为20418个,节点数为42180个。

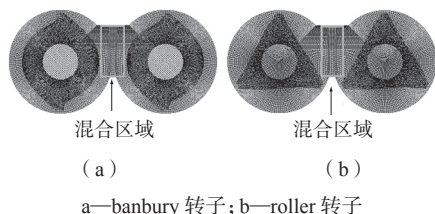


图2 两种转子密炼机的有限元模型

## 1.2 数学模型

假设流道内为非牛顿流体,等温流场。惯性力、重力远小于流体粘滞力,可以忽略。流体为不可压缩流体,流体与壁面间无滑移。雷诺数比较小,可以近似为层流流动。在以上假设条件下流体流动的基本方程为<sup>[4]</sup>:

连续方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{T} - \nabla p = 0 \quad (2)$$

式中: $\nabla$ 为哈密顿算子; $\mathbf{v}$ 为速度矢量; $\mathbf{T}$ 为切应力张量; $p$ 为压力。

Carreau-Yasuda 黏度模型方程为:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\gamma k^a)^n]^{\frac{n-1}{n}} \quad (3)$$

式中: $\eta$ 为输入黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\eta_{\infty}$ 为极限剪切黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\eta_0$ 为零剪切黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\gamma$ 为剪切速率; $k$ 为特征松弛时间,  $\text{s}$ ;  $a$ 为 Carreau 常数; $n$ 为 Carreau 指数。

笔者采用 PE-HD 熔体,其流体物性参数分别为: $\eta_{\infty}=100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_0=350 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $k=0.002 \text{ s}$ ,  $a=0.53$ ,  $n=0.35$ 。求解过程中所采用的边界条件为:流体在密炼室内壁上的速度为零,转子外表面速度为  $V(r)=2\pi Nr$ ,其中  $N$  为转子转速,  $r$  为转子外表面与转子中心轴的径向距离。

## 2 混合效率的评价方法

根据分散混合理论,分散混合是通过剪切和拉伸作用使分散相粒度减小的过程。流场中剪切速率与拉伸速率越高,粒子所经历的最大剪切和拉伸作用的次数就越多,进而就更有利于熔体的混合。拉伸作用对分散混合过程的影响要大于剪切作用。混合指数( $\lambda_{\text{MZ}}$ )用来评价分散混合效果,定义式为<sup>[5]</sup>:

$$\lambda_{\text{MZ}} = \frac{|D|}{(|D| + |\Omega|)} \quad (4)$$

式中: $D$ 为形变速率张量, $\Omega$ 为旋度速率张量。

对于纯剪切流动,混合指数的值为0.5;对于纯拉伸流动,混合指数的值为1;对于纯旋转流动,混合指数的值为0。

$\gamma$ 的计算公式为:

$$\gamma = \sqrt{2D:D} \quad (5)$$

分离尺度是用来衡量混合效果的主要参数,是混合物中相同组分区域平均尺度的度量。其定义式为:

$$L_s = \int_0^{\xi} R(|r|) d|r| \quad (6)$$

式中,  $R(|r|) = \frac{\sum_{j=1}^M (C_j' - \bar{C}) \cdot (C_j'' - \bar{C})}{MS^2}$ 。  $R(|r|)$  为浓度相关系数,表示在任意时刻  $t$  距离为  $r$  有着相同浓度随机质点的概率,  $|r|$  为在任意时刻  $t$  所取的一对随机质点之间的距离。  $C_j'$ ,  $C_j''$  分别表示第  $j$  对质点中两个质点处的浓度,  $\bar{C}$  为所取质点的平均浓度,  $M$  表示所取质点的总对数,  $S$  为浓度的标准差。

在二维流场中,流体与流体之间的边界是一条线。通过分析流体与流体之间的边界在流动过程中随时间与位置的变化情况,可以对混合过程做出客观的评价。令  $x = \chi(X, t)$  表示粒子的流动轨迹,  $X$  表示粒子在初始时刻的位置,  $x$  表示同一粒子在  $t$  时刻的位置。流体之间的线拉伸可通过公式  $\lambda = \frac{|\Delta x|}{|\Delta x|_0}$  来定量的统计。混合的瞬时效率计算公式为:

$$e_{\lambda} = \frac{\dot{\lambda}/\lambda}{(D:D)^{1/2}} = \frac{D \ln \lambda / D t}{(D:D)^{1/2}} \quad (7)$$

