

超临界二氧化碳动力循环中印刷电路板换热器 芯体机械应力和热应力耦合分析

吴家荣, 李红智*, 杨玉, 张旭伟, 乔永强

(西安热工研究院有限公司, 陕西省 西安市 710054)

Coupling Analysis of Mechanical Stress and Thermal Stress of Printed Circuit Heat Exchanger Core in Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle

WU Jiarong, LI Hongzhi*, YANG Yu, ZHANG Xuwei, QIAO Yongqiang

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, ShaanXi Province, China)

ABSTRACT: The high temperature and pressure conditions of printed circuit heat exchanger(PCHE) in supercritical carbon dioxide power cycle may lead to core material failure and structure destruction, so it is necessary to analyze the stresses in PCHEs to optimize channel structures, and thus ensure the long-term safe and stable operation of the system. In this paper, the thermal, mechanical and total stresses of the specific paths of the hot and cold channels of the printed circuit heat exchanger core were analyzed by the finite element method. The thermal stress was compared in the range of 487.6~537.1°C. The effect of the tip radius of the semi-circular channel on the stress change was analyzed. The results indicate that the stresses are the combined effect of the pressure loading and temperature gradient and the total stress of the cold channel is greater than that of the hot channel; the stress concentration occurs owing to the sharp tips of semi-circular channels of the core, and the large temperature gradient in the middle of the semi-circular leads to the large thermal stress. Increasing rounded tip radius of the core can reduce thermal and mechanical stresses effectively in stress concentration regions, and the mechanical stress decreases more dramatically. Finally, it is pointed out that the stress concentration at the sharp tips should be relieved, and the etching depth should be controlled when the channel structures are designed. With the same hydraulic diameter, the maximum thermal stress, mechanical stress and total stress can be significantly reduced when circular cross section channels are adopted.

KEY WORDS: supercritical carbon dioxide; printed circuit heat exchanger; thermal stress; mechanical stress; stress concentration

摘要: 超临界二氧化碳动力循环中印刷电路板换热器所处的高温高压工况可能导致芯体材料失效和结构破坏,有必要进行应力分析以优化通道结构,保证系统长期安全稳定运行。该文利用有限元方法对印刷电路板换热器芯体热冷通道特定路径的热应力、机械应力和总应力进行分析,比较487.6~537.1°C范围内的热应力,分析半圆通道尖角圆弧半径对应力变化的影响。结果表明:芯体所受应力是工质压力和温度梯度共同作用的结果,冷通道的总应力大于热通道;芯体半圆截面通道尖角的存在导致应力集中,半圆弧中间位置因温度梯度较大产生较大热应力;增大芯体半圆截面尖角圆弧半径能有效减小应力集中处的机械应力和热应力,且机械应力减小幅度更大。最后,指出在通道结构设计时应注意改善尖角处的应力集中,并控制蚀刻深度,相同当量直径下采用圆截面的通道最大热应力、最大机械应力和最大总应力都有大幅的减小。

关键词: 超临界二氧化碳; 印刷电路板换热器; 热应力; 机械应力; 应力集中

0 引言

超临界二氧化碳动力循环具有效率高、结构简单、设备紧凑、热源适应性广、灵活性高等优点^[1-2],与传统蒸气朗肯循环相比:工质临界参数低(30.98°C/7.377MPa),容易达到超临界状态,在现有的材料水平下能够实现更高的循环效率;设备尺寸小,系统结构紧凑,将其运用于发电领域可取代或部分取代水蒸气朗肯循环,实现高效热功转换^[3-5]。作为超临界二氧化碳动力循环的关键换热设备,印刷电路板换热器(printed circuit heat exchanger, PCHE)可用于加热器、预冷器和回热器,研发低成本、高强度、结构紧凑、流动阻力小、传热效率高

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501004)。
National Key R&D Program of China (2018YFB1501004).

的PCHE是未来超临界二氧化碳动力循环商业应用的关键之一。

目前,国内外针对PCHE的研究主要集中在强化传热和降低流阻两方面,发展了直通通道、Z字形通道^[6]、S形通道^[7]等结构。KIM等^[8]提出一种国家航空咨询委员会(national advisory committee for aeronautics, NACA)系列对称机翼通道,在单位体积传热量不变的情况下,压降可减小到Z字形通道的二十分之一。XU等^[9]对机翼头部进行优化,设计出前后对称的剑鱼结构,进一步减小了压降。还有学者研究了NACA系列对称翼型的选择^[10]、排布方式^[11]、与丁胞相结合的结构^[12],并开展相关实验研究^[13],这些研究揭示了PCHE通道结构对流动传热的影响规律,提供了PCHE热设计的基础。

作为一种高效紧凑耐高压的换热器,除热设计外,结构设计及应力评估也不可缺少。文献^[14]将半圆截面直通通道简化为矩形通道。文献^[15]研究了作为钠冷快堆中间换热器的PCHE结构强度,认为压力载荷是主要的应力来源,塑性变形减小了通道尖角处的应力集中。文献^[16]研究了PCHE关键位置的应力随板片结构参数的变化规律,比较了有限元法和解析法的结果,显示部分计算结果存在较大偏差。文献^[17]研究了高温条件下半圆通道直径、板厚、肋宽和尖角圆弧半径对PCHE应力的影响。文献^[18]比较了PCHE流道顺排和错排方式下热流和应力分布,结果表明,采用错排方式,最大应力减小10%,而热流密度仅减小0.02%。文献^[19]研究了拟二维及三维Z字形通道PCHE应力分布情况,结果表明,大多数情况下,PCHE的应力符合设计标准,而用于核电则超出了最大许用应力强度。

超临界二氧化碳动力循环中,PCHE以紧凑的结构承受很大的热负荷,以再压缩布雷顿循环为例,回热器回热量是透平输出功率的4倍以上,而体积仅是相同工况下传统管壳式换热器的七分之一^[20]。大的热负荷、高温高压的工作环境以及换热通道内工质物性变化引起的传热恶化给PCHE的结构设计带来了一定的挑战。现有对PCHE芯体结构和应力分析的研究大多以传统半圆截面通道为主,对热应力以及圆截面形状与应力分布之间影响规律的研究存在不足。

