# 半导体陶瓷流延料槽流场分布特性分析与结构参数优化

赵 军[1,2] 王嘉乐[1,2] 黄华贵[1,2*] 季 策[1,2] 孙静娜[1,2] 任海龙[3] 韩金鑫[4]

1.燕山大学机械工程学院,秦皇岛,066004

2.燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心,秦皇岛,066004

3.河北东方泰阳电子科技有限公司,石家庄,050220

4.河北中瓷电子科技股份有限公司,石家庄,050299

**摘要**:针对当前流延机普遍受限于料槽出口横向速度分布不均匀这一技术瓶颈,以LYL型流延机料槽为研究对象,基于Herschel-Bulkley本构方程构建料槽出口速度解析模型,采用FLUENT软件开展料槽流场模拟,研究浆料流变参数与料槽流道几何结构参数对出口速度均匀性的影响规律,并结合响应面法(RSM)对料槽流道几何结构参数进行优化。研究结果表明,当稠度系数$k$与流动行为指数$n$增大时,出口速度显著降低,且速度均匀性明显劣化;经RSM优化后,出口速度不均匀系数$r$降低幅度达94%。实验数据与仿真结果具有良好一致性,证实了理论模型与仿真模型的准确性,为提升陶瓷基板流延成型质量提供理论依据与技术支撑。

**关键词**:陶瓷基板;流延成型;料槽;结构优化;出口速度;解析模型;响应面法

**中图分类号**:TH3

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.028 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

# Analysis on Flow Field Distribution Characteristics and Structural Parameter Optimization of Casting Feed Chute for Semiconductor Ceramics

ZHAO Jun[1,2] WANG Jiale[1,2] HUANG Huagui[1,2*] JI Ce[1,2] SUN Jingna[1,2]
REN Hailong[3] HAN Jinxin[4]

1.School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2.National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

3.Hebei Orient Sun-Tech Co., Ltd., Shijiazhuang, 050220

4.Hebei Zhongci Electronic Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, 050299

**Abstract**: Addressing the current technical bottleneck of tape casting machines, which was commonly limited by the uneven lateral outlet velocity distribution in the feed chute, taking the LYL-type tape casting machine's feed chute as the object, an analytical model of outlet velocity was established based on the Herschel-Bulkley equation, the flow field simulations of feed chute were conducted via FLUENT, and the effects of slurry rheological parameters and flow channel geometric parameters on velocity uniformity were investigated. Flow channel parameters were optimized by using RSM. The results show that when the consistency coefficient($k$) and the flow behavior index($n$) increase, the outlet velocity significantly decreases, and the velocity uniformity deteriorates markedly. After RSM optimization, the outlet velocity non-uniformity coefficient($r$) is reduced by 94% . The experimental data show good consistency with simulation results, confirming the accuracy of the theoretical model and the simulation model, providing the theoretical basis and technical support for improving the ceramic substrate tape casting quality.

**Key words**: ceramic substrate; tape casting; feed chute; structure optimization; outlet velocity; analytical model; response surface methodology(RSM)

## 0 引言

流延成型工艺作为高性能超薄陶瓷基板制备的关键技术之一,凭借其优异的工艺适应性与生产效率,在半导体制造领域占据关键地位[1]。陶

**收稿日期**:2025-09-10

**基金项目**:国家自然科学基金(52375390);河北省自然科学基金燕赵青年科学家项目(E2023203260);河北省高等学校科学技术研究项目(CXY2024009);河北省创新能力提升计划(24431801D);邢台市重大科技专项(2023ZZ017)

瓷基板作为半导体器件制造过程中的核心功能材料，其厚度均匀性直接影响最终产品的性能指标[2]，尤其在高精度应用场景下，陶瓷基板的厚度不均匀性需严格控制在1 μm以内。为满足日益提高的工业标准要求，通过优化料槽结构设计以提高成形精度，已成为该领域的重要研究方向。

流延成型时陶瓷浆料在压力驱动下从料槽中心注入，经分配腔体完成料槽宽度方向的流体再分布。之后浆料由狭缝流道流出，在料池内形成稳定均匀的液面，为刮涂工艺提供理想初始条件，进而保障基板生坯的厚度一致性。

当前流延成型设备普遍面临料槽横向出口速度分布不均匀的技术瓶颈，其物理本质在于料槽型腔内难以建立稳态压力场分布。根据流体力学理论，恒定压力梯度是实现流体均匀分配的必要前提[3]。尽管流体惯性力引发的Bernoulli效应可部分补偿黏性耗散，但通过优化腔体截面积、狭缝流道尺寸等几何参数仍是调控压力场分布的最有效途径[4]。围绕这一核心优化方向，近年来国内外学者开展了针对性研究：于玉真等[5]通过FLUENT模拟PVC-U管材挤出机头流道，结合正交试验及CFD-POST分析得到了最优结构；KURKIN等[6]提出了通道拓扑优化启发式算法，解决了热塑性材料注塑多腔模具流道设计问题；HAO等[7]针对聚合物共挤工艺提出医用条纹导管模具优化与逆向设计耦合方法，结合非线性规划二次拉格朗日算法得到了共挤模道的最优几何解。

