doi: 10. 11933 / j. issn. 1007-9289. 20221202001

PECVD 喷淋板上微通道结构对射流均匀性的 影响性分析

刘万锁¹ 岳向吉¹ 蔺 增^{1,2} (1. 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819;

2. 沈阳市真空镀膜工程技术研究中心 沈阳 110819)

摘要:喷淋板微通道结构对等离子体增强化学气相沉积镀膜工艺成膜均匀性具有重要影响,目前缺少对不同微通道差异性的 研究。通过采用滑移边界修正的连续流计算方法,获得克努森数为 0.009~0.01 的微通道流动特性结果,计算结果与其他微 通道试验与计算结果具有一致性。结果表明,等径型与收缩型微通道几何尺寸对均匀性影响较小,出口射流所形成的涡流会 降低均匀性,扩张型微通道提高出口扩散性,其射流均匀性明显优于前两者。通过提出均匀性量化方法,研究等径型、收缩 型和扩张型三种具有代表性的微通道结构,进一步完善了喷淋板及稀薄环境微通道研究的不足。 关键词:微通道;射流均匀性;均匀性量化;扩张腔;等离子体增强化学气相沉积(PECVD) 中图分类号: O356

Analysis of Microchannel Structure on Jet Uniformity of PECVD Showerhead

LIU Wansuo¹ YUE Xiangji¹ LIN Zeng^{1,2}

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeast University, Shenyang 110819, China;
 Research Center of Vacuum Coating Technology of Shenyang, Shenyang 110819, China)

Abstract: Plasma-enhanced chemical vapor deposition(PECVD) is an important thin-film manufacturing process for semiconductors. In PECVD, a chemical reaction occurs between the ionized reaction gas and ion state, and the plasma is driven through a bias electric field to achieve the final thin film deposition. The uniformity of the gas in this process significantly affects the uniformity of the chemical reaction in the reactor, which in turn affects the quality of the film. Therefore, incorporating a showerhead is necessary to homogenize the gas, and the corresponding homogenization performance is determined by the structural characteristics of the microchannels. Currently, there are few studies on such microchannels, and systematic evaluation of the differences between various microchannels has not been performed. Based on research in the field of microchannels in rarefied environments, research on the uniformity of microchannel jets has been extended. In simulating the three-dimensional structure, a continuous flow calculation method with slip boundary correction and a hexahedral grid structure were employed to analyze the flow field of a microchannel with a circular section of variable diameter, and the flow properties of the microchannel with a Knudsen number of 0.009 1-0.010 9 were obtained. The diameter of the equal-diameter-type microchannel is 0.8 mm and the length is 8 mm. The calculated results are consistent with the experimental and calculated results for the other microchannels. Owing to the lack of measurement methods for jet uniformity, those of different regions or velocities cannot be compared. Therefore, a quantification method and standard for jet uniformity are proposed to distinguish between uniform, nonuniform, and sub-uniform jets. This allows simple comparison of sub-uniform jets, as well as various jet uniformities, by integration. Based on the quantitative method of jet flow uniformity, the flow characteristics of representative expansionary, contractile, and equal-diameter microchannels were analyzed, and the effects of constricting and expanding cavities on the flow field were studied. The development process of the flow field in different microchannels was analyzed using a transient calculation method to determine the cause of the change in jet uniformity in different

20221202 收到初稿, 20230625 收到修改稿

microchannels. The differences in the jet uniformity of expansion cavities of different sizes were compared and analyzed, and the principle of the influence of the expansion cavity geometry on fluid diffusion was determined. The results show that, compared with the equal-diameter- and contractile-type microchannels, the jet uniformity in expansionary-type microchannels clearly changes with the geometry. When the length and diameter of the equal-diameter- and contractile-type microchannels were varied, there was no significant difference in the uniformity of the jet flow. When the taper of the expansionary type is too large, the characteristics of the expansion cavity are lost, reducing the uniformity. Expansionary-type microchannels. Nevertheless, the vortex formed by the jet has a negative effect on uniformity. The outlet positions of the equal-diameter- and contractile-type microchannels formed a vortex that hindered fluid diffusion. Similarly, when the taper of the expansionary type is too large, a vortex forms in the expansion cavity, which reduces the jet uniformity.