因此,本文以国内MW级超临界二氧化碳试验台中高温回热器为研究对象,利用有限元软件研究PCHE换热通道的机械应力、热应力与总应力的分

布,分析温度和尖角圆弧半径的影响,并进一步对圆截面通道的应力分布进行探究,结果可为超临界二氧化碳循环中关键换热设备的研制提供一定的依据。

1 计算模型

1.1 物理模型

PCHE的芯体通道具有很好的对称性和周期性,对工质在一层热板片一层冷板片排布方式的流动传热特性模拟中,绝大多数选取 2×1 (换热通道行数为2,列数为1)几何模型以减小计算量。 2×1 的模型中,通常在固体域的上下表面施加周期性边界条件,前后面施加绝热边界条件,左右面为对称或周期性边界条件。对于结构应力分析,通道的位移约束随通道离芯体外边界的距离而变化,模型简化时不能简单仿照流动传热特性研究只取 2×1 的模型。文献^[15]分别选取 2×1 、 4×4 和 8×8 的单元模型,对比了3种模型沿同一路径的应力分布,认为 4×4 和 8×8 模型能较好反应PCHE的应力分布,最终选取 4×4 作为最小的单元模型。TORRE等^[17]比较6种单元模型(2×1 、 4×3 、 6×3 、 8×5 、 10×5 和 12×7),给出了6种模型沿同一路径的热应力和机械应力分布,认为 4×3 模型适用于计算中间通道的机械应力,而 8×5 模型则能保证热应力和机械应力的计算精度。文献^[21-22]分别选取 4×4 与 4×5 的单元模型分析芯体的应力分布。考虑到上述研究多选取 $4 \times n$ ($n=3, 4, 5$)的单元模型,为便于取模型的中间通道进行应力分析,本文选取 4×5 的PCHE单元模型。

如图1所示,模型取自文献^[23]中的高温回热器。共4行5列20个通道,其中第1、3层为热流体通道(下文简称热通道),第2、4层为冷流体通道(下文简称冷通道)。通道为半圆截面,深度为

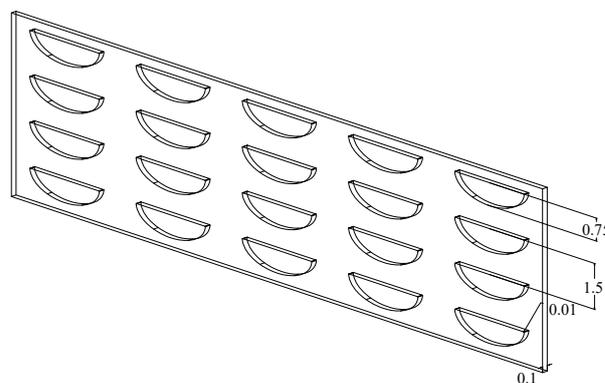


图1 PCHE芯体应力计算的物理模型

Fig. 1 Physical model of PCHE core stress calculation

0.75mm, 板厚 1.5mm, 水平方向相邻通道间壁厚 0.8mm。文献[21]比较了沿流动方向模型长度对冷热通道应力分布的影响, 认为长度对应力分布的影响可忽略不计。因此, 图 1 中沿流动方向的厚度设为 0.1mm。半圆截面的 2 个尖角是典型的应力集中位置, 扩散焊接过程中, 尖角会发生一定的塑性变形变得光滑, 在调研了文献[15,17,19,24]后, 对模型尖角做半径 0.01mm 的圆弧过渡。

1.2 边界条件

求解过程在 ANSYS WORKBENCH 平台里进行。与整个结构相比, 微通道换热器的温度和压力载荷对固体域变形的影响极其微弱, 可以忽略固体域变形对温度场的影响, 将问题视为单向热固耦合。在 Fluent 模块中, 计算出温度场, 再将结果导入 Static Structure 模块进行静力学分析。如图 2 所示, 计算温度场时模型上下面施加周期性边界条件, 左右面设为对称面, 前后面绝热。通常金属材料的许用应力强度随温度的升高而减小, 对于逆流布置的 PCHE, 热通道入口和冷通道出口温度最高, 容易导致应力过大, 材料失效。分别将文献[23]中高温回热器热通道入口和冷通道出口的温度值 537.1°C 和 487.6°C 施加给图 2 中热通道壁面和冷通道壁面。应力分析中分别赋给热冷通道壁面工质的压力为 8.4MPa 和 21.3MPa。分析热应力时, 仅施加温度载荷, 分析机械应力时仅施加机械载荷, 总应力则同时施加两种载荷。模型材料为 316L 不锈钢, 其物性变化可参考文献[25], 部分温度范围内的最大许用应力强度见表 1。路径选取图 2 中冷热通道壁面, 起点分别为位于中点 1 和 1', 绕直径和半圆弧一周。研究应力分布选取基于材料力学中第四强度理论的 Von Mises 应力, 强度校核则按《钢制压力容器分析设计标准 JB 4732-1995》^[26], 取基于第三强度理论的应力强度。

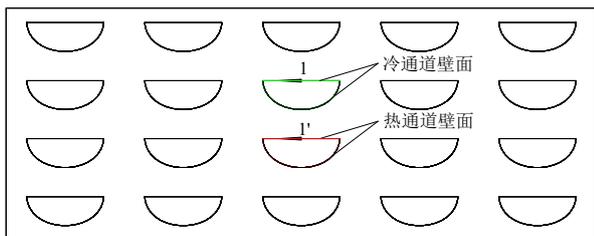


图 2 PCHE 芯体应力计算的边界条件
Fig. 2 Boundary condition of PCHE core stress calculation

表 1 不同温度时的 316L 不锈钢最大许用应力强度
Table 1 Maximum allowable stress intensity of 316L(00Cr17Ni14Mo2) at different temperatures

温度/°C	最大许用应力强度/MPa
150	117
200	108
250	100
300	95
350	90
375	88
400	86
425	85
450	84

2 结果分析

2.1 网格数量的影响

为验证网格数量对应力分布的影响, 选取合适的网格数进行下文的研究, 分别划分了网格数量为 105300、158080、214650 和 270845 的 4 套网格, 如图 3 所示, 同一工况下通道应力分布如图 4 所示。

4 套网格对应的热应力和机械应力分布无明显差异, 与文献[17, 19]中网格无关性检验的现象一致, 表明 PCHE 应力分布对网格数量不敏感。这与研究 PCHE 内超临界流体流动传热的情况完全不同, 后者研究中, 不仅要选取合适的湍流模型, 更要保证湍流边界层内有足够细密的网格以捕捉层流底层和过渡层中工质的物性变化及其对传热流动的影响。而在结构应力分析时, 温度场的数据已由 Fluent 导入, 不涉及超临界流体的流动, 4 套网

