

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220638-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220638

金属海绵阻力特性数值计算

张丽芬¹, 葛鑫¹, 胡兴龙², 韦瑞荣¹, 余邦拓¹, 刘振侠¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空发动机集团有限公司 航空发动机动力传输重点实验室, 沈阳 110015)

摘 要: 采用体心立方结构和 Kelvin 结构重建金属海绵的胞体结构, 分析比较了单相流和两相流下金属海绵内部阻力、不同切角时金属海绵内部阻力。结果表明: ①体心立方结构能够达到的孔隙率 e 的范围为 $68.01\% < e < 98.01\%$; 而 Kelvin 结构能够达到的孔隙率的范围为 $72.1\% < e < 98.7\%$; ②油滴质量分数为 9.1%、进口速度小于 20 m/s 时, 两相流计算的压降比单相流计算的压降高约 5%; ③切角为 30° 的 Kelvin 结构金属海绵与实际金属海绵的阻力特性一致性较高, 能够较好地表征金属海绵的阻力特性。

关 键 词: 金属海绵; 阻力特性; 体心立方结构; Kelvin 结构; 离心通风器

中图分类号: V233.4

文献标志码: A

Numerical calculation on resistance characteristics of metal foam

ZHANG Lifan¹, GE Xin¹, HU Xinglong², WEI Ruirong¹, YU Bangtuo¹, LIU Zhenxia¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aero-engine,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The cell structure of the metal foam was reconstructed using the body-centered cubic structure and Kelvin structure, respectively, and the internal resistances of the metal foam under single-phase flow and two-phase flow at different cutting angles were analyzed and compared. The results showed that: 1) the body-centered cubic structure can achieve a porosity e range of $68.01\% < e < 98.01\%$; while the Kelvin structure can achieve a porosity range of $72.1\% < e < 98.7\%$; 2) the pressure drop calculated by two-phase flow was about 5% higher than that calculated by single-phase flow when the mass fraction of oil droplets was 9.1% and the inlet velocity was less than 20 m/s; 3) the resistance characteristics of the Kelvin structure metal foam with a cutting angle of 30° were in high agreement with those of the actual metal foam, and can better characterize the resistance characteristics of the metal foam.

Keywords: metal foam; resistance characteristics; body-centered cubic structure;
Kelvin structure; centrifugal ventilator

金属海绵是一种具有密度小、比表面积大、孔隙率高等特点的多孔介质材料^[1], 其制备材料主要有铝、铜、镍、陶瓷等^[2], 在石油、化工、航空航天、环境保护等方面运用越来越多。金属海绵离心通风器是航空发动机通风系统中的重要组成

部件, 对金属海绵阻力特性的研究能够为金属海绵离心通风器结构设计和优化提供依据。

在金属海绵研究方面, 国内外已经开展了一些相关研究。自 1856 年达西定理首次提出, 经 Forchheimer、Ergun 等^[3]、Innocentini 等^[4]、Richard-

收稿日期: 2022-08-30

作者简介: 张丽芬(1980—), 女, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事航空发动机通风系统部件流动、换热以及金属海绵离心通风器的研究。

引用格式: 张丽芬, 葛鑫, 胡兴龙, 等. 金属海绵阻力特性数值计算[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220638. ZHANG Lifan, GE Xin, HU Xinglong, et al. Numerical calculation on resistance characteristics of metal foam[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220638.

son 等^[5]、Moreira 等^[6]、Tadrist 等^[7]和 Dukhan 等^[8]的不断补充和完善,对金属海绵的结构参数有了非常完整的定义和描述,包括平均直径、孔隙率、孔密度等,还得到了不同结构参数之间的关系式。2010 年, Mancin 等^[9]对孔隙率在 90%~96%, 4 种 PPI(pores per inch, 孔密度, 指的是每英寸的孔数, 量符号记为 P_{inch})、相同材料的金属海绵进行阻力实验,得到了金属海绵结构参数与其阻力之间的关联式,研究得到了进一步发展。Trifale 等^[10]采用体心立方模型对金属海绵进行了模拟,并用实验方法和数值方法研究了金属海绵的力学特性。Krishnan 等^[11]也用体心立方模型获得的参数对金属海绵的有效导热系数、压降以及传热系数进行了研究。De Carvalho 等^[12]将微电脑层析扫描与数值方法相结合,研究了开孔金属海绵的流动,利用层析技术获得了金属海绵的微观结构图像,然后从这些图像中重建金属海绵的三维结构进行数值模拟。在国内,刘晓丹等^[13]提出了一种用 3 个六棱柱交叉穿过立方体形成的结构单元,用该单元模拟金属海绵的元胞并进行了数值计算;左孝青等^[14]对金属海绵的各方面性能及应用做了综述。赵红柳等^[15]设计了 S 型泡沫金属管翅式换热器,发现泡沫金属能够提升换热器的整体性能。李婧等^[16]对 5 种金属海绵的简化结构进行了数值分析,揭示了开孔泡沫金属作为换热翅片的换热和流动特性。刘东洋等^[17]在孔隙尺度上研究了孔隙率和孔密度对金属海绵换热和阻力的影响。可以看出,已经开展的研究多是将金属海绵作为一种强化换热的介质,主要关注金属海绵的换热特性,对金属海绵内部阻力特性研究开展得较少。

本文以金属海绵离心通风器为研究背景,对体心立方结构和 Kelvin 结构能够构建的金属海绵孔隙率范围进行了研究,计算了单相流动阻力和两相流动阻力的差异,分析了不同切取角度(0° 、 15° 、 30° 、 45° , 以下简称切角)构建的金属海绵模型的阻力特性,为金属海绵离心通风器的设计和优化提供了技术支撑。

