

## Effect of area ratio of variable cross-section dividing manifolds on performance of fluid distribution in high Reynolds number

Honggang YANG<sup>1,2</sup>, Nan WANG<sup>1</sup>, Yi WANG<sup>2,3\*</sup>, Lei YAO<sup>1</sup>, Xiaofan CAI<sup>2,3</sup>

1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

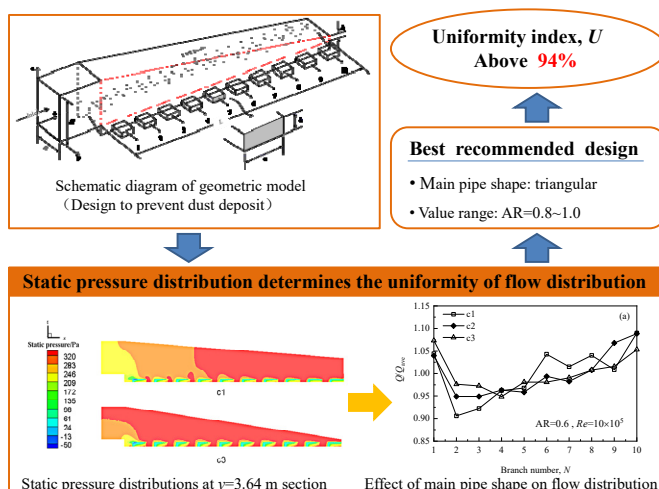
2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

3. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

**Abstract:** As a fluid distribution device, the dividing manifold is widely used in engineering systems such as air supply ducts, heat exchangers, and large bag filters. The flow distribution uniformity of the dividing manifold directly affects the overall performance of the system. A geometric model of dividing manifold was proposed to prevent dust accumulating with consideration of the problem of preventing dust and particles from accumulating in dust-containing airflow in practical engineering. With the aim of providing theoretical guidance and basis for the design of shunt manifold, the numerical simulation study on the fluid distribution performance of dividing manifolds with different

main pipe shapes and area ratios was carried out to obtain the optimal flow distribution uniformity of the dividing manifold. The effects of  $Re$ , main pipe shape and area ratio (AR) on the flow distribution performance of the dividing manifold were analyzed. The results showed that at high Reynolds number, the flow distribution uniformity of dividing manifold was hardly affected by the inlet Reynolds number. When the inlet Reynolds number and area ratio remained unchanged, the flow distribution uniformity of the manifold with a triangular main pipe shape was obviously better than that of the other two main pipe shapes. As the increase of area ratio of the dividing manifold, the flow distribution uniformity index  $U$  of the dividing manifold generally decreased. When the area ratio was greater than 1.0, the flow distribution uniformity of all dividing manifolds was decreased. When the area ratio was between 0.8 and 1.0, the flow distribution uniformity index of dividing manifold did not change significantly.

**Key words:** dividing manifold; Reynolds number; main pipe shape; area ratio; uniformity index



收稿: 2020-12-03, 修回: 2021-02-17, 网络发表: 2021-03-23, Received: 2020-12-03, Revised: 2021-02-17, Published online: 2021-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFC0705305); 西安建筑科技大学人才科技基金(编号: RC1831)

作者简介: 杨宏刚(1981-), 男, 陕西省宝鸡市人, 博士, 讲师, 研究方向为工业粉尘控制理论与技术, E-mail: yanghonggang@xauat.edu.cn; 王怡, 通讯联系人, E-mail: wangi6920@126.com.

**引用格式:** 杨宏刚, 王楠, 王怡, 等. 高雷诺数下变截面分流歧管面积比对流体分配性能的影响. 过程工程学报, 2021, 21(5): 550-557.

Yang H G, Wang N, Wang Y, et al. Effect of area ratio of variable cross-section dividing manifolds on performance of fluid distribution in high Reynolds number (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(5): 550-557, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220393.

# 高雷诺数下变截面分流歧管面积比对流体分配性能的影响

杨宏刚<sup>1,2</sup>, 王楠<sup>1</sup>, 王怡<sup>2,3\*</sup>, 姚蕾<sup>1</sup>, 采晓帆<sup>2,3</sup>

1. 西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西 西安 710055

2. 西安建筑科技大学西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055

3. 西安建筑科技大学建筑设备与工程学院, 陕西 西安 710055

**摘要:** 在高雷诺数( $Re=5\times 10^5\sim 30\times 10^5$ )下, 对不同主管形状和面积比的分流歧管流体分配性能进行数值模拟。通过计算各支管出流流量比( $Q/Q_{ave}$ )与流量分配均匀性指数( $U$ ), 分析  $Re$  和主管形状以及面积比( $AR$ )对分流歧管流量分配性能的影响。结果表明, 与低  $Re$  下的分流歧管流量分配性能高度依赖于  $Re$  的规律不同, 高  $Re(5\times 10^5\sim 30\times 10^5)$  下分流歧管的流量分配性能几乎不受  $Re$  的影响; 在相同  $Re$  与  $AR$  下, 主管形状为三角形渐缩的分流歧管的流量分配性能优于其他两种主管形状; 随  $AR$  增加  $U$  总体呈下降的趋势, 当  $AR>1.0$  时, 随  $AR$  增大, 三种主管形状的分流歧管流量分配均匀性均显著下降, 当  $AR=0.8\sim 1.0$  时, 分流歧管的流量分配均匀性指数变化不明显。