工业流延料槽流道结构具有显著多物理场耦合特征，参数间存在强非线性相互作用。传统单因素实验方法存在固有局限性，需开展大样本实验，存在无法捕捉参数交互效应且优化效率低的问题[8]。相比之下，响应曲面法（response surface methodology，RSM）作为基于统计学习的优化范式，具有通过有限实验构建代理模型、精确量化非线性响应关系及实现Pareto前沿优化等优势[9]。近年研究已验证其工程应用价值：KIM等[10]采用Box-Behnken设计（BBD）优化槽模涂布机后，最佳工况下料带厚度偏差降低71%；ZHANG等[11]提出基于聚合物流动数值模拟的多目标分析方法，通过调整实验设计（DOE）构建结构优化数值模型，发现经优化后3项目标均得到显著改善；RAZEGHIYADAKI等[12]运用RSM优化衣架式挤出模具结构参数后，使得出口速度均匀性提高了20.07%。综上，RSM在流体加工领域的应用提供了重要理论支撑与实践参考。

针对LYL型流延机料槽技术瓶颈，结合实际生产工况，本文采用非牛顿流体Herschel-Bulkley本构方程建立料槽出口速度解析模型，并通过FLUENT软件开展流场模拟，探究浆料流变参数与料槽流道几何参数对出口速度均匀性的影响规律。然后结合仿真模拟与RSM优化料槽流道几何参数，以确定最优参数组合。

## 1　料槽出口速度数学模型

### 1.1　基本假设与动量方程

陶瓷流延浆料表现出典型的非牛顿流体特性，其流动行为符合稳态、层流及不可压缩流体的基本假设。鉴于陶瓷流延过程（图1）的复杂性，针对LYL型流延机的料槽（图2）内部浆料的流动过程作出具体假设如下：在仅考虑沿$x$方向压力驱动的条件下，且考虑到流场速度分布关于料槽宽度方向的几何中心面（即$z=0$平面）对称，本研究选取$z$轴正方向的流场区域作为建模与分析对象，以简化计算并聚焦核心流动特征。同时可忽略浆料自身重力与惯性力的影响，并假定壁面处无滑移边界条件成立。

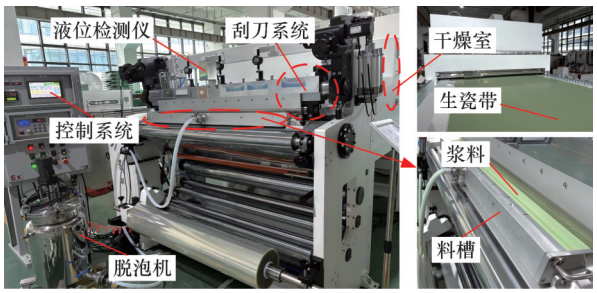



**图1　陶瓷流延过程示意图**

**Fig.1　Schematic diagram of the ceramic tape casting process**

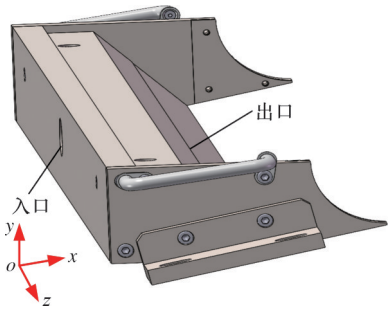



**图2　料槽结构示意图**

**Fig.2　Schematic diagram of the feed chute structure**

陶瓷流延浆料的流变行为遵循Herschel-Bulkley模型[13]，其本构方程表达式为

$$\tau=\tau_0+k\left(\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z}\right)^n \qquad n>0 \tag{1}$$

式中：$\tau$为剪切应力；$\tau_0$为屈服应力；$k$为稠度系数；$\mathrm{d}v/\mathrm{d}z$为速度梯度；$n$为流动行为指数。

根据纳维-斯托克斯方程，$x$方向动量方程为

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}=\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}z} \tag{2}$$

式中：$\mathrm{d}p/\mathrm{d}x$为流向压力梯度，令$\Delta p=\mathrm{d}p/\mathrm{d}x$，且$\Delta p\leqslant 0$时压力沿流动方向降低，驱动流体流动。

### 1.2 屈服区判定

当剪切应力$\tau\leqslant\tau_0$时，流体处于屈服区，速度梯度$\mathrm{d}v/\mathrm{d}z=0$，速度均匀[14]。设$z_0$为屈服区半宽，则有

$$v(z)=v_{\mathrm{yield}}\qquad z\leqslant z_0 \tag{3}$$

式中：$v_{\mathrm{yield}}$为屈服区的速度，且其数值为常数。

### 1.3 流动区速度分布

当$\tau>\tau_0$时，流体进入流动区($z>z_0$)，结合Herschel-Bulkley模型，动量方程变为

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\left[\tau_0+k\left(\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z}\right)^n\right] \tag{4}$$

在式(4)等号两边对$z$积分，得到

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}z+C_1=\tau_0+k\left(\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z}\right)^n \tag{5}$$

式中：$C_1$为积分常数。

流体在对称面($z=0$)上的速度梯度为0，即

$$\left.\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z}\right|_{z=0}=0 \tag{6}$$

将式(6)代入(5)可得

$$C_1=\tau_0 \tag{7}$$

进而将式(5)写为

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}z=k\left(\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z}\right)^n \tag{8}$$

由于$\mathrm{d}p/\mathrm{d}x<0$，且$z\geqslant 0$，$z$轴正方向需要为正，则有

$$\left(\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z}\right)^n=-\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}\frac{z}{k} \tag{9}$$