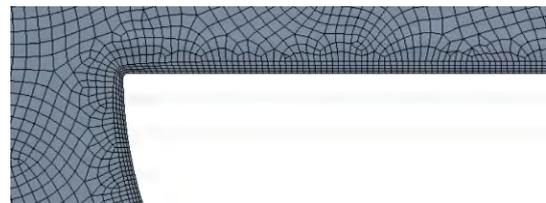


图 3 网格划分

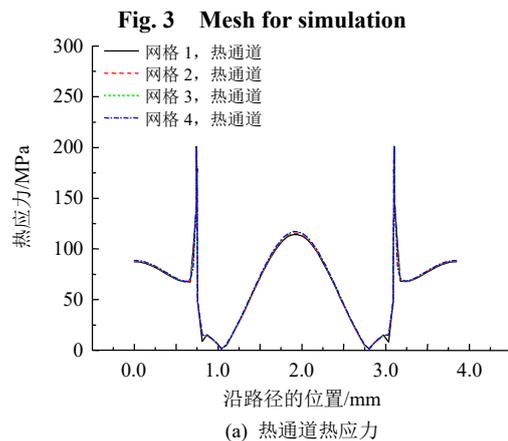
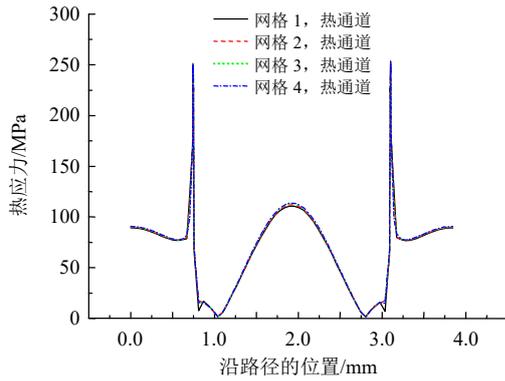
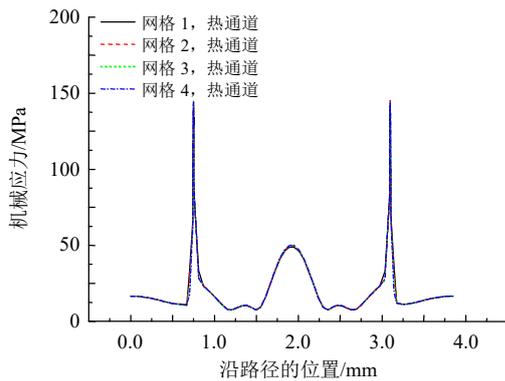


Fig. 3 Mesh for simulation

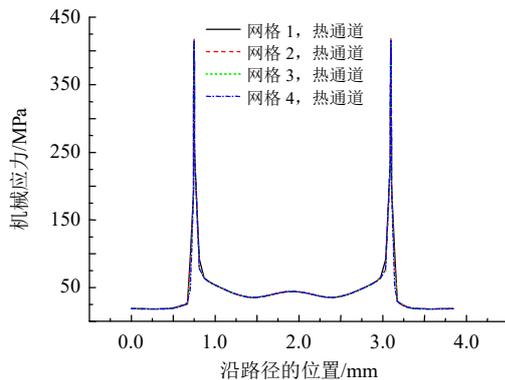
(a) 热通道热应力



(b) 冷通道热应力



(c) 热通道机械应力



(d) 冷通道机械应力

图 4 热应力与机械应力

Fig. 4 Thermal stress and mechanical stress

格在应力集中位置已有足够细密的网格分布，考虑到计算量，选取数量为 214650 的网格进行研究。

2.2 应力分布

模型中的应力主要由热应力和机械应力两部分构成。热应力因金属材料在温度场中受内部或外部约束而不能自由热胀冷缩导致，机械应力则由通道内工质压力产生。图 5 为应力计算前的温度分布，温度最高与最低的位置分别为热冷通道壁面，温度梯度较大，水平方向上相邻通道间的温度梯度很小。图 6 给出了沿路径的应力分布，总体上，冷通道的机械应力大于热通道而在大部分位置热应力相差不大。冷通道内工质压力大于热通道，两者的机械应力相差较大，热载荷和机械载荷共同作用下

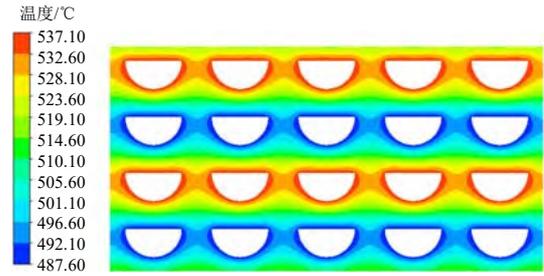
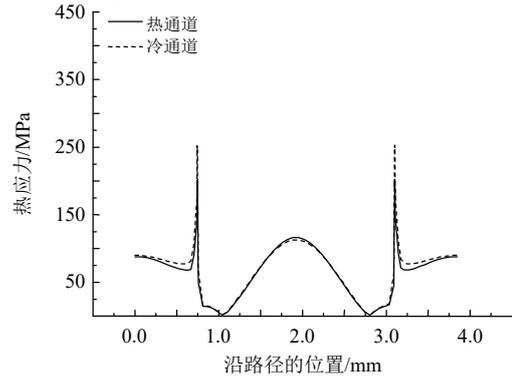
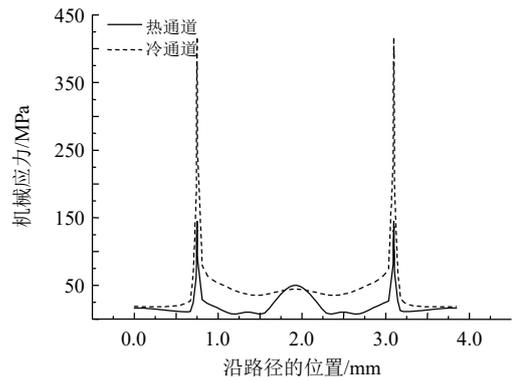


图 5 温度分布

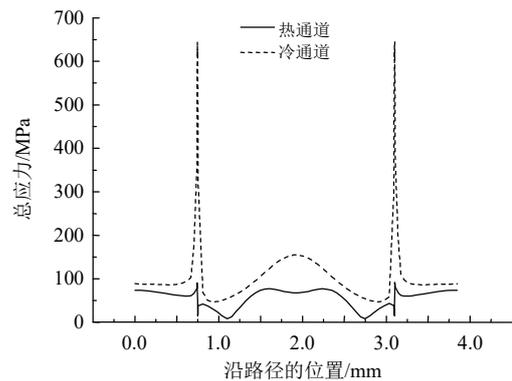
Fig. 5 Temperature distribution



(a) 热应力



(b) 机械应力



(c) 总应力

图 6 应力分布

Fig. 6 Stress distribution

的总应力如图 6(c)所示，沿路径的所有位置，冷通道的总应力都大于热通道，通道的 2 个尖角和半圆弧中间位置两者差异最大。

根据《钢制压力容器分析设计标准 JB 4732-1995》^[26]，应力分为一次应力、二次应力和峰值应

力。图6的通道尖角和半圆弧中间应力值较大，属于危险位置，需要进行强度校核，因不涉及疲劳破坏，本文强度校核只考虑一次和二次应力。取穿过壁面且容易破坏的AC、BD、JK、LM 4条路径进行应力强度线性化解与评定，如图7所示，其中，AC、BD为垂直方向上厚度最小的路径，JK、LM为水平方向上穿过应力集中处厚度最小的路径。