Keywords: microchannel; jet uniformity; uniformity quantification; expansion cavity; plasma-enhanced chemical vapor deposition(PECVD)

0 前言

等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 是半导 体生产中所采用的制造工艺的一种,其特点是在几 至几十托的稀薄环境下,通过电极板电离反应气体, 进行等离子体化合反应,并将产物沉积在晶圆表面。 因此,气体的均匀性会直接影响最终在晶圆表面的 沉积均匀性。为了改善气体的均匀性,通常会在反 应腔室内增加喷淋板结构,该结构通常是圆形多孔 挡板,通过其上密布的孔隙来增强气体的均匀性。 生产应用中喷淋板孔隙结构种类很多,大致可以分 为扩张型、收缩型和等径型, LEE 等^[1]采用了扩张 型微通道来分析薄膜的沉积效率,CROSE、LEE 等^[2-3]采用等径型结构进行 PECVD 均匀性研究,这 些研究中没有对单孔特性进行研究。XIA、WI等^[4-5] 虽然研究了孔深对薄膜生长速度的影响,但没有就 孔变径对流动特性的影响进行研究。稀薄环境孔隙 特性的研究主要集中在航天领域的微喷嘴研究^[6-8], 但是这与喷淋板上的微孔隙是存在差异的。航天领 域使用喷嘴的目的是形成射流产生推力,喷淋板孔 隙的目的是形成均匀的气体入口,尽量减小集束效 应,将反应气体均匀扩散到反应腔室内。

除了设计性的孔隙变径结构外,还存在生产过 程中孔隙刻蚀导致的孔径改变。DENPOH^[9]对喷淋 板孔隙内局部增强放电导致的孔刻蚀进行了研究。 气体经由喷淋板进入反应腔的过程中,会在孔隙出 口形成由局部增强放电导致的等离子过渡刻蚀形 变。这种刻蚀形变会改变孔隙的出口结构,导致孔 隙气体特动特性改变,进而造成喷淋板的整体均匀 性改变。因此,针对孔隙几何对流场影响性的研究 是至关重要的。 对稀薄环境下微通道的研究主要集中于通道内 气体的压力、速度及温度分布,目前缺少对于射流 均匀性的相关研究。本文以微通道研究为出发点, 将微通道气体流动与射流均匀性相结合,研究不同 微通道结构对射流均匀性的影响性,一方面可以获 得更多基于微通道的理论与实验研究基础,另一方 面可以将微通道射流均匀性结果应用于 PECVD 的 生产过程。

在研究均匀性时缺少量化标准,通常采用曲线 重叠方法通过对比曲线梯度来分析均匀性。这种方 法对于速度、流量或位置差异较大情况无法进行对 比,因此该方法的缺陷和局限性是很明显的。为此, 本文提出均匀性量化方法与量化标准,这种量化方 法可以实现对不同流速、流量以及不同位置的流体 进行对比。以此为基础,本文研究了不同微通道结 构下形成的射流均匀性。

1 计算方法与验证

1.1 计算方法与分析流程

本文采用 FLUENT 商用软件,通过连续流(NS) 模拟方法,在微通道内(克努森数 Kn 较大区域) 采用滑移边界修正来计算入口压力 800 Pa、出口压 力 667 Pa下的微通道气体流动。采用密度基可压缩 流 SST(四方程)湍流模型,计算过程监视流场最 大速度、平均压力及射流区最大速度,计算收敛精 度为 10⁻⁴,计算结束前监视数据达到稳定值。

采用等径型微通道直径为 0.8 mm、长度为 8 mm,通过与前人微通道试验结果对比以验证计算 精度。之后分析生产中具有代表性的扩张型、收缩 型和等径型微通道的流动特性。对实际微通道结构 进行简化,以便集中分析收缩腔和扩张腔对流场的 影响,并通过瞬态计算方法分析不同出口均匀性差 异的成因。最后对不同尺寸的扩张腔的气体均匀性 进行分析,以获得扩张腔尺寸对其特性的影响。

1.2 网格无关性分析

为了提高计算精度,对网格尺度进行无关性验证,保证流场数据不会受网格因素影响。本文采用 六面体网格形式,并进行局部细化,壁面采用边界 层,网格示例如图1所示。



图1 几何及网格示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geometry and mesh

图 2 所示为流场高速区 (微通道内),对网格密度无关性进行数值验证。A 区为速度场第一峰值, 网格密度对峰值影响明显; B 区为稳定流域,该区域受出入口影响较低; C 区为微通道出口,为速度场第二峰值。网格数量由 61 991 逐步增加到720 253,速度场可以在 88 720 网格量达到稳定。