式中: $D$ 为在  $t$  时刻的形变速率张量,  $\dot{\lambda}$  为线拉伸  $\lambda$  对时间  $t$  的导数。混合效率的时间平均值定义式为:

$$\langle e_{\lambda} \rangle = \frac{1}{t} \int_0^t e_{\lambda} dt \quad (8)$$

应用粒子示踪法来研究两种类型转子密炼机的混合效果。初始时刻在流场中任意分布2000颗无体积、无质量的粒子,计算得到100s的粒子运动轨迹。在此基础上,统计计算并生成了线拉伸,瞬时混合效率以及混合效率的时间平均值随时间的变化曲线。据此来比较分析两种类型转子密炼机的混合性能。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 速度场

图3为两种类型转子密炼机中熔体流动的速度矢量图。从图中可以看到,banbury 转子密炼机中

与 roller 转子密炼机中熔体移动的最大速度分别为  $120.82 \text{ mm/s}$  和  $121.15 \text{ mm/s}$ , 而转子棱峰上的最大线速度为  $119.4 \text{ mm/s}$ 。这是由于熔体受到了转子的挤压, 在棱的前后两侧存在压力梯度, 这有利于对熔体的剪切和拉伸作用, 进而提高分散混合效率。而且 roller 转子密炼机中熔体移动的最大速度高于 banbury 密炼机中熔体的最大移动速度。此外, roller 转子密炼机混合区中两转子之间的物料交换比 banbury 转子更加频繁, 表明 roller 转子密炼机的分散混合效率更高。

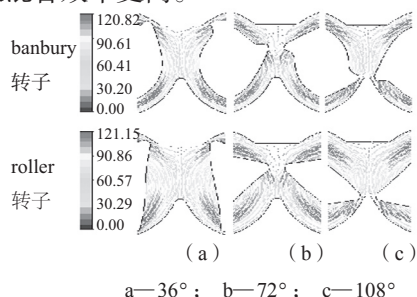


图3 两种转子相对于初始位置转过  $36^\circ, 72^\circ, 108^\circ$  时的速度矢量图

### 3.2 粒子分布图

在两种密炼机的“混合区域”释放 2000 个粒子, 初始位置如图 4 所示, 经过一定的混合时间可以观察到粒子在整个流道中的分布情况。图 5 所示分别为转子旋转 2 圈、3 圈、5 圈之后的粒子分布图。图中显示, roller 转子密炼机的混合区域中的粒子出现明显的折回现象, 使混合区物料能够产生拉伸和折叠, 有利于熔体在混合区域的混合, 而 banbury 转子密炼机的混合区域却不存在此现象; 此外, 两种转子旋转 5 圈后, roller 转子密炼机的粒子分部更加均匀; 这进一步说明了 roller 转子密炼机的混合效果要好于 banbury 转子密炼机。

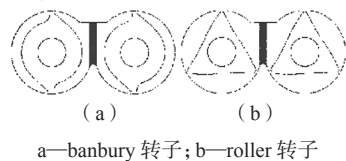


图4 粒子的初始摆放位置

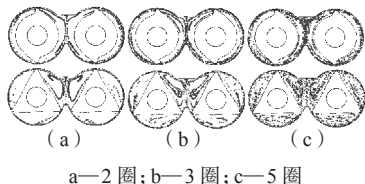


图5 转子旋转不同圈数之后的粒子分布图

### 3.3 混合指数和剪切速率

图 6 给出了 banbury 转子和 roller 转子相对于

初始位置转过  $0^\circ, 36^\circ, 108^\circ$  时的混合指数分布图。从图中可以看到, 相对 banbury 转子密炼机来说, roller 转子密炼机中流体混合指数处于  $0.7 \sim 1$  之间的分布面积更大。这说明 roller 转子密炼机中的物料粒子经历的拉伸作用更强。拉伸流动比剪切流动更有利于密炼机物料的混合。此外, 在两类转子密炼机中靠近转子的壁面存在流动死区, 因此出现了混合指数很小的蓝色区域。