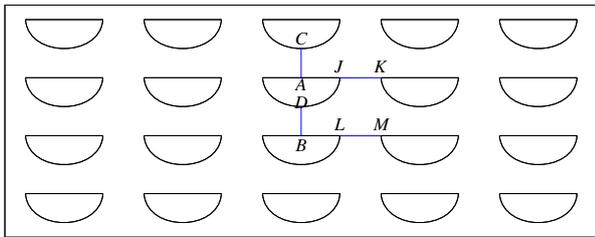


图7 半圆截面通道应力强度校核
Fig. 7 Stress intensity checking of semi-circular cross section channels

应力强度的校核分2种情况：只有机械载荷作用；机械载荷和热载荷共同作用。仅机械载荷作用，要求：

$$P_m \leq S \tag{1}$$

$$P_1 + P_b \leq 1.5S \tag{2}$$

式中： P_m 为一次总体薄膜应力； P_1 为一次局部薄膜应力； P_b 为一次弯曲应力； S 为许用应力强度。

2种载荷共同作用，要求：

$$P_1 + P_b + Q \leq 3S \tag{3}$$

式中 Q 为二次应力。

因表1中仅有部分温度下的最大许用应力强度，对表1中数据进行拟合，可得到537.1℃对应的应力强度值为71.54MPa，校核结果如表2所示，

表2 半圆截面通道应力强度校核
Table 2 Stress intensity checking of semi-circular cross section channels

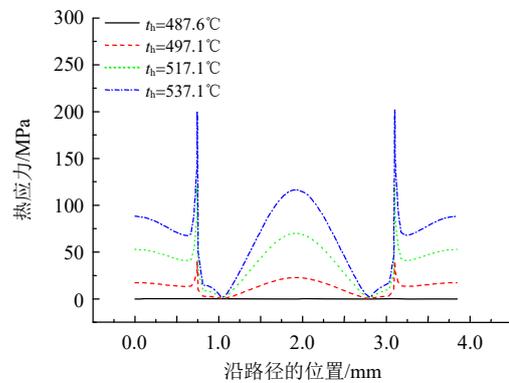
路径	应力类型	应力判定/MPa	评定
AC	P_m	$24.923 \leq S$	通过
	$P_1 + P_b$	$39.037 \leq 1.5S$	
	$P_1 + P_b + Q$	$106.62 \leq 3S$	
BD	P_m	$28.236 \leq S$	通过
	$P_1 + P_b$	$41.902 \leq 1.5S$	
	$P_1 + P_b + Q$	$123.41 \leq 3S$	
JK	P_m	$67.42 \leq S$	通过
	$P_1 + P_b$	$69.176 \leq 1.5S$	
	$P_1 + P_b + Q$	$121.04 \leq 3S$	
LM	P_m	$15.34 \leq S$	通过
	$P_1 + P_b$	$24.575 \leq 1.5S$	
	$P_1 + P_b + Q$	$43.985 \leq 3S$	

4条路径均通过了应力强度校核。

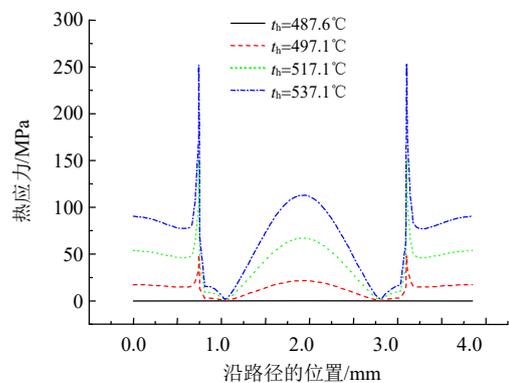
2.3 温度对热应力的影响

为研究通道温度变化对热应力的影响，令冷通道温度 t_c 为487.6℃，改变热通道温度 t_h 依次为487.6、497.1、517.1、537.1℃。如图8所示，可知，整体上热冷通道的热应力随通道温差的增大而增大，尖角和半圆弧中间热应力增大最明显。对于该模型，热冷通道温度不同导致温度分布不均匀，使得各部分的热膨胀量产生差异，由于通道间的壁面是刚性连接，热膨胀量大的部分必然受热膨胀量小的部分压缩，而热膨胀量小的部分则受热膨胀量大的部分拉伸，各部分间的相互约束导致了热应力的产生，热冷通道间的温差增大，温度梯度增大，热膨胀量的差异增大，热应力增大。因此，当通道温度相等，热应力为零。比较图8(a)与(b)可知，相同温差下热冷通道热应力，大小相差不大，但当温差较大，如 t_h 等于537.1℃时，冷通道尖角处的热应力大于热通道，可能由于温差的增大，使得热冷通道材料的弹性模量和热膨胀系数差异增大。

图9为冷通道温度改变时热通道和冷通道的应力变化，由图9可知，热通道温度 t_h 恒为537.1℃，



(a) 热通道热应力



(b) 冷通道热应力

图8 热通道温度改变时热应力
Fig. 8 Variation of thermal stress with the temperature of hot fluid

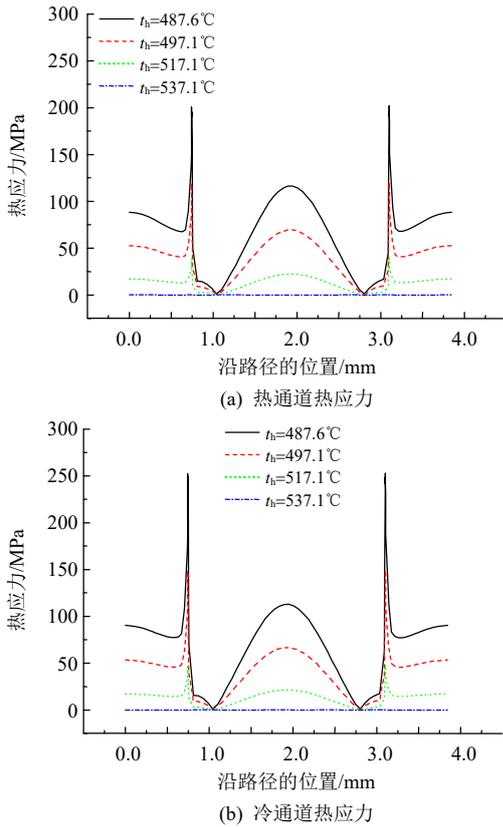


图 9 冷通道温度改变时热应力

Fig. 9 Variation of thermal stress with the temperature of cold fluid

而冷通道温度 t_c 从 487.6°C 逐渐增大到 537.1°C ，热应力的变化规律与图 8 相同。从图 8 与图 9 热应力的分布可知，各温差下通道半圆弧中间的热应力均大于尖角外的其余位置。这是因为竖直方向上半圆弧中点与相邻热或冷通道的距离最小，如图 5 所示，温度梯度最大。其余位置，特别是水平相邻的通道，温度梯度不大，热应力不大。因此，PCHE 结构设计时，对于大温差的情况，应注意控制蚀刻深度或增加板片厚度，避免半圆弧中点处热应力过大的情况。