对气体环境计算可知, 微通道内气体的 Kn 约 为 0.023, 由此可以推断微通道内流场处于滑移流 态。因此, 对微通道内是否采用边界层(inflation) 进行对比, 结果如图 3a 所示, 可见无边界层(no inflation)数值与有边界层(inflation)数值有极 高重合度。这是因为边界层主要是为了计算近壁 处的低雷诺数(Re), 用以体现近壁粘性的非线性 特征,但本模型采用滑移边界修正,壁面速度不为 零,近壁黏度不符合低雷诺数特征,因此无需边 界层。



分析射流区网格尺度,射流区速度梯度较低, 但为获得准确数值所需的网格密度很大,结果如图 4 所示,分别对比了最大网格尺度 Δx 及计算流场长 度 *L* 对结果的影响。*L*=50 mm 模型在采用 Δx =1.7、 0.8、0.6 mm 网格时,数值差异逐步降低,45 mm 位置最小递进差异率为 5.9%。相较 *L*=150 mm 模型, 差异率为 7%。因此,以 10%作为低速区误差极限, 可以由 *L*=50 mm、 Δx =0.6 mm 网格模型获得准确 结果。





Fig. 4 Velocity curves of different grid scales and computational domain sizes in the jet region

1.3 计算结果准确性分析

GAD-EL-HAK^[10]指出,由于粘性耗散优于惯性力,微尺度气体流动通常是可压缩的,因此算法采用密度基可压缩流。BESKOK等^[11]研究了在*Kn*<0.3的滑移流结构中,气体微流中压缩性和稀薄性的综合效应。ARKILIC等^[12]基于一阶滑移边界条件模

型,提出了微通道内压力分布的解析解。ARKILIC 等和 BESKOK 等的模型均表明,可压缩性会引起非 线性压力分布。非线性压力分布是很细微的微管流 压力变化,仿真结果对非线性压力分布的辨识可以 认为是计算精度的体现。

先前的研究^[13-17]表明,微通道中的压力分布具 有凸轮廓。图 5 显示了真空(图 5a)和非真空 (图 5b)出口条件下的空间压力分布,线性和非线 性压力分布之间的差异由阴影非线性区域反映,表 示为 *S*_n,非线性 *S* 计算公式定义为:

$$S = \frac{S_{\rm n}}{S_{\rm a}} \tag{1}$$

式中, $S_n = \int_0^L (P(x) - P_{\text{linear}}(x)) dx$, $S_a = (P_{\text{in}} - P_{\text{out}})L/2$ 。 在考虑流体稀薄性情况下, GAO 等^[18]将式(1)转 变为:

$$S_{(Kn=0)} = \frac{1}{3} - \frac{2}{3\left(\sqrt{1 + \frac{32Lc^2Ma^2}{TRr_0Re} + 1}}\right)$$
(2)

式中, *L* 为管长, *c* 为管流速度, *Ma* 为马赫数, *T* 为温度, *R* 与 r₀ 为粘性系数式, *Re* 为雷诺数。式(2) 表明, 对于给定的气体种类和微管, 在连续介质区, 非线性取决于 *Ma* 和 *Re*。*Re* 低时, 由于粘性耗散, 即便速度不高, 非线性依然明显。



图 5 非线性压力分布示意图



图 6 显示了微管流速度曲线,为避免出、入口 效应影响,截取如图所示 z=0.023~0.068 m 范围数 据进行分析。一方面该流段流速下降,体现了粘性 耗散影响,说明出入口效应影响很小;另一方面, 由于粘性力突出,管流 Re 较低,非线性凸显。



图 6 微通道内稳定区流速分布曲线 Fig. 6 Velocity distribution curve of

stable zone in microchannel

为了更简明地研究微管流特性,采用压力比 η 来简化式 (2),因为 η 考虑了 Ma 和 Re 对非线性的 影响,GAO 等给出了简化公式如下:

$$S_{(Kn=0)} = \frac{1}{3} - \frac{2}{3(\eta+1)}$$
(3)