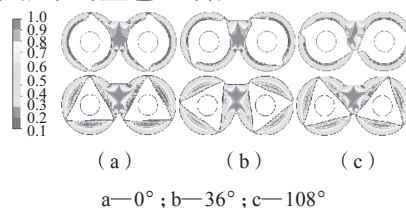


图6 两种转子在相对初始位置  $0^\circ, 36^\circ, 108^\circ$  时的混合指数分布图

图 7 所示分别为 banbury 转子与 roller 转子在相对于初始位置  $0^\circ, 36^\circ, 108^\circ$  时的  $\gamma$  分布图。从图中可以观察到, 两类转子密炼机中熔体所经历的最大剪切速率均分布在转子的棱峰处。由于 roller 转子的棱数要多于 banbury 转子, 任意时刻的 roller 转子密炼机流场中经历最大剪切速率的粒子数要多于 banbury 密炼机。以上两种分析结果均说明 roller 转子密炼机的分散混合性能更好。

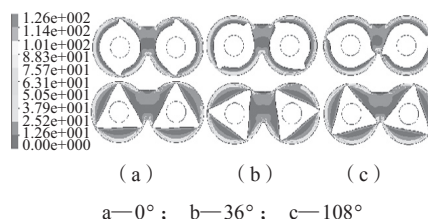


图7 两种转子在相对于初始位置  $0^\circ, 36^\circ, 108^\circ$  时的  $\gamma$  分布图

### 3.4 分离尺度

图 8 为两种转子密炼机流道中粒子的分离尺度。在初始时刻, 粒子的释放方式如图 9a 所示。由于 roller 转子的截面积要小于 banbury 转子的截面积, roller 转子密炼机内流体所占的空间更大, 使得在初始时刻, roller 转子密炼机中粒子的分离尺度大于 banbury 转子密炼机中粒子的分离尺度, 如图 8 所示。在转子旋转 3 s 之后, 两种类型转子密炼机的分离尺度基本相同。但是, 从图 9b 中转子旋转 5 圈之后的粒子分情况来看, banbury 密炼机中的粒子的“分层”情况比较明显。图 9c 显示, 转子旋转 10 圈之后, banbury 密炼机流场中粒子的聚集情况仍十分明显。而 roller 转子密炼机中的粒子分布比较均匀。这说明 roller 转子密炼机的分布混合性能要

优于 banbury 转子密炼机。

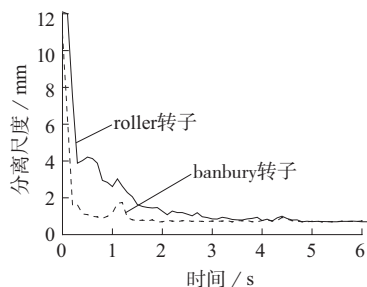


图8 分离尺度时间变化曲线

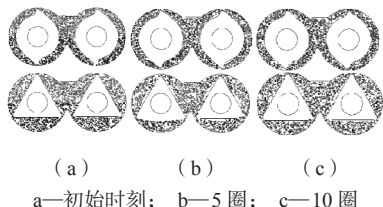


图9 转子旋转不同圈数之后的浓度粒子图

### 3.5 线拉伸与混合效率

图10给出了平均线拉伸随时间变化的曲线。从图中可以看出 roller 转子密炼机的线拉伸要明显高于 banbury 转子密炼机。在转子运动 70 s 时, roller 转子密炼机的线拉伸高出 banbury 转子密炼机线拉伸 28.6%。随着混合时间的增加, roller 转子密炼机线拉伸进一步提高,当混合时间增加到 100 s 时, roller 转子密炼机的线拉伸高出 banbury 转子密炼机线拉伸 31.8%。

