

聚合物加工设备内壁射流清理工艺 设计优化

余威佑¹, 辛瑞峰¹, 张昊¹, 李金芳¹, 张国辉^{2*}, 张冰^{1*}

(1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029 ;

2. 山西北方兴安化学工业有限公司, 山西 太原 030008)

摘要: 为提高旋转式射流喷头的清洗效率, 使用 Fluent 对喷头的倾斜角度和旋转速度进行模拟仿真, 以对旋转式射流喷头的结构进行参数优化。仿真结果表明: 随着喷嘴倾斜角度增大, 最大冲击压力逐渐降低, 当喷嘴倾斜角度超过 20° 时, 最大冲击压力下降明显。喷头旋转速度对最大冲击压力和射流路径均有影响, 当喷头转速大于 180 r/min 时, 冲击压力下降明显, 当转速大于 240 r/min 时射流偏移路径逐渐增大。在保证既有足够的打击力, 又能驱动喷头旋转的前提下, 喷嘴倾斜角度设定在 20° 左右, 旋转速度设定在 180 r/min 左右最佳。

关键词: 旋转喷头; 水射流; 模拟仿真; 参数优化

中图分类号: TQ320.61

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)05-0038-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.05.008

0 引言

聚合物加工设备包括反应釜、捏合机等混合设备, 柱塞挤出机、螺杆挤出机等成型设备以及旋转流变仪、毛细管流变仪等物性检测设备, 如图 1 所示。由于聚合物材料具有高粘性特点, 加工过程结束后设备内部会残留大量物料, 目前主要依靠人工采用刮刀、铲子等方式清理^[1-2], 不仅费时费力而且危险性高。

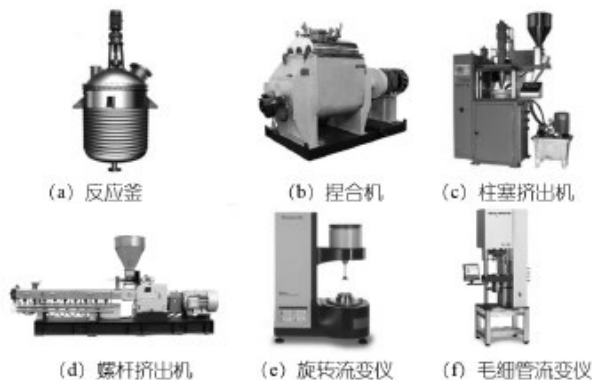


图 1 聚合物加工设备

水射流清理技术具有高效、安全性高的优点, 广泛应用于石油化工、电力、造船、建筑等领域^[3], 也作为化工反应设备化工反应釜、换热器、塔器的清洗方式。因此针对聚合物加工设备内壁清理任务需求, 采用旋转式射流喷头对设备内壁残留的高粘度物料进

行射流清理的相关工艺技术日益受到重视。旋转式射流喷头由前置喷嘴、后置喷嘴、旋转体和进水口组成^[4], 如图 2 所示。其中, 前置喷嘴主要用于清洗前方污垢, 后置喷嘴则在提供旋转动力的同时辅助清洗。当喷头工作时, 喷嘴会绕自身轴线旋转, 并配合喷杆进给运动实现清理, 如图 3 所示。



图 2 旋转式射流喷头

为提高旋转式射流喷头的清洗效率并节约水用量, 需要对旋转喷头结构进行优化, 对喷嘴的倾斜角度、旋转速度进行计算分析以确定其最佳结构参数。

作者简介: 余威佑(1999—), 男, 硕士研究生在读, 主要研究方向为聚合物加工工艺与装备。

* 为通讯作者

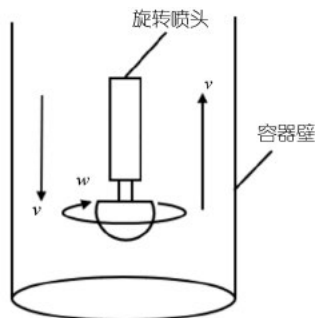


图3 旋转喷头清洗运动示意图

1 流场模型构建

1.1 几何模型与网格划分

将旋转喷头仿真区域划分为内部流场和外部流场，其中，喷头内部流场位于旋转区域，而喷头外部流场处于静止区域。使用 SolidWorks 建立的旋转喷头仿真模型如图4所示，对于超出喷嘴部分的流体域在计算中跟随喷头一起转动，目的是在之后的求解设置中便于处理旋转域和静止域的交界面。