式(3)表明,非线性是连续介质中压力比的唯一函数,非线性随着η的增加而增大,当η接近无穷大时,可以达到非线性的最大极限(33%),当η接近1时,非线性为0,此时流体的压缩性消失。

WENG 等^[19]在微管流研究中将流场数值进行 了归一化处理,如图 7a 所示,Position 0-1 表示管 流入口至出口,P 表示管流内压力相对出口压力的 压力比值,D₀是反克努森数 $\left(D_0 = \frac{2r}{\sqrt{\pi\lambda}}\right)$ 。图 7a 中 表示了不同压力比、不同稀薄性下的非线性特征, 可见随压力比减小非线性逐步减弱,对比图 7b 所示 的仿真数据可见,仿真计算结果的非线性特征符合

WENG 等的研究结果。

将压力曲线非线性差值归一化后绘制图 8, 图 中左侧纵坐标为归一化压力分布曲线,右侧纵坐标 为非线性与线性差异,根据式(1)计算可得非线性 S 为 0.045。为了进一步研究算法精度,与 GAO 等^[18]、HUANG 等^[13]、JANG 等^[14]和 PENG 等^[16] 的分析结果进行比较,如图 9 所示,研究的 *Kn* 数 范围均包含滑移流,其中,GAO 等研究 *Kn* 数范围 是 0.02~6.6,HUANG 等研究范围是 0.001 5~ 0.014,JANG 等研究范围是 0~0.104,ARKILIC 等 研究范围是 0~0.155。不同之处在于,ARKILIC 与 JANG 等采用的是矩形微通道,并且 ARKILIC 的研 究环境是 1.6~4.2 个大气压,JANG 的研究环境是 98 kPa,环境压力均远高于本文环境,但由前两者研究 的微通道尺寸均为微米级,所以研究的流态与本文的 研究范围 (Kn 数为 0.009~0.01)相同,因此流体运 动特性具有一致性。HUANG等、JANG等和ARKILIC 等的分析结果与 GAO 等给出的式 (3)非常一致。在 η =1.2 时,式(3)非线性结果为 3%,仿真结果为 4.53%, 仿真结果与先前结果有很好的一致性。







对图 8 非线性压力差值曲线进行拟合, 拟合曲线 R² = 0.988, 峰值位置 Z_{max} = 0.619。 JANG 等指出非线 性凸型曲线的峰值位置 Z_{max} 也是有规律可循的, 给出 了稀薄特性影响下峰值位置 Z_{max} 计算公式如下:

$$Z_{\max} = 1 - \frac{\eta + 1 + 2KnC}{4(\eta - 1)} + \frac{(1 + KnC)^2}{\eta^2 - 1 + 2KnC(\eta - 1)}$$
(4)

当 Kn = 0 时,式(4)可以简化为:

$$Z_{\max(Kn=0)} = \frac{3}{4} - \frac{1}{2(\eta+1)}$$
(5)

根据式(5)可知,峰值位置在 $0.5\sim0.75$,当 $\eta=1.2$ 时, $Z_{max}=0.523$ 。由式(4)计算可得,当Kn=0.01, C=1时, $Z_{max}=0.523$;当Kn=0.01,C=-88.5时, $Z_{max}=0.616$ 。仿真结果与式(4)结果具有相似性, 可以说明仿真结果具有较高精度。



图 8 非线性压力分布与差值曲线





2 标准结构均匀性分析及均匀性量化 方法

对目前已有的 PECVD 用均匀器进行研究,其 孔隙结构如图 10 所示,孔隙类型可以根据径向尺度 分为等径型、收缩型和扩张型三类。孔隙的径向结 构差异对孔隙泄流的射流形状起到决定性作用,而 射流对于气体均匀性具有负面效果。通过改善孔隙 将射流影响区减小,可以获得更好的气体均匀效果, 并且更小射流区可以减小 PECVD 均化结构的整体 尺寸,这对于保证均化效果、缩减结构尺寸并降低 生产过程扰动具有重要意义。



图 10 喷淋板与微通道结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of microchannel structure