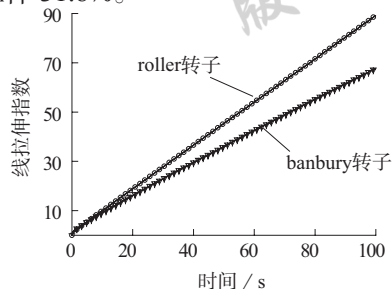


图10 两种转子线拉伸曲线比较

图11为转子旋转10圈之后的两种转子密炼机的粒子线拉伸指数分布图。

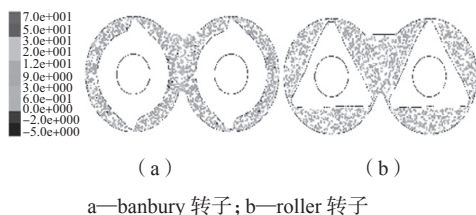


图11 转子旋转10圈之后的粒子线拉伸指数分布图

从图中可以看到, roller 转子密炼机中粒子所经受的线拉伸很高而且分布比较均匀。相反,在 banbury 转子密炼机当中混合区域以及转子边缘都

出现了负值,这说明有压缩的情况存在,不利于密炼机物料的混合。

图12所示为瞬时混合效率随时间的变化曲线。从图中可以看出 roller 转子密炼机的瞬时效率在 0.06 附近波动,而 banbury 转子密炼机的瞬时效率在 0.025 附近波动,因此 roller 转子密炼机具有较高的瞬时混合效率。此外,图12中 banbury 密炼机的瞬时效率曲线中出现了负值,这说明出现了类似于图9中的粒子压缩现象。

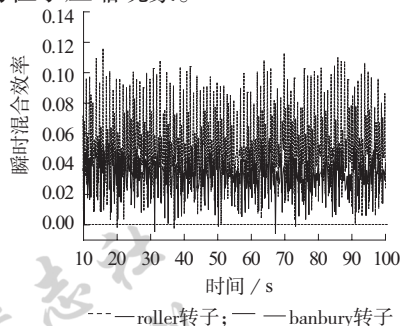


图12 瞬时混合效率曲线

图13所示为混合效率的时间平均值随时间的变化曲线。从图中可以看出, roller 转子密炼机的效率时间平均值曲线高于 banbury 转子密炼机的效率时间平均值曲线。混合时间为 70 s 时, roller 转子密炼机的效率时间平均值高出 banbury 转子密炼机的效率时间平均值 51%,混合时间达到 100 s 时, roller 转子密炼机高出 banbury 转子密炼机的效率时间平均值则达到 56.2%。

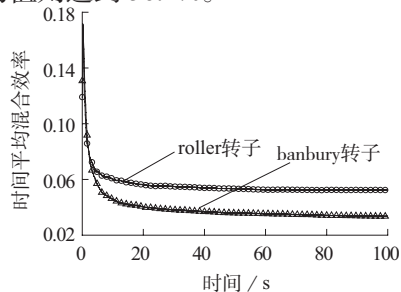


图13 混合效率时间平均值曲线

## 4 结论

(1) 由于 roller 转子端面的棱数多于 banbury 转子, roller 转子密炼机流场中经历最大剪切速率的粒子数要多于 banbury 转子密炼机。roller 转子密炼机混合区域中两转子之间的物料流动速度较快、物料交换比 banbury 转子更加频繁,同时, roller 转子密炼机中流体混合指数在 0.7 ~ 1 之间的分布面积更大。因此, roller 转子密炼机比 banbury 转子密炼机具有更高的分散混合效率。

(2)从粒子的分情况来看,banbury 转子密炼机中的粒子的“分层”和聚集情况比较明显。在 banbury 转子密炼机当中混合区域以及转子边缘都有物料粒子的压缩现象出现,不利于密炼机对物料的混合。roller 转子密炼机的混合区域中的粒子出现明显的折回现象,使混合区物料能够产生拉伸和折叠,有利于熔体在混合区域的混合。此外,roller 转子密炼机中的粒子分布比较均匀且所经受的线拉伸较大。roller 转子密炼机的分布混合性能优于 banbury 转子密炼机。

(3)和 banbury 转子密炼机相比,roller 转子密炼机具有更高的瞬时混合效率和平均时间混合效率,因此,roller 转子密炼机具有更高的混合效率。

#### 参考文献

[1] 龚树云,方程,马玉录,等.基于能量等效的双转子连续混炼机

混炼段相似放大研究探讨[J].工程塑料应用,2012,40(3):57-61.

[2] 刘晓鸣,谢林生,马玉录,等.双转子连续混炼机混炼段分散混合效率的研究[J].工程塑料应用,2006,35(5):64-68.

[3] Salahudeen S A, Elleithy R H, AlOthman O, et al. Comparative study of internal batch mixer such as cam, banbury and roller : Numerical simulation and experimental verification [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66 ( 12 ) : 2 502-2 511.

[4] Connelly R K, Kokini J L. 2-D numerical simulation of differential viscoelastic fluids in a single-screw continuous mixer : Application of viscoelastic FEM methods [J]. Advances in Polymer Technology, 2003, 22 ( 1 ) : 22-41.

