

界面层及其建模方式对编织结构CMC材料 导热系数影响研究*

叶大海¹, 屠泽灿², 李洋¹, 毛军逵², 赵陈伟²

(1. 中国航发湖南动力机械研究所 中小型航空发动机叶轮机械湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412002;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对编织结构陶瓷基复合材料 (Ceramic matrix composite, CMC) 中基体、纤维束和界面层等组分的不同传热特征, 以及考虑到界面层结构极薄的尺寸特征, 探究了界面层及其在细观结构代表单元中的引入方式对编织结构CMC材料内部热量传输特征和各向异性导热系数的影响。研究中对比分析了不考虑界面层、含隐式界面层和含显式界面层等三种代表性体积单元模型的温度场、热流密度场及各向异性等效导热系数, 获取了界面层导热系数对CMC材料整体导热系数的影响规律。研究结果表明: 编织结构CMC材料内部温度场存在明显的不均匀性, 不同模型计算获取的热流密度场具有明显区别。同时基于三个模型获取的各向异性导热系数也具有较大差异, 显示界面层方法预估精度较高。此外, 随着界面层导热系数增加, CMC材料整体各向异性导热系数明显增加, 其对水平经纱Y方向上等效导热系数的影响最大。

关键词: 陶瓷基复合材料; 编织结构; 界面层; 热分析; 导热系数; 各向异性

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 05-200899-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200899

Effects of Interface and Its Modeling Method on Thermal Conductivity of Braided CMC Materials

YE Da-hai¹, TU Ze-can², LI Yang¹, MAO Jun-kui², ZHAO Chen-wei²

(1. Hunan Key Laboratory of Turbomachinery on Medium and Small Aero-Engine,
AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;

2. College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Different components of the braided ceramic matrix composites (CMC), including the matrix, the fiber and the interface, have different heat transfer properties. Considering the thin-wall characteristic of interface, the effects of the interface and its modeling method on the heat conduction characteristics and the anisotropic thermal conductivity were studied. Three different representative volume element (RVE) models were built, that is, the model without interface, the model with implicit interface and the model with explicit interface. The temperature distributions, heat flux distributions and effective anisotropic thermal conductivities of these three models were compared. The effects of interface's thermal conductivity on the thermal conductivities of

* 收稿日期: 2020-11-10; 修订日期: 2021-02-07。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (51906105); 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20190420); 中国博士后科学基金 (2018M642248); 国家科技重大专项 (2017-III-0001-0025)。

作者简介: 叶大海, 硕士, 工程师, 研究领域为航空发动机空气系统及传热。

通讯作者: 屠泽灿, 博士, 工程师, 研究领域为航空发动机传热。

引用格式: 叶大海, 屠泽灿, 李洋, 等. 界面层及其建模方式对编织结构CMC材料导热系数影响研究[J]. 推进技术, 2022, 43(5): 200899. (YE Da-hai, TU Ze-can, LI Yang, et al. Effects of Interface and Its Modeling Method on Thermal Conductivity of Braided CMC Materials[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5): 200899.)

whole CMC material were also studied. The results show that, the internal temperature field is quite non-uniform. The heat flux distributions of these three models have significant difference. At the same time, the anisotropic thermal conductivities based on these three models are also different with each other. The modeling method with explicit interface has better accuracy in predicting the effective thermal conductivity of braided CMC materials. Additionally, as the thermal conductivity of interface increases, the anisotropic thermal conductivities of whole CMC material increase significantly, especially the effective thermal conductivity on the Y axis (the direction along horizontal warp yarns).

Key words: Ceramic matrix composite; Braided structure; Interface; Thermal analysis; Thermal conductivity; Anisotropy

1 引言

随着航空发动机性能的不不断提升,涡轮进口前温度也随之迅速升高^[1],对涡轮叶片等高温部件材料的耐热能力提出了较高的要求。编织结构纤维增韧的陶瓷基复合材料(Ceramic matrix composite,简称 CMC 材料)由于其良好的力学性能及耐高温性能,得到了较多关注,并逐渐在航空发动机中得到工程应用^[2]。

CMC 材料是在 SiC 等基体中加入纤维束等增强相,并且纤维与基体之间存在界面层等连接结构。由于材料内部非均匀非均质的特征以及纤维本身的导热各向异性,使得 CMC 材料的导热系数等热物性参数表现出明显的各向异性及分散性等特征^[3-5]。因此,在 CMC 材料高温部件的设计应用中,基于各向同性金属材料的高温部件热分析方法不再适用,需要建立针对 CMC 材料的热物性预估及热分析方法。

代表性体积单元法(Representative volume element,简称 RVE)^[6]由于其能够较好地反映材料细观编织结构的几何特征,以及较高的预估精度,被广泛地应用于编织结构 CMC 材料的热分析研究中^[7-9]。Dong 等^[10]针对 2.5 维编织结构材料分别在微观尺度和细观尺度建立了 RVE 模型,详细分析了材料内部的温度场及热流密度场的分布特征,并最终计算获取了材料的各向异性等效导热系数。江华^[11]基于三维五向编织结构 RVE 模型,探究了编织结构几何特征及材料组分热物性对材料整体各向异性导热系数的影响规律。Tu 等^[12]在上述基础上,进一步考虑涡轮叶片等航空发动机高温部件的薄壁特征尺寸,建立了厚度方向全尺寸的代表性单元模型,进一步提高了材料厚度方向等效导热系数的预估精度。