图 11 所示为三种孔型中线轴向速度数据,由图 可见,等径型与收缩型的射流明显、范围较广,并 且两者的差异较小,收缩型射流相较前者几乎不可 见。从曲线图可知,等径型与收缩型在孔隙出口 *A* 区流场数值具有很高的重合度。对比三种孔隙内流 场数值可知,图中 *C* 点(喉部入口)等径型与收缩 型在喉部入口峰值有一定差异,*B* 点(喉部出口) 等径型与收缩型具有相似的喉部出口峰值,且两区 域数值均高于扩张型。可以说明孔隙出口形式对于 射流的均匀性有关键影响,相似的出口结构会产生 相似流场分布,并且受入口结构影响较小。







为了能够更简单地对比均匀性,对均匀性进行 量化处理。如图 12 所示,对流场数据进行归一化处 理,图中 y=0 位置为速度分布的对称轴。对于一侧 速度曲线,由于流体受粘性作用的影响,均匀流 (Uniformity)流体的径向速度呈现"C"型分布。 当受到射流影响时,中心流体速度上升,流体的惯 性力远高于粘性力,此时非均匀流(Nonuniform) 流体呈现"J"型分布。随着射流影响的减弱,流体 粘性力作用上升,欠均匀流(Sub-uniformity)流体 流速分布由"J"型向"C"型过渡,形成了"S" 型分布曲线。对于欠均匀流"S"型分布,可以通过 比较"S"型分布高于线性分布的比例来量化均匀性, 其值在 0%~100%范围,均匀流"C"型曲线 100% 高于线性分布,非均匀流"J"型曲线 0%高于线性 分布。此外,可通过对曲线积分值大小来对比同为 "C"或"J"型的均匀性,实际上,积分的方法也同 样适用于"S"型。比例系数体现主流影响性,比例 系数越大,说明主流区越宽泛,均匀性越好。积分 系数体现粘性作用影响性,积分系数越大,说明粘 性力引起的边流速度越高,均匀性也越好。对比图 13 与图 14 可见,均匀性量化方法对于不同流速的 流场均匀性的呈现效果明显。











在获得有效的均匀性量化比较方法后,对等径型、收缩型及扩张型孔隙射流均匀性重新比较分析,如图 14 所示。等径型与收缩型均匀性具有很高的一致性,这与轴向分布数值结果一致,说明孔隙出口结构对于射流的均匀性有决定性作用。此外,经过均匀性量化处理后,可以清晰发现扩张型孔隙的射

流均匀性并没有图 11、13 中所表现的均匀,在出口 后 5 mm 处均匀性数值为 6.9%,这与等径型及收缩 型在 35 mm 位置均匀性相当。在 45 mm 位置,等 径型与收缩型均匀性与扩张型在 25 mm 位置相当, 说明扩张型孔隙射流均匀性至少优于其他两者孔隙 20 mm 的均匀距离。





通过细致比较扩张型与等径型结构可以发现, 两者不但在扩张趋势上存在影响射流均匀性的差别,而且扩张型的孔长和喉部直径均有别于等径型, 这可能会产生额外的射流均匀性差异。等径型直径 为 0.8 mm,长度 8 mm,扩张型喉部直径为 0.4 mm, 喉部长度为 0.77 mm,因此分别建立直径为 0.4 mm、 长度 8 mm 以及直径 0.4 mm、长度 0.77 mm 两种新 的等径型孔隙,并与原等径型及扩张型进行对比, 结果曲线如图 15 所示。





其次,由速度云图 16a 可见,当直径减小后射 流区域明显收缩,孔隙长度对于射流形态几乎没有 影响。这主要是由孔隙直径减小导致流量减小,流 体总能量下降,射流在均化过程能量的扩散范围也 相应减小。孔隙长度对于流场影响较小主要是由流 态所致,在孔隙内流体绝大多数处于滑移流和过渡 流态,壁面粘性对流体能量的耗散作用被极大削弱, 因此长度没有对射流产生明显影响。从图 15 中可以 发现,等径型孔隙直径以及长度发生变化时,射流 均匀性并不会出现明显的差异。

通过轴向速度曲线图 16b 可知,直径对于轴向速 度分布影响明显,并且小直径下流速衰减速度更快, 这是由于小流量所蕴含的总能量更小,即便具有较高 的出口速度,但是均化影响范围也会大幅消减。值得 关注的是, 直径、长度减小模型与扩张型在具有相同 喉部的情况下,扩张型在图 16b 中 A 区具有更低流速 差别和更快的流速下降趋势,可以说明扩张型射流均 匀性优势主要是由孔隙出口扩张型结构决定的。