**关键词:** 分流歧管; 雷诺数; 主管形状; 面积比; 均匀性指数

中图分类号: TV134

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2021)05-0550-08

## 1 前言

分流歧管是一种将流体均匀分配的装置, 按照设计思路不同工程上有分岔型与直通型两类分流歧管<sup>[1-6]</sup>。分岔型分流歧管由一根主管和与之连接的若干横向支管(或孔口)组成, 因其制造精度要求低、节点数量少, 流动压降较小, 且不易引起流体堵塞问题<sup>[1,7]</sup>, 在工业领域得到广泛应用, 如送风风道<sup>[8-12]</sup>、热交换器<sup>[13,14]</sup>、电子封装器件<sup>[15]</sup>以及袋式除尘器横向进气通道<sup>[16]</sup>等。工程中分流歧管的流量分配性能直接影响系统的整体性能, 如袋式除尘器进气通道的气流分配不均会造成局部风速过高而引起处于高速区的滤袋过早破损, 进而影响袋式除尘器的分离效率和使用寿命<sup>[17-20]</sup>。因此, 流量分配均匀性是评估分流歧管流体分配性能的重要指标<sup>[11]</sup>。

为提高分流歧管的流量分配均匀性, 已有研究主要从分流歧管的几何结构和操作条件等两方面进行了大量的研究。有学者针对分流歧管主管形状对其流量分配均匀性的影响进行了研究。Hassan 等<sup>[12]</sup>对主管等截面与线性渐缩截面两种不同分流歧管的流量分配均匀性进行了比较研究, 结果表明主管截面渐缩分流歧管的流量分配均匀性明显优于主管等截面分流歧管, 进一步分析其原因在于主管截面渐缩使主管内部分静压通过转化为动压而减小, 从而使主管内静压趋向均匀。Tong 等<sup>[11]</sup>调查了分流歧管的主管不同渐缩方式(包括具有一定渐缩角的线性渐缩主管、四分之一椭圆线上凸渐缩主管以

及四分之一椭圆线下凹渐缩主管)对流量分配性能的影响, 在低入口雷诺数( $Re=50\sim 500$ )下研究发现主管线性渐缩是提高分流歧管流量分配均匀性最简单有效的方式。为进一步揭示主管线性渐缩对分流歧管流量分配均匀性的影响, Kim 等<sup>[21]</sup>针对用于电子器件冷却工艺的分流歧管, 考虑低入口雷诺数( $Re=50\sim 300$ )下, 主管为不同的线性渐缩形状(三角形和梯形)下的分流歧管流量分配性能, 结果表明流体流量分配均匀性最优的主管线性渐缩形状为三角形。以上关于分流歧管主管形状对其流量分配均匀性的研究大多考虑入口低雷诺数条件, 本工作对实际中用于工业袋式除尘器上的进气通道这一分流歧管进行研究, 其设计处理风量少则数万  $m^3/h$ , 多则数十万甚至数百万  $m^3/h$ , 入口雷诺数  $Re$  高达  $5\times 10^5$  以上, 因此需进一步探究在高雷诺数下分流歧管主管形状对其流量分配均匀性的影响。

不同学者针对分流歧管面积比对其流量分配均匀性的影响也进行了大量的研究。分流歧管面积比(Area Ratio, AR)定义为歧管出口总面积与进口面积之比<sup>[8,21]</sup>。Bajura 等<sup>[22]</sup>较早研究了面积比对等截面圆形主管的分流歧管在较高雷诺数下流动的流量分配性能影响, 通过实验研究发现在高雷诺数下为了获得更均匀的流量分配效果, 建议分流歧管的  $AR<1$ 。此后, 大量学者对于低雷诺数(如层流)下分流歧管面积比的影响进行了较全面的研究。Choi 等<sup>[15]</sup>针对电子封装的冷却分流歧管, 采用数值模拟的方法研究了面积比 AR 分别取 4, 8, 16 时

分流歧管的流量分配均匀性,结果表明,AR=4的分流歧管表现出最佳的流量分配,随面积比增大而使支管入口处的涡流更明显,增加了歧管流量分配的不均匀性,易造成局部热点进而影响芯片的均匀散热。Siva等<sup>[5]</sup>针对于集成微电子冷却的分流歧管,采用实验与数值模拟相结合的方法对AR=0.5, 2下的分流歧管的流量分配均匀性进行研究,发现在入口雷诺数 $Re=50$ 的操作条件下,AR=0.5时分流歧管的流量分配均匀性显著优于AR=2时。在入口低雷诺数( $Re=1\sim 500$ )下,Ahn等<sup>[23]</sup>通过数值模拟与实验相结合的方法调查了三种不同面积比(AR=4, 8, 16)的分流歧管的流量分配均匀性,研究结果表明,当面积比较大时分流歧管的进口端附近出口流量分配占有更大的比例,而仅在较小的面积比下流量向分流歧管的末端附近出口分配,流量分配均匀性显著提高。文献结果表明,面积比的影响无论是在层流或湍流流态下,均表现出同样的规律,已有文献大多考虑分流歧管的主管形状为等截面几何条件。

考虑到含尘气流流经分流歧管时易引起歧管内粉尘堆积的问题,本工作提出了一种防止积尘的分流歧管几何模型,同时选取流量分配均匀性指数作为衡量分流歧管性能的主要指标。在此基础上,首先揭示了在入口高雷诺数( $Re=5\times 10^5\sim 30\times 10^5$ 之间)动力学条件下,分流歧