上述基于细观尺度编织结构的 CMC 材料热物性预估及热分析方法,大多没有考虑界面层对材料内

部热量传输的影响,仅有少量学者在微观尺度纤维丝模型中考虑了界面层对热物性的影响^[13]。这主要是由于,界面层结构非常薄,大都为 μm 量级(0.1 ~ 10 μm)^[14-16],而 RVE 模型的尺寸约为 mm 量级。界面层与整体模型的尺寸差异较大,按照真实厚度建模,所需网格量及计算资源巨大。

较多学者在开展 CMC 材料力学性能研究时,为了能够模拟界面层破坏模式对材料整体失效的影响,早期常采用在纤维与基体间建立隐式界面层(零厚度单元)的方法,例如卢子兴^[17]基于内聚力模型方法,建立了界面非线性力学模型,探究了界面脱粘过程中的非线性行为。但是潘清等^[18]指出由于上述方法没有显式地建出界面部分,界面破坏模式无法和基体破坏模式区分,并不能很好地预测材料的界面失效特征。因此他们提出在纤维束和基体之间引入一层厚度为 0.03mm 的显式界面单元(有限厚度界面层)。Braginsky 等^[19]同样建立了包含界面层模型的三维轴对称多相模型,获取了更加多样且贴近真实情况的裂纹形态。

综上所述,关于界面层对 CMC 材料力学性能的影响已有较多学者开展研究,然而针对界面层及其引入方式对 CMC 材料,尤其是编织结构 CMC 材料内部热量传输特征及热物性参数的影响研究较少。因此本文以 2.5 维编织结构 CMC 材料为例,分别建立不考虑界面层、隐式界面层以及显式界面层结构的 RVE 模型,并在不同方向的定温边界条件下,探究界面层及其在建模中的引入方式对材料等效导热系数及内部热量传输特征的影响机制。

2 计算模型及数值方法

2.1 计算模型

本文采用与文献[12]中具有相同几何特征尺寸的 2.5 维编织结构 CMC 材料作为研究对象。图 1 中给出了 2.5 维编织结构复合材料的样品照片及 RVE

计算模型(单位:mm),样品几何尺寸为10mm×10mm×2.8mm。纤维束截面为六边形,几何尺寸如图1(b)中所示,宽度为1.5mm,厚度为0.25mm。图1(c)为不考虑界面层的编织结构 RVE 模型,命名为 Model 1,其几何尺寸为5.72mm×3.34mm×0.6mm,编织纤维束的偏转角度为45°,图1(d),(e)分别为编织纤维束和基体结构。

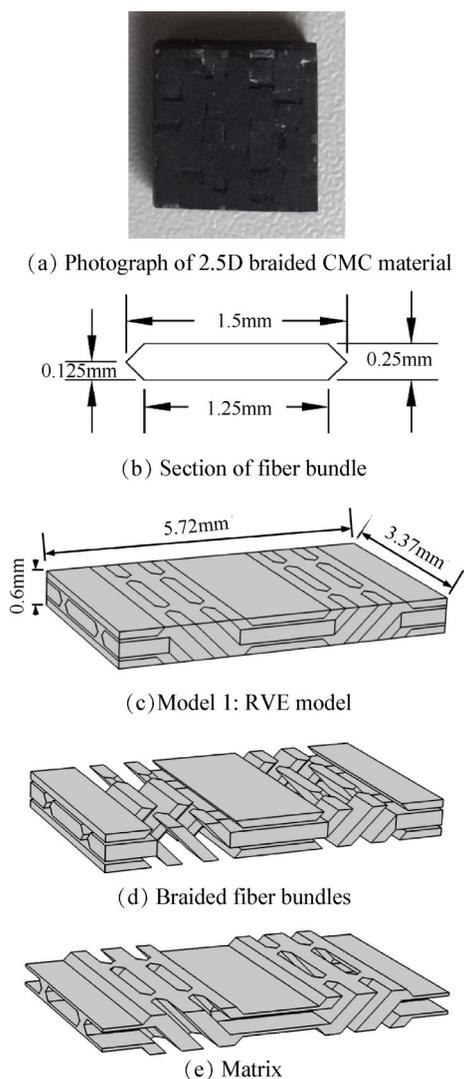


Fig. 1 RVE model of 2.5D braided CMC material without interface

图2(a),(b)为考虑热解碳(Pyrolytic carbon,缩写PyC)界面层的RVE模型,其中图2(a)为基于Comsol multiphysics建立的隐式界面层模型,即采用在基体和纤维束之间添加无实际几何厚度的界面层材料(设置表征几何厚度为0.01mm),命名为Model 2。图2(b)为显式界面层模型,在基体和纤维束之间建立了厚度为0.01mm的界面层几何薄层,命名为Model 3,界面层如图2(c)中所示。

