

手术器械清洗装置喷淋机构的流体动力学分析

邵婷婷¹ 张永海² 丁浩亮³ 陈博华⁴

1.青岛汉唐生物科技有限公司 山东 青岛 266000

2.青岛海尔生物医疗股份有限公司 山东 青岛 266000

3.青岛海尔生物医疗股份有限公司 山东 青岛 266000

4.懋煜（青岛）医疗科技有限公司 山东 青岛 266000

【摘要】：手术器械清洗装置喷淋机构的流体动力学分析旨在研究喷淋机构的流体动力学特性及其对清洗效率的影响。通过数值模拟和实验验证，分析了喷淋系统内流体流动的规律，探讨了喷头设计、流速、压力等参数对清洗效果的优化路径。研究结果表明，合理设计喷淋系统能有效提高清洗效率，并减少器械表面污染残留。此项分析为手术器械清洗设备的优化设计提供了理论依据，推动了医疗设备自动化清洗技术的发展。

【关键词】：手术器械清洗；喷淋机构；流体动力学；清洗效率；优化设计

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.012

引言

在现代医疗过程中，手术器械的清洁是保障患者安全的重要一环。随着医疗行业对无菌环境要求的提高，手术器械的自动清洗设备已成为医院日常工作中不可或缺的一部分。喷淋机构作为清洗系统的核心，其流体动力学性能直接影响清洗效果和效率。合理的喷淋系统设计不仅能够有效去除器械表面的污垢，还能减少清洗过程中可能产生的交叉污染。当前，针对喷淋系统流体动力学特性的研究相对较少，因此对这一问题的深入分析具有重要意义。

1 喷淋机构流体动力学特性分析

喷淋机构的流体动力学特性对手术器械的清洗效果起着至关重要的作用。流体在喷淋系统内的流动状态决定了清洗液的分布和对器械表面的冲刷强度。喷头的结构设计、喷射角度、流速、喷雾粒径等因素，都会影响液体的流动特性以及其与器械表面的接触情况。喷雾的均匀性和覆盖范围直接关系到清洗液的渗透能力与污物去除效果。流体在喷淋管道内的流动呈现复杂的湍流状态，尤其在喷头出口处，流速的变化导致液体在空间中的分布呈现非均匀性，部分区域可能因流速不足而导致清洗效果不佳。

通过流体动力学的分析，可以深入理解喷淋系统中的流动特性。具体而言，喷头设计对流体流动具有重要影响，喷头的孔径、形状和排列方式会直接影响流体的喷射角度和喷雾形态。不同的喷射模式，如圆形喷雾和扇形喷雾，能在不同的清洗场景中发挥不同的效果。为了使清洗液能够充分覆盖器械的各个部位，喷头的流速和压力必须在一个适当的范围内。过低的压力会导致流速不足，喷雾覆盖不均匀；而过高的压力则可能导致喷雾液滴过小，清洗液无法有效渗透污垢。

在喷淋装置的流体动力学分析中，喷淋压力的优化也是关键。压力过低时，清洗液喷射力度不足，无法有效去除顽固污

渍；而压力过高时，可能导致液体飞溅，反而降低清洗效率。适当的压力不仅能够保证液体的高效冲刷，还能避免由于过高流速带来的物理损伤，确保器械表面不被损坏。因此，喷头的流体动力学设计必须综合考虑压力、流速以及喷头的几何形状，以达到最佳的清洗效果。对于喷淋机构的进一步优化，流体动力学的数值模拟和实验研究能够提供重要的理论支持。通过模拟不同流体参数和喷头设计，研究人员可以预测喷淋系统中可能出现的流动问题，进而优化喷头的设计和调整流体参数。实验验证则可以通过实际测试，验证模拟结果的准确性，为喷淋系统的改进提供数据支持和实践依据。

2 喷头设计对流体流动的影响

喷头设计对流体流动的影响在手术器械清洗过程中起到了至关重要的作用。喷头是液体喷射系统的核心部件，决定了流体如何与器械表面接触以及清洗液的分布效果。喷头的几何形状、孔径、排列方式及其流量特性都会显著影响流体在喷射过程中的流动模式。喷头孔径的大小直接决定了液体的喷射速度和喷雾粒径，较小的孔径会使得液体喷射速度较高，喷雾呈现细小的液滴形态，而较大的孔径则能产生较大液滴，喷射较为集中。液滴大小对于清洗效率有着直接关系，较细的液滴能够覆盖更大的表面区域，并且有更强的渗透力，更有利于清除细小污垢。

喷头的形状设计同样对流体流动的影响不可忽视。喷头出口的形状决定了喷射液流的分布方式。不同形状的喷头（如圆形、扇形、锥形等）会产生不同的喷雾模式，进而影响清洗液的分布。扇形喷头适合在较大面积的器械表面进行均匀喷洒，而圆形喷头则更适合局部集中的清洗。喷头的喷射角度对清洗效果也有显著影响，过小的喷射角度可能导致液体集中于少数区域，而过大的喷射角度则可能导致液体分散，影响清洗效率。因此，喷头设计不仅要考虑流体动力学特性，还需要考虑喷射