对于半圆截面直通道、Z 字形通道板片厚度的设计，通常将换热通道简化为受压的薄壁圆柱，壁厚应满足^[24, 27]：

$$\frac{r_o}{r_i} \geq \sqrt{\frac{S - p_i}{S - 2p_o + p_i}} \quad (4)$$

$$\frac{r_o}{r_i} \geq \sqrt{\frac{S + p_i}{S + 2p_o - p_i}} \quad (5)$$

式中： r_o 、 r_i 分别为薄壁圆柱的外半径和内半径； p_o 、 p_i 分别为外部压力和内部压力。当 $p_o > p_i$ 时，选用式(4)；当 $p_o < p_i$ 时，选用式(5)。

将竖直方向上相邻通道的内壁面当作压力边界，于是薄壁圆柱的外半径等于板厚，内半径等于

通道的蚀刻深度，式(4)、(5)可改写为：

$$\frac{t_p}{d} \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S - p_i}{S - 2p_o + p_i}} \quad (6)$$

$$\frac{t_p}{d} \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S + p_i}{S + 2p_o - p_i}} \quad (7)$$

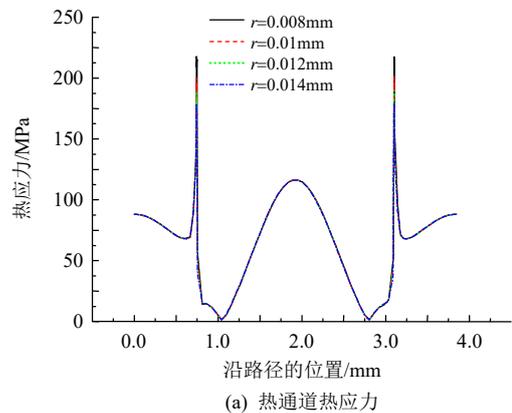
式中 t_p 和 d 分别为板片厚度和通道直径。本文工况下，热通道的 p_o 、 p_i 分别为 21.3、8.4MPa，冷通道的 p_o 、 p_i 分别为 8.4、21.3MPa，代入式(6)和(7)，板厚和通道直径之比应分别满足：

$$\frac{t_p}{d} \geq 0.65 \quad (8)$$

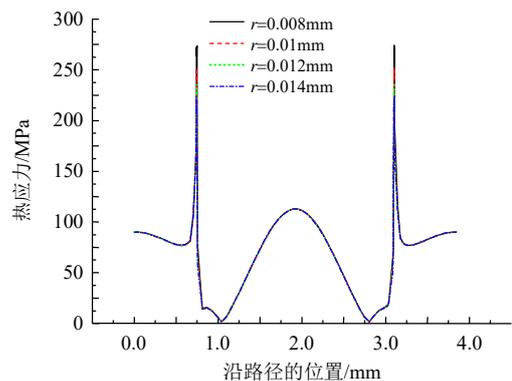
$$\frac{t_p}{d} \geq 0.59 \quad (9)$$

2.4 尖角圆弧半径的影响

半圆通道尖角是典型的应力集中位置，减小此处的应力对 PCHE 结构设计有重要意义。图 10 为相同工况下，尖角圆弧半径 r 分别为 0.008、0.01、0.012 和 0.014mm 时热冷通道热应力和机械应力的分布。总体上，增大半径通道的热应力和机械应力在应力集中处都有了明显的减小，而在其他位置几乎无影响。为更直观表明增大尖角圆弧半径对应力集中的缓解，定义应力集中系数 f 为沿路径最大应力与平均应力之比。热应力集中系数 f 随圆弧半径



(a) 热通道热应力



(b) 冷通道热应力

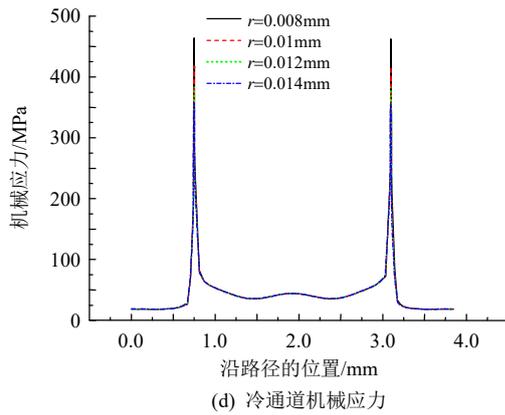
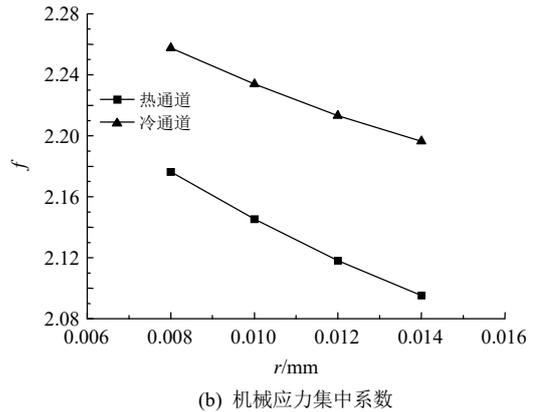
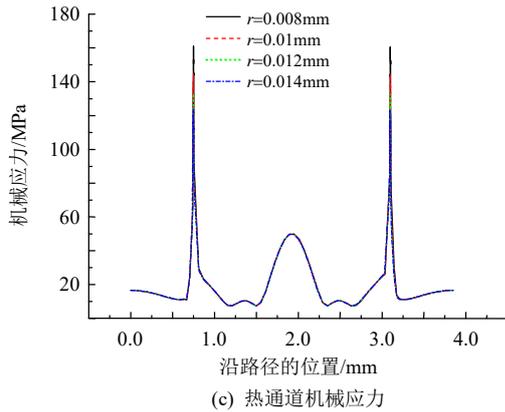


图 11 应力集中系数随圆弧半径的变化
Fig. 11 Variation of stress concentration factor with rounded tip radius