1 金属海绵模型构建方法

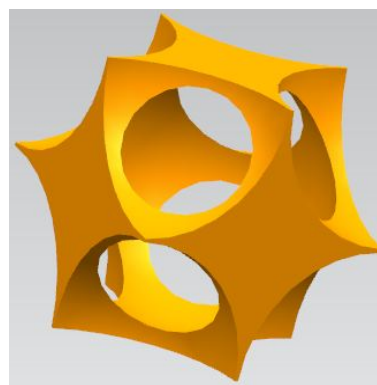
金属海绵内部胞体大多为 11~17 面体,单面的形状多为六边形面或四边形面^[18]。常见的金属海绵制作工艺主要有熔铸法与发泡法,这就导致金属海绵内部空的部分多为类球状^[1]。金属海

绵的 PPI 及孔隙率对金属海绵阻力特性有很大影响,而目前金属海绵数值计算中常以孔隙率及 PPI 作为构建金属海绵的基本结构参数^[11, 19-20]。常见的构建金属海绵的胞体结构有:棱柱搭接模型、面心立方模型、体心立方模型、Kelvin 结构等^[11, 13, 20-22]。棱柱搭接模型和面心立方模型结构较为简单,一般作为定性分析研究。体心立方与 Kelvin 结构较为复杂,单个胞体与实际金属海绵单个胞体相似,是目前较为广泛采用的金属海绵简化结构。

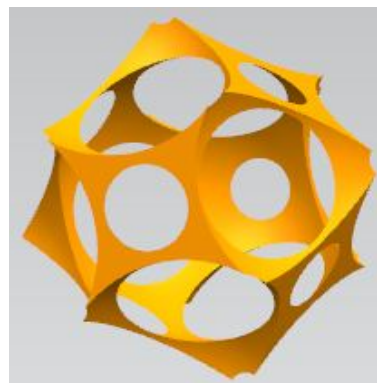
1.1 体心立方结构胞体

将一个立方体从 8 个顶点与中心处同时剖去相同直径的球,就形成了体心立方结构胞体,如图 1 所示。假设立方体边长为 L ,内剖球直径为 D ,分析可知,为保证 8 个顶点处剖的球与中心处球相连通,内剖球直径应有 $D \geq \sqrt{3}L/2$,为保证各剖球之间的骨架结构连续,应有 $D \leq \sqrt{5}L/2$ 。将结构胞体阵列排布,形成有序的金属海绵简化模型,如图 2 所示。

当 $\sqrt{3}L/2 < D < L$ 时,中心处内剖球与立方体面还未相交,从而形成八孔结构的体心立方体结



(a) $\sqrt{3}L/2 < D < L$ 得到的胞体



(b) $L < D < \sqrt{5}L/2$ 得到的胞体

图 1 体心立方结构胞体

Fig. 1 Body-centered cubic structure cell

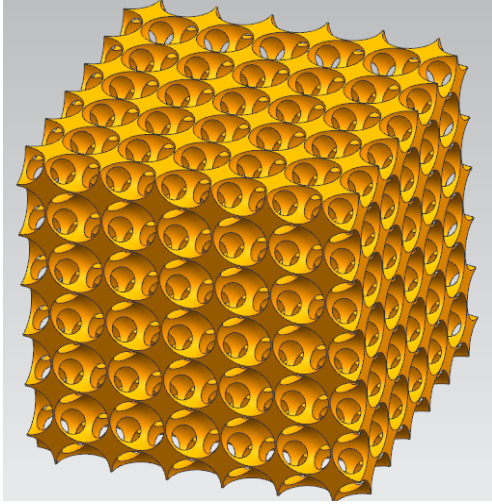


图 2 金属海绵简化模型

Fig. 2 Simplified model of metal foam

构单元胞体, 如图 1(a)所示。构建金属海绵的胞体结构时, 保持构建的金属海绵的 PPI 和孔隙率与真实金属海绵的 PPI 和孔隙率一致。此时, 构建的模型参数与金属海绵的孔隙率 e 和 PPI 的关系如下:

$$P_{\text{inch}} = \frac{25.4}{L} \quad (1)$$

$$e = \frac{\frac{1}{3}\pi D^3 - 16 \times \pi h_1^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{1}{3}h_1 \right)}{L^3} \quad (2)$$

其中 $h_1 = (2D - \sqrt{3}L)/4$, 经计算, 当 $\sqrt{3}L/2 < D < L$ 时, 金属海绵模型的孔隙率范围为 $68.01\% < e < 93.05\%$ 。

当 $L < D < \sqrt{5}L/2$ 时, 内剖球与立方体 6 个面相交, 各剖球间出现更多的相切, 但仍保持骨架连续, 形成具有 14 个孔的单元胞体, 如图 1(b)所示。构建的模型参数与金属海绵的孔隙率 e 和 PPI 的关系如下:

$$P_{\text{inch}} = \frac{25.4}{L} \quad (3)$$

$$e = \frac{1}{a^3} \left[\frac{1}{3}\pi D^3 - 12 \times \pi h_2^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{1}{3}h_2 \right) - 16\pi h_1^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{1}{3}h_1 \right) \right] \quad (4)$$

其中 $h_1 = (2D - \sqrt{3}L)/4$, $h_2 = (D - L)/2$, 经分析可知, 此时金属海绵模型孔隙率范围为 $93.05\% < e < 98.01\%$ 。