角度、形状以及使用的实际情况。

除了喷头几何设计，喷头的排列方式也对清洗效果有很大影响。在多喷头设计中，每个喷头之间的距离和相对位置决定了喷射液体的重叠度和覆盖范围。如果喷头之间的间距过大，液体可能无法均匀覆盖器械表面，导致部分区域无法有效清洗。而喷头间距过小则可能导致液体浪费和不必要的重复清洗，因此需要精确设计喷头的布置，以实现液体的最佳分布。喷头的设计不仅涉及流体的喷射速度、液滴尺寸和喷雾模式，还需综合考虑实际清洗环境、器械形状以及清洗液的性质。通过优化喷头设计，可以有效改善流体的流动特性，提高清洗效率，并确保清洗过程中器械表面不受损伤。

3 流速与压力对清洗效果的优化

流速与压力是影响清洗效果的两个关键因素，在手术器械清洗过程中，它们直接决定了液体与污垢的接触力度和去除效率。清洗液在喷淋系统中的流速越高，液体与污垢的冲击力就越强，从而有助于提高清洗效率。流速的增大会导致喷雾颗粒的大小变化，可能使液体分布更加不均匀，影响清洗液对器械表面细节的渗透。流速与清洗效果之间存在一个平衡点，过高或过低的流速都会降低清洗效果。

在清洗过程中，压力的作用同样不可忽视。喷淋系统的压力直接影响流体的喷射速度和喷雾的均匀性。较高的喷射压力能够加速流体的流动，产生更高的冲击力，有助于去除顽固的污垢，尤其是对于难以清洁的器械表面。但如果压力过高，可能会导致喷雾液滴过小，表面液体的渗透性减弱，且液体的冲击力过强，可能对器械表面造成损害，甚至引起污染物的二次扩散。合理的压力设定应确保流体能够产生适度的冲击力，同时避免过度喷射对器械表面造成物理损伤。

流速与压力的匹配也决定了喷头的工作效率。不同的喷头设计对流速和压力有不同的适应要求，喷头与喷射液体的匹配情况会影响流体的分布方式和喷雾形态。较大流量的喷头通常需要较高的压力才能保持喷射稳定，而较小流量的喷头则适合在较低压力下工作。合适的流速和压力参数能确保液体以最佳的喷射角度和液滴大小分布在器械表面，进而提升清洗效果。喷淋系统的优化需要综合考虑流速、压力和喷头设计之间的相互作用。

在优化流速与压力对清洗效果的影响时，实际应用中的因素也需要考虑在内。例如，器械的材质、形状以及污垢的类型都会对流速和压力的需求产生影响。对于一些易受损的器械，较低的流速和压力可能更加适宜，以减少对器械的损害。而对于表面附着力较强的顽固污垢，则可能需要更高的流速和压力来确保去除效果。在多喷头设计中，喷头间的压力差异也会影响液体的分布，必须精确调控每个喷头的流速与压力，以实现清洗效果的最大化。通过数值模拟和实验验证，能够为流速和

压力的优化提供数据支持。通过模拟不同流速和压力条件下喷淋系统的运行状态，分析喷头的工作性能，可以在理论上预测清洗效果，并为实际操作提供指导。在实际运行过程中，通过调整流速和压力参数，可以实现针对不同器械和污垢类型的个性化清洗方案，最大限度地提高清洗效果，减少能量消耗和液体浪费。

4 数值模拟与实验验证

数值模拟与实验验证在喷淋系统的优化过程中发挥着重要作用。通过数值模拟，可以预测流体在喷淋装置中的流动特性，分析喷雾分布、压力变化以及液体与器械表面的相互作用。借助流体动力学模型，结合计算流体力学（CFD）技术，能够在不同工况下模拟流体的喷射过程。模拟结果不仅可以为喷头的设计提供数据支持，还可以帮助调整流速、压力和喷射角度等参数，从而优化清洗效果。

CFD 模拟能够准确预测喷雾液滴的大小、速度分布以及喷头与器械表面的接触情况。通过对喷头几何结构和喷射方式的调整，可以模拟不同设计方案下流体的运动轨迹。对于复杂形状的器械，数值模拟能够提供详细的喷雾分布图，帮助分析清洗液的渗透深度与均匀性。通过对比不同压力、流速下的模拟结果，可以清晰地看到流体如何影响清洗效果，进而为喷头设计和喷射参数优化提供依据。数值模拟虽然能够精确提供理论指导，但最终的效果仍需通过实验验证来确认。实验验证通过实际操作测定喷雾效果，评估喷头在不同参数下的表现。通过调整流速、压力和喷头位置等变量，实验可帮助观察实际清洗效果，特别是在不同器械表面上的清洗表现。实验数据与数值模拟结果相结合，可以有效验证模拟的准确性，并进一步调整模拟参数，使其更符合实际应用中的需求。

