

# 搅拌槽内液相层流高效混合的数值模拟

曹宇<sup>1</sup>, 沈学峰<sup>1</sup>, 王建成<sup>1</sup>, 刘志伟<sup>1</sup>, 刘海龙<sup>1\*</sup>  
1.能源与动力工程, 江苏大学, 江苏省, 镇江市

**简介:**机械搅拌作为一种重要的混合技术在化工生产、环保安全、生物制药等领域有着广泛的应用。搅拌效率和流场的分布是衡量搅拌质量的重要指标。然而,在层流搅拌流场中,搅拌桨周期性的扰动产生环形动力流场,搅拌槽内普遍存在混合隔离区,成为实现高效混合的主要障碍。

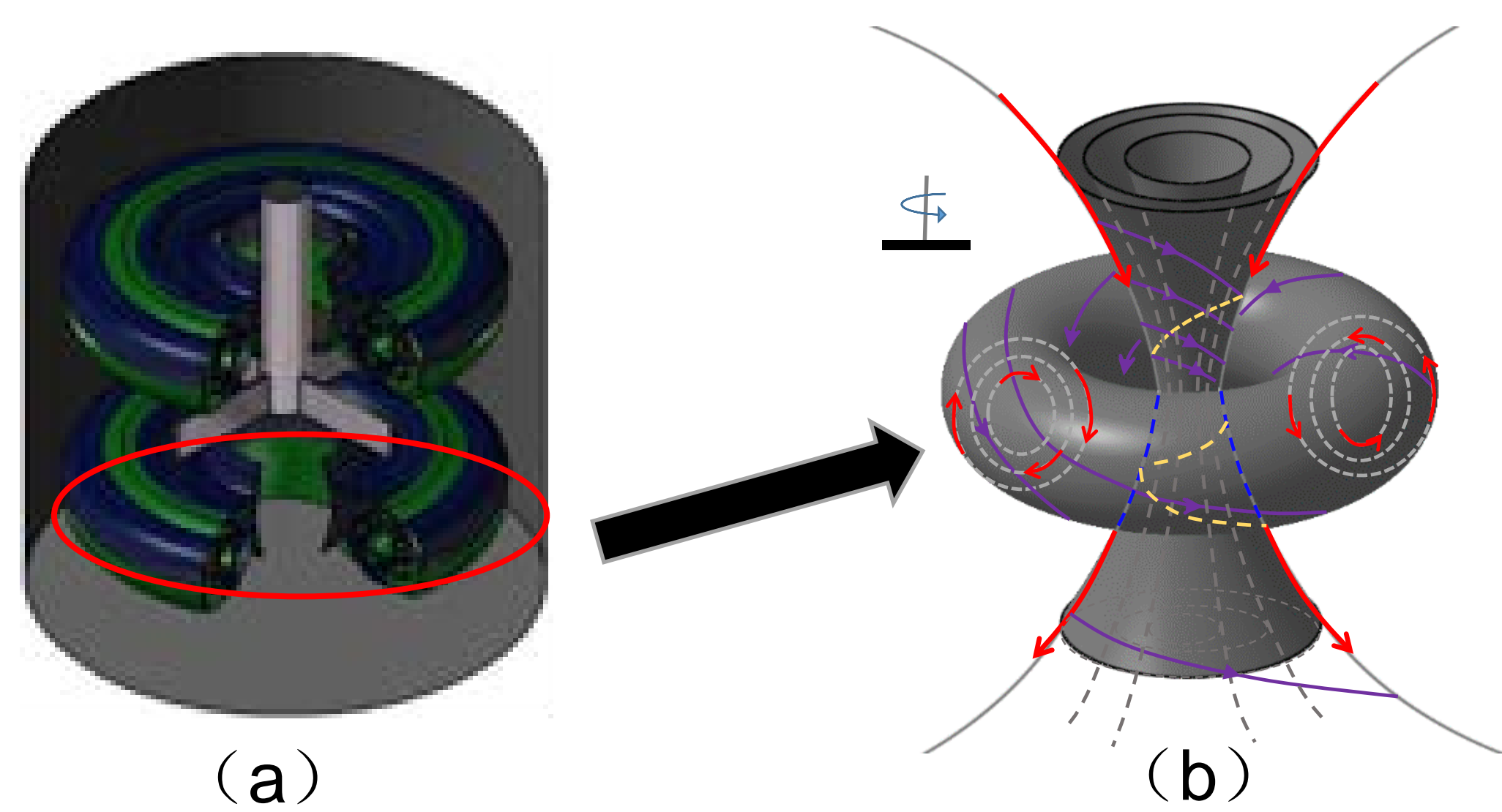


图 1. 层流搅拌的流场结构 (a) 槽内流场结构图 (b) 隔离流场结构图

**计算方法:**搅拌槽内流体流动的基本守恒定律包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。本文的数值模型基于层流流体不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程来模拟中低雷诺数的搅拌。为了耦合电场力的影响,在方程中添加了电场力项。因此,本文数值模拟研究中所求解的 Navier-Stokes 方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot [-P\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_E$$

$$\mathbf{F}_E = q \cdot \mathbf{E}$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}) = \rho_v$$