整理可得

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z}=\left(-\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}\frac{z}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{10}$$

设壁面到对称面的距离为$w$，依据壁面无滑移条件对式(10)进行积分，可得

$$v(z)=\int_z^w\left(-\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}\frac{z}{k}\right)^{\frac{1}{n}}\mathrm{d}z \tag{11}$$

进而整理得到

$$v(z)=\frac{n}{n+1}\left(-\frac{\Delta p}{k}\right)^{\frac{1}{n}}\left(w^{\frac{n+1}{n}}-z^{\frac{n+1}{n}}\right) \tag{12}$$

综上可得

$$v(z)=\begin{cases}v_{\mathrm{yield}} & z\leqslant z_0\\ \dfrac{n}{n+1}\left(-\dfrac{\Delta p}{k}\right)^{\frac{1}{n}}\left(w^{\frac{n+1}{n}}-z^{\frac{n+1}{n}}\right) & z>z_0\end{cases} \tag{13}$$

由式(13)可以看出，在狭缝流动过程中，陶瓷浆料的出口速度分布呈现出显著的“抛物线形”特征，具体表现为中心区域流速最大值与近壁面区域流速最小值之间存在显著差异。进一步分析得到，压力梯度$\Delta p$是影响出口速度分布的关键调控因素，而对于不同流变特性的陶瓷浆料体系，其出口速度分布规律主要受控于流变参数(稠度系数$k$和流动行为指数$n$)的协同作用。从流道结构设计的角度来看，该压力梯度在物理层面上直接反映了料槽狭缝流道的几何尺寸变化。

需特别指出的是，当前所建立的料槽出口速度数学模型对浆料流变特性的时变性、颗粒间相互作用等细微影响因素进行了简化处理。为突破上述理论局限，本文采用FLUENT软件开展料槽流场模拟，研究浆料流变参数与料槽流道几何结构参数对出口速度均匀性的影响规律，并结合RSM对料槽流道几何结构参数进行优化。

## 2 有限元模型分析

### 2.1 几何模型的处理及网格划分

为简化模型并保障模拟效率，建立仿真模型时保留料槽(图2)内影响流体流动的关键结构，忽略微弱辅助结构，经流体域抽取获得流动区域几何模型。图3展示了网格划分后的流体域计算模型。该模型采取关键区域加密、非关键区域简化设计的方式，在保证精度的前提下降低了计算复杂度。

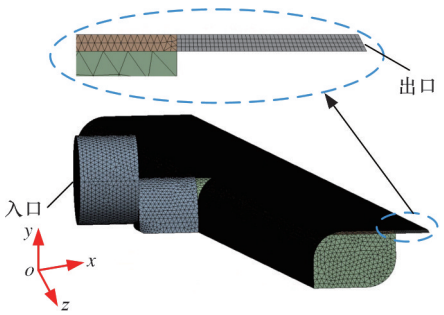



**图3 流体域网格模型**

**Fig.3 Mesh model of the fluid domain**

### 2.2 仿真设置

依据LYL型陶瓷流延机料槽的实际工艺参数，基于FLUENT软件开展料槽流场仿真模拟，具体参数如下：入口速度为3.89 mm/s，出口采用压力控制模式；浆料密度为3.4 g/cm$^3$，屈服应力阈值为0.1 Pa，临界剪切速率为100 s$^{-1}$，并选用Herschel-Bulkley本构方程对其浆料流变行为进行描述。

### 2.3 结果分析

陶瓷浆料流经料槽出口后，其横向速度分布呈现显著的非均匀性特征，如图4所示。为定量表征上述速度非均匀现象，本研究基于流体力学连续性原理，定义出口速度不均匀系数$r$作为该现象的评价指标，其表达式如下：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{q}\sqrt{(v_i-\bar{v})^2}}{\sum_{i=1}^{q}v_i} \tag{14}$$

式中：$v_i$为第$i$个料槽出口监测点的速度；$\bar{v}$为料槽出口速度平均值；$q$为监测点数量。

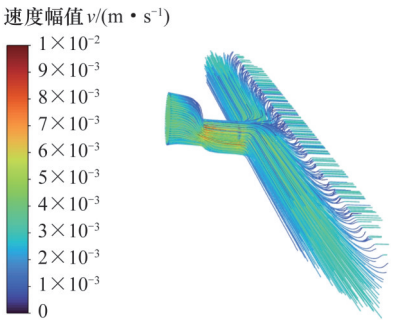
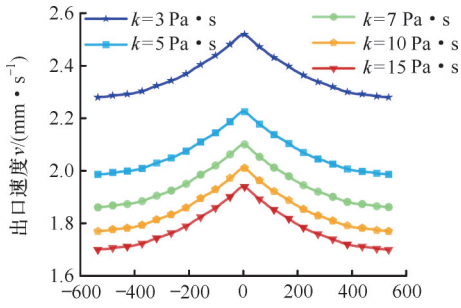



**图4　料槽内部流场典型模拟结果**

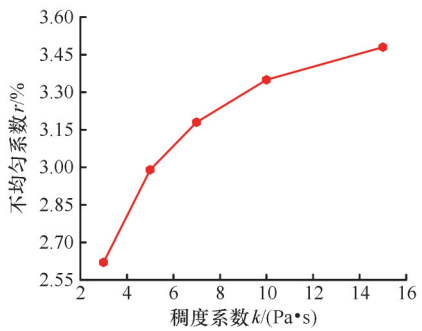
**Fig.4　Typical simulation results of the flow field inside the feed chute**