管主管形状对流量分配均匀性的影响规律;其次,探究了不同主管形状下分流歧管面积比对流量分配均匀性的影响;最终获得了分流歧管的主管形状以及面积比的最佳推荐设计,为分流歧管的工程设计提供科学依据。

## 2 几何模型及工况设计

### 2.1 几何模型

变截面分流歧管的几何模型如图1所示,主要包括一根变截面主管和连接在主管两侧对称布置的20个支管;分流歧管主管的底面由两个倾斜平面合并而成,倾斜角度 $\theta=30^\circ$ ,目的是防止含尘气流中粉尘颗粒物的堆积;分流歧管的三种主管变截面的工况分别是:红色虚线框为矩形表示主管等截面,红色虚线框为梯形、三角形表示对主管进行不同程度的变截面情形。Chen等<sup>[24]</sup>对不同出口截面几何形状对分流歧管流量分配均匀性影响研究表明,相同开孔率下出口截面为矩形时的分流歧管流量分配均匀性优于圆形出口截面。在此基础上,Yang等<sup>[16]</sup>通过对矩形出口截面宽长比对歧管分配性能的影响研究,进一步获得了矩形截面的最佳宽长比 $b/a=0.25$ 。基于此,本研究设置支管矩形截面宽长比 $b/a=0.25$ 。

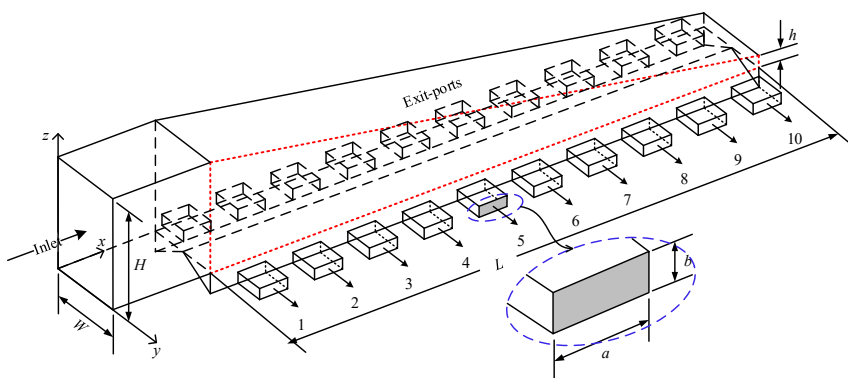


图1 几何模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of geometric model

### 2.2 研究工况设计

根据某实际工程中涉及的分流歧管尺寸,将分流歧管长度 $L$ 取值为28.4 m,入口矩形截面尺寸为 $W\times H=3.64\text{ m}\times 4.22\text{ m}$ ,出口数量 $N=20$ ,沿着分流歧管长度方向将对应支管两两组合为10组,支管组号如图1所示。通过改变末端高度 $h$ 实现分流歧管主管的截面渐缩形式,主要考察的3种不同主管渐缩形式分别为主管纵向截面形状为梯形-1渐缩(对应 $h=2.110\text{ m}$ )、主管纵向截面形状为梯形-2渐缩(对应 $h=0.560\text{ m}$ )以及主管纵向截面形状为三角形渐缩(对应 $h=0\text{ m}$ )。通过改变支管

的截面面积调整面积比,基于面积比的定义,即分流歧管面积比是指分流歧管所有支管截面面积之和与主管入口截面面积之比。所有模型中分流歧管进口尺寸相同,歧管主管末端高度 $h$ 变化形成不同的主管线性渐缩形状,工况设计见表1。因此,针对AR=0.6~1.2的4种不同面积比及三种变截面形式,共设计出从c1~c12共计12个不同的分流歧管几何结构,具体参数如表1所示。

### 2.3 性能参数定义

为定性描述流量分配均匀性,参考文献[25,26]以各支管流量与平均流量的比值来衡量流量分配的不均匀

性，以实现流量的无量纲比较，记作  $Q_i/Q_{ave}$ ，其中， $Q_i$  为通过第  $i$  组通道的流体流量( $m^3/s$ )， $Q_{ave}$  为通过所有支管通道的平均流量( $m^3/s$ )。

为进一步量化流量分配均匀性，在相对标准方差法的基础上定义了流量分配均匀性指数  $U$ 。

$$U=1-\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^N\left(\frac{Q_i-Q_{ave}}{Q_{ave}}\right)^2}$$

(1)

式中， $N$  表示支管个数。当  $U=0$  时，表示流量分配最差的情况，当流量分配完全均匀时  $U=1$ 。

表 1 12 种不同分流歧管的几何条件  
Table 1 Geometric conditions of 12 different dividing manifolds

Parameter	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12
AR	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2
a/m	1.358	1.358	1.358	1.568	1.568	1.568	1.753	1.753	1.753	1.920	1.920	1.920
b/m	0.339	0.339	0.399	0.392	0.392	0.392	0.438	0.438	0.438	0.480	0.480	0.480
h/m	2.11	0.56	0	2.11	0.56	0	2.11	0.56	0	2.11	0.56	0

3 数值模拟方法

3.1 几何模型的建立及网格划分

采用 ICEM 软件构建了图 1 所示相同大小的分流歧管物理模型。采用结构化六面体网格对模型进行了网格划分，同时对歧管局部壁面区(如倾斜面附近区域)进行了网格的局部加密处理。对歧管主管与横向支管采用 interface 建立联通，以方便对横向支管进一步实施局部网格加密处理。为达到计算机快速计算并同时能满足计算精度的要求，进一步分析网格数量对结果的影响，并针对不同网格数量进行了网格无关性验证(见 3.3 节)，并确定数值模拟的网格数量约为 110 万。