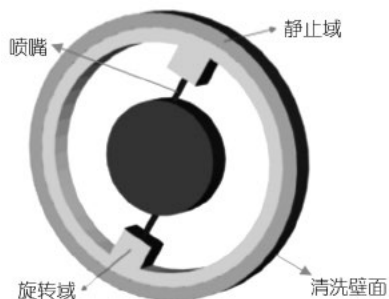


图4 几何模型

将模型导入到 Mesh 模块进行网格划分，采用四面体非结构网格划分。考虑到喷嘴处压力和速度梯度变化较大，需要在此区域的网格进行加密，设置尺寸为 0.2 mm，外流场区域设置尺寸为 0.8 mm，旋转喷头网格模型如图5所示。

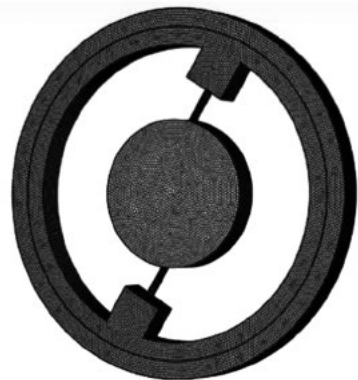


图5 网格模型

1.2 仿真参数设置

对于旋转或曲率效应显著的流动，选取 Realizable 模型能表现出更好的性能^[5]。空气和水在常温下它们是互不相融的两组分，因此可以选择 VOF 模型。设置多相流的第一相为空气，第二相为水。将旋转域和静止域的接触面设置为 interface，以便两相共用一个接口进行相互作用。采用瞬态计算，通过滑移网格来实现喷头的旋转运动，迭代步长设置为 0.000 1 s，迭代步数为 1 000 步。

2 流场数值模拟及结果分析

2.1 喷嘴倾斜角度数值模拟及结果分析

以喷头偏转半径和转速为恒定变量，探究喷嘴倾斜角度对射流流场的影响。分别对表1中的5组数据进行模拟仿真，研究不同的喷嘴倾斜角度对射流速度和压力的变化情况。

表1 喷嘴倾斜角度数值模拟方案

序号	倾斜角度 / (°)	喷头偏转半径 / mm	转速 / (r·min ⁻¹)
1	0	20	180
2	10	20	180
3	20	20	180
4	30	20	180
5	40	20	180

射流的反冲力在圆周切向方向上的力即驱动喷头旋转的力，当喷嘴倾斜角度等于 45° 时射流反冲力在圆周切向方向和径向方向的分力相等。当喷嘴倾斜角度越小，打击壁面的力越大，用于驱动喷头的力越小。因此，在保证即能有足够打击力，又能驱动喷头旋转的前提下，喷嘴的倾斜角度应小于 45°。图6为不同倾斜角度的喷嘴轴向截面的速度与压力云图。从图6可以看出随着喷嘴倾斜角度的增大，喷嘴内部高流速区域减小，低流速区域增加，这是因为随着喷嘴倾斜角度的变化，流体速度的径向和切向分量发生重新分配，一部分流速转化为沿倾斜方向的速度，使原本的高流速区域减小，低速区域相对增大。

速度分布曲线如图7(a)所示，可以看出射流离开喷嘴后速度先保持一段等速区域，然后逐渐下降，直至速度减为0，越接近壁面，速度下降趋势越明显。喷嘴倾斜角度小于等于 20° 时，速度下降趋势基本一致，喷嘴倾斜角度大于 20° 时，射流速度在等速区域之后急剧下降，而后半段的下降趋势又与小于 20° 时基本保持一致。压力分布曲线如图7(b)所示，可以看出射流在离开喷嘴后压力缓慢上升，在壁面附近压力