1.2 Kelvin 结构胞体

Kelvin 结构是一种十四面体结构, 具有 8 个

六边形面及 6 个四边形面^[23], 其命名源自于 1887 年, Kelvin 首先提出最小分区面积划分空间的理论^[24], 如图 3 所示。

本文采用与处理体心立方相似的方法, 将 Kelvin 结构在中心处剖去一个球形成 Kelvin 结构胞体。Kelvin 结构胞体可以以四边形面为基底排布阵列, 也可以以六边形面为基底排布阵列, 阵列得到的结构略有差异。研究表明, 以四边形面为基底得到的金属海绵结构拥有更高范围的孔隙率^[25], 所以本文采用四边形面为基底, 构建 Kelvin 结构的金属海绵模型。

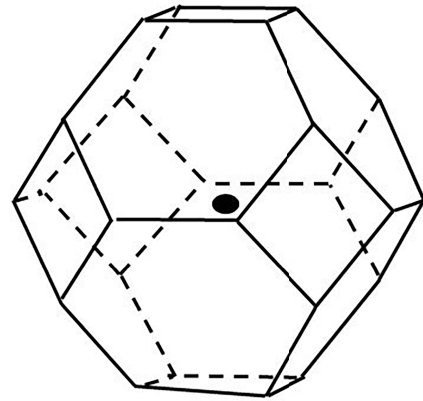
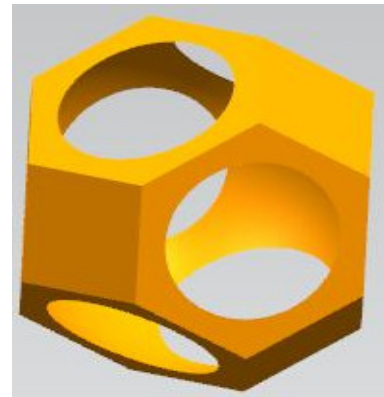


图 3 Kelvin 结构

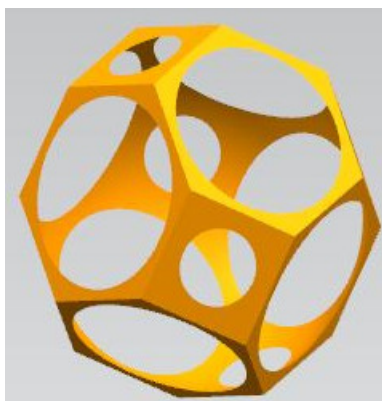
Fig. 3 Kelvin structure

Kelvin 结构胞体的关键参数为正十四面体的边长 c 与剖去球的直径 D_2 , 当正十四面体的边长 c 确定后, 根据剖去球的直径不同, Kelvin 结构胞体会形成两种不同通道的结构胞体(如图 4), 并具有不同的结构参数。为具有相通的孔结构, 保持结构胞体的连通性, 应有 $D_2 > 3c \sin(54.735^\circ)$ 。

当 $3c \sin(54.735^\circ) < D_2 < 2\sqrt{3}c \sin(54.735^\circ)$ 时, 中心处的内剖球只与正十四面体的六边形面相交,



(a) $3c \sin(54.735^\circ) < D_2 < 2\sqrt{3}c \sin(54.735^\circ)$ 得到的胞体



(b) $2\sqrt{3}c \sin(54.735^\circ) < D_2 < 4.236c$
得到的胞体

图 4 Kelvin 结构胞体

Fig. 4 Kelvin structure cell

与四边形面并未相交, 形成只有 8 个通孔 Kelvin 结构胞体, 如图 4(a), 此时 Kelvin 结构模型参数与金属海绵 PPI 的关系如下:

$$P_{\text{inch}} = \frac{25.4}{h} \quad (5)$$

$$h = 2\sqrt{3}c \sin(54.735^\circ) \quad (6)$$

$$V = \left(4.333hc^2 - \frac{\sqrt{2}c^3}{3} \right) \times 2 \quad (7)$$

其中 h 为正十四面体两对四边形面的距离, V 为正十四面体的体积。

$$a = 3c \sin(54.735^\circ) \quad (8)$$

$$V_1 = 8\pi \left(R - \frac{a}{2} \right)^2 \left(\frac{2R}{3} + \frac{a}{6} \right) \quad (9)$$

其中 a 为正十四面体两对六边形面的距离, $R = \frac{D_2}{2}$, V_1 是球缺体积。

当 Kelvin 胞体以四边形面为基面进行阵列时, 其胞体间阵列并不完全被胞体填充, 还存在两胞体间的孔隙, 此时构建一个如图 5 所示的立方体为胞体单元, 如图 5 标记处所示, 从而立方体胞体的孔隙率即可代表金属海绵模型的孔隙率。立方体孔隙率计算公式如下:

$$e = 1 - \left(V + V_1 - \frac{4\pi R^3}{3} \right) / h^3 \quad (10)$$

经计算分析可知, 此时 Kelvin 结构胞体孔隙率范围为 $72.1\% < e < 94.4\%$ 。

当 $D_2 > 2\sqrt{3}c \sin(54.735^\circ)$ 时, 孔隙率进一步增大。如图 4(b) 所示, 中心处的内剖球不仅与正

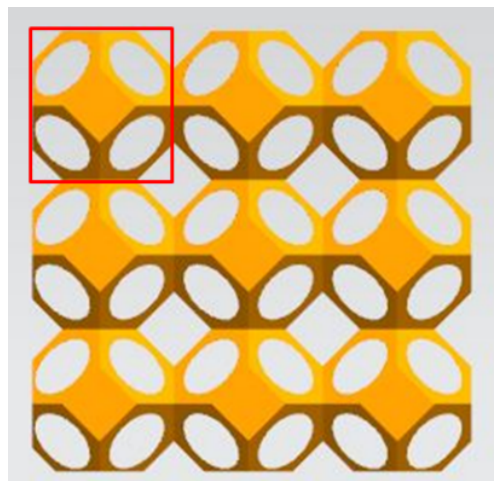


图 5 Kelvin 结构胞体阵列

Fig. 5 Kelvin structure cell array

十四面体六边形面相交, 并同时与四边形面相交, 形成十四通孔的胞体结构, 流道更为复杂。当内剖球与六边形面相切圆的直径大于六边形面两对边距离时, 孔与孔间的骨架将不再连续, 所以应有 $2\sqrt{3}c \sin(54.735^\circ) < D_2 < 4.236c$ 。此时, Kelvin 结构模型参数与金属海绵的孔隙率关系如下:

$$V_2 = 8\pi \left(R - \frac{a}{2} \right)^2 \left(\frac{2R}{3} + \frac{a}{6} \right) + 6\pi \left(R - \frac{h}{2} \right)^2 \left(\frac{2R}{3} + \frac{h}{6} \right) \quad (11)$$

$$e = 1 - \left(V + V_2 - \frac{4\pi R^3}{3} \right) / h^3 \quad (12)$$

其中 V_2 为球缺体积。此时, Kelvin 结构的金属海绵模型孔隙率范围为 $94.4\% < e < 98.7\%$ 。

在工程中, 金属海绵离心通风器一般采用的金属海绵的孔隙率在 90% 以上, 因此两种结构均可满足要求。

2 构建模型的方向性

实际情况中金属海绵内部是无序的网状结构, 本文构建的金属海绵模型是由单个胞体阵列排布而成, 势必具有有序的特点。但是从不同方向进入到金属海绵的流体其流动特征是不同的, 所以需要考虑方向对其阻力特性的影响。

保持进气方向与切取的金属海绵模型入口的法线方向一致, 则随着切角的不同, 得到的金属海绵模型的流动阻力也是不同的。如图 6 所示, 将单元胞体阵列组合成为一个较大的金属海绵模型, 基于该模型切取不同角度的金属海绵模型(图中 v 为来流速度)。切角 θ 是金属海绵模型入口面

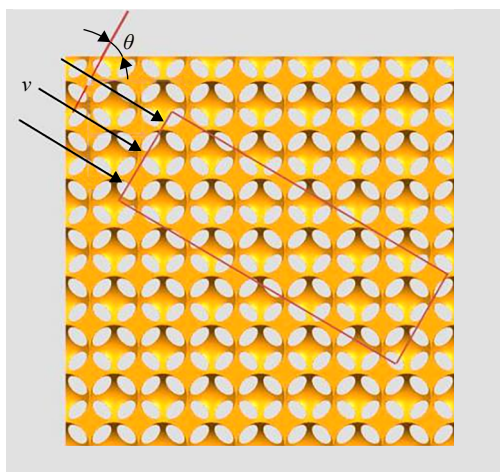


图 6 金属海绵模型切取方向示意图

Fig. 6 Sketch of cutting direction of metal foam model

与被切模型上端面的夹角。 θ 的范围在 $0^\circ \sim 90^\circ$, 当切角 θ 从 $0^\circ \sim 45^\circ$ 变化时与从 $90^\circ \sim 45^\circ$ 变化时, 得到的金属海绵模型内部结构是一致的, 所以本文金属海绵模型切角取在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内, 在该范围内选取了 0° 、 15° 、 30° 、 45° 时的金属海绵模型。图 7 和图 8 为体心立方结构和 Kelvin 结构两种金属海绵模型在不同切角下的主视图。

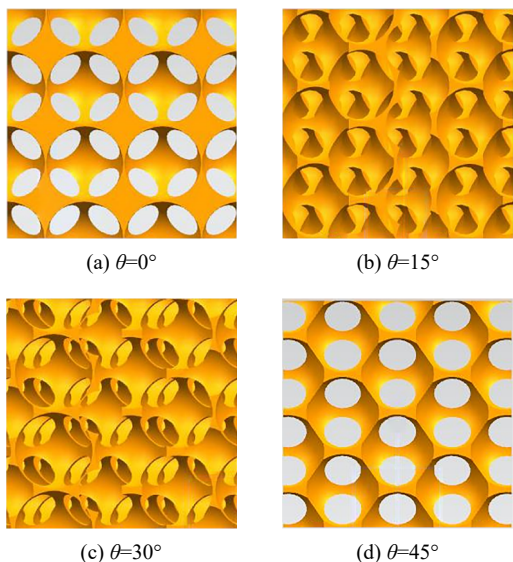


图 7 不同切角下体心立方结构

Fig. 7 Body-centered cubic structure at different cutting angles

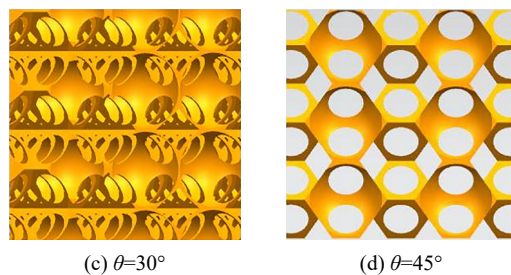
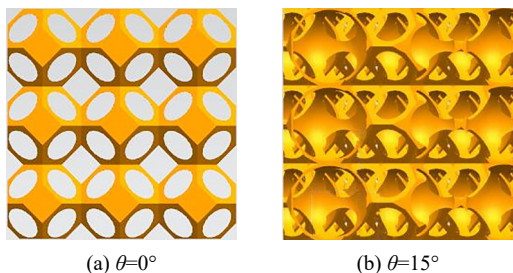