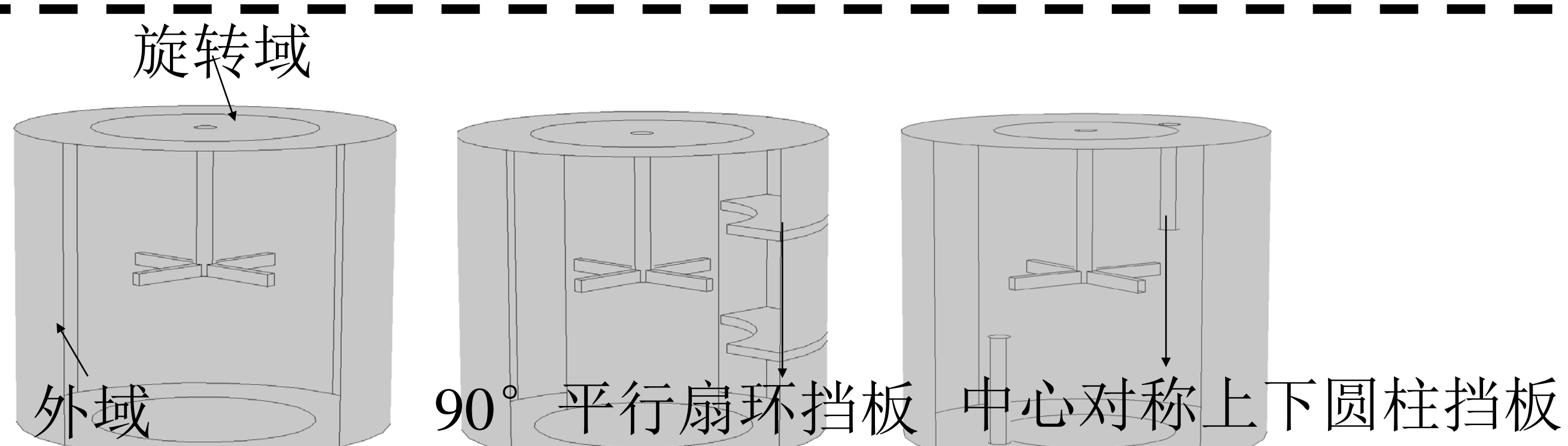


图 2. 不同形状搅拌筒的几何模型的建立 (a) 标准筒 (b) 90° 平行扇环挡板 (c) 中心对称圆柱挡板