[5] Cheng H, Manas-zloczower I. Distributive mixing in conveying elements of a ZSK-53 co-rotating twin screw extruder [J]. Polymer Engineering Science, 2004, 38 ( 6 ) : 626-635.

#### 朗盛推出全新的 UP 产品系列

德国特殊化学品集团朗盛日前推出全新的 UP (装饰用皮革)产品系列,满足众多装具用皮革生产商的需求。在装具皮革领域,对于外观和质感的要求千差万别,因此涂饰产品必须配方简便、易于操作,使皮革生产商无需复杂繁复的流程,即可满足每位客户的不同需求。

朗盛的创新 UP 系列完全满足皮革生产商的这个要求:产品秉承了“简单即美”原则,仅由两个 Euderm 底涂产品、四个 Bayderm 产品系列的不同顶涂产品组成,同时配以 Aquaderm X-Shield UP-L。Aquaderm X-Shield UP-L 是一种基于含氟聚合物的防污剂,尤其适用于容易沾污的浅色调皮革。大量测试结果表明,上述产品具备了出色的相互兼容性。

底涂产品 Euderm Compact UP-SC 是一款多用途产品,尤其适用于全粒面皮革;而另一款基于丙烯酸底涂产品 Euderm Compact UP-E 则是修面革或压花草的不二之选。

特别研发的四款创新顶涂产品性能卓越,可以根据需求,精确地调整光泽度和表面质感。朗盛皮革业务部全球涂饰产品管理负责人 Bianca Verstegen 在介绍全新的组合顶涂系统时说:“这些产品使用起来极其简单。从前常常需要将多达 10 种成份混合在一起,如今,这一切都成为了历史。”

提到这些顶涂产品,首先是基于丙烯酸的 Bayderm Finish UP,可以赋予皮革哑光表面效果和中性的表面手感。适当添加基于聚氨酯/丙烯酸的 Bayderm Finish UP-G 可逐步增加光泽度。而添加 Bayderm Finish UP-W 聚氨酯类产品,则能赋予涂层更高物性、蜡感的表面手感。基于聚亚氨酯/丙烯酸的 Bayderm Finish UP-WG 能使顶涂的光泽度更高,并呈现温暖、更多蜡感。Verstegen 深信:“有了这四款产品,我们的客户无需使用任何其他添加剂,就能根据需求调整装饰用皮革的光泽度和表面质感。”使用更少种类的成份和简单的配方能够使库存变得简单,从而削减仓储成本,同时降

低了配方混淆或不准确的风险。

所有 UP 系列产品均不含甲基吡咯烷酮,符合技术和法规要求。该系列产品使用简单,性能环保,同时具备了卓越的兼容性,为可持续皮革生产做出重要贡献。(PUWORLD)

#### 轨道车辆安全新标实施在即,SABIC 再添两新品

由于轨道车辆内饰材料泛欧防火阻燃安全标准即将实施,日前,SABIC 创新塑料业务部再次拓展了其高性能材料解决方案产品系列,为业已丰富的产品组合再添两款新型 LEXANTM 板材产品。

SABIC LEXANTM 板材产品,包含半透明和不透明两类材质,可用于轨道车辆内饰。

这两款新型产品分别是:LEXANH6500 板材(一种新型聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(PC/ABS)板材)和 LEXANH6200 板材(一种符合德国 DIN 标准的新型板材)。

这两款潜心研发的产品采用了先进的非氯化非溴化阻燃剂技术,可帮助轨道交通客户满足日益增长的增强可持续性以及对先进热塑性材料的需求,并有助于轨道车辆内饰产品的设计与开发。

LEXANH6500 板材是一种不透明、实心、低光泽的 PC/ABS 材料,可满足轨道车辆侧壁、桌子和座椅对于高刚度的需求。该材料采用了非氯化和非溴化的产品技术,环保阻燃性能满足《关于限制在电子电器设备中使用某些有害成分的指令》(RoHS)的相关要求。除了符合 CEN/TS45545 标准的 R6 (座椅)要求外,LEXANH6500 板材还符合包括法国 NFF16-101 标准的 M1F1 等级(厚度为 2~4 mm 时)在内的现行欧洲标准。

LEXANH6200 板材不仅符合德国 DIN5510 标准,而且具有良好的着色性能,相比于标准 PC 材料,它可在较低温度下具备极佳的热成型性能。(中国塑料橡胶网)