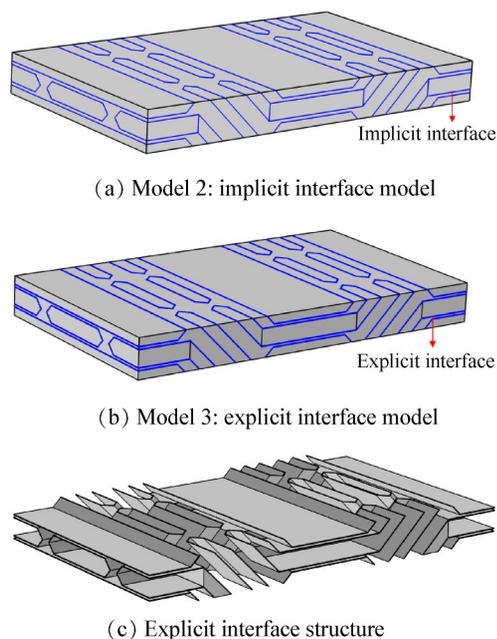


Fig. 2 RVE model of 2.5D braided CMC material with interface

2.2 控制方程

本文数值模拟中为固体域内部热量稳态传导过程,温度场的有限元计算采用Comsol multiphysics软件中的固体传热模块完成,模型固体域能量传输方程^[20]为

$$-\nabla \cdot (\mathbf{k}_{ij} \nabla T) = Q \quad (1)$$

式中 Q 为源项, \mathbf{k}_{ij} 为各向异性导热系数矩阵, T 为温度。

2.3 各向异性导热系数设置

图1,2中所示的计算模型中基体及PyC界面层为导热各向同性材料,根据文献[12]中的数据,SiC基体的导热系数为6.5W/(m·K)。PyC界面层的导热系数采用文献[21]中的数据为25W/(m·K)。而纤维束的导热系数为各向异性,轴向导热系数大于径向导热系数,为了表征纤维束的各向异性导热系数,引入导热主方向坐标系(ζ, η, ν), ζ 方向的导热系数较大,为纤维束轴向,数值为9.66W/(m·K),而径向 η 和 ν 方向的导热系数相同,数值为1.48W/(m·K)^[12],如表1所示。

Table 1 Thermal conductivity of different components

Component	$k/(W/(m \cdot K))$
SiC matrix ^[12]	6.5
PyC interface ^[21]	25
Fiber axial ^[12]	9.66
Fiber radial ^[12]	1.48

然而在本文的三个计算模型中,纤维束存在空间上的方向偏转,即导热主方向坐标系(ζ, η, ν)与计算坐标系(X, Y, Z)存在空间夹角,如图3中所示,因此需要对偏转部分纤维束的各向异性导热系数矩阵进行空间转换,具体转换过程参考文献[12]中的方法。

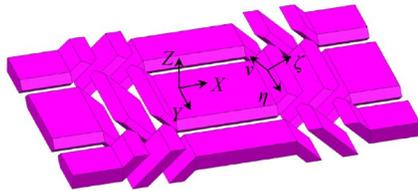


Fig. 3 Schematic diagram of the variation of local coordinate

2.4 网格划分

网格划分采用 Comsol multiphysics 中的四面体网格,经过网格独立性试验后,网格最大尺寸为 0.1mm,最小尺寸为 10 μ m,网格增长率小于 1.2,三个模型采用相同的网格划分策略。最终 Model 1, 2 和 3 的网格数量分别为 338121, 387067 和 4869594,网格示意图如图4中所示。

2.5 边界条件及计算工况

计算中分别在 RVE 模型 Z, X 和 Y 方向上的两个

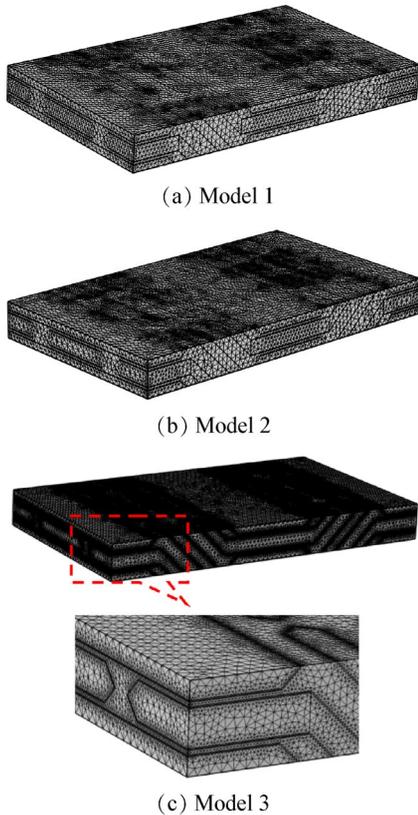


Fig. 4 Mesh generation

底面施加定温边界条件,温度分别设定为 273K 和 283K,在模型其余的四周壁面采用周期边界,即分别为 Z 方向温度梯度(边界条件 1)、X 方向温度梯度(边界条件 2)和 Y 方向温度梯度(边界条件 3),分别如图 5(a), (b), (c) 所示。