3.2 数值方法、控制方程及边界条件

采用商业软件 ANSYS Fluent 对分流歧管 3D 模型进行数值模拟计算。工质采用空气，密度取  $1.225\text{ kg/m}^3$ ，运动黏滞系数取  $1.7894\times10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。湍流模型选取 Realizable  $k-\varepsilon$  两方程模型<sup>[27]</sup>。流场压力-速度耦合采用 SIMPLEC 插值算法，压力项采用 PRESTO!，动量、湍动能、湍动耗散率、能量的离散格式均为二阶迎风格式离散，残差收敛标准为  $10^{-4}$ 。考察的分流歧管中的气流流速很低，可将空气看作不可压缩流体。

分流歧管中的空气流动由雷诺应力控制方程加以描述，包括连续性方程和动量方程。

不可压缩流体连续性方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

(2)

动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial z}\right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \end{aligned}$$

(3)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial v}{\partial z}\right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \end{aligned}$$

(4)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial w}{\partial x}\right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial w}{\partial z}\right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{aligned}$$

(5)

式中， $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向的速度分量， $\rho$  为流体密度， $p$  为流体微元控制体上的压强， $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏性系数，定义  $\mu_{\text{eff}}=\mu+\mu_t$ ，其中  $\mu$  为流体动力黏滞系数， $\mu_t$  为湍动黏度， $S_u, S_v, S_w$  为动量守恒方程中的广义源项，针对黏性为常数的不可压缩空气， $S_u=0, S_v=0, S_w=-\rho g$ 。

边界条件如下：(1) 进口边界：采用速度入口，速度为 2.29、4.58、9.16 和 13.73 m/s，对应的  $Re$ (特征长度选取入口矩形的当量直径  $d_e=3.91\text{ m}$ )为  $5\times10^5, 1\times10^6, 2\times10^6, 3\times10^6$ ，对应的流量分别为 12.66 万、25.32 万、50.63 万、75.95 万  $m^3/h$ 。且速度方向垂直于分流歧管入口过流断面，对充分发展的内流湍流指定方法选择湍流强度和水力直径。湍流强度按  $0.16Re^{-1/8}$  计算，水力直径选取歧管入口当量直径  $D_h$ ；(2) 出口边界：采用压力出口；(3) 壁面边界：分流歧管的内壁为流固接触壁面，采用无滑移固定壁面；按照实际工程壁面材质定义为钢板制作，其壁面绝对粗糙高度取为  $0.15\text{ mm}$ <sup>[28]</sup>。

3.3 网格无关性验证

为了检验网格独立无关性，采用三种不同网格数量(51 万，83 万和 110 万)对表 1 中的 c7 分流歧管模型进行网格划分，通过数值模拟获得了歧管下部中线( $y=1.82\text{ m}, z=0$ )上的静压分布曲线(图 2)，从图可看出，当网格数量超过 51 万时，随着网格数量增加静压曲线变化不明显，计算结果随网格数的进一步增加变化已经微小。

因此,可认为此时已有足够的计算精度,为了获得更高精度的计算结果,选取的网格数量约为110万。

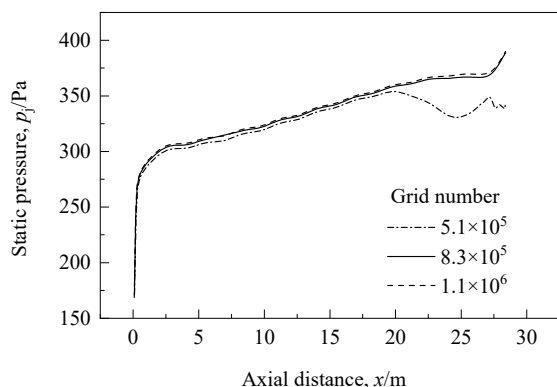


图2 网格无关性验证

Fig.2 Grid independence tests for different grid numbers

### 3.4 数值计算可靠性验证

为了验证数值模拟结果的可靠性,采用亚克力板制作了c8几何结构的分流歧管按照几何比例1:10等比例缩小的缩尺模型,通过实验测量获得了该缩尺模型各支管流量分配结果。在进行模型实验前须依据相似性原理(黏性力相似准则)确定缩尺模型实验的分流歧管入口流量,以实现缩尺模型与原型之间的流动相似。c8分流歧管原型中流动介质空气的运动黏滞系数取 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ ,入口风速为12.5 m/s,经计算可知原型的入口雷诺数为 $2.73 \times 10^6$ ,足以使气流在歧管内的流动处于自模型区,而自模型区的最低雷诺数为50000,与此相对应的分流歧管缩尺模型中气流的入口流速为2.29 m/s,模型入口流量为988.76 m<sup>3</sup>/h。

实验中配置了低噪声离心风机驱动空气在歧管中正压流动,功率0.75 W,工频时可提供最大风量1600 m<sup>3</sup>/h,采用变频器实现调速。为了校正入口处风量的均匀性,在离心风机和流体分配歧管之间采用0.5 m渐扩管段+1.0 m直管段连接,在渐扩管与直管段之间连接法兰中间放置均流板,以上措施均为了使气流速度在分流歧管整个入口断面上均匀分布,从而保证实验测试与数值模拟的起始条件尽可能吻合,以提高与数值模拟结果的可比性。