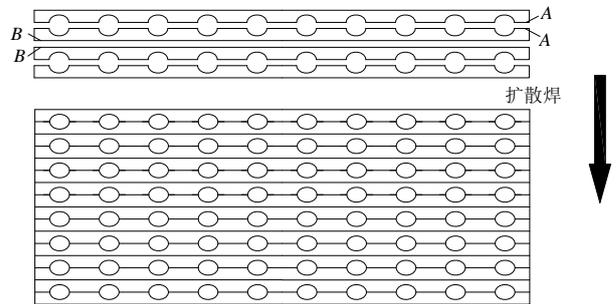


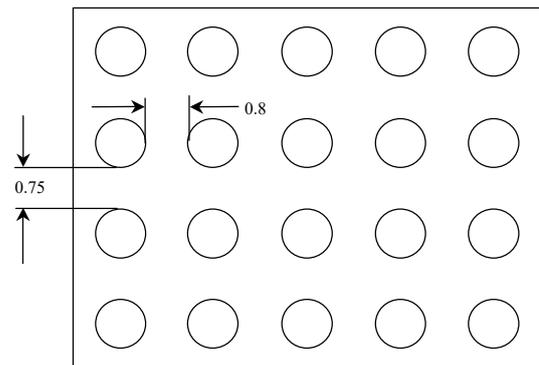
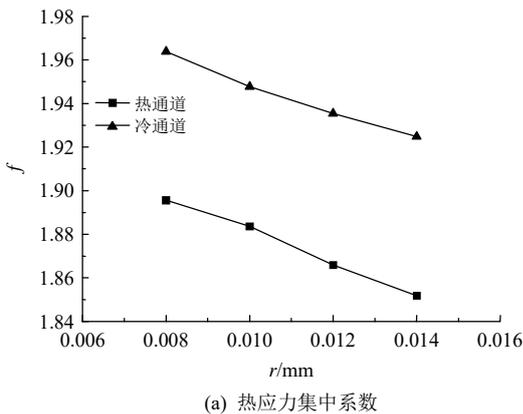
图 12 圆截面通道芯体

Fig. 12 PCHE core with circular cross section channels

图 10 圆弧半径对应力影响
Fig. 10 Effect of rounded tip radius on stress
 r 的变化如图 11(a)所示。可知,当 r 从 0.008mm 增大至 0.014mm 时,热冷通道 f 分别减小了 23.11% 和 19.9%。机械应力集中系数的变化规律与热应力集中系数一致,但应力集中系数减小的幅度更大,当 r 从 0.008mm 增大至 0.014mm 时, f 分别减小了 37.27% 和 27.07%。

考虑一种极端的情况,即无任何尖角的圆截面通道换热芯体,如图 12 所示。可知,通道的材料和蚀刻方法与传统半圆截面相同,不同的是调整冷热板片扩散焊接的接触面,使得 2 块热板片或冷板片 A 面与 A 面对称相接,热板片的 B 面与冷板片的 B 面相接。

文献[28]比较了相同当量直径不同截面形状 PCHE 的传热与流动特性,认为圆截面通道的摩擦系数最小。文献[29]认为相同当量直径下,通道截面形状对 PCHE 的传热性能影响很小。为比较圆截面通道和半圆截面通道的应力,令 2 种截面通道当量直径相同,且水平和垂直方向上相邻通道的距离相同,如图 13 所示。为便于比较,将应力路径的长度做归一化处理,同一工况下,两者的热应力、机械应力及总应力的比较如图 14 所示。可知,圆截面通道的热应力在路径起点和中点较大,这是因为两处位置恰好位于温度梯度最大的位置,而沿整个路径最大热应力仅为半圆截面通道的一半。相较



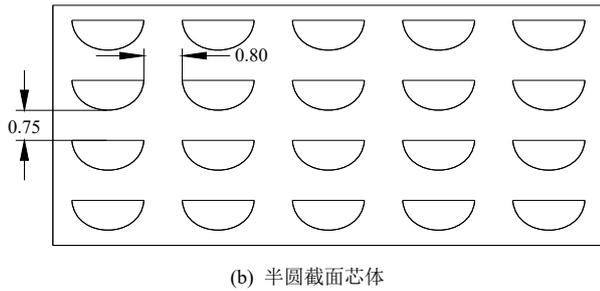
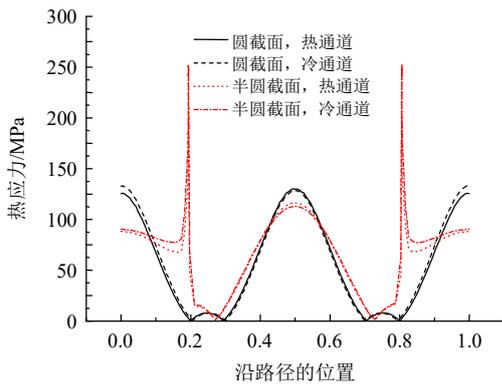
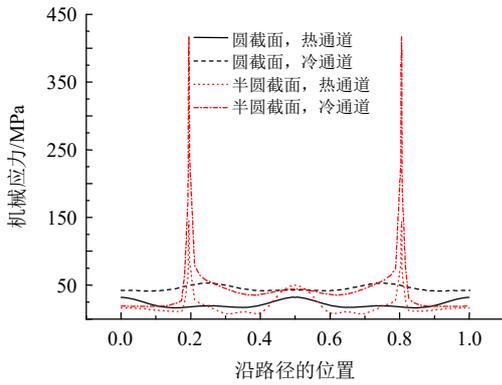


图 13 圆截面与半圆截面芯体

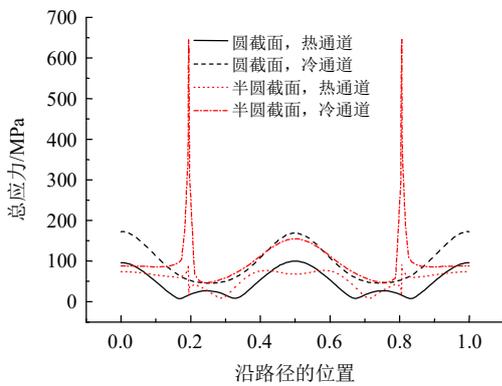
Fig. 13 PCHE core with circular and semi-circular cross sections



(a) 热应力



(b) 机械应力



(c) 总应力

图 14 圆截面与半圆截面通道应力比较

Fig. 14 Comparison of stress between circular and semi-circular cross section channels

于半圆截面，圆截面外形光滑，受力均匀，没有出现从直线到半圆弧的结构突变，因此，机械应力分

布非常均匀，最大机械应力相较半圆截面减小了 80%以上，最大总应力减小了 70%以上。

对圆截面通道芯体取穿过壁面的 4 条路径，即 $A'C'$ 、 $B'D'$ 、 $J'K'$ 、 $L'M'$ 进行应力强度线性化分解与评定，如图 15 所示，结果见表 3，可知 4 条路径均通过了应力强度校核。

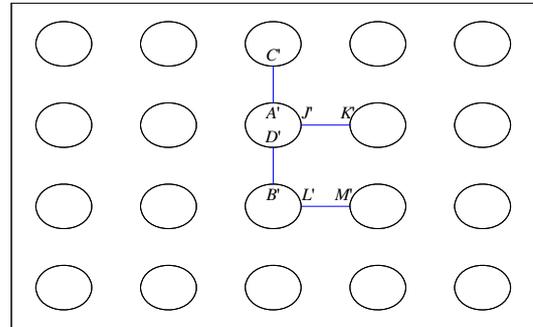


图 15 圆截面通道应力强度校核

Fig. 15 Stress intensity checking of circular cross section channels

表 3 圆截面通道应力强度校核
Table 3 Stress intensity checking of circular cross section channels