图 8 不同切角下 Kelvin 结构

Fig. 8 Kelvin structure at different cutting angles

由图 7、图 8 可以看出, 对于两种结构的金属海绵模型, 切角为 0° 与 45° 的金属海绵在速度方向上有明显的通孔, 而 15° 与 30° 的金属海绵模型无明显通孔。

3 计算域、网格及边界条件

3.1 计算域

图 9 为计算域, 中间部分为金属海绵模型, 为防止计算过程中产生回流, 延长了出口段。

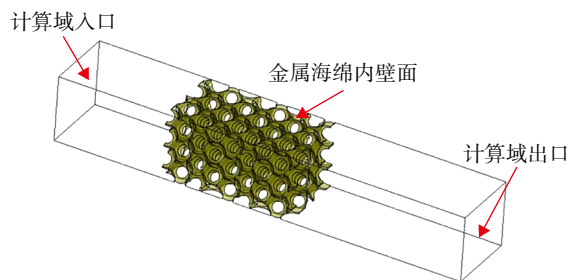


图 9 数值模拟计算域

Fig. 9 Computational domain of numerical simulation

3.2 计算网格

使用非结构四面体网格进行网格划分。由于内部金属海绵流道曲折复杂, 曲率较大, 含有较多的狭长较薄的骨架结构, 所以采用了局部加密 (见图 10)。通过网格无关性分析, 最终的网格数量约为 1 000 万。

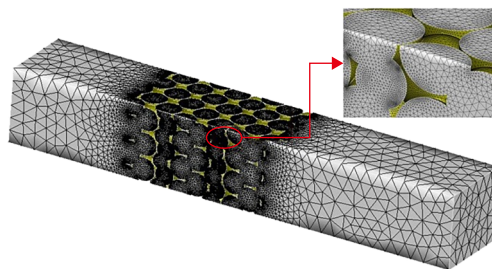


图 10 计算域网格划分

Fig. 10 Grid of computational domain

3.3 边界条件

计算域入口边界为速度入口边界,方向垂直于金属海绵外流域入口面,出口边界为压力出口,四周边界设为对称边界条件。

在工程中,金属海绵离心通风器内部是油气两相流动。计算两相流时,油滴平均直径取为 15 μm ,最大直径为 70 μm ,最小直径为 3 μm ,油滴颗粒分布为 R-R 分布,油滴入口速度与空气速度相同,空气-油滴采用双向耦合计算,油滴撞击到壁面后全部反弹。

4 计算结果分析

4.1 两相流动阻力与单相流动阻力分析

采用 Kelvin 结构 0°切角的金属海绵模型进行计算,孔隙率为 92%,PPI 为 25。金属海绵入口为速度入口边界。表 1 为根据入口速度计算的入口空气质量流量及油滴质量流量。工程中,通风器中的油滴质量分数一般认为不大于 10%,本文油滴的质量分数取为 9.1%,也即油滴的质量流量占空气质量流量的 10%,计算结果如图 11 所示。

表 1 空气质量流量与油滴质量流量

Table 1 Air mass flow rate and lubricant mass flow rate

入口速度/ (m/s)	入口表面积/ 10 ⁻⁶ m ²	空气质量流量/ 10 ⁻⁵ (kg/s)	油滴质量流量/ 10 ⁻⁶ (kg/s)
6	9	6.966	6.966
7	9	8.127	8.127
10	9	11.6	11.6
15	9	17.4	17.4
20	9	23.2	23.2