### 2.3.1　稠度系数对出口速度的影响

对不同稠度系数下浆料的速度分布特性展开了系统研究。通过提取料槽出口截面的平均速度数据，计算得到了不同稠度系数对应的出口速度不均匀系数，相关结果如图5所示。由图5可知，随着稠度系数$k$的增大，浆料在出口处的速度呈现逐渐减小的趋势，同时其速度均匀性也随之变差。从流体力学特性的角度来看，稠度系数是表征流体非牛顿特性的关键参数，其数值增大意味着浆料内部的黏性阻力显著增大，在相同流动条件下更难获得较高流速，从而导致出口速度降低。黏性阻力的不均匀分布会加剧速度梯度，使得速度均匀性降低。




(a)出口速度分布曲线



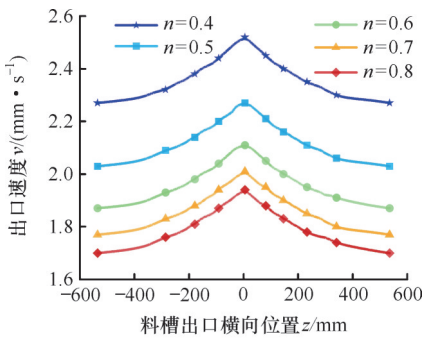

(b)不均匀系数

**图5　稠度系数对出口速度的影响**

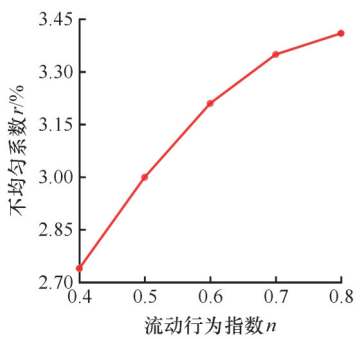
**Fig.5　Effect of consistency coefficient on outlet velocity**

### 2.3.2　流动行为指数对出口速度的影响

为研究不同流动行为指数$n$对浆料速度分布规律的影响，提取了料槽出口截面的平均速度数据，并基于此计算得到不同流动行为指数下的出口速度不均匀系数，相关结果如图6所示。由图6可见，随着流动行为指数$n$的增大，浆料在出口处的速度呈现逐渐减小的趋势，同时其速度均匀性也随之变差。结合非牛顿流体的流动特性，原因如下：流动行为指数$n$是描述流体偏离牛顿流体特性的重要参数，对于假塑性流体，$n$值增大意味着流体剪切变稀特性减弱，在相同流动条件下流体内部的剪切阻力变化规律发生改变，进而导致出口速度降低；同时，流动行为指数的变化会影响流场内部的速度梯度分布，$n$值增大时，流场中速度的空间差异性更加显著，最终导致速度均匀性降低。




(a)出口速度分布曲线




(b)不均匀系数

**图6　流动行为指数对出口速度的影响**

**Fig.6　Effect of flow behavior index on outlet velocity**

## 3　有限元仿真模型的实验验证

### 3.1　实验原理及过程

本实验基于浆料质量与出口速度在固定截面积下的正比关系，通过横向分区收集浆料质量并反推速度分布。将宽度为1080 mm、出口截面高度为1 mm的狭缝均匀地划分为10个宽度为108 mm的区域，采用硅胶条分隔塑料槽并保持出口间距为5 mm，如图7所示。在料槽入口速度为3.89 mm/s的稳定流场条件下，设定60 s收集时间以确保单槽浆料体积不小于5 mL。通过称量获得

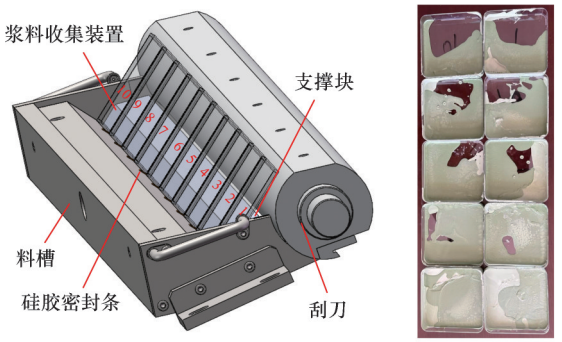
各分割区域收集的浆料质量(表1),计算出各分区的平均出口速度,其表达式如下:

$$v_j=\frac{q_j}{S_j} \tag{15}$$

$$q_j=\frac{m_j}{\rho t} \tag{16}$$

$$S_j=w_j h_j \tag{17}$$

式中:$m_j$为第$j$段分割区域宽度的浆料质量,g;$\rho$为浆料密度,g/cm$^3$;$q_j$为第$j$段分割区域宽度的体积流量,mL/s;$t$为时间,s;$S_j$为第$j$段分割区域宽度的横截面积,mm$^2$;$v_j$为第$j$段分割区域宽度的平均流速,mm/s;$w_j$为第$j$段分割区域的宽度,mm;$h_j$为第$j$段分割区域的狭缝高度,mm。