路径	应力类型	应力判定/MPa	评定
$A'C'$	P_m	$24.259 \leq S$	通过
	$P_1 + P_b$	$32.996 \leq 1.5S$	
	$P_1 + P_b + Q$	$123.59 \leq 3S$	
$B'D'$	P_m	$25.322 \leq S$	通过
	$P_1 + P_b$	$33.086 \leq 1.5S$	
	$P_1 + P_b + Q$	$122.45 \leq 3S$	
$J'K'$	P_m	$34.507 \leq S$	通过
	$P_1 + P_b$	$34.518 \leq 1.5S$	
	$P_1 + P_b + Q$	$30.471 \leq 3S$	
$L'M'$	P_m	$13.821 \leq S$	通过
	$P_1 + P_b$	$13.896 \leq 1.5S$	
	$P_1 + P_b + Q$	$18.902 \leq 3S$	

通常金属材料的许用应力强度随温度的升高而减小，比较 2 种截面通道的应力分布，在材料不变的前提下，采用圆截面通道的芯体能承受更高的压力和温度。然而要形成一个完美的圆截面，需要板片的 A 面与 A 面完全对称相接，这取决于扩散焊接工艺的精度，未来可以尝试采用 3D 打印技术实现换热芯体的制造。

3 结论

1) PCHE 芯体所受应力是工质压力和温度梯度共同作用的结果，应力分布与工质压力、温差、材料物性、通道结构等因素有关。

2) 机械应力和热应力在 PCHE 芯体半圆截面通道的尖角处产生了应力集中, 通道半圆弧中间位置因温度梯度较大导致热应力较大。

3) 增大 PCHE 芯体半圆截面尖角的圆弧半径能有效减小此处的机械应力和热应力, 且机械应力减小幅度更大。相同当量直径的圆截面通道所受最大热应力、最大机械应力、最大总应力相较半圆截面, 都有大幅度的减小。

4) 基于热-流-固耦合的三维 PCHE 芯体模型及应力分析有待进一步构建并研究。

参考文献

- [1] 李航宁, 孙恩慧, 徐进良. 多级回热压缩超临界二氧化碳循环的构建及分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 211-221.
LI Hangning, SUN Enhui, XU Jinliang. Construction and analysis of supercritical carbon dioxide cycle with multi-stage regenerative-compression[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 211-221(in Chinese).
- [2] 张一帆, 王安, 白文刚, 等. 300MW 超临界二氧化碳锅炉气动力特性及壁温分布[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1700-1706.
ZHANG Yifan, WANG An, BAI Wengang, et al. Thermal fluid dynamic characteristics and wall temperature distribution of a 300MW supercritical CO₂ boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1700-1706(in Chinese).
- [3] 徐进良, 刘超, 孙恩慧, 等. 超临界二氧化碳动力循环研究进展及展望[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 1-10.
XU Jinliang, LIU Chao, SUN Enhui, et al. Review and perspective of supercritical carbon dioxide power cycles [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 1-10(in Chinese).
- [4] XU Jinliang, LIU Chao, SUN Enhui, et al. Perspective of S-CO₂ power cycles[J]. Energy, 2019(186): 115831.
- [5] XU Jinliang, SUN Enhui, LI Mingjia, et al. Key issues and solution strategies for supercritical carbon dioxide coal fired power plant[J]. Energy, 2018, 157: 227-246.
- [6] NIKITIN K, KATO Y, NGO L. Printed circuit heat exchanger thermal-hydraulic performance in supercritical CO₂ experimental loop[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(5): 807-814.
- [7] TSUZUKI N, KATO Y, ISHIDUKA T. High performance printed circuit heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(10): 1702-1707.
- [8] KIM D E, KIM M H, CHA J E, et al. Numerical investigation on thermal-hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(12): 3269-3276.
- [9] XU Xiangyang, MA Ting, LI Lei, et al. Optimization of fin arrangement and channel configuration in an airfoil fin PCHE for supercritical CO₂ cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(1): 867-875.
- [10] CHEN Fei, ZHANG Lishen, HUAI Xiulan, et al. Comprehensive performance comparison of airfoil fin PCHEs with NACA 00XX series airfoil[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017(315): 42-50.
- [11] CHU Wenxiao, LI Xionghui, MA Ting, et al. Study on hydraulic and thermal performance of printed circuit heat transfer surface with distributed airfoil fins[J]. Applied Thermal Engineering, 2017(114): 1309-1318.
- [12] 时红远, 刘华, 熊建国, 等. 丁胞与翼形肋片相结合的印刷电路板式换热器流动与换热特性的研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(4): 857-862.
SHI Hongyuan, LIU Hua, XIONG Jianguo, et al. Study on flow and heat transfer characteristics of an airfoil printed circuit heat exchanger with dimples[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(4): 857-862(in Chinese).
- [13] ZHAO Zhongchao, ZHANG Yong, CHEN Xudong, et al. Experimental and numerical investigation of thermal-hydraulic performance of supercritical nitrogen in airfoil fin printed circuit heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2020(168): 114829.
- [14] DOSTAL V. A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [15] LEE Y, LEE J I. Structural assessment of intermediate printed circuit heat exchanger for sodium-cooled fast reactor with supercritical CO₂ cycle[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014(73): 84-95.
- [16] 于改革, 姚志燕, 陈永东, 等. 印刷电路板式换热器板片结构强度设计[J]. 压力容器, 2018, 35(12): 42-46, 33.
YU Gaige, YAO Zhiyan, CHEN Yongdong, et al. Study on the strength design of the plate of printed circuit heat exchanger[J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35(12): 42-46, 33(in Chinese).
- [17] DE LA TORRE R, FRANÇOIS J L, LIN Chengxian. Assessment of the design effects on the structural performance of the Printed Circuit Heat Exchanger under very high temperature condition[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020(365): 110713.
- [18] LIM J B, SHRAKE R G, KIM E S, et al. Stress and heat transfer analyses for different channel arrangements of PCHE[C]//American Nuclear Society Winter Meeting. Reno: Idaho National Laboratory, 2008.
- [19] BENNETT K, CHEN Y T. One-way coupled three-dimensional fluid-structure interaction analysis of