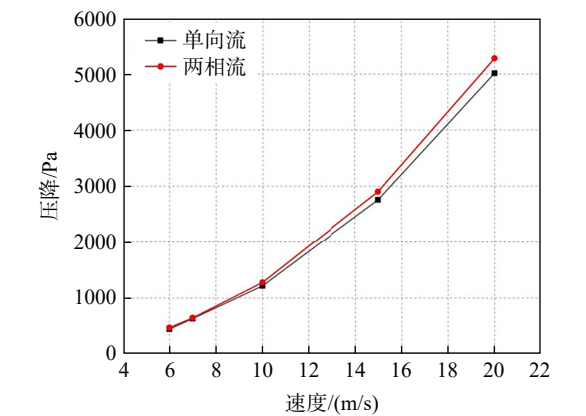


图 11 金属海绵模型内两相流与单相流阻力对比

Fig. 11 Two-phase flow versus single-phase flow resistance in metal foam model

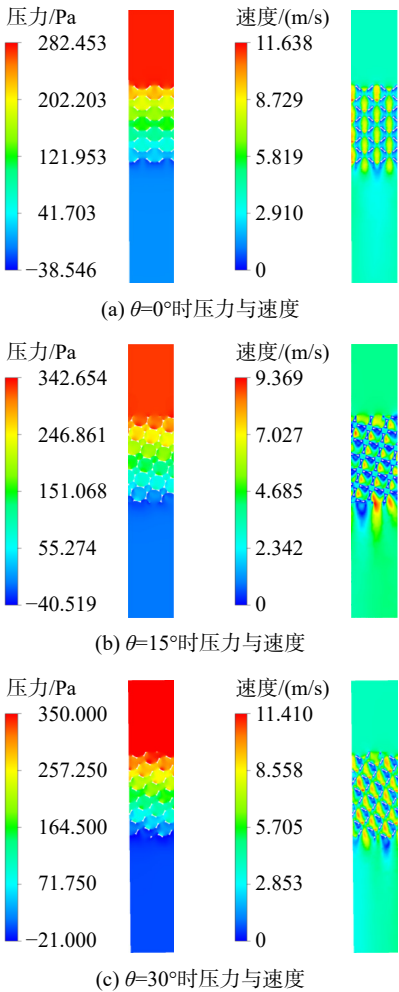
由图 11 可以看出,在入口速度相同的情况下,

使用两相流模型计算得到的阻力值单相流更大,并且随着速度的增大,两相流与单相流阻力的绝对差值也增大,但相对阻力增加量基本不变,不同速度下两相流相对于单相流的阻力计算值的增加量约为 5% 左右。计算中油滴的质量分数取为 9.1%,当油滴质量分数减少时,两相流计算的阻力与单相流计算的阻力差异将进一步减小。因此在图 11 所示的速度范围内,油滴的质量分数不大于 9.1% 时,可以采用单相流动代替多相流动快速地进行阻力特性预估。

4.2 金属海绵流场分析

以孔隙率为 92%、PPI 为 25 的金属海绵为例,分别对上述切角为 0°、15°、30°、45°的金属海绵模型进行计算。图 12 和图 13 为出口压力相同,入口速度为 4 m/s 的两种金属海绵结构的压力云图与速度云图计算结果。

由图 12、图 13 看出,流体进入金属海绵后会通过突缩与突扩的孔状结构,压力持续降低,速度则交替地增大和减小。对比两种结构的金属海绵,可以看出同样 PPI 和孔隙率下 Kelvin 结构产



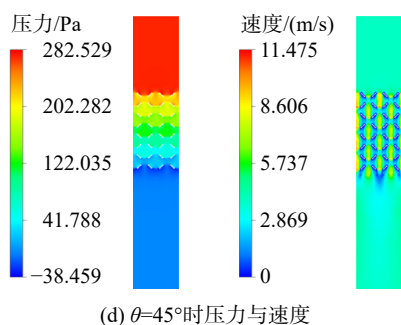


图 12 体心立方结构金属海绵压力云图与速度云图

Fig. 12 Pressure and velocity contours of metal foam with body-centered cubic structure

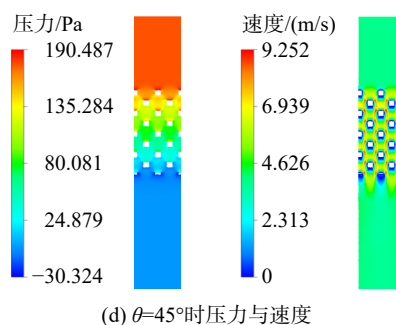


图 13 Kelvin 结构金属海绵压力云图与速度云图

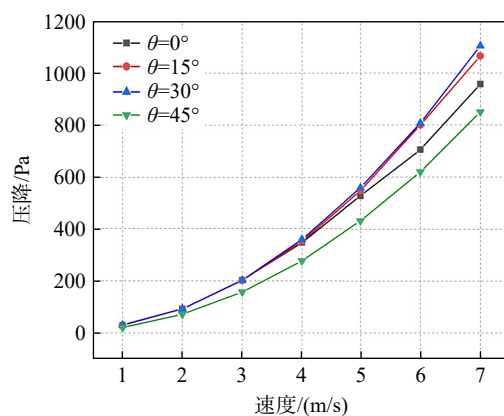
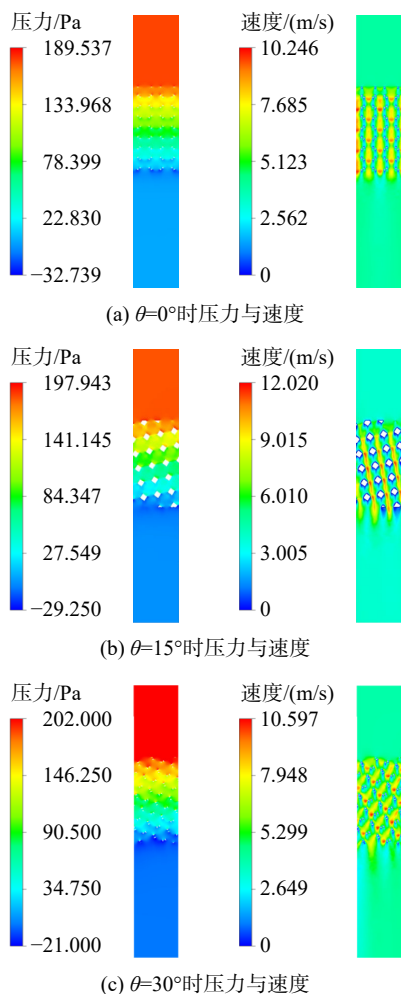
Fig. 13 Pressure and velocity contours of metal foam with Kelvin structure

生的阻力更小,无论是体心立方结构还是 Kelvin 结构,切角为 30° 和 15° 的金属海绵产生的阻力在相同条件下均高于 0° 、 45° 切角的金属海绵产生的阻力。