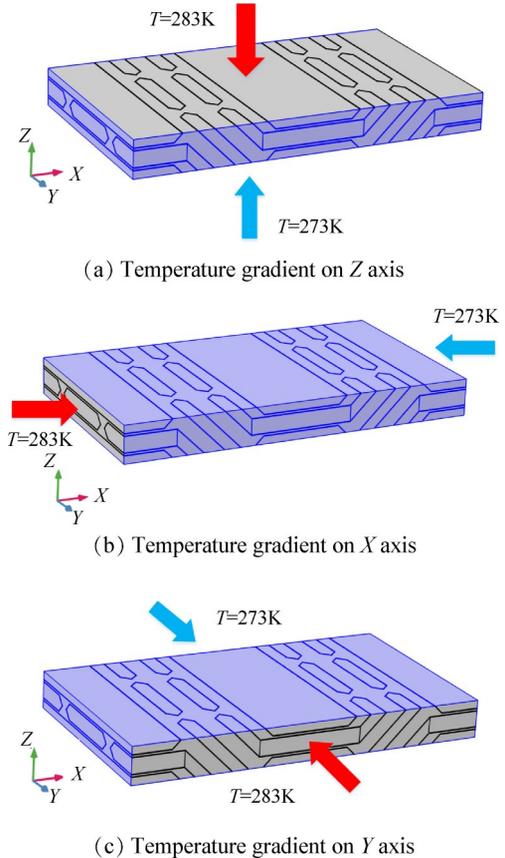


Fig. 5 Three different boundary conditions

研究中为了获取三个模型 X, Y 和 Z 方向上的导热系数,计算了 Model 1, 2 和 3 在上述三种边界条件的温度场及热流密度场等,表 2 中给出了本文的 9 个计算工况。

同时,为了进一步获取界面层导热系数对编织

Table 2 Operating conditions

Case	Model	Boundary
1-1	1	Z axis
1-2	2	Z axis
1-3	3	Z axis
2-1	1	X axis
2-2	2	X axis
2-3	3	X axis
3-1	1	Y axis
3-2	2	Y axis
3-3	3	Y axis

结构 CMC 材料导热性能的影响规律,本文改变了界面层与基体的导热系数比 r ,并基于 Model 3 获取了各向异性等效导热系数的变化规律。导热系数比 r 的具体定义如式(2)中所示

$$r = k_{\text{interface}}/k_{\text{matrix}} \quad (2)$$

式中 $k_{\text{interface}}$ 为界面层导热系数, k_{matrix} 为基体导热系数。

因此 2.3 小节中给出的典型导热系数工况下 $r=3.85$ 。此外,根据文献[21]中给出的界面层导热系数范围,本文中设定的导热系数比 r 见表 3。

Table 3 Variation of r

r	$k_{\text{interface}}/(W/(m \cdot K))$	$k_{\text{matrix}}/(W/(m \cdot K))$
1	6.5	6.5
3.85	25	6.5
8	52	6.5
12	78	6.5
16	104	6.5

研究中为了更好地分析模型的温度场及热流密度场分布特征,在模型表面选择了如图 6 所示的特征线 Line 1 作为分析对象。



Fig. 6 Schematic diagram of the specific line

3 结果分析

3.1 温度场计算结果对比分析

图 7 中给出了 Case 1-3 中基体、纤维束及界面各个组分的温度场分布云图。由图中可以看出,基体、纤维束及界面层等各个组分的温度分布均存在一定的不均匀性。纤维部分的温度不均匀性是由于,纤维束本身的导热各向异性及纤维束在模型内部方向偏转,使得纤维束内部的热量传输路径复杂多变。而界面层和基体虽然是各向同性材料,但是由于纤维与界面层、界面层与基体交界处的温度分布较为复杂,最终导致该两组分的温度分布不均匀。

图 8 给出了三个模型在 Z 方向温度梯度(边界条件 1)下即 Case 1-1, 1-2 和 1-3 的温度场分布云图以及 Line 1 上的温度分布曲线。由图中可以看出,模型表面的等温线呈波浪状分布,在纤维束与基体交界处,等温线发生明显偏转,这主要是由于基体和纤维束的导热系数存在明显差异,在上下表面之间的热量传递形成了多层壁的热传导过程。