简化结构均匀性及涡流对均匀性差 3 异影响分析

简化结构的均匀性分析 3.1

由于实际微通道模型的结构存在细微差异,为 了更准确地对比等径型、收缩型和扩张型结构的流 场差异,对模型进行简化,在简化模型中,收缩型 入口和扩张型出口采用了相同的锥度,锥度比例为 1:1(锥底直径:锥高)。

从轴向数据曲线图 17 可知,等径型与收缩型具 有相似的速度与压力分布,两者的区别在于锥型腔 的存在导致微管喉部右移,但喉部入口速度和压力

并无明显变化,收缩型喉部出口流速明显高于等径 型,这可能是由喉部长度减小使得入口效应产生的 流体加速效果未消退所导致的,入口、出口效应的 流体加速效果相衔接,使得收缩型出口流速较高。 扩张型微通道速度、压力分布与等径型具有显著差 异,首先喉部速度峰值明显,其次速度衰减明显, 最后外空间射流梯度很小。

图 17a 中, A 区为微通道喉部入口, B 区为喉 部出口,可见,收缩型和扩张型锥型腔分别针对了 等径型的入口和出口两处峰值。锥型腔对入口相应 的影响很小,仅改变了轴向位置。出口锥型腔对整 个微通道流场改变巨大,一方面降低了出口压力, 增强了入口效应,形成了微通道高速流,另一方面 改善了微通道射流的影响区域。







从均匀性曲线图 18 可知,等径型与收缩型微通 道均匀性相似,扩张型微通道具有更高的均匀性。 图中 z = 5 mm 扩张型均匀性数值相似于等径型、收 缩型 z = 15 mm 的均匀性,扩张型 z = 35 mm 均匀性 相似于等径型、收缩型 z = 45 mm 的均匀性,可见 扩张型均匀性优于等径型、收缩型10mm轴向距离。



中 王 表



Fig. 18 The uniformity curves of the simplified model at 5-45 mm axial positions

3.2 涡流对均匀性的影响

为了研究微通道出口几何所形成的涡流对射流 均匀性的影响,进行了流场的瞬态计算,取时间步 长为 0.000 1 s。图 19 为等径型分别在微通道出口外 45 mm 处, *t* = 0.000 1 s、0.000 3 s、0.000 5 s、0.001 0 s 时刻的均匀性曲线。在45 mm 位置具有明显均匀性 差异,随时间推移,流场均匀性不断减弱。结合表 1 可见,在45 mm 流场均匀性明显下降,比例系数 下降约 50%,积分系数下降约 64%。





等径型 45 mm 位置的速度场均匀性数值 表 1 Table 1 Uniformity values of velocity field at 45 mm position of equal diameter

Time / s	Ratio coefficient / %	Integral coefficient
0.000 1	1.1	0.39
0.000 3	0.8	0.33
0.000 5	0.6	0.23
0.001 0	0.6	0.14

依次提取 0.000 1 s、0.000 3 s、0.000 5 s、 0.0010s的流线,如图20所示。图20左侧可见 微通道出口涡流逐步形成,图右侧为微通道射流 流线图,可见图中射流随涡流的形成而逐渐集中 并延申。由此可知,出口涡流对射流稳定性有增 强效果,随涡流逐步增强,流场的均匀性不断下 降,并且射流影响区域不断扩张。结合表1的数 据可知, z=45 mm的流场区域,一开始由于远离 出口射流影响区,显示出较好的均匀性,随着涡 流的形成,射流区延申,流场均匀性开始显著下 降。说明涡流能够稳定出口射流,并降低射流均 匀性。





Fig. 20 Streamline diagram of eddy current and jet

面

图 21 为出口后 25 mm 位置等径型和扩张型在 0.000 3 s、0.001 0 s 的均匀性曲线,可见等径型流场 均匀性变化很小,而扩张型流场均匀性从 0.000 3 s 到 0.001 0 s 存在明显下降。结合图 22 流线图可见, 扩张型微通道内形成了涡流,锥型腔内的涡流对扩 张型具有减小锥型腔锥度的作用,进而削弱了扩张 腔的流体分散作用,导致扩张型流体均匀性的显著 下降。