(a)实验结构示意图　　(b)所收集的浆料

**图7　实验结构及所收集浆料状态示意图**

**Fig.7　Schematic of experimental setup and collected slurry state**

**表1　实验结果**

**Tab.1　Experimental results**

| 塑料槽编号 | 浆料质量/g |
|---|---|
| 1 | 18.99 |
| 2 | 19.20 |
| 3 | 19.72 |
| 4 | 20.34 |
| 5 | 21.39 |
| 6 | 20.97 |
| 7 | 20.34 |
| 8 | 19.61 |
| 9 | 19.09 |
| 10 | 18.88 |

通过对式(15)~式(17)进行推导,得到

$$v_j=\frac{m_j}{\rho w_j h_j t} \tag{18}$$

将各分区的相关参数代入式(18),求出各分区中心点处的平均速度,最终以横向位置-速度曲线呈现分布特征。

### 3.2　流变实验及对应工况仿真

利用移液器量取验证实验中所用的浆料,采用称量法测得其密度为1.61 g/cm$^3$。利用MCR301型流变仪表征浆料的流变特性,结果如图8所示。基于最小二乘法拟合实验数据,得到Herschel-Bulkley本构模型参数如下:当剪切速率$\gamma$为100 s$^{-1}$时,稠度系数$k$为10 Pa·s,流动特性指数$n$为0.72,屈服应力阈值为0.09 Pa。验证实验工况所对应的仿真模拟中,浆料物理参数采用上述实测值,其余参数设置同2.2节,并计算得到横向位置-速度分布曲线。

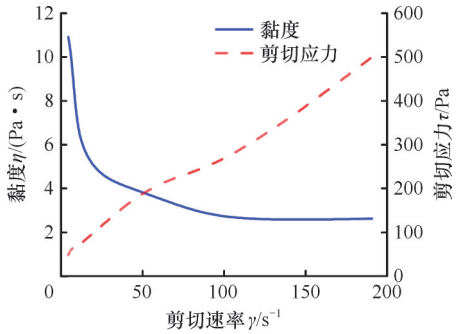



**图8　流变曲线**

**Fig.8　Rheological curve**

### 3.3　结果分析

验证实验与对应工况下仿真模拟所获取的横向位置-速度曲线见图9。由图9可知,实验测量数据与仿真模拟数据之间的最大相对误差为1%,该偏差范围处于工程仿真模拟的可接受误差区间内。这一结果不仅充分验证了本文所构建有限元模型的较高可靠性,还进一步表明基于该有限元模型推导得出的结论具有实际工程应用价值,为后续相关研究及工程实践提供了可信的模型基础。

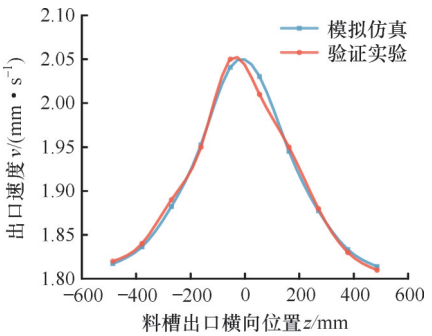



**图9　验证实验与对应工况下仿真模拟结果对比**

**Fig.9　Comparison of validation experiment and simulation results under corresponding conditions**

## 4　料槽流道几何结构参数优化

### 4.1　优化目标

料槽出口速度不均匀系数越小意味着出口速度分布更接近理想均匀状态,这能显著提高流延成型制备的陶瓷基板在宽度方向上的厚度分布均匀性。为改善出口速度不均匀的问题,在优化设计料槽流道几何结构时,将目标函数$R$定义为

$$R=\min r \tag{19}$$

### 4.2　约束条件

基于前文数学模型分析结果，压力梯度$\Delta p$已被确认为影响LYL型流延机料槽出口速度分布的关键控制参数。从流道结构设计视角看，该参数在物理层面直接对应于狭缝流道的几何尺寸变化，具体体现为狭缝阶梯上段长度$L_1$、狭缝阶梯下段长度$L_2$及狭缝阶梯高度$h$（图10）等关键几何参数的组合效应。基于流延成型生产的实际工况要求，采用如下约束条件体系：

$$\left.\begin{aligned}&1.5\ \text{mm}\leqslant L_1\leqslant 5.5\ \text{mm}\\&6\ \text{mm}\leqslant L_2\leqslant 9\ \text{mm}\\&0.2\ \text{mm}\leqslant h\leqslant 0.8\ \text{mm}\end{aligned}\right\}\tag{20}$$

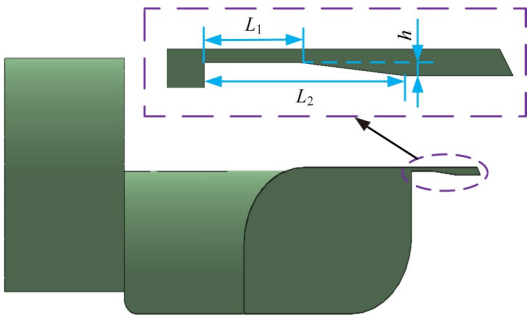



**图10　待优化的流体域几何特征**

**Fig.10　Geometric features of the fluid domain to be optimized**

### 4.3　RSM实验设计

RSM是探究自变量与响应变量函数关系的经典统计工具，实施流程如下：明确关键自变量后，基于RSM的BBD构建实验方案；获取实验结果并导入Design-Expert软件设计矩阵，可自动生成回归分析与方差分析（ANOVA）报告，通过回归分析建立二者量化关系方程，以揭示影响机制与规律[15]。