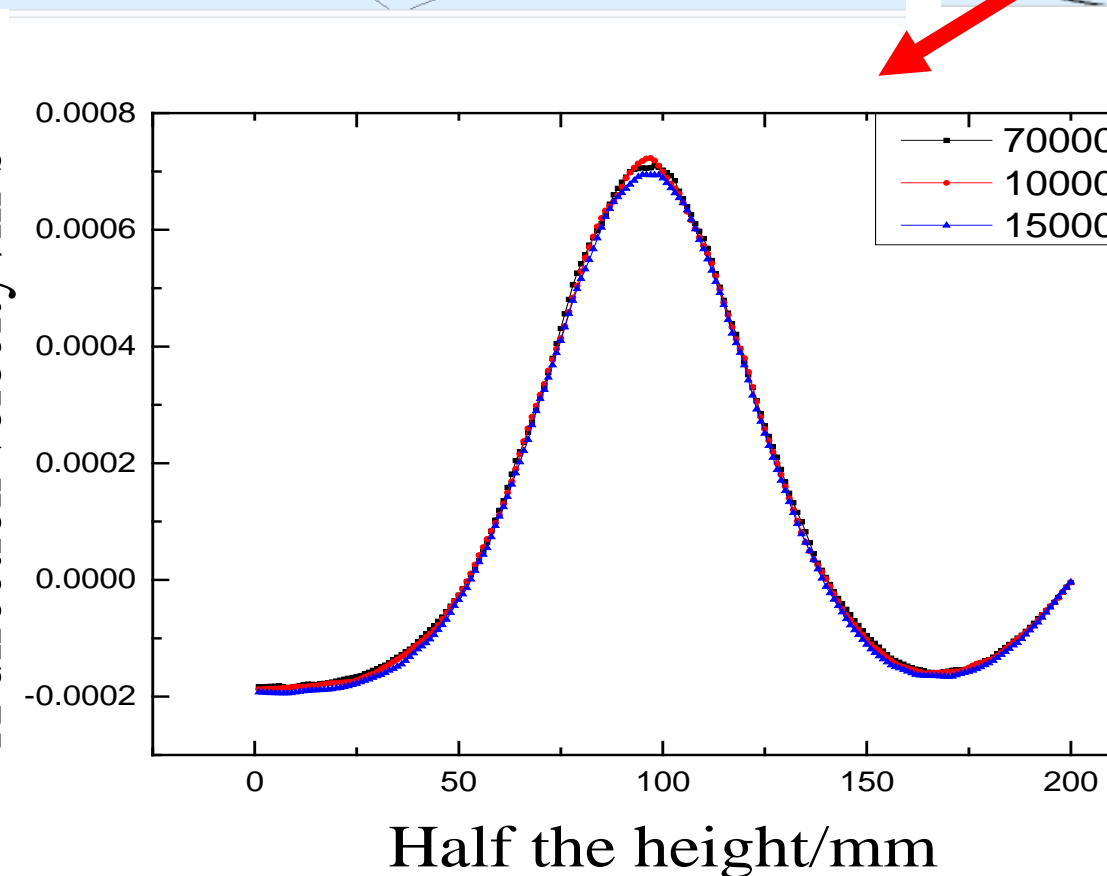
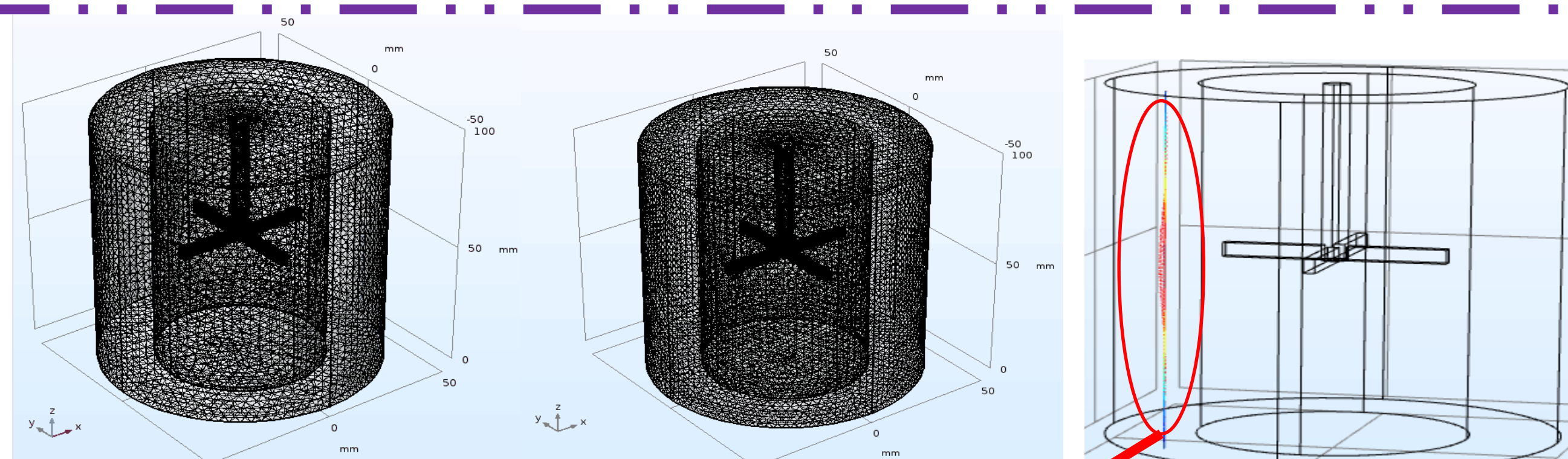