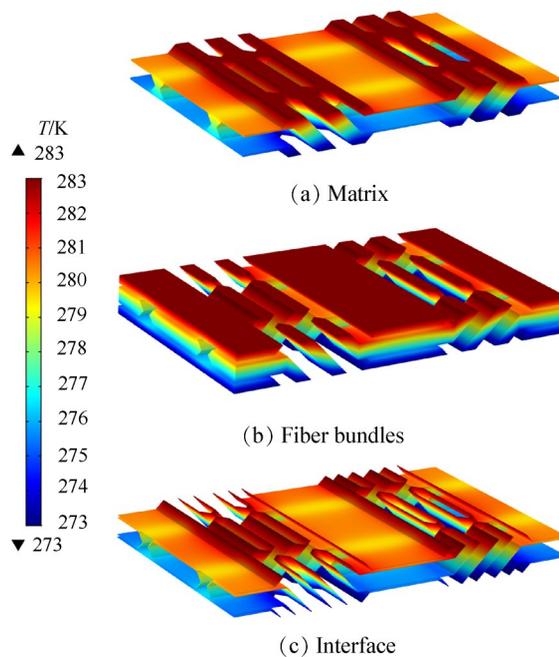


Fig. 7 Temperature distributions of different components in Case 1-3

对比三个模型的计算结果,可以发现温度场分布规律类似,差异不大,从图 8(d)中 Line 1 上的温度分布曲线也可以看出,三者之间温度分布差异甚微。

3.2 热流密度场计算结果对比分析

图 9 给出了 Case 1-1, 1-2 和 1-3 的热流密度分布云图以及 Line 1 所在位置对应的平面 1 上的热流密度分布曲线。由图中可以看出,三个模型的表面热流密度分布都不均匀,其分布与 RVE 模型的几何形状具有较高的相关性,对于 Case 1-1 和 1-2,斜向编织纱内的热流密度较大,对于 Case 1-3,界面层及斜向编织纱内的热流密度相对较高。这主要是由于纤维束、界面层和基体的导热系数不同,导致热量传输路径随着几何及组分的变化而改变。具体表现为:纤维束轴向、基体和界面层的导热系数分别为 $9.66W/(m \cdot K)$, $6.5W/(m \cdot K)$ 和 $25W/(m \cdot K)$,而纤维束径向的导热系数仅为 $1.48W/(m \cdot K)$,因此水平方向编织纱在厚度 Z 方向上的热传导能力较弱,而界面层的热量传导能力最强。

为了进一步分析三个模型热流密度分布的差异,图 10 中给出了 Case 1-1, 1-2 及 1-3 中局部区域的热流密度矢量分布,其中红色箭头的方向和长度分别表征了模型内部热流密度场的方向和大小。由图中可以看出,三个模型中的热流密度方向多变,其随着纤维和基体材料的交替变化以及纤维束方向的变化发生改变。这主要是由于纤维束为导热各向异性材料,其轴向具备较高的导热能力,因此其方向的

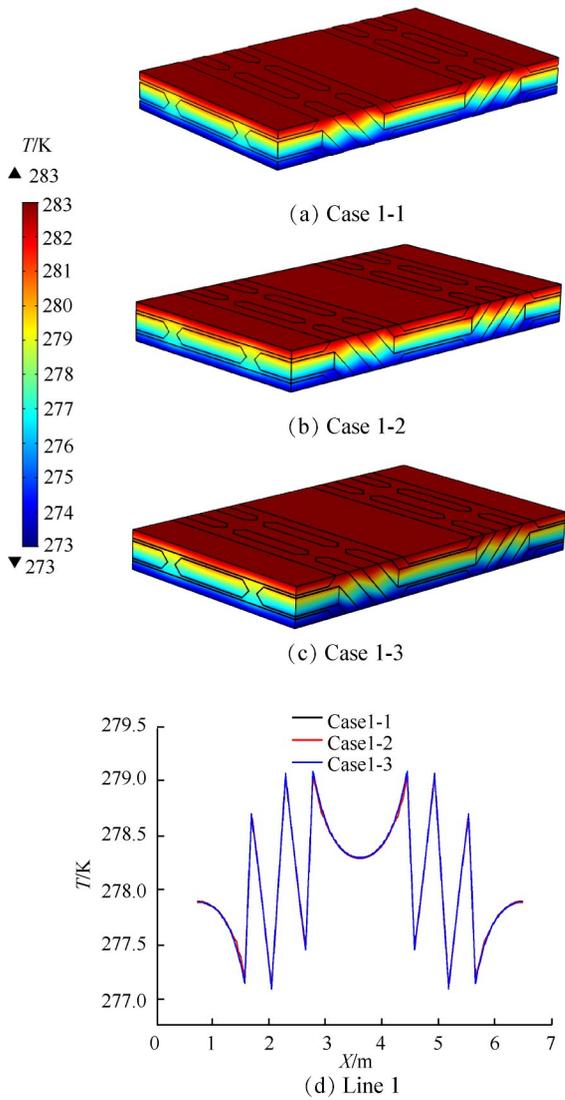


Fig. 8 Temperature distributions in Case 1-1,1-2 and 1-3

改变会影响模型内部热流密度的方向。

同时对比三个模型,可以发现 Case 1-1 和 1-2 中的热流密度矢量分布类似。然而 Case 1-3 中,在界面层附近存在明显的热流密度峰值,并且方向与界面层区域平行,这也进一步说明了图 9(c)中的现象,主要是由于界面层的导热系数最高,热量更容易通过界面层传输,进而存在热流密度的峰值。

Case 1-1, 1-2 和 1-3 对应的平均热流密度和最大热流密度如表 4 中所示。可以看出,Case 1-3 的平均热流密度及最大热流密度均高于其他两个模型,这主要是由于界面层的导热系数较高,为 $25\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,其内部存在的热流密度也明显较高。同时也说明,Case 1-2 中采用的隐式界面层表征方法无法准确地获取模型内部的热流密度峰值。