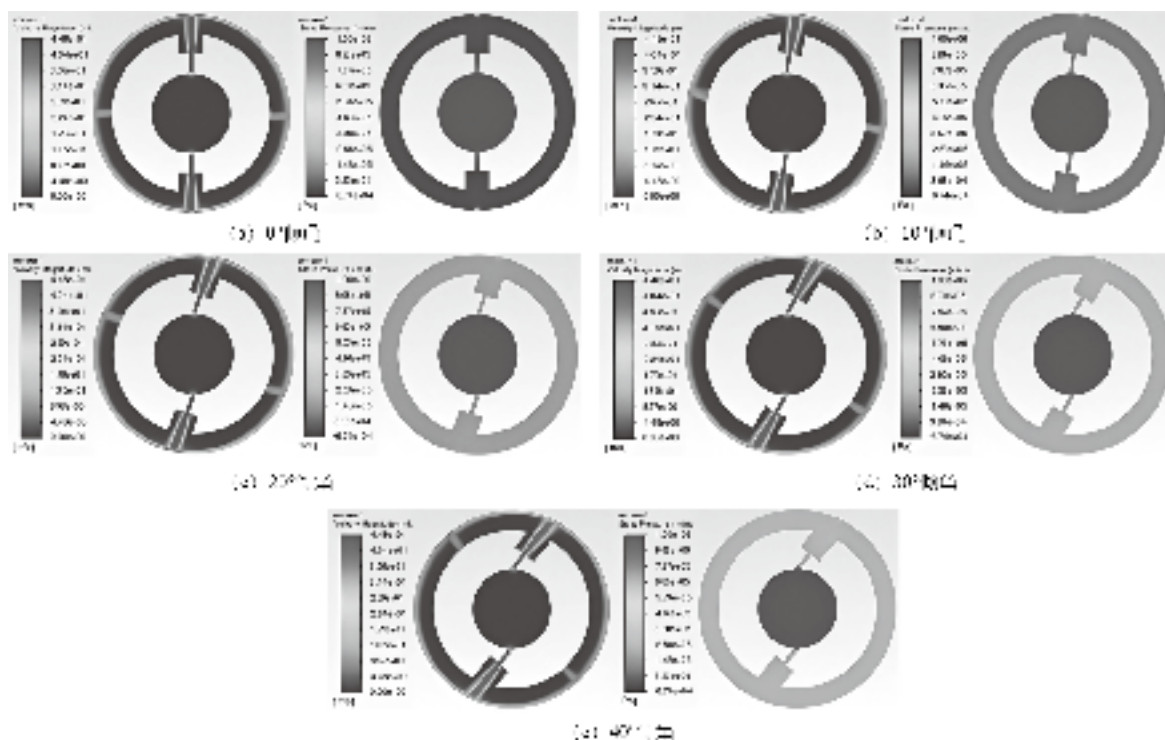


图6 不同倾斜角度喷嘴在轴向横截面的速度和压力云图

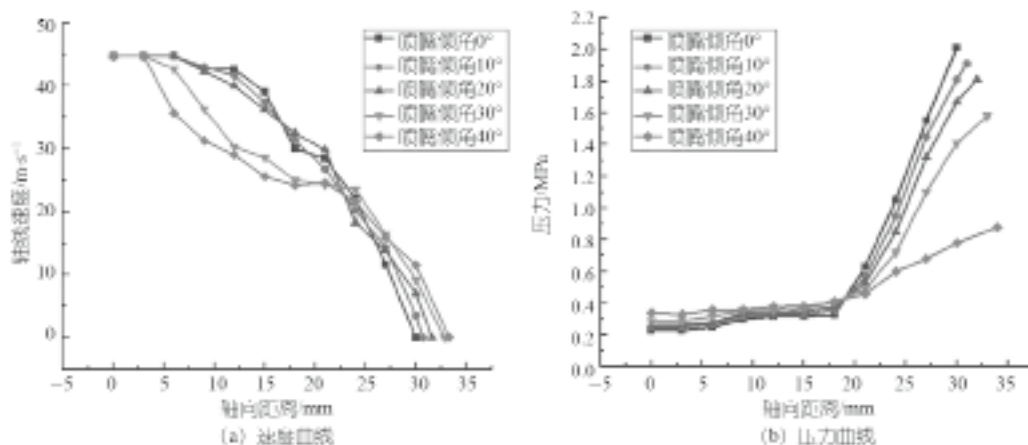


图7 不同倾斜角度喷嘴轴线的速度、压力分布

急剧增长，这一阶段为流体动能迅速转化为静压能的过程。

喷嘴倾斜角度与最大冲击压力的变化曲线如图8所示，随着喷嘴倾斜角度的增加，最大冲击压力逐渐降低。根据旋转喷头的结构可知，倾斜角度越大，喷嘴出口到打击壁面的距离越远，当倾斜角度为 0° 时，最大压力为2.01 MPa，当倾斜角度为 10° 时，最大压力为1.89 MPa，降低了6%，当倾斜角度为 20° 时，最大压力为1.83 MPa，降低了8.9%。随着倾斜角度的增大，最大压力降低的幅度逐渐增加，当倾斜