Fig. 21 Uniformity curves of equal diameter type and expansionary type at 0.000 3 s and 0.001 0 s at 25 mm axial position



图 22 扩张型在 0.000 3 s 与 0.001 0 s 时刻流线图 Fig. 22 Streamline diagram of expansionary type at time 0.000 3 s and 0.001 0 s

通过在锥度1:1 微通道内增加一段锥度1: 2 的锥型腔来改善微通道内涡流量,如图 23a 所示。由图 23a 可见,锥型腔内涡流消失,有效锥度被提高。提取出口后 *z* = 25 mm、45 mm 均匀性 曲线如图 23b 所示,1:1 锥度结构为 base 型,消 除涡流的 1:1+1:2 双锥型腔组合型的流场均匀 性得到提升。









4 扩张腔几何结构对均匀性的影响

为了进一步研究微通道的微结构变化对流场均 匀性的影响,对简化模型进行改进,如图 24 所示, 锥型腔长度 *L* 分别为 4 mm 和 2 mm,锥度分别为 1: 1、1:2 和 2:1,以此分析锥度及锥长的影响性。



Fig. 24 Schematic diagram of 4 types of expansionary structure

图 25 为四种扩张型锥型腔结构的均匀性分布 曲线图,由图可见,四种结构的曲线相似性很高, 锥度为1:2时,相对锥度1:1流场均匀性较差,可以认为是由锥度不足导致的流通扩散性不足所致。锥型腔长度减少值*L*=2mm时,流场均匀性改变较小。当锥型腔锥度提高到2:1时,流场均匀性表现最差。



Fig. 25 Uniformity distribution curves

提取轴向压力与速度曲线如图 26 所示,由图可 见,四种结构仅在微通道内存在较大的数值差异。 曲线可分为两类, *A* 类是锥度 2:1, *B* 类是其他 3 种, *A* 类在为微通道内具有高于出口的压力,以及 具有双峰值的速度曲线, *B* 类在微通道内压力明显 低于外界,并且速度曲线是单峰值。图中 *A*、*B* 所 示为微通道喉部出口位置, *A* 类存在明显压降及速 度上升, *B* 类是压力上升及速度下降。经分析, *A* 类由于锥型腔角度较大,喉部出口几何突变,导致 压力骤降形成射流,喉部压力处于高压; B 类锥型 腔角度较小,由于流速小于 1 *Ma*,流体在扩张腔内 逐步压缩,压力逐步上升,速度下降,喉部压力处 于低压,满足质量守恒。由连续性方程可得如下 公式:

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho} = \frac{Ma^2}{1 - Ma^2} \frac{\mathrm{d}A}{A} \tag{6}$$

式中, ρ 为密度,Ma为马赫数,A为截面面积。当 $Ma = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 时, $\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dA}{A}$,当 $1 > Ma > \frac{\sqrt{2}}{2}$ 时, $\frac{d\rho}{\rho} > \frac{dA}{A}$,密度增长率大于面积增长率,只有速度 下降可以满足质量守恒,因此在B类锥型腔速度逐 步下降,压力逐步上升。B类喉部为等径型, $\frac{dA}{A} = 0$, 因此 $\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dA}{A} = 0$,压力不变。可见B类在微通道内, 首先在入口处由于低压而迅速膨胀(流速骤升),并 在喉部保持膨胀状态(压力不变),之后在扩张腔内 逐步压缩(压力上升)。



4 types of conical cavity

由以上分析可知, 锥型腔锥度为2:1时, 失去 了扩张腔特征, 变为分段式等径型微通道形式, 并 且由均匀性分布图25可知,这种分段式等径型均匀 性低于扩张型。

5 结论

通过对 PECVD 喷淋板上微通道特性系统性研 究,获得以下结论:

(1)提出的均匀性量化方法能够有效区分不同 射流的均匀状态,并且可以直观地比较不同射流均 匀程度,对于射流均匀性的研究有重要意义。

(2)通过系统性研究不同微通道结构的流动特性,明确了出口变径对射流均匀性的重要影响,可为滑移流态微通道射流研究提供基础,也可对生产设计提供指导。

(3)揭示了微通道射流均匀性的关键影响是涡流的形成,但所研究的环境是滑移流态。随着气体的稀薄性增强,层流间作用力减小,可能会减少涡流的产生,对于过渡流态和分子流态下微通道的流动特性与射流均匀性可能会发生改变。