本研究选取图10中结构参数$L_1$、$L_2$、$h$作为RSM自变量，基于BBD构建含5个中心点的三水平实验方案，因子水平见表2，以料槽出口速度不均匀系数为响应变量开展仿真模拟。仿真数据导入Design-Expert后，先通过回归方程显著性检验及ANOVA判断模型有效性（显著性不足则调整中心点参数并重新设计），再利用软件优化模块求解出口速度均匀性最优的结构参数组合。

### 4.4　RSM实验结果分析

表3系统呈现了宽度方向出口速度不均匀系数$r$的仿真实验结果。本研究通过计算各系数的$P$值对其显著性进行检验，检验标准参照文献[16]设定：$P\leqslant 0.01$表示影响极显著；$0.01<P\leqslant 0.05$表示影响显著；$P>0.05$表示影响不显著。方差分析结果表明，所构建模型的$P$值小于0.0001，达到极显著水平，这一结果验证了所建模型具有显著的统计学意义与可靠性。此外，模型拟合优度指标进一步表明，决定系数$R^2$和调整决定系数$R_a^2$均达到0.99，信噪比（Adeq Precision）大于4。上述指标表明所建立的数学模型具有优异的预测精度和稳健性，能够为非设计工况下的预测分析提供有效支撑。

**表2　RSM实验矩阵**

**Tab.2　RSM experimental matrix**

| 算例 | $L_1$/mm | $L_2$/mm | $h$/mm | $r$/% |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.5 | 7.5 | 0.8 | 0.436 |
| 2 | 1.5 | 7.5 | 0.2 | 2.492 |
| 3 | 5.5 | 9.0 | 0.8 | 0.246 |
| 4 | 3.5 | 7.5 | 0.5 | 1.060 |
| 5 | 1.5 | 7.5 | 0.8 | 0.428 |
| 6 | 3.5 | 6.0 | 0.2 | 2.456 |
| 7 | 1.5 | 9.0 | 0.8 | 0.436 |
| 8 | 1.5 | 7.5 | 0.2 | 2.463 |
| 9 | 5.5 | 6.0 | 0.5 | 0.952 |
| 10 | 5.5 | 9.0 | 0.5 | 0.845 |
| 11 | 5.5 | 7.5 | 0.2 | 2.228 |
| 12 | 3.5 | 6.0 | 0.8 | 0.335 |
| 13 | 3.5 | 7.5 | 0.5 | 1.060 |
| 14 | 3.5 | 7.5 | 0.5 | 1.060 |
| 15 | 3.5 | 7.5 | 0.5 | 1.060 |
| 16 | 3.5 | 7.5 | 0.5 | 1.060 |
| 17 | 3.5 | 9.0 | 0.2 | 2.355 |

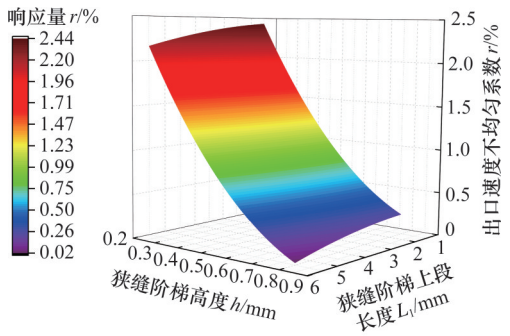
**表3　RSM实验结果**

**Tab.3　Experimental results of RSM**

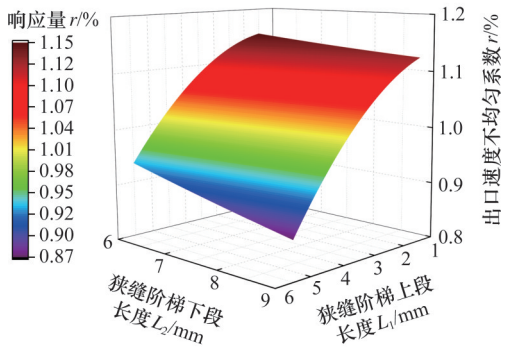
| 序号 | 目标参数 | $P$值 | 序号 | 目标参数 | $P$值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 本文模型 | <0.0001 | 8 | $A^2$ | 0.0151 |
| 2 | A($L_1$) | <0.0001 | 9 | $B^2$ | 0.2872 |
| 3 | B($L_2$) | 0.0375 | 10 | $C^2$ | <0.0001 |
| 4 | C($h$) | <0.0001 | 11 | 决定系数$R^2$ | 0.9997 |
| 5 | AB | 0.042 07 | 12 | 调整决定系数$R_a^2$ | 0.9994 |
| 6 | AC | 0.013 63 | 13 | 信噪比 | 152.9705 |
| 7 | BC | 0.000 48 | | | |

研究结果表明，狭缝结构参数对出口速度均匀性产生了显著影响。具体而言，狭缝阶梯上段长度$L_1$及狭缝阶梯高度$h$对出口速度不均匀系数$r$均表现出极显著的影响效应（$P<0.01$），狭缝阶梯下段长度$L_2$对出口速度不均匀系数$r$表现出显著的影响效应（$P<0.05$）。图11系统揭示了各结构参数对$r$值的影响机制，具体规律分析如下：根据图11a中$h$与$L_1$的交互效应分析结果，$r$值随$L_1$与$h$的减小呈现显著下降趋势，且通过ANOVA验证可知，$h$对$r$值的影响效应量显著大于$L_1$对$r$值的影响效应量。此外，图11b的变化趋势表明，$r$值随$L_2$的增大先呈单调递减特征，但当$L_2$达到