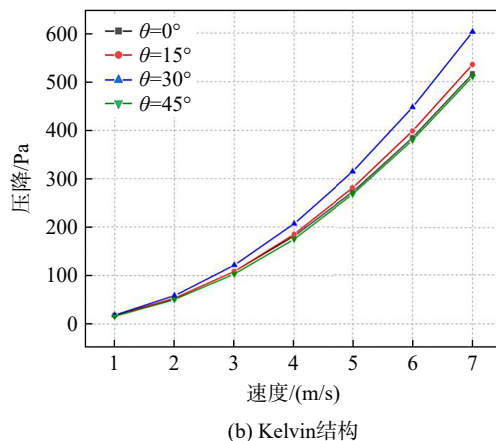
图 14 为不同入口速度下,两种结构、不同切角金属海绵的阻力对比。

由图 14(a)可以看出,对于体心立方结构,切角为 45° 的金属海绵阻力最小,其次为切角为 0°

的金属海绵,切角为 15° 与 30° 的金属海绵阻力最大。对于切角为 45° 与 0° 的金属海绵,其流体入口速度方向具有较多的通孔,这就导致金属海绵突扩及突缩程度较小,更多的流体会在直通孔中流出,从而避免与金属海绵骨架结构接触产生更大的损失,所以流体穿过金属海绵时阻力更小。对比切角为 45° 与 0° ,切角为 45° 的金属海绵通孔面积相比于切角为 0° 更大,所以产生的损失更小,



(a) 体心立方结构



(b) Kelvin 结构

图 14 不同切角金属海绵的阻力

Fig. 14 Resistance of metal foam with different cutting angles

阻力更小。

由图 14(b)可以看出,对于 Kelvin 结构,切角为 0° 与 45° 的金属海绵压降几乎完全相同,这是因为切角为 0° 与 45° 的金属海绵的通孔面积大致相同;而切角为 15° 与 30° 的金属海绵压降则有一定的增加,其中切角为 30° 的金属海绵阻力在较高流速下有明显增加。这是因为, Kelvin 结构中,流体在切角为 30° 的金属海绵中流动相对于其他切角的速度偏转更加剧烈,从而造成较大的局部损失,使阻力相对于其他切角更大。

4.3 阻力特性与实验对比

本节对所构建的金属海绵模型进行验证。表 2 为 Koltsakis 等^[26]所做的阻力实验中金属海绵的结构参数,其中实验介质为空气。

表 2 文献 [26] 实验的金属海绵参数
Table 2 Experimental metal foam parameters
in literature [26]

PPI	体积分数/%	密度/(g/m ³)
30	9.8	0.450
20	6.6	0.410

分别使用体心立方与 Kelvin 结构构建上述结构参数的金属海绵,计算边界条件与实验一致,其中进口速度为实验金属海绵入口面处速度,出口处压力为大气压力。数值计算结果与实验值对比如图 15 和图 16 所示。可以看出,对于 Kelvin 结构来说,其数值计算结果与实验值相比偏小,切角为 30° 金属海绵的阻力特性比切角为 0° 更加贴合真实金属海绵的阻力;对于体心立方结构,切角为 0° 与 30° 的金属海绵数值计算单位压降都比实验值高,而且随着速度的增大,其差距越来越

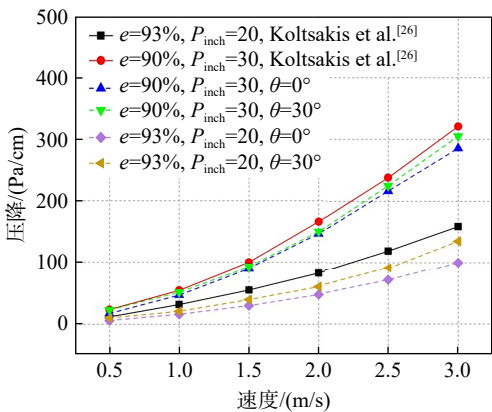


图 15 Kelvin 结构数值计算结果与实验值对比

Fig. 15 Comparison of numerical results of Kelvin structure with experiment

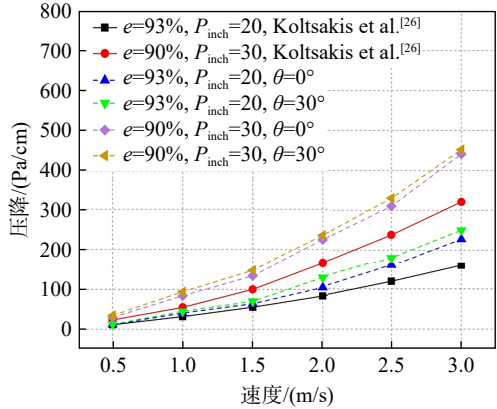


图 16 体心立方结构数值计算结果与实验值对比

Fig. 16 Comparison of numerical results of body-centered cubic structure with experiment

越大。相比较,切角为 30° 的 Kelvin 结构更接近实际金属海绵的阻力特性,可用来模拟真实金属海绵的阻力特性。

5 结 论

本文建立了体心立方结构金属海绵模型与 Kelvin 结构金属海绵模型,计算了单相流与多相流阻力特性的差异,分析了不同切角两种模型内部的流场与阻力特性,与实验数据进行了对比,得到以下结论:

- 1) 体心立方结构能够达到的孔隙率的范围为 $68.01\% < e < 98.01\%$; 而 Kelvin 结构能够达到的孔隙率的范围为 $72.1\% < e < 98.7\%$ 。
- 2) 在本文计算的进口速度和油滴质量分数范围内,两相流与单相流计算的阻力差异约为 5%,因此可以在通风器阻力计算中采用单相流进行阻力特性预估。
- 3) 在同样的孔隙率和 PPI 下,体心立方模型比 Kelvin 模型产生的阻力大;切角为 0° 和 45° 的模型存在较大的直通面积,阻力比切角为 15° 和 30° 的模型小。
- 4) 切角为 30° 的 Kelvin 结构金属海绵模型的压降特性与真实金属海绵有着较高的一致性,能够作为金属海绵数值模拟的有效模型,为通风器优化设计提供有效支持。