针对缩尺模型,采用实验测量与数值模拟相结合的方法,分别获得了缩尺模型下的无量纲流量分配的实验结果和模拟结果,同时因为是无量纲流量的比较,可考虑将原型的数值模拟结果也综合对比分析,结果如图3所示。可以看出,实验结果曲线与模拟结果曲线具有良好的定性一致性,吻合程度较高,进一步计算发现,实验与模拟的流量分配结果的相对误差在 $\pm 5\%$ 范围以内,

说明数值模拟的结果是可靠的。

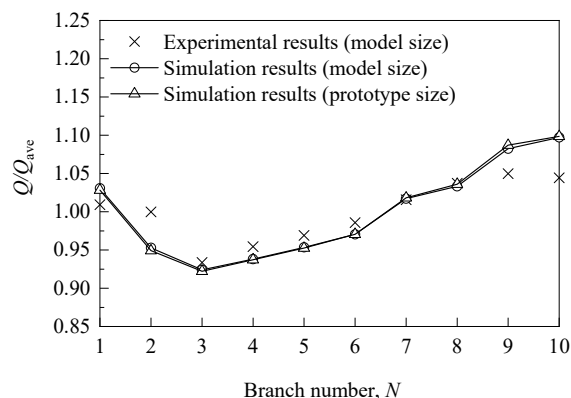


图3 分流歧管流量分配模拟结果与实验结果的比较

Fig.3 Comparison of simulation results and experimental results of dividing manifold flow distribution

## 4 模拟结果分析

### 4.1 雷诺数对分流歧管流量分配性能的影响

为考察 $Re$ 对分流歧管流量分配性能的影响,对c2几何结构给定的分流歧管(主管形状为梯形-2渐缩结构,  $AR=0.6$ ),分别对 $Re=5 \times 10^5 \sim 30 \times 10^5$ 之间的4个不同 $Re$ 下的分流歧管的流量分配性能进行数值模拟。图4(a)给出了分流歧管的支管出流流量 $Q$ 随 $Re$ 的变化关系。由图可知,分流歧管各支管的流体出流流量 $Q$ 均随 $Re$ 增大而增加,尤其分流歧管最末端的支管10的 $Q$ 增加最显著,这是由于流体流动惯性效应,即更大的入口速度倾向于驱使流体向主管的末端发展集中。图4(b)为流量比 $Q/Q_{ave}$ 随 $Re$ 的变化。通过分流歧管同一支管出流的流体流量比几乎不受 $Re$ 的影响,图中同一支管的流量比的连线是一组近似平行的直线分布,表明分流歧管的流量分配性能几乎不受 $Re$ 的影响。图4(c)为沿歧管内流体流动方向上所有支管的出流流量比的变化,进一步证明在高雷诺数( $Re=5 \times 10^5 \sim 30 \times 10^5$ )下分流歧管的流量分配性能几乎不受 $Re$ 的影响,这一结果与低雷诺数下(层流)的分流歧管流量分配均匀性高度依赖于 $Re$ 的规律有很大差异,已有研究表明 $Re=35 \sim 1400$ 时,随 $Re$ 增大,分流歧管的流量分配均匀性不断提高<sup>[11]</sup>。

### 4.2 主管形状对分流歧管流量分配性能的影响

为考察高雷诺数下分流歧管主管形状对其流量分配均匀性的影响,分别对c1, c2与c3三种几何结构分流歧管( $AR=0.6$ )进行数值模拟,其中,c1为主管形状为梯形-1渐缩(对应 $h=2.110 \text{ m}$ ),c2为主管形状为梯形-2渐缩(对应 $h=0.560 \text{ m}$ ),c3为主管形状为三角形渐缩(对