3.3 模型等效导热系数对比分析

Model 1, 2 和 3 在 Z 方向上的热流密度平均值分

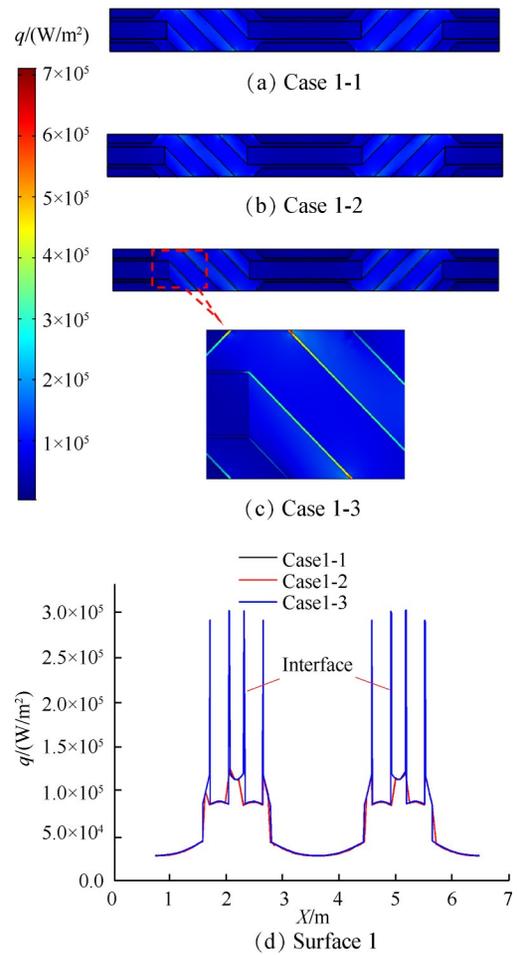


Fig. 9 Heat flux distributions in Case 1-1,1-2 and 1-3

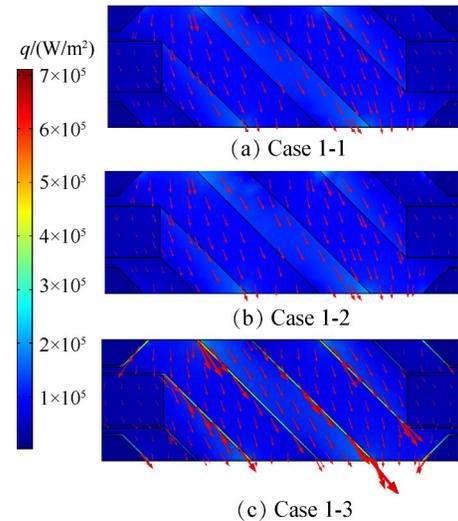


Fig. 10 Heat flux directions in Case 1-1,1-2 and 1-3

Table 4 Heat flux in difference cases

Case	Average heat flux/(W/m^2)	Maximum heat flux/(W/m^2)
1-1	6.01×10^4	2.14×10^5
1-2	6.09×10^4	2.65×10^5
1-3	6.54×10^4	7.11×10^5

别为 6.01×10^4 , 6.09×10^4 和 $6.54 \times 10^4 \text{W}/\text{m}^2$ 。同时 RVE 模型 Z 方向厚度为 0.6mm , 上下表面温差为 10K , 根据

傅里叶计算公式, 得出 Model 1, 2 和 3 在 Z 方向上的等效导热系数 k_z 分别为 3.61, 3.66 和 3.93 W/(m·K)。

同理, 针对 Case 2-1, 2-2 和 2-3 利用类似的方法计算得到 Model 1, 2 和 3 在 X 方向上的等效导热系数, 根据 Case 3-1, 3-2 和 3-3 计算得到三个模型在 Y 方向上的等效导热系数, 具体结果如表 5 和图 11 中所示。

Table 5 Effective thermal conductivities in difference cases

Model	$k_x/(W/(m \cdot K))$	$k_y/(W/(m \cdot K))$	$k_z/(W/(m \cdot K))$
1	5.64	5.28	3.61
2	6.39	5.95	3.66
3	6.49	6.32	3.93

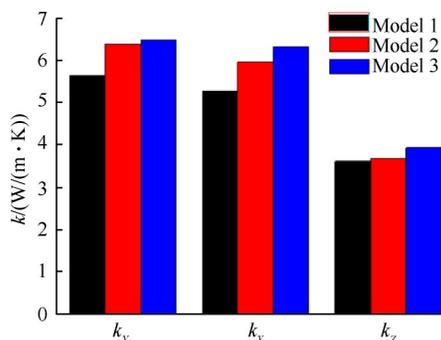


Fig. 11 Effective thermal conductivities based on different RVE models

由图中可以看出, 相对于 Model 1 和 2, Model 3 的三个方向导热系数数值均较高, 基于 Model 1 获取的导热系数数值最小。其中 Y 方向上的导热系数差异最大, 本文以 Model 3 的计算结果为基准参考对象, 对比分析了三个模型间的相对误差。结果表明: Model 1 和 Model 3 的相对误差达到了 16.46%, 而 Model 2 和 Model 3 的相对误差也为 5.85%。