角度为 30° 和 40° 时，最大压力分别降低了19.5%和56.7%。综合以上分析，在保证即能有足够打击力，又能驱动喷头旋转的前提下，喷嘴的倾斜角度设定为 20° 左右较为合理。

2.2 喷头旋转速度数值模拟及结果分析

以喷头偏转半径和转速为恒定变量，探究喷头旋转速度对射流速度和压力的影响。分别对表2中的5组数据进行模拟仿真，研究不同的喷头旋转速度对射流速度和压力的变化情况。

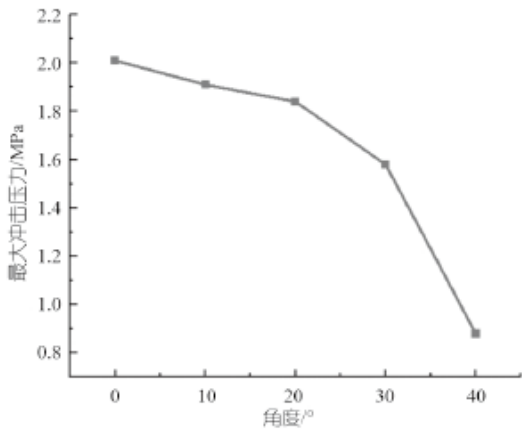


图8 喷嘴最大压力随倾斜角度的变化

表2 喷头转速数值模拟方案

序号	角度/(°)	喷头偏转半径/mm	转速/(r·min ⁻¹)
1	70	20	120
2	70	20	180
3	70	20	240
4	70	20	300
5	70	20	360