图 3. 网格划分与线性无关

## 结果:

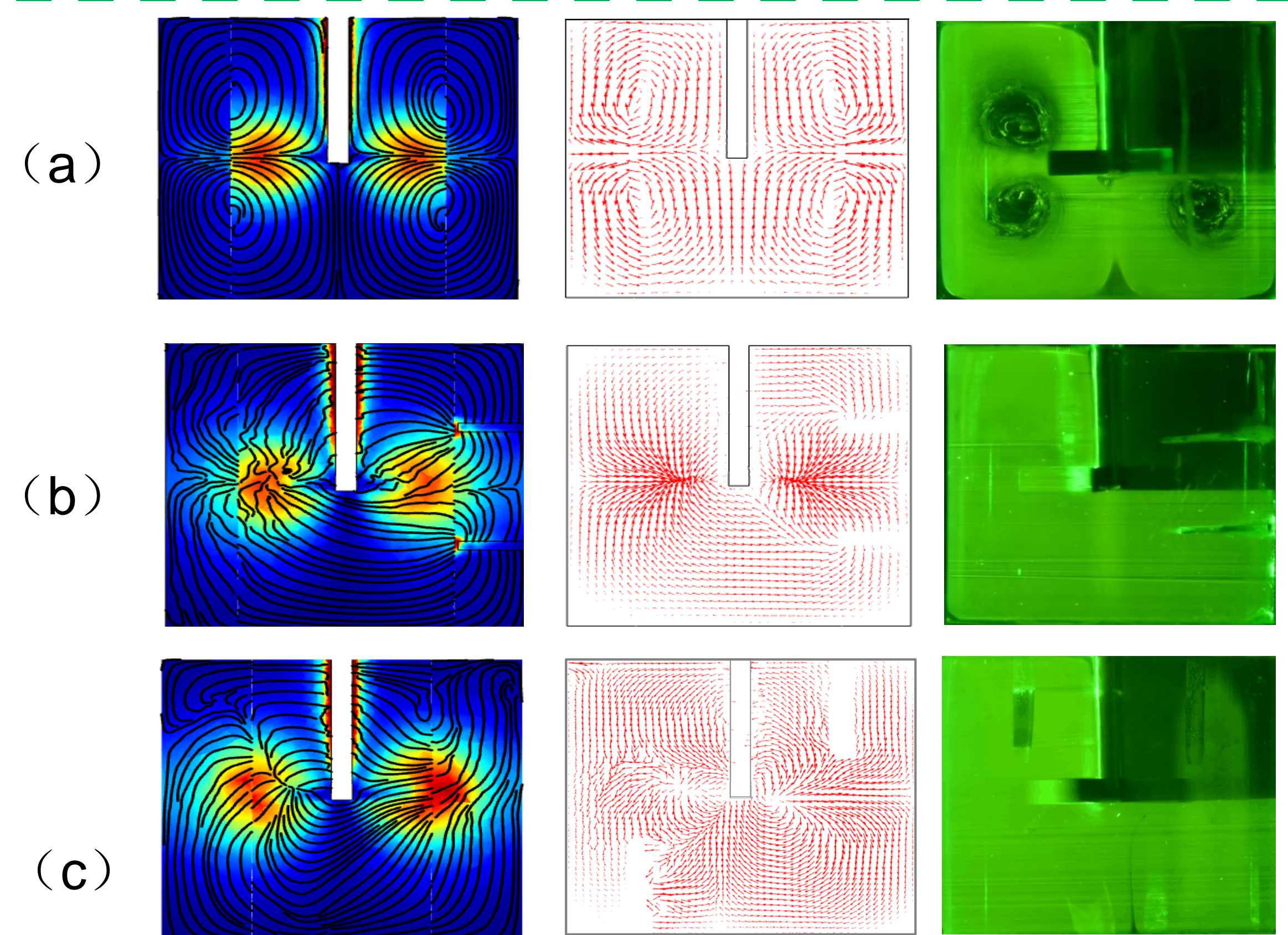


图 4. 模拟流线及速度场图、二维速度矢量图和 PILF 实验图像 (a) 标准筒 (b) 90° 平行扇环挡板 (c) 中心对称圆柱挡板

变量	数值	单位
密度	1260	Kg/m <sup>3</sup>
动力粘度	1.49	Pa.s
转速	150	r/min
雷诺数	4.2	1

表 1. 模拟参数

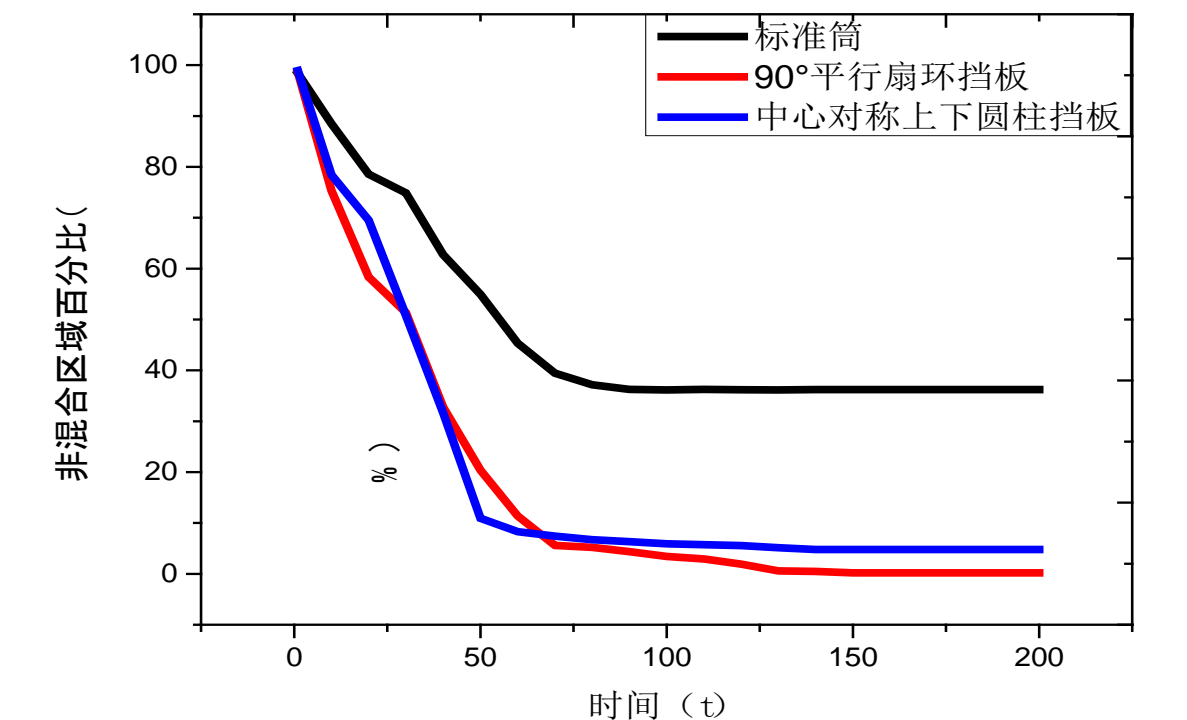