临界阈值后，$r$值转而呈现递增趋势；进一步对比可知，$L_1$对$r$值的调控作用强度显著优于$L_2$对$r$值的调控作用。




(a)$L_1$与$h$对$r$的影响




(b)$L_1$与$L_2$对$r$的影响

**图11 结构参数对$r$值的影响**

**Fig.11 Effect of structural parameters on $r$ value**

基于BBD的优化结果(表4)表明，$L_1$、$h$和$L_2$是影响出口速度均匀性的关键设计参数，它们的交互作用对优化效果具有重要影响。结合图12中优化前后的出口横向速度分布对比，通过式(14)计算得到优化后的出口速度不均匀系数$r$较基准工况时显著降低94%，该优化效果充分验证了所提出优化方法的有效性和工程适用性，为实际生产中的结构参数调控提供了可靠依据。

**表4 RSM优化结果**

**Tab.4 RSM optimization results**

| 参数 | $L_1$/mm | $L_2$/mm | $h$/mm | $r$/% | 综合期望度 |
|---|---|---|---|---|---|
| 原始 | 11.0 | 11.5 | 1.0 | 3.35 | |
| BBD | 5.5 | 7.5 | 0.8 | 0.19 | 0.915 |

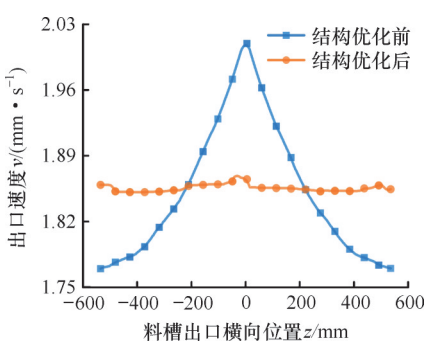



**图12 优化前后出口速度分布对比**

**Fig.12 Comparison of outlet velocity distribution before and after optimization**

## 5 结论

1)基于Herschel-Bulkley本构方程构建了料槽出口速度的解析模型，并采用FLUENT软件对料槽流场进行了仿真模拟。研究结果表明，随着流动行为指数$n$和稠度系数$k$的增大，浆料在出口处的速度逐渐降低，同时其速度均匀性也相应降低。基于解析模型进一步筛选出对料槽出口速度均匀性具有显著影响的流道结构几何参数。

2)为验证料槽流场有限元模型的可靠性，设计了验证实验，并对相关浆料进行了流变特性测试。实验中通过采集料槽出口横向位置的浆料质量数据，反演获得了出口截面的横向速度分布曲线。将该实测结果与数值仿真结果进行对比分析，发现两者具有良好的一致性，从而验证了所构建的理论模型与仿真模型具备较高的可靠性。

3)建立了Box-Behnken响应面优化模型，分析结果表明，各流道结构几何参数对料槽出口速度均匀性的影响程度由高到低依次为：狭缝阶梯高度$h$、狭缝阶梯上段长度$L_1$及狭缝阶梯下段长度$L_2$。在此基础上，求解得到最优参数组合。优化结果表明，改进后的流延料槽出口速度不均匀系数$r$较优化前显著降低了94%。

4)经优化的流道结构可显著提高料槽出口速度分布均匀性，突破了陶瓷流延成型中狭缝宽度方向速度不均导致的基板厚度波动瓶颈，为高精度陶瓷基板(厚度不均匀性小于1 μm)控制提供关键上游设备结构支撑。

后续将系统优化刮涂及干燥工艺参数，构建“料槽—刮涂—干燥”全流程精度调控体系，最终实现基板厚度精度闭环控制。

**参考文献：**

[1] XI Xiaoqian, ZHANG Le, LIU Mingyuan, et al. Surface Energy Matching to Improve the Wetting Behaviour of Aqueous Slurries with Carrier Tapes for the Production of Large YAG Transparent Ceramic Flakes[J]. Ceramics International, 2022, 48(20): 30564-30573.

[2] ZHOU Liang, HU Jianbao, ZHANG Yunhui, et al. Oxidation Behaviors and Mechanisms of $Yb_2SiO_5$-$Yb_2O_3$-SiSiC Ceramic Fabricated by Tape Casting and Reactive Melt Infiltration[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(1): 471-483.

[3] ZHANG L, HU G L, BI X T. Two-phase Flow in Parallel Channels: Mal-distribution, Hysteresis and Mitigation Strategies[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 247: 117044.