图9为喷头不同转速下打击壁面的速度和压力云

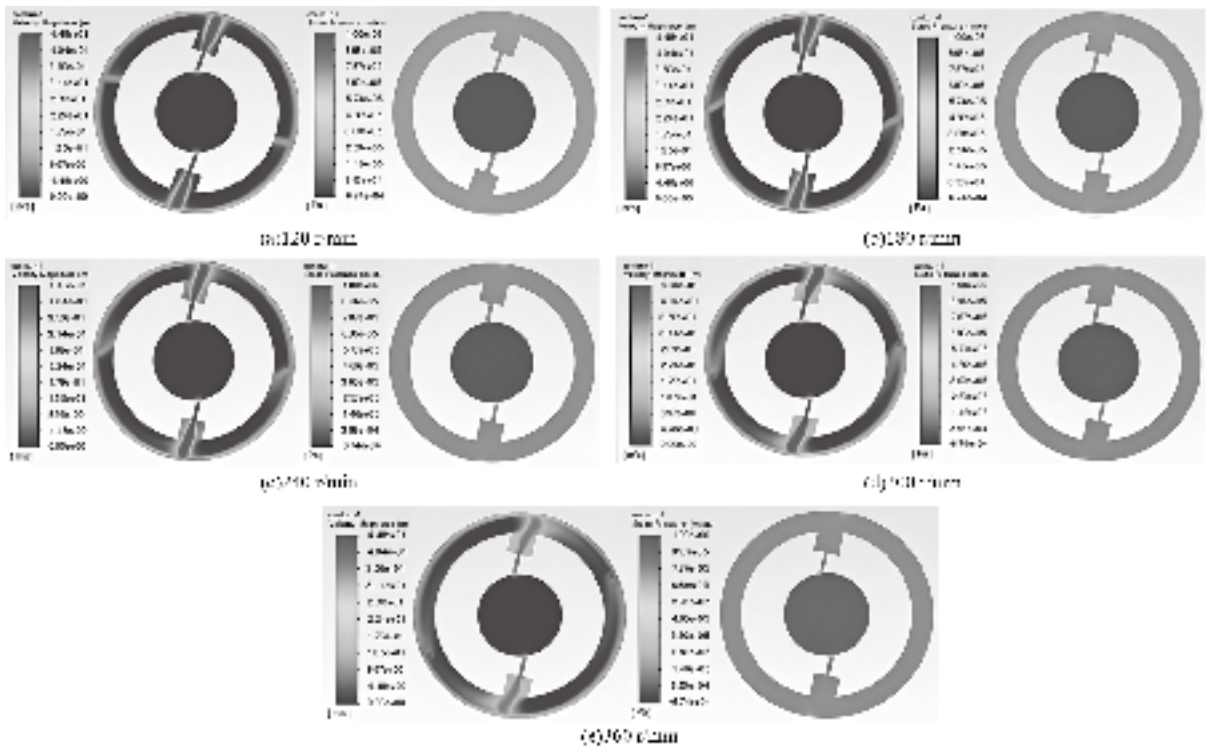


图9 不同转速下旋转喷头速度的压力云图

3 结论

通过对旋转式射流喷头的倾斜角度和旋转速度进行模拟仿真,主要得出以下结论:

(1) 随着喷嘴倾斜角度增大,最大冲击压力逐

图。从图中可以看出,当转速小于 240 r/min 时,射流几乎不会受到影响,流体从喷嘴出口可以直线到达壁面。当转速等于 240 r/min 时,射流喷射路径出现轻微偏移。随着转速继续增加,偏移角度增大。当转速等于 360 r/min 时,偏移角度达到 45° 左右,可以明显看出,射流的速度和压力都大大降低,射流的连续性也受到严重破坏。这是由于随着喷头转速的增加,在空气阻力的作用下,射流与空气之间的能量交换越发剧烈,造成射流能量的损失。

射流打击壁面的最大压力与喷头转速变化如图 10 所示。由图中可以看出,壁面的最大打击压力在喷头转速大于 180 r/min 之后急剧下降,当转速为 300 r/min 时,最大压力为 1.1 MPa,压力损失接近 50%。喷头转速过快会造成射流雾化,打击压力下降,喷头旋转速度过慢会造成水资源浪费,降低清洗效率,综合以上分析,旋转喷头转速限制在 180 r/min 左右较为合适。

渐降低。当倾斜角度为 0° 时,最大冲击压力为 2.01 MPa;当倾斜角度为 10° 时,最大压力为 1.89 MPa,相对降低了 6%;当倾斜角度为 20° 时,最大冲击压力为 1.83 MPa,相对降低了 8.9%;随着倾斜角度的