分析其原因, 这主要是由于, 相对于 Model 1, Model 2 和 3 中考虑了界面层的影响, 而界面层具有较高的导热系数, 因此整体提高了 Model 2 和 3 的各向异性等效导热系数。进一步对比 Model 2 和 3, Model 3 获取的等效导热系数较高, 这主要是由于 Model 3 中所建立的显式界面层结构, 模拟获取的热流密度峰值 (主要存在于界面层内) 要高于 Model 2 中隐式界面层的计算结果。因此基于 Model 3 获取的各向异性等效导热系数数值最高。

3.4 Z 方向等效导热系数试验验证

针对图 1(a) 中的样品, 采用文献 [12] 中的激光闪射法测试了材料厚度 Z 方向上的等效导热系数, 测试仪器为 NETZSCH LFA 467 MicroFlash, 测试标准为

ASTM E1461-13^[22]。测试过程中针对样品不同位置进行了 4 次测试, 得到的导热系数测试结构如表 6 中所示, 最终获得该样品材料厚度 Z 方向上的等效导热系数 k_z 为 4.05 W/(m·K)。

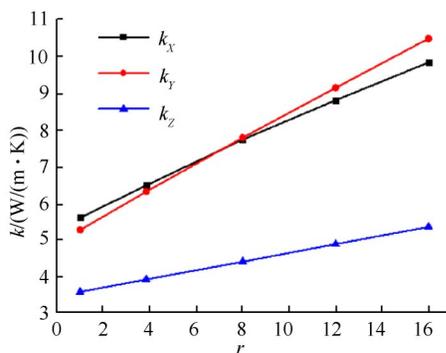
Table 6 Experimental results of k_z

$k_z/(W/(m \cdot K))$				Average value/ (W/(m·K))
4.036	4.072	4.053	4.052	4.05

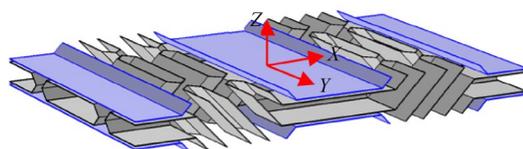
前文中基于 Model 1, 2 和 3 获取的 Z 方向等效导热系数分别为 3.61, 3.66 和 3.93 W/(m·K), 与试验测试值的相对误差分别为 10.86%, 9.63% 和 2.96%。未考虑界面层模型 Model 1 计算得到的等效导热系数与试验值误差较大, 而 Model 2 中采用的隐式界面层表征方式仍然难以准确获取材料的等效导热系数。这进一步说明, 在建立编织 CMC 材料细观结构热分析模型时, 应该引入显式界面层结构, 以表征其对材料内部热量传输及等效导热系数的影响。

3.5 界面层导热系数的影响规律

图 12 中给出了导热系数比 r 增加时 (即界面层导热系数增加, 具体如表 3 中所示), 基于 Model 3 获取的 X, Y 和 Z 三个方向等效导热系数 (k_x, k_y 和 k_z) 的变化规律。由图中可以看出, 随着 r 增加, 三个方向上的等效导热系数均明显增加, 例如当 $r=1$ 时, k_y 为 5.28 W/(m·K), 当 $r=16$ 时, k_y 增加至 10.49 W/(m·K)。但对比三条曲线可以发现, 它们增加的速度不同, Y 方向导热系数 k_y 增加速度较快, 例如在 $r=1$ 时, $k_y < k_x$, 然而当 $r=16$ 时, $k_y > k_x$ 。当 r 从 1 增加至 16 时, k_x, k_y 和



(a) Thermal conductivities with different r



(b) Continuous interface on the Y axis

Fig. 12 Influence of r and the interface structure

k_z 分别增加了75%,99%和49%。

上述结果表明,虽然界面层在 CMC 材料内部所占的体积分数不高,但是其导热系数的变化对材料整体的各向异性等效导热系数具有明显影响,其中对 Y 方向等效导热系数影响最大,Z 方向等效导热系数影响最小。这主要是由于,Y 方向为水平经纱方向,X 方向为编织纬纱方向,Z 方向为垂直经纱方向,相对来说,在 Y 方向存在较多的连续界面层区域,如图 12(b)中蓝色区域所示,因此,在 Y 方向,界面层内的热量传输具有较强的影响;而在 Z 方向,由于界面层间断分布,没有形成较多的连续热量输运通道,界面层内部热量传输的影响相对较弱。

4 结 论

通过研究,本文得到如下结论:

(1)由于基体、纤维束和界面层的导热系数不同,编织结构 CMC 材料内部温度场具有明显的非均匀特征。界面层、纤维束及其方向偏转改变了材料内部热量传输的路径。

(2)对比不考虑界面层、采用隐式界面层及采用显式界面层的三个模型计算结果,其温度场分布特征差异较小,然而其热流密度场的平均值及最大值具有明显差异。显式界面层模型的热流密度明显高于其他两个模型,同时也表明隐式界面层获取的热流密度分布特征具有较大误差。