参考文献:

[1] 姬科学. 开孔泡沫金属的功能化应用基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
JI Keju. Basic research on functional application of open-cell foam metal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)

- [2] BANHART J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams[J]. *Progress in Materials Science*, 2001, 46(6): 559-632.
- [3] ERGUN S, ORNING A A. Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1949, 41(6): 1179-1184.
- [4] INNOCENTINI M D M, SALVINI V R, MACEDO A, et al. Prediction of ceramic foams permeability using Ergun's equation[J]. *Materials Research*, 1999, 2(4): 283-289.
- [5] RICHARDSON J T, PENG Y, REMUE D. Properties of ceramic foam catalyst supports: pressure drop[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2000, 204(1): 19-32.
- [6] MOREIRA E A, INNOCENTINI M D M, COURRY J R. Permeability of ceramic foams to compressible and incompressible flow[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, 24(10/11): 3209-3218.
- [7] TADRIST L, MISCEVIC M, RAHLI O, et al. About the use of fibrous materials in compact heat exchangers[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28(2/3): 193-199.
- [8] DUKHAN N. Correlations for the pressure drop for flow through metal foam[J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 41(4): 665-672.
- [9] MANCIN S, ZILIO C, CAVALLINI A, et al. Pressure drop during air flow in aluminum foams[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(15/16): 3121-3130.
- [10] TRIFALE N, NAUMAN E, YAZAWA K. Mechanical characterization of metal foams for contact resistance in thermal interface applications[R]. San Francisco, US: ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, 2015.
- [11] KRISHNAN S, MURTHY J Y, GARIMELLA S V. Direct simulation of transport in open-cell metal foam[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2006, 128(8): 793-799.
- [12] DE CARVALHO T P, MORVAN H P, HARGREAVES D, et al. Experimental and tomography-based CFD investigations of the flow in open cell metal foams with application to aero engine separators[R]. ASME GT2015-43509, 2015.
- [13] 刘晓丹, 冯妍卉, 杨雪飞, 等. 泡沫金属的热分析[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(7): 895-900.
LIU Xiaodan, FENG Yanhui, YANG Xuefei, et al. Thermal analysis on metal foams[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(7): 895-900. (in Chinese)
- [14] 左孝青, 孙加林. 泡沫金属的性能及应用研究进展[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2005, 30(1): 13-17.
ZUO Xiaoqing, SUN Jialin. Properties and applications of foamed metals[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 2005, 30(1): 13-17. (in Chinese)
- [15] 赵红柳, 孙明瑞, 姜楠, 等. S 型泡沫金属管翅式换热器的设计与实验研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(4): 840-849.
ZHAO Hongliu, SUN Mingrui, JIANG Nan, et al. Design and experimental study of S-type foam metal tube-fin heat exchanger[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(4): 840-849. (in Chinese)
- [16] 李婧, 孙晓霞, 马兴龙, 等. 开孔泡沫金属传热和流动特性[J]. 兵工学报, 2024, 45(1): 122-130.
LI Jing, SUN Xiaoxia, MA Xinglong, et al. Study on heat transfer and flow characteristics of open-cell metal foams[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(1): 122-130. (in Chinese)
- [17] 刘东洋, 顾令东, 闵敬春. 泡沫金属内空气流动换热特性数值研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(7): 1929-1934.
LIU Dongyang, GU Lingdong, MIN Jingchun. Numerical study on air flow and heat transfer in foam metal[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(7): 1929-1934. (in Chinese)
- [18] BOOMSMA K, POULIKAKOS D, VENTIKOS Y. Simulations of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2003, 24(6): 825-834.
- [19] KUMAR P, TOPIN F. Micro-structural impact of different strut shapes and porosity on hydraulic properties of kelvin-like metal foams[J]. *Transport in Porous Media*, 2014, 105(1): 57-81.
- [20] NIE Zhengwei, LIN Yuyi, TONG Qingbin. Modeling structures of open cell foams[J]. *Computational Materials Science*, 2017, 131: 160-169.
- [21] BOCK J, JACOBI A M. Geometric classification of open-cell metal foams using X-ray micro-computed tomography[J]. *Materials Characterization*, 2013, 75: 35-43.
- [22] YU Qijun, THOMPSON B E, STRAATMAN A G. A unit cube-based model for heat transfer and fluid flow in porous carbon foam[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2006, 128(4): 352-360.
- [23] WEAIRE D, PHELAN R. A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces[J]. *Philosophical Magazine Letters*, 1994, 69(2): 107-110.
- [24] SIR THOMSON W. On the division of space with minimum partition area[J]. *Acta Mathematica*, 1887, 11(1): 121-134.
- [25] 齐敏菊, 高光发. 开孔泡沫材料随机化 Kelvin 微结构模型建立与应用[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(2): 262-269.
QI Minju, GAO Guangfa. Modeling random kelvin cell micro-structure for open-cell foam and its application on compression response of open-cell aluminum foam[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(2): 262-269. (in Chinese)
- [26] KOLTSAKIS G C, KATSAOUNIS D K, MARKOMANOLAKIS I A, et al. Design and application of catalyzed metal foam particulate filters[R]. Warrendale, US: SAE International, 2006.

(编辑: 秦理曼)