- zigzag-channel supercritical CO₂ printed circuit heat exchangers[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 358: 110434.
- [20] YANG Yu, LI Hongzhi, YAO Mingyu, et al. Investigation on the effects of narrowed channel cross-sections on the heat transfer performance of a wavy-channeled PCHE[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019(135): 33-43.
- [21] WANG Jian, SUN Yuwei, LU Mingjian, et al. Stress intensity simulation of printed circuit heat exchanger for S-CO₂ Brayton cycle[C]//2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). Liverpool: IEEE, 2019: 406-410.
- [22] HOU Yaqiong, TANG Guihua. Thermal-hydraulic-structural analysis and design optimization for micron-sized printed circuit heat exchanger[J]. Journal of Thermal Science, 2019, 28(2): 252-261.
- [23] LI Hongzhi, ZHANG Yifan, YAO Mingyu, et al. Design assessment of a 5 MW fossil-fired supercritical CO₂ power cycle pilot loop[J]. Energy, 2019(174): 792-804.
- [24] OH C H, KIM E S. Heat exchanger design options and tritium transport study for the VHTR system[R]. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2008.
- [25] SONG K N, HONG S D. Structural integrity evaluation of a lab-scale PCHE prototype under the test conditions of HELP[J]. Science and Technology and Nuclear Installations, 2013(2013): 520145.
- [26] 全国压力容器标准化技术委员会. JB 4732-95 钢制压力容器—分析设计标准[S]. 秦皇岛: 中国标准出版社, 1995.
- China Standardization Committee on Pressure Vessels. JB 4732-95 Steel pressure vessels-design by analysis[S]. Qinhuangdao: Standards Press of China, 1995(in Chinese).
- [27] MYLAVARAPU S K. Design, fabrication, performance testing, and modeling of diffusion bonded compact heat exchangers in a high-temperature helium test facility[D]. Columbus: The Ohio State University, 2011: 57-58.
- [28] LEE S M, KIM K Y. Comparative study on performance of a zigzag printed circuit heat exchanger with various channel shapes and configurations[J]. Heat and Mass Transfer, 2013, 49(7): 1021-1028.
- [29] JEON S, BAIK Y J, BYON C, et al. Thermal performance of heterogeneous PCHE for supercritical CO₂ energy cycle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016(102): 867-876.



吴家荣

在线出版日期: 2021-06-30。

收稿日期: 2021-02-01。

作者简介:

吴家荣(1996), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为超临界流体流动传热, dearwujr@163.com;

*通信作者: 李红智(1983), 男, 博士, 研究员, 研究方向为超临界二氧化碳动力循环, lihongzhi@tpri.com.cn。

(编辑 胡琳琳)

Coupling Analysis of Mechanical Stress and Thermal Stress of Printed Circuit Heat Exchanger Core in Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle

WU Jiarong, LI Hongzhi*, YANG Yu, ZHANG Xuwei, QIAO Yongqiang
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd.)

KEY WORDS: supercritical carbon dioxide; printed circuit heat exchanger; thermal stress; mechanical stress; stress concentration

The high temperature and pressure conditions of printed circuit heat exchanger(PCHE) in supercritical carbon dioxide power cycle may lead to core material failure and structure destruction, so it is necessary to analyze the stresses in PCHEs to optimize channel structures, and thus ensure the long-term safe and stable operation of the system. In this work, the finite element method is employed to simulate stress field of PCHE channel model with semi-circular cross section by using CAE software. The thermal, mechanical and total stresses of the hot and cold channels are presented in Fig. 1. In general, the stresses are the combined effect of the pressure loading and temperature gradient, and the mechanical stress of the cold channel is greater than that of the hot channel because of its high pressure loading but the thermal

stress distributions are similar at most positions.

The effect of the temperature parameters on the thermal stress is studied in the range of 487.6~537.1°C. Fig. 2 shows the thermal stress distributions when the temperatures of hot or cold channels change. The thermal stress increases with temperature differences between hot and cold channels. The rounded tip radius can effectively reduce thermal and mechanical stress in stress concentration regions, and the mechanical stress decreases more dramatically. So circular cross section PCHE channels with no sharp tips are compared with semi-circular cross section channels in terms of stress. The results show that the maximum thermal stress, mechanical stress and total stress are significantly reduced when circular cross section channels are adopted.

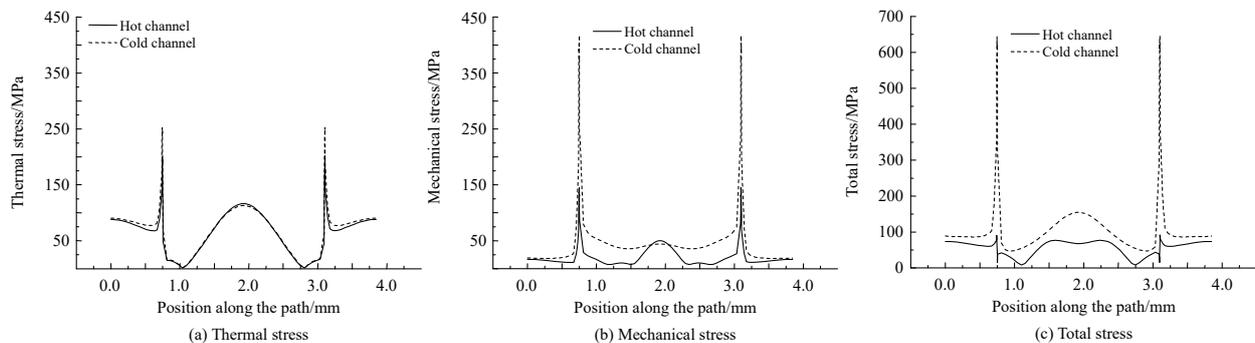


Fig. 1 Stress distribution

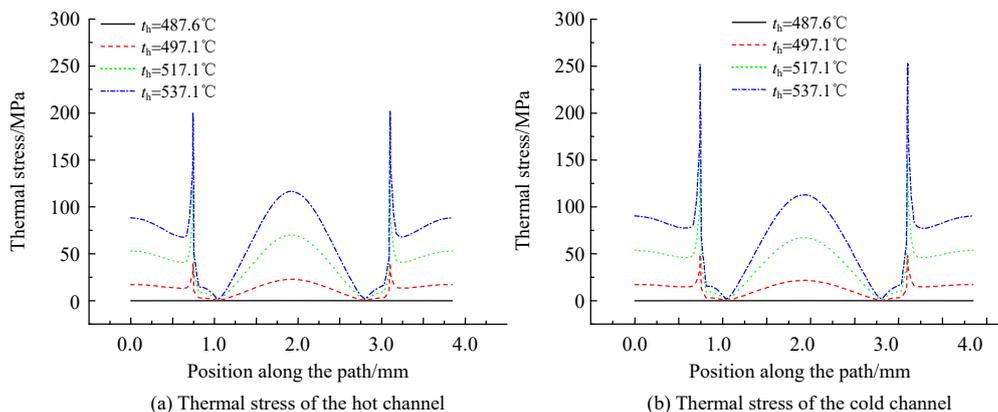


Fig. 2 Variation of thermal stress with the temperature of hot fluid