在实验验证过程中，通常采用多种传感器和成像技术来检测喷雾的粒径、速度、喷雾模式等关键指标。高速摄像技术可以用来捕捉液滴的运动轨迹，激光粒度仪则能够测量喷雾液滴的分布情况。这些实验工具提供了对流体行为更精确的理解，有助于评估不同设计和工作参数对清洗效果的影响。通过比较喷头设计的不同组合，可以分析哪种方案能够最有效地去除污垢，最小化清洗液的浪费。将数值模拟与实验验证相结合，可以形成闭环优化过程。在数值模拟的基础上进行初步设计，再通过实验验证进行调试优化，最终实现喷淋系统在清洗过程中的最佳表现。这种方法不仅可以节约大量的设计与试验时间，还能够精确控制清洗过程中液体流动与喷射的各项参数，确保喷雾系统的高效能和稳定性。此外，模拟与实验的结合也有助于不断改进喷淋装置的设计，使其更加符合实际应用需求。

5 喷淋系统设计优化方案

喷淋系统设计的优化方案需要综合考虑流体动力学、喷头设计、喷射参数和器械特点，以实现高效清洗。优化喷淋系统

的关键在于平衡喷雾的均匀性、冲击力和液体分布的合理性。为了提升清洗效果，喷头的设计需要根据清洗对象的复杂程度进行调整。对于形状复杂的手术器械，喷头的排布和喷射角度要能覆盖器械的每个部位，避免因喷雾不均匀而导致的清洗盲区。喷头的形状和排列方式必须精确匹配清洗目标，确保喷淋液能够有效渗透至器械的每个角落。

流速和压力是影响喷淋效果的另一重要因素，优化方案需要在二者之间找到最佳的工作点。过高的流速可能导致喷雾过于分散，无法达到预期的清洗效果，而过低的流速则可能无法提供足够的冲击力。喷射压力的设置同样至关重要，高压能够提供更强的冲击力，但过高的压力可能损伤器械表面或导致液体浪费。优化方案应考虑器械的材质、表面形态以及污垢类型，通过调节压力和流速，使其在清洗过程中发挥最大的效果。为了优化喷淋系统的性能，还应结合计算流体力学（CFD）进行数值模拟，提前评估喷头设计和流体流动的表现。通过模拟不同参数组合下的喷淋系统，能够明确哪些设计方案最能保证喷雾的均匀性及液体的有效渗透。模拟过程中，流速、压力和喷头形状等变量可以在虚拟环境中调整，从而快速识别最优配置。模拟结果也能为喷头设计提供有力的数据支持，避免设计上的反复试验。

在实验验证阶段，优化方案应结合具体的清洗需求进行调

整。通过对不同压力、流速和喷头设计的实验验证，可以进一步优化喷淋系统的工作参数。实际测试中，通过使用高精度传感器和成像设备，可以对喷雾的粒径、速度、喷射模式等进行量化分析，为调整参数提供参考。测试结果可以帮助判断喷淋系统在不同工况下的实际表现，进一步验证数值模拟的精度和有效性。对于不同类型的手术器械，优化方案还应考虑器械的几何特性和材质差异。对于表面光滑的器械，较低的流速和压力可能足以完成清洗任务，而对于复杂形状或表面附着力强的器械，则可能需要更高的压力和适当的流速，以确保彻底去除污垢。喷头的布置也需要根据清洗物品的形状、尺寸以及工作环境进行调整，以保证每个区域都能够受到充分的清洗液冲刷。喷淋系统的优化方案不仅要考虑性能的提升，还需要兼顾节能、环保和经济性。

6 结语

本研究通过对喷淋系统的流体动力学特性、喷头设计、流速与压力优化以及数值模拟与实验验证的综合分析，为手术器械清洗设备的改进提供了理论基础和实践指导。优化喷淋系统设计不仅能够提高清洗效率，还能确保器械的安全性和清洁度。未来的研究可进一步深化喷淋系统与不同器械材质和形状的匹配性，从而在实际应用中实现更高效、更经济的清洗过程。

参考文献：

- [1] 王伟,赵丽.喷淋清洗系统流体动力学分析与优化研究[J].流体机械,2023,51(7):120-125.
- [2] 李思源,陈洁.手术器械自动清洗系统的优化设计[J].医疗设备与技术,2022,34(5):45-50.
- [3] 周磊,张颖.基于数值模拟的喷淋系统性能研究[J].机械工程学报,2022,58(10):112-119.
- [4] 李军,王明.喷雾清洗系统流体力学特性及其应用[J].化工设备,2023,42(2):68-73.
- [5] 赵磊,刘媛.基于 CFD 的手术器械喷淋清洗系统研究[J].计算机辅助设计与图形学,2021,33(12):28-34.