参考文献

- LEE G, SOHN D K, SEOK S H, et al. The effect of hole density variation in the PECVD reactor showerhead on the deposition of amorphous carbon layer[J]. Vacuum, 2019, 163: 37-44.
- [2] CROSE M, ZHANG W, TRAN A, et al. Run-to-run control of PECVD systems: Application to a multiscale three-dimensional CFD model of silicon thin film deposition[J]. AIChE Journal, 2019, 65(7): e16400.
- [3] LEE H S, LEE Y S, SEO S H, et al. Effective design of

multiple hollow cathode electrode to enhance the density of rf capacitively coupled plasma[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(8): 081503.

- [4] WI S S, KIM Y G, LEE H J, et al. Effects of showerhead hole structure on the deposition of hydrogenated microcrystalline silicon thin films by vhf PECVD[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2012, 30(4): 04D113.
- [5] XIA H, XIANG D, MOU P, et al. Experimental study of the effects of showerhead configuration on large-area silicon-nitride thin film by plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. Thin Solid Films, 2017, 638: 1-8.
- [6] RRFI K M M, DEEPU M, RAJESH G. Effect of heat transfer and geometry on micro-thruster performance[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 146: 106063.
- [7] 赵芃沛,朱镭. 某型喷管真空羽流流场数值仿真计算研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 23-26.
 ZHAO Pengpei, ZHU Lei. Numerical simulation calculation of vacuum plume flow field of a certain type of nozzle[J]. Chinese Journal of Weaponry and Equipment Engineering, 2019, 40(11): 23-26. (in Chinese).
- [8] 邢卓异,王彤,舒燕,等.地外天体上航天器起飞瞬时 羽流对主发动机干扰效应影响[J].航天器环境工程, 2019,36(6):1-7.

XING Zhuoyi, WANG Tong, SHU Yan, et al. Plum effect for main engine of ascending spacecraft launching extraterrestrial body[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(6): 1-7. (in Chinese).

- [9] DENPOH K. Locally enhanced discharges at gas hole outlets of a showerhead in a plasma etching reactor[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 42(3): 032003.
- [10] GAD-EL-HAK M. The fluid mechanics of microdevices—The Freeman scholar lecture[J]. Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(1): 5-33.
- [11] BESKOK A, KARNIADAKIS G E, TRIMMER W. Rarefaction and compressibility effects in gas

microflows[J]. Journal of Fluids Engineering: Transactions of the ASME, 1996, 118(3): 448-456.

- [12] ARKILIC E B, SCHMIDT M A, BREUER K S. Gaseous slip flow in long microchannels[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1997, 6(2): 167-178.
- [13] HUANG C Y, LAI C M. Pressure measurements with molecule-based pressure sensors in straight and constricted PDMS microchannels[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(6): 065021.
- [14] JANG J, WERELEY S T. Pressure distributions of gaseous slip flow in straight and uniform rectangular microchannels[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2004, 1(1): 41-51.
- [15] KO H S, GAU C. Local heat transfer process and pressure drop in a micro-channel integrated with arrays of temperature and pressure sensors[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2011, 10(3): 563-577.
- [16] PONG K C, HO C M, LIU J, et al. Non-linear pressure distribution in uniform microchannels[J]. ASME. Publications. Fed., 1994, 197: 51.
- [17] ZOHAR Y, LEE S Y K, LEE W Y, et al. Subsonic gas flow in a straight and uniform microchannel[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 472: 125-151.
- [18] GAO R, O' BYRNE S, LIOW J L, et al. An experimental study of pressure distribution nonlinearity in a circular micro-tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 97: 468-483.
- [19] WENG C I, LI W L, HWANG C C. Gaseous flow in microtubes at arbitrary Knudsen numbers[J]. Nanotechnology, 1999, 10(4): 373-379.

第5期

作者简介: 刘万锁 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为计 算流体力学及应用。 E-mail: loerwalson@sina.com 岳向吉, 男, 1973 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研

究方向为计算流体力学及应用。 E-mail: xjiyue@mail.neu.edu.cn

蔺增(通信作者),男,1975年出生,博士,教授,博士研究生导师。

主要研究方向为真空表面工程与过程控制。

E-mail: zlin@mail.neu.edu.cn