(3)基于三种模型所获取的三个方向等效导热系数均具有较大差异,其中水平经纱方向,即 Y 方向上的导热系数相对误差最大,Model 1 和 Model 3 的相对误差达到了 16.46%,而 Model 2 和 Model 3 的相对误差也为 5.85%。同时与材料厚度 Z 方向上等效导热系数的试验测试结果对比,采用显式界面层模型的相对误差仅为 2.96%,而不考虑界面层及采用隐式界面层模型的相对误差分别为 10.86% 和 9.63%。即隐式界面层方法在预估材料各向异性等效导热系数时具有较大误差。

(4)界面层的导热系数对材料整体的各向异性导热系数具有明显影响,在本文计算工况下,当界面层与基体导热系数比 r 从 1 增加至 16 时, k_x , k_y 和 k_z 分别增加了 75%,99% 和 49%。此外,界面层导热系数对水平经纱方向(本文为 Y 方向)的等效导热系数影响最大。

致 谢:感谢国家自然科学基金青年基金、江苏省自然科学基金青年基金、中国博士后科学基金及国家科技重大专项的资助。

参考文献

- [1] 方昌德. 航空发动机的发展研究[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- [2] 王 鸣, 董志国, 张晓越, 等. 连续纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2014(6): 10-13.
- [3] Tian T, Kevin D C. Anisotropic Thermal Conductivity Measurement of Carbon-Fiber/Epoxy Composite Materials [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(23-24): 6530-6537.
- [4] Xu Y B, Yagi K. Automatic FEM Model Generation for Evaluating Thermal Conductivity of Composite with Random Materials Arrangement[J]. *Computational Materials Science*, 2004, 30(3): 242-250.
- [5] 宋迎东, 孙志刚, 高希光, 等. 纤维增强复合材料有效性能分散性[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 230-235.
- [6] Hill R. Elastic Properties of Reinforced Solids: Some Theoretical Principles[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solid*, 1963, 11(5): 357-372.
- [7] Gao X, Han X, Song Y. X-Ray Computed Tomography Based Microstructure Reconstruction and Numerical Estimation of Thermal Conductivity of 2.5D Ceramic Matrix Composite[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(13): 9790-9797.
- [8] Gou J J, Fang W Z, Dai Y J, et al. Multi-Size Unit Cells to Predict Effective Thermal Conductivities of 3D Four-Directional Braided Composites [J]. *Composite Structures*, 2017, 163: 152-167.
- [9] Jiang L, Xu G, Cheng S, et al. Predicting the Thermal Conductivity and Temperature Distribution in 3D Braided Composites[J]. *Composite Structures*, 2014, 108: 578-583.
- [10] Dong K, Liu K, Pan L J, et al. Experimental and Numerical Investigation on the Thermal Conduction Properties of 2.5D Angle-Interlock Woven Composites [J]. *Composite Structures*, 2016, 154: 319-333.
- [11] 江 华. 陶瓷基涡轮叶片热分析模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [12] Tu Z C, Mao J K, Han X S, et al. Prediction Model for the Anisotropic Thermal Conductivity of a 2.5-D Braided Ceramic Matrix Composite with Thin-Wall Structure[J]. *Applied Sciences*, 2018, 9(5): 875.
- [13] Xu Y, Ren S, Zhang W. Thermal Conductivities of Plain Woven C/SiC Composite: Micromechanical Model Considering PyC Interphase Thermal Conductance and Manufacture-Induced Voids[J]. *Composite Structures*, 2018, 193: 212-223.

- [14] 吕毅, 张伟, 吕鹏. 界面层对C/SiC复合材料热残余应力影响的模拟及分析[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(6): 949-956.
- [15] Xu X, Xu B, Hong C, et al. Effect of Pyrolytic Carbon Interface Thickness on Microstructure and Mechanical Properties of Lightweight Zirconium Boride Modified Carbon-Bonded Carbon Fiber Composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 96: 305-311.
- [16] 杨金华, 吕晓旭, 焦健. 碳化硅陶瓷基复合材料界面层技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2018, 61(11): 79-87.
- [17] 卢子兴. 复合材料界面的内聚力模型及其应用[J]. 固体力学学报, 2015, (S1): 85-94.
- [18] 潘清, 李向前. 考虑界面层影响的三维机织复合材料单胞模型研究[J]. 纤维复合材料, 2018, 2(14): 14-19.
- [19] Braginsky M, Przybyla C P. Simulation of Crack Propagation/Deflection in Ceramic Matrix Continuous Fiber Reinforced Composites with Weak Interphase via the Extended Finite Element Method [J]. *Composite Structures*, 2016, 136: 538-545.
- [20] 张靖周. 高等传热学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [21] Youngblood G E, Senor D J, Jones R H, et al. Optimizing the Transverse Thermal Conductivity of 2D-SiC_f/SiC Composites, II. Experimental [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, 307-311: 1120-1125.
- [22] ASTM E1461-13, 2013. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method[S].

(编辑:史亚红)