图 5. 挡板结构的混合效率图

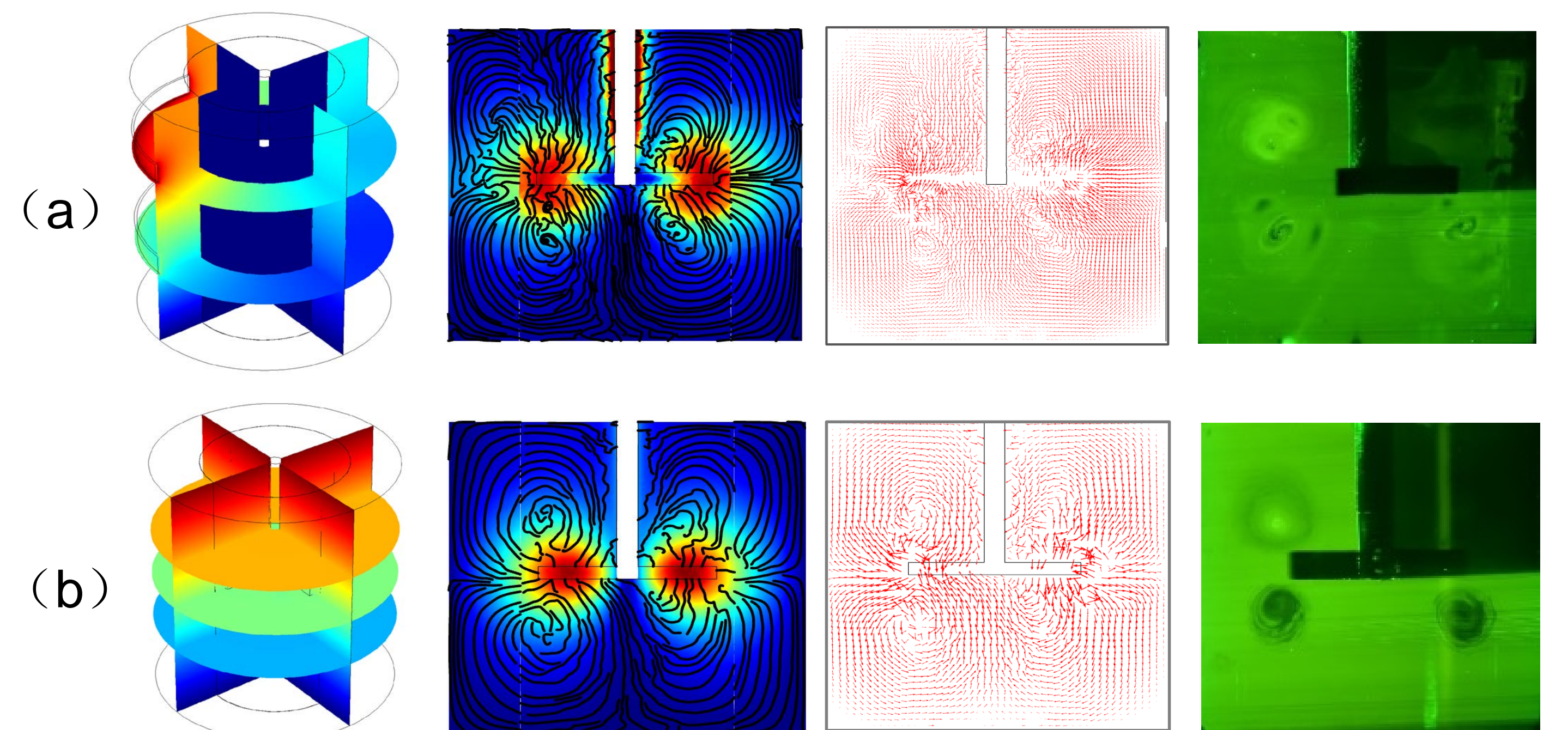


图 6. 模拟流线及速度场图、二维速度矢量图和 PILF 实验图像 (a) 耦合带状电场 (b) 耦合平行板电场

变量	数值	单位
密度	1260	Kg/m <sup>3</sup>
动力粘度	1.49	Pa.s
电压	5	KV
相对介电常数	1	1

表 2. 模拟参数

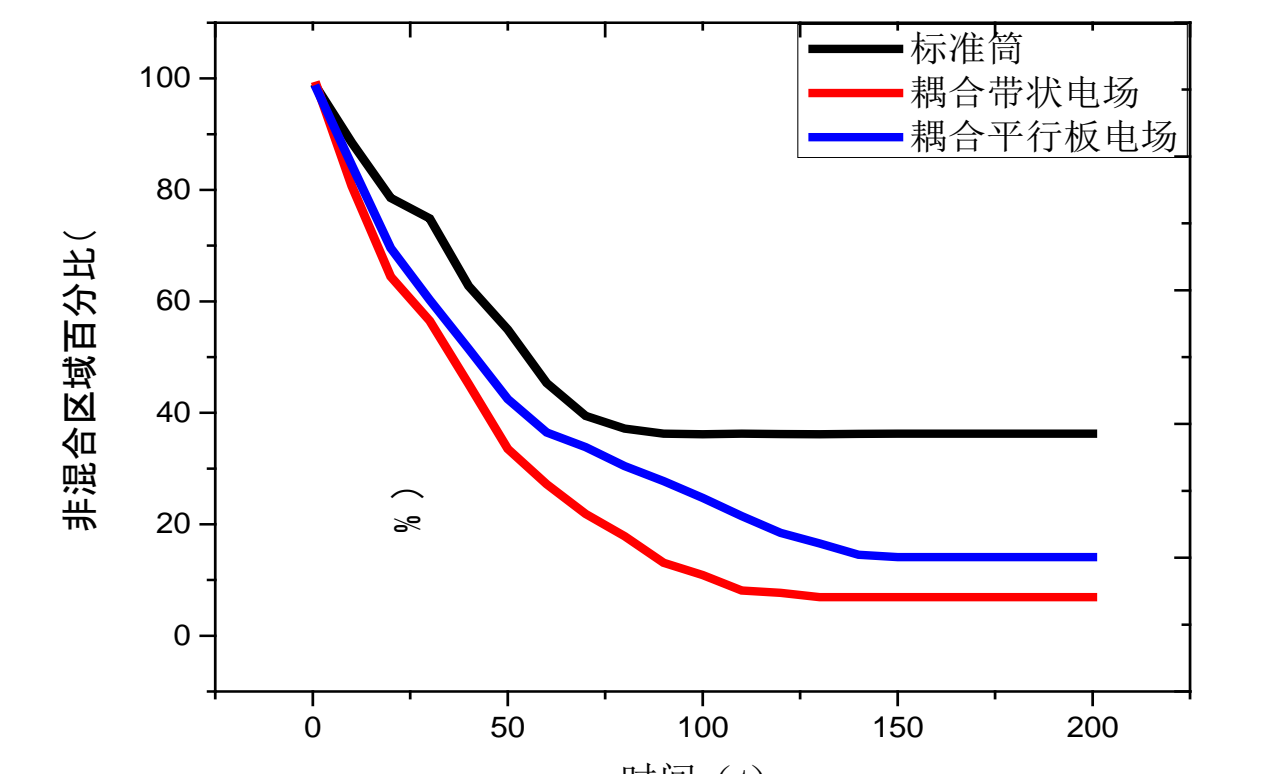


图 7. 耦合不同形式电场的混合效率图

**结论:**通过 CFD 数值模拟指导优化挡板的特定位置并且根据电流体力学的原理耦合不同形式的电场,使流体中流场结构发生改变,实现混合流场的扰动,诱导更多的流体进入混沌混合,使层流流体的混合效率大幅度提高,也同时为高效层流搅拌混合器的设计和工业应用提供了理论依据。

## 参考文献:

1. Sharp K V, Adrian R J. PIV study of small-scale flow structure around a Rushton turbine[J]. AIChE Journal, 2001, 47(4): 766-778.
2. Escudie R, Line A. Experimental analysis of hydrodynamics in a radially agitated tank[J]. AIChE Journal, 2002, 49(3): 585-603.
3. Jung S Y, Ahn K H, Kang T G, et al. Chaotic Mixing in a Barrier - Embedded Partitioned Pipe Mixer[J]. AIChE Journal, 2017, 64(1):717-729.