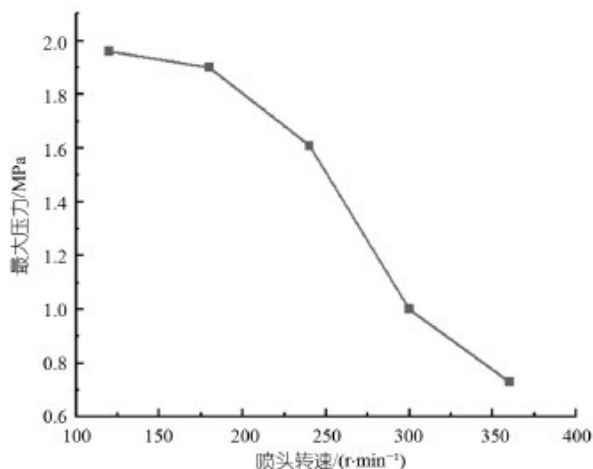


图 10 最大打击压力随喷头转速变化

继续增大,最大压力下降明显,当倾斜角度为 30° 和 40° 时,最大压力分别降低了 19.5% 和 56.7%。在保证即能有足够打击力,又能驱动喷头旋转的前提下,喷嘴的倾斜角度设定为 20° 左右较为合理。

(2) 随着喷头旋转速度增大,最大冲击压力逐渐降低。当喷头转速大于 180 r/min 时,冲击压力急剧下降,当喷头转速为 300 r/min 时,最大冲击压力为

仅 1.1 MPa,压力损失接近 50%。此外,喷头旋转速度对射流路径还有影响。当转速小于 240 r/min 时,射流路径几乎不会受到影响;当喷头旋转速度等于 240 r/min 和 360 r/min 时,射流喷射路径从轻微偏移逐渐增加到 45° 左右的偏移。喷头转速过快会造成射流路径偏移和射流雾化,造成打击压力下降,喷头旋转速度过慢会造成水资源浪费,降低清洗效率。因此,喷头旋转速度限制在 180 r/min 左右较为合适。

参考文献:

- [1] 窦艳涛,郭炜,袁志鹏.聚合釜用高压水射流三维旋转清洗喷头的结构设计研究[J].北京石油化工学院学报,2024,32(04):33-37.
- [2] 王素华,韦志超,陈志华,等.水射流技术在有色冶金工业管束清洗中的应用与研究[J].设备管理与维修,2024,(15):126-128.
- [3] 郑帮龙,雷泽勇,李魁等.钎化物料桶清洗喷头的水射流分析[J].机械研究与应用,2021,34(05):39-42.
- [4] 胡强法,谷子昂,房伟等.旋转喷头射流工具水力参数优化及结构参数优选[J].石油钻采工艺,2022,44(03):366-375.
- [5] 梁博健,高殿荣.高压扇形喷嘴结构参数的优化[J].排灌机械工程学报,2020,38(01):69-75.

Optimization design of jet cleaning process for inner wall of polymer processing equipment

Yu Weiyou¹, Xin Ruifeng¹, Zhang Hao¹, Li Jinfang¹, Zhang Guohui^{2*}, Zhang Bing^{1*}

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China);

2. Shanxi North Xing'an Chemical Industry Co. LTD., Taiyuan 030008, Shanxi, China)

Abstract: In order to improve the cleaning efficiency of the rotating jet nozzle, this study adopts Fluent software to simulate the tilt angle and rotation speed of the nozzle in order to realize the parameter optimization of the nozzle structure. The simulation results show that with the increase of the nozzle tilt angle, the maximum impact pressure shows a gradually decreasing trend. When the nozzle tilt angle exceeds 20°, the maximum impact pressure decreases significantly. In addition, the rotational speed of the nozzle has a significant effect on both the maximum impact pressure and the jet path. When the nozzle rotational speed exceeds 180 r/min, the impact pressure decreases significantly; and when the rotational speed exceeds 240 r/min, the jet deflection path increases gradually. Therefore, under the premise of ensuring that the nozzle has sufficient striking force and can effectively drive the rotation, the optimal tilt angle of the nozzle should be set at about 20°, and the rotation speed should be set at about 180 r/min.

Key words: rotating nozzle; water jet; simulation; parameter optimization

(R-03)