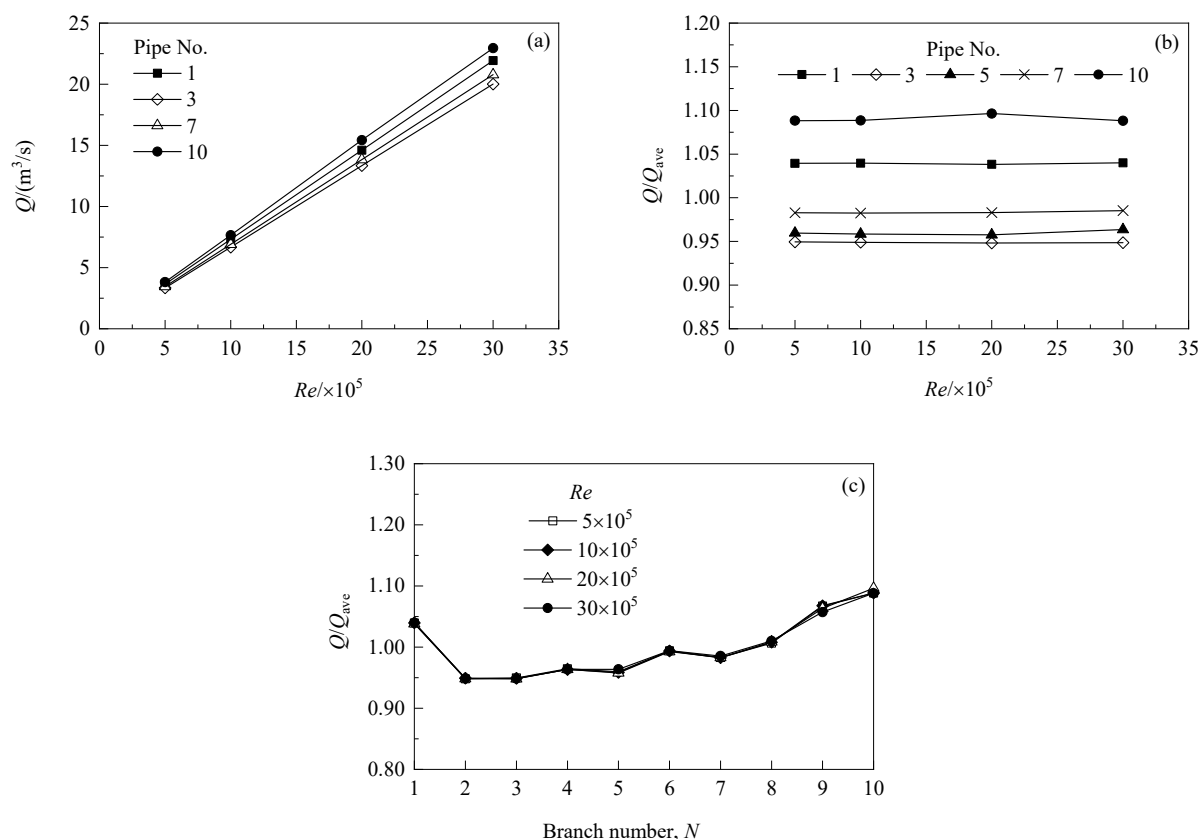
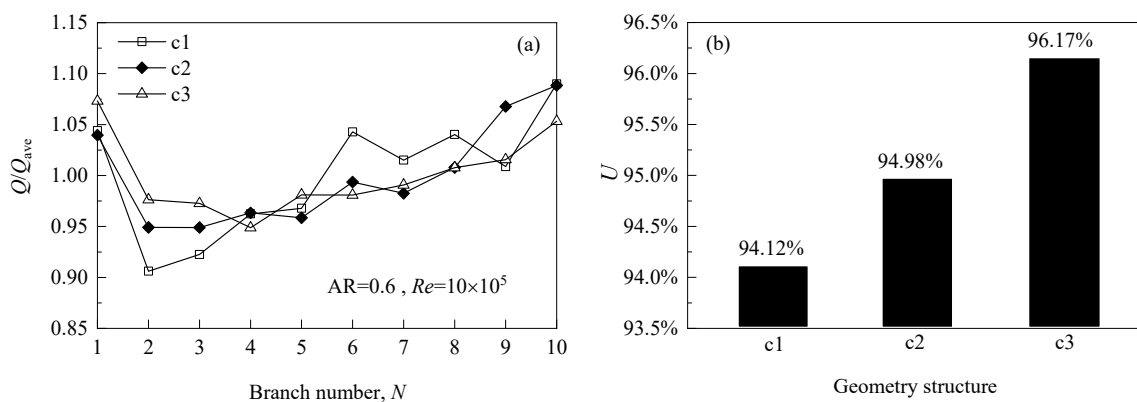
图4 分流歧管支管出流流量随  $Re$  的变化关系Fig.4 The change of the outflow flow rate of the branch pipe of the dividing manifold with  $Re$ 

图5 主管形状对分流歧管流量分配性能的影响

Fig.5 Influences of main pipe shape on flow distribution performance of dividing manifold

应  $h=0$  m)。考虑到高雷诺数( $Re=5 \times 10^5 \sim 30 \times 10^5$ )下分流歧管的流量分配性能与  $Re$  的相关性很小, 仅对  $Re=10 \times 10^5$  的操作条件进行数值模拟。图5为上述三种工况分流歧管流量分配结果, 其中, 图5(a)为不同主管形状分流歧管的流量比变化。由图5(a)可看出, 与  $c3$  相比,  $c1$  和  $c2$  两个几何结构分流歧管的入口端附近各支管组的流体出流流量比  $Q_i/Q_{ave}$  更小, 而歧管末端支管流体的出流流量比更大, 进而导致  $c1$  和  $c2$  两个分流歧管的流量分配均匀性变得更差。这是由于分流歧管的流动特点决定了在主管内的流体静压沿着流向不断增大(静压复得),

进而促使歧管末端支管出流的流量显著增大。而  $c3$  几何结构分流歧管将主管形状设计为三角形渐缩, 能使主管内部原本不断增大的静压降低, 使歧管末端支管分流的流量减小, 从而提高流量分配均匀性。关于三种几何结构分流歧管流量分配均匀性的量化结果见图5(b)。量化结果表明,  $c3$  分流歧管表现出最佳的流量分配均匀性 ( $U=96.17\%$ ),  $c1$  分流歧管具有最差的流量分配均匀性,  $c2$  次之, 说明主管形状为三角形渐缩形式能有效地减小静压升高的影响。上述规律也可通过分流歧管内的静压分布说明, 图6给出了  $c1$  和  $c3$  两种几何结构分流歧管