[4] 韩洁. 锂电池双腔式狭缝涂布挤压模头内流场分析与多

目标优化[D]. 太原：太原科技大学，2024.
HAN Jie. Flow Field Analysis and Multi-objective Optimisation in a Dual-cavity Slot Die Coating for Lithium Batteries[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2024.
[5] 于玉真，马飞，王璐，等. PVC-U管材挤出机头的流道数值模拟及优化[J]. 工程塑料应用，2020，48(11)：65-69.
YU Yuzhen, MA Fei, WANG Lu, et al. Numerical Simulation and Optimization of Flow Channel of PVC-U Pipe Extruder Head[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11): 65-69.
[6] KURKIN E, PIOQUINTO J G Q, KURKINA E, et al. Heuristic Algorithm for the Topological Optimization of Runner System for the Thermoplastics Injection Molding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 124: 1393-1409.
[7] HAO Xinyu, ZHANG Guangdong, DENG Tong. Improved Optimization of a Coextrusion Die with a Complex Geometry Using the Coupling Inverse Design Method[J]. Polymers, 2023, 15(15): 3310.
[8] SZPISJÁK-GULYÁS N, AL-TAYAWI A N, HORVÁTH Z H, et al. Methods for Experimental Design, Central Composite Design and the Box-Behnken Design, to Optimise Operational Parameters: a Review[J]. Acta Alimentaria, 2023, 52(4): 521-537.
[9] SEOK W, KIM G H, SEO J, et al. Application of the Design of Experiments and Computational Fluid Dynamics to Bow Design Improvement[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(7): 226.
[10] KIM S, LEE J, LEE C. Computational Fluid Dynamics Model for Thickness and Uniformity Prediction of Coating Layer in Slot-die Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5): 2991-2997.
[11] ZHANG Hong, WANG Chenyu, CHAI Yi, et al. Structure Optimisation of Coat-hanger Die Based on the Multi-objective and Design of Experiment Analysis[J]. International Journal of Theoretical and Applied Multiscale Mechanics, 2020, 3(3): 206.
[12] RAZEGHIYADAKI A, ZHANG D, WEI D, et al. Optimization of Polymer Extrusion Die Based on Response Surface Method[J]. Processes, 2020, 8(9): 1043.
[13] LEE M, SHIN K, NAM J. Operating Limit of Vacuum-assisted Slot Die Coating of Herschel-Bulkley Fluids[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 274: 118668.
[14] MURAVLEVA L. Squeeze Flow of Bingham, Casson and Herschel-Bulkley Fluids with Yield Slip at the Wall by Accelerated Augmented Lagrangian Method[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2020, 282: 104320.
[15] 欧阳亚文，赵亦希，李晓凯，等. 大径厚比椭球收口环件回弹分析与模具优化研究[J]. 中国机械工程，2026，37(6)：1497-1507.
OUYANG Yawen, ZHAO Yixi, LI Xiaokai, et al. Springback Analysis and Die Optimization Design of Ellipsoid Rings with Large Diameter-thickness Ratio during Nosing Processes[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(6): 1497-1507.
[16] 邢雷，李新亚，蒋明虎，等. 适用于超低进液量的微型水力旋流器结构优化[J]. 机械工程学报，2022，58(23)：251-261.
XING Lei, LI Xinya, JIANG Minghu, et al. Structure Optimization of Micro-hydrocyclone for Ultra-low Inlet Flow Rate[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(23): 251-261.

（编辑　胡佳慧）

**作者简介：赵　军**，男，1996年生，博士研究生。研究方向为半导体陶瓷基片流延/压延工艺及装备研究。E-mail：15263903869@163.com。**黄华贵***（通信作者），男，1978年生，教授、博士研究生导师。研究方向为先进成形技术与智造装备研究。E-mail：hhg@ysu.edu.cn。

**本文引用格式：**
赵军，王嘉乐，黄华贵，等. 半导体陶瓷流延料槽流场分布特性分析与结构参数优化[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2954-2961.
ZHAO Jun, WANG Jiale, HUANG Huagui, et al. Analysis on Flow Field Distribution Characteristics and Structural Parameter Optimization of Casting Feed Chute for Semiconductor Ceramics [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(11): 2954-2961.

（上接第2953页）

[21] 孙宝福，金有海. 高频直缝焊管成型过程仿真分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2010，34(4)：123-126.
SUN Baofu, JIN Youhai. Simulation Analysis of Shaping Process of High Frequency Longitudinal Electric Resistance Welded Pipe[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(4): 123-126.
[22] 成大先，中国有色工程设计研究总院. 机械设计手册-第2卷[M]. 6版. 北京：化学工业出版社，2016：8-10.
CHENG Daxian. Handbook of Mechanical Design [M]. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2016: 8-10.
[23] 程深圳. 直缝焊管辊弯成型关键技术研究[D]. 无锡：江南大学，2023.
CHENG Shenzhen. Research on Key Technology of Straight Seam Welded Pipe Roll Bending [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
[24] 赵纯锋，傅前进，纪庆高，等. 高强高韧汽车传动轴管双道次W弯曲组合成型工艺的研究与设计[J]. 现代制造技术与装备，2016，52(7)：62-64.
ZHAO Chunfeng, FU Qianjin, JI Qinggao, et al. Research and Design of W Bending Combined Forming Process of High Strength and High Toughness Automobile Ttransmission Shaft Tube [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016, 52(7): 62-64.
[25] 裴新元. 直缝焊管辊弯成型孔型设计及工艺研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2022.
PEI Xinyuan. Research on Pass Design and Technology of Straight Seam Welded Pipe Formed by Roll Bending [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.

（编辑　王艳丽）

**作者简介：王建森***（通信作者），男，1973年生，博士、副教授。研究方向为特种成形装备。E-mail：wajase@163.com。

**本文引用格式：**
王建森，王旭，刘少君，等. 上辊开设中心槽对薄壁焊管辊弯成形质量的影响研究[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2947-2953.
WANG Jiansen, WANG Xu, LIU Shaojun, et al. Influences of Central Grooves in Upper Rolls on Roll-forming Quality of Thin-walled Welded Pipe[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(11): 2947-2953.