$y=3.64\text{ m}$  截面上的静压分布云图,可以看出该截面上静压分布 c3 比 c1 更均匀。

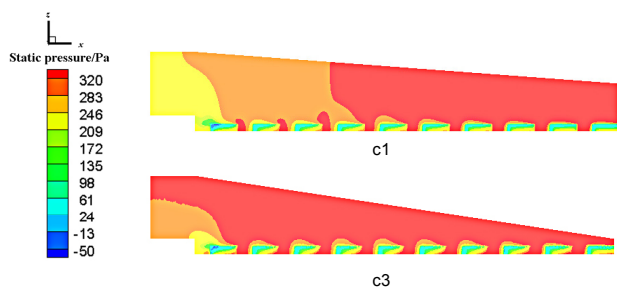


图6  $y=3.64\text{ m}$  截面的静压分布云图  
Fig.6 Static pressure distributions at  $y=3.64\text{ m}$  section

#### 4.3 面积比对分流歧管流量分配性能的影响

图7为分流歧管的流量分配性能随AR的变化( $Re=10\times 10^5$ )。其中,图7(a)为主管形状为梯形-1渐缩的

分流歧管各支管出流流体的流量比变化,在不同AR下分流歧管的流量比随AR的减小而趋于平缓,当AR增大时流量倾向于向歧管末端附近的支管分配更多,导致流量分配性能变得更差。相同的现象也发生在主管形状为梯形-2、三角形渐缩的分流歧管中,分别见图7(b)和图7(c)。为进一步对上述结果进行定量化,图7(d)给出了分流歧管流量分配均匀性指数 $U$ 的计算结果。由图可知,随AR增加流量分配均匀性指数 $U$ 总体呈下降的趋势,主管形状为三角形渐缩的分流歧管的流量分配性能明显优于其他两种主管形状。当 $AR>1.0$ 后,三种主管渐缩形式下的分流歧管流量分配均匀性均呈现显著下降的趋势;当 $AR=0.8\sim 1.0$ ,三种主管渐缩形式下分流歧管的流量分配均匀性指数均变化不明显;主管形状为梯形-1的分流歧管在 $AR=0.6\sim 1.0$ 的流量分配性能随AR增大没有显著降低。

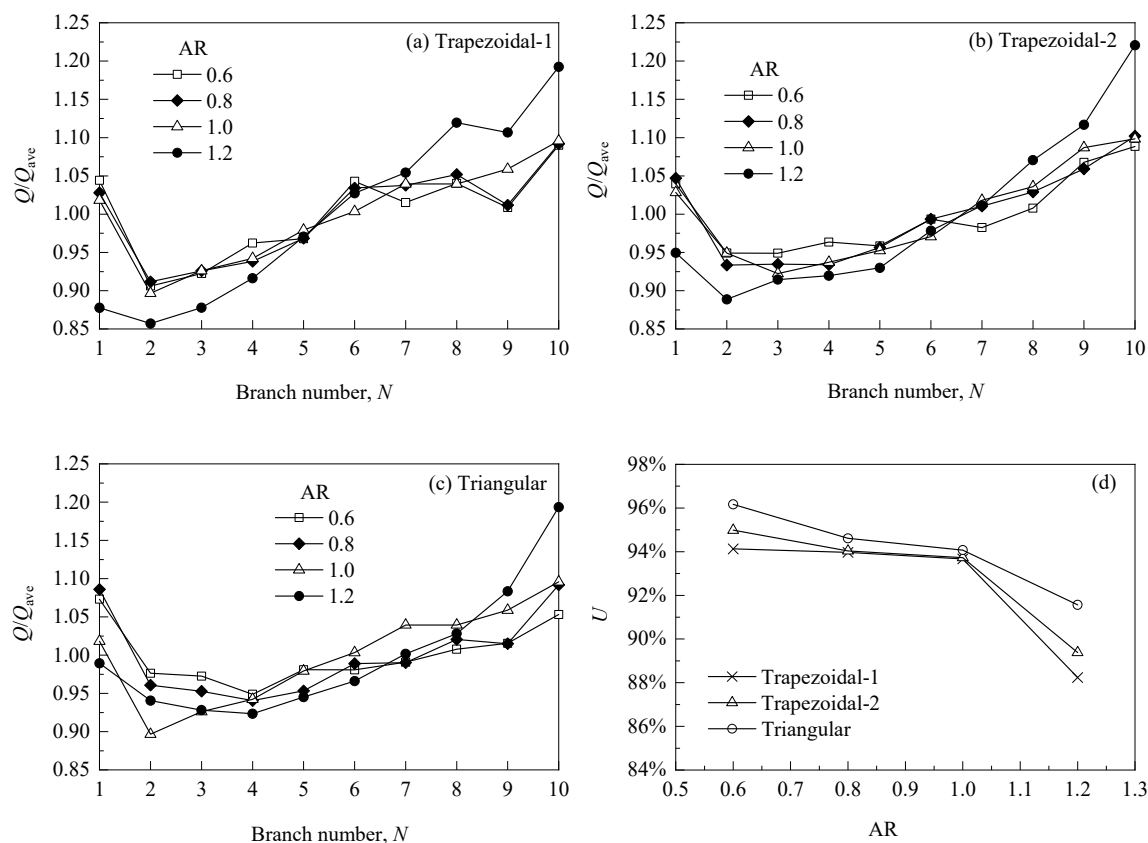


图7 不同面积比分流歧管的流量分配曲线  
Fig.7 Flow distribution curves of dividing manifold with different AR

## 5 结论

通过数值模拟考察了不同主管形状及面积比对分流歧管在高 $Re$ 下的流量分配性能的影响,得到以下结论:

(1) 与低 $Re$ 下分流歧管的流量分配性能高度依赖于 $Re$ 的事实不同,高 $Re(Re=5\times 10^5\sim 30\times 10^5)$ 下分流歧管的流量分配性能几乎不受 $Re$ 的影响。

(2) 相同 $Re$ 与AR下,三种不同主管形状对应的流量分配均匀性指数 $U$ 的值三角形渐缩>梯形-2渐缩>梯

形-1 渐缩。说明主管形状为三角形渐缩的分流歧管的流量分配性能优于其他两种主管形状;这是因为主管形状设计为三角形渐缩,能使主管内部原本不断增大的静压降低,使歧管末端支管分流的流量减小,从而提高流量分配均匀性。

(3) 随 AR 增加流量分配均匀性指数  $U$  总体呈下降的趋势,当  $AR>1.0$  后,三种主管渐缩形式下的分流歧管流量分配均匀性均呈现显著下降的趋势;当  $AR=0.8\sim 1.0$  时,三种主管渐缩形式下分流歧管的流量分配均匀性指数均变化不明显。

## 参考文献

- [1] Wang J Y. Theory of flow distribution in manifolds [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 168(3): 1331–1345.
- [2] Wang J Y. Theory and practice of flow field designs for fuel cell scaling-up: a critical review [J]. Applied Energy, 2015, 157: 640–663.
- [3] Ghani I A, Sidik N A C, Kamaruzzaman N, et al. The effect of manifold zone parameters on hydrothermal performance of micro-channel heat sink: a review [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 1143–1161.
- [4] Siddiqui O K, Zubair S M. Efficient energy utilization through proper design of microchannel heat exchanger manifolds: a comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 969–1002.
- [5] Siva V M, Pattamatta A, Das S K. Investigation on flow maldistribution in parallel microchannel systems for integrated microelectronic device cooling [J]. IEEE Trans Compon Packag Manufact Technol, 2014, 4(3): 438–450.
- [6] Webb R L. Effect of manifold design on flow distribution in parallel micro-channels [C]//ASME 2003 International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2003: 527–535.
- [7] Amador C, Gavrilidis A, Angeli P. Flow distribution in different microreactor scale-out geometries and the effect of manufacturing tolerances and channel blockage [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 101(1/2/3): 379–390.
- [8] Mackinnon I R. Air distribution from ventilation ducts [D]. Montreal: McGill University, 1990: 39.
- [9] El Moueddeb S, Barthakur N. Perforated ventilation ducts: part 1, a model for air flow distribution [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 68(1): 21–27.
- [10] El Moueddeb S, Barthakur N. Perforated ventilation ducts part 2, validation of an air distribution model [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 68(1): 29–37.
- [11] Tong J C K, Sparrow E M, Abraham J P. Geometric strategies for attainment of identical outflows through all of the exit ports of a distribution manifold in a manifold system [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(17/18): 3552–3560.
- [12] Hassan J M, Mohamed T A, Mohammed W S, et al. Modeling the uniformity of manifold with various configurations [J]. Journal of Fluids, 2014, 2014: 1–8.
- [13] Balaji S, Lakashminarayanan S. Improved design of microchannel plate geometry for uniform flow distribution [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2006, 84(6): 715–721.
- [14] Kew P A, Cornwell K. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small diameter channels [J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17(8): 705–715.
- [15] Choi S H, Cho Y I. The effect of area ratio on the flow distribution in liquid cooling module manifolds for electronic packaging [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1993, 20(2): 221–234.
- [16] Yang H G, Wang Y, Ren M T, et al. Effect of the rectangular exit-port geometry of a distribution manifold on the flow performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117: 481–486.
- [17] 党小庆, 袁胜利, 姚群, 等. 直通式袋式除尘器流量分配计算流体动力学方法研究 [J]. 热力发电, 2005, (9): 29–31, 41–76.
- [18] 汪家琼, 刘根凡, 邓翔. FLUENT 软件在布袋除尘器挡板和导流板设计中的应用 [J]. 石油化工设备, 2008, 37(5): 71–73.
- [19] 张广朋, 袁竹林. 袋式除尘器内部流场的数值模拟研究 [J]. 动力工程学报, 2010, 30(7): 518–522.
- [20] 张相亮, 沈恒根, 周睿, 等. 袋式除尘器进气均布板结构参数对气流分布的影响分析 [J]. 环境工程, 2012, 30(4): 76–79, 27.
- [21] Kim S Y. The Effect of header shapes on the flow distribution in a manifold for electronic packaging applications [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1995, 22(3): 329–341.
- [22] Bajura R A, Jones E H. Flow distribution manifolds [J]. Journal of Fluids Engineering, 1976, 98(4): 654–666.
- [23] Ahn H, Lee S, Shin S. Flow distribution in manifolds for low reynolds number flow [J]. KSME International Journal, 1998, 12(1): 89–95.
- [24] Chen A W, Sparrow E M. Effect of exit-port geometry on the performance of a flow distribution manifold [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 29(13): 2689–2692.
- [25] Horiki S, Nakamura T, Osakabe M. Thin flow header to distribute feed water for compact heat exchanger [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(2): 201–207.
- [26] Osakabe M, Hamada T, Horiki S. Water flow distribution in horizontal header contaminated with bubbles [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(5): 827–840.
- [27] Chen A, Sparrow E M. Turbulence modeling for flow in a distribution manifold [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 52(5): 1573–1581.
- [28] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 104–106.
- [29] Cai Z J, Long T Y. Fluid Mechanics and Pump and Fan [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 104–106.