

700 °C 新型涂层双管系统关键特征参数分析及结构优化

郭晓峰¹, 张子龙¹, 秦磊¹, 袁博¹, 高俊翔¹, 庞自强²

(1. 内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010)

(2. 中国华能集团有限公司 包头第一热电厂, 内蒙古 包头 014060)

摘要: 以含双陶瓷结构的 700 °C 新型涂层双管系统为研究对象, 采用有限元顺次耦合的计算方法, 研究了关键特征参数对系统传热与应力分布的影响。在此基础上, 基于 MATLAB 与 ABAQUS 平台, 开发了一种优化算法与有限元相结合的多层异质涂层系统结构优化设计方法, 用以确定涂层双管系统的最优几何结构尺寸与材料物理性能参数。结果表明: 陶瓷层厚度比、外陶瓷层导热系数、热膨胀系数、冷却蒸汽温度和压力均会对涂层双管系统的温度和应力分布产生重要影响; 系统结构优化前后, P91 钢管内表面温度下降约 27 °C, 系统中热生长氧化物与粘接层界面处的最大 Mises 应力下降约 151 MPa, 这表明当前提出的系统结构优化方法可以用于自动确定多层异质涂层系统的最优关键特征参数。

关键词: 涂层双管系统; 双陶瓷层; 界面应力; 结构优化

中图分类号: TG174.453

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)11-3757-10

近年来, 在努力实现“碳达峰、碳中和”的目标下, 我国对煤炭的洁净、高效利用提出了更高的要求, 而发展高效率、低排放的先进超超临界燃煤发电技术被视为从源端提升能源效率, 构建清洁低碳、安全高效能源体系的关键环节之一。由于耐热材料技术的限制, 迄今最先进的商用燃煤发电技术是 600 °C 超超临界电站。为进一步提升燃煤发电效率, 我国前期已论证了 630~700 °C 超超临界电站建设的可能性。然而, 制 630~700 °C 超超临界燃煤电站设计和建设的技术瓶颈仍然是超超临界机组结构耐热材料技术^[1]。为了突破现有设计极限, 作者前期采用先进热障涂层(thermal barrier coatings, TBCs)技术, 在传统的 P91 耐热钢管内覆盖热障涂层, 并在管外配置了冷却蒸汽管, 设计出一种含双陶瓷层结构的 700 °C 新型涂层双管系统, 如图 1 所示^[2]。整个 TBC 系统主要包括 5 种材料组元, 即顶层锆酸钪(lanthanum zirconate, LZO)陶瓷层、内层氧化钇部分稳定氧化锆(yttria-stabilized zirconia, YSZ)陶瓷层、粘结层(bond coat, BC)、P91 钢基底以及在陶瓷层和粘结层之间形成以氧化铝为主要成分的热生长氧化物(thermally grown oxides, TGO)^[3]。

新型涂层双管系统是典型的多层材料体系, 各组分间存在显著不同的热导率和热膨胀系数, 并且在服役过程中会受到力、热和化学等共同作用。诸多研究表明, 采用双陶瓷层结构设计可兼顾两种陶瓷材料性能的优点进行优势互补, 实现对基体合金材料的保护^[4-6]。一方面, LZO 材料具有低热导率、低氧透过性、抗烧结、抗硅酸盐环境沉积物腐蚀等优点, 可以充分发挥新型材料高温隔热、抗氧化和抗腐蚀的作用^[7]; 另一方面, 底层陶瓷材料(YSZ)选用高热膨胀系数、高断裂韧性、高应变容限材料, 可有效缓解新型材料同金属粘结层间热膨胀系数不匹配的问题^[8]。然而, 与传统主蒸汽管道结构设计中沿壁厚方向近似恒温的运行工况不同, 当前涂层双管系统内陶瓷和钢多层异质结构设计特点, 在系统运行过程中会由于陶瓷和钢的物理、热学和力学性能的不同, 产生热梯度和热失配应力。受到材料、结构和服役环境等多重因素的耦合影响, 系统内材料分布和多尺度结构特征对结构性能的耦合影响规律复杂, 特别是陶瓷层厚度比会对热障涂层系统的构筑设计与多界面协同调控产生重要影响, 这导致系统内材料与结构匹配的性能设计困难,

收稿日期: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(52265021); 内蒙古自然科学基金(2021MS01011); 内蒙古自治区高等学校青年科技人才发展计划(NJYT22071)

作者简介: 郭晓峰, 男, 1986 年生, 博士, 副教授, 内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古 包头 014010, 电话: 0472-5951574, E-mail: guoxiaofeng@imust.edu.cn

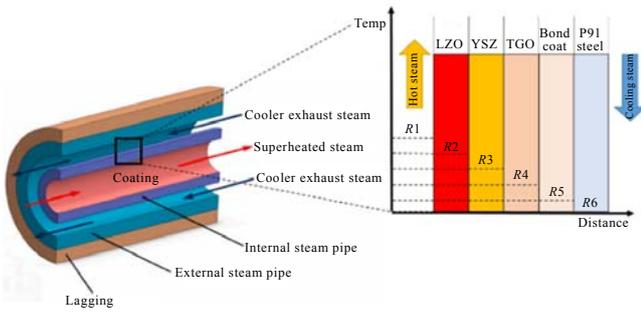


图 1 新型涂层双管系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the coated steam dual-pipe system^[2]

存在结构和性能多场精确调控的挑战。此外，由于各层材料在热膨胀系数、杨氏模量、泊松比等参数上的不匹配，在热障涂层制备和高温服役过程中，复杂的异质多层结构及其所产生的热膨胀不匹配性导致涂层系统界面产生极大的失配应力，这是造成热障涂层失效剥落的主要因素。

鉴于此，本实验在考虑理想余弦 TGO 形貌的基础上，以含双陶瓷结构的新型涂层双管系统为研究对象，分析陶瓷层厚度比、外陶瓷层热膨胀系数、导热系数、冷却蒸汽温度和压力等关键特征参量对系统传热和应力分布的影响。在此基础上，以上述关键特征参数为优化变量，采用优化算法与有限元相结合的技术手段，开展涂层双管系统结构优化设计研究，以期为先进热障涂层技术在 700 °C 超超临界机组中的设计和应用奠定理论基础。

1 涂层双管系统的有限元模型

1.1 几何模型和网格划分

基于新型涂层双管系统，建立二维轴对称有限元模型（基准模型），该系统总厚度为 30.85 mm，陶瓷隔热层（LZO+YSZ）总厚度为 0.8 mm，其中外陶瓷层（LZO）为 0.3 mm，内陶瓷层（YSZ）为 0.5 mm。热生长氧化物（TGO）厚度为 0.001 mm，粘结层（BC）厚度为 0.049 mm，主蒸汽管道外径为 300 mm，壁厚为 30 mm，结构示意图如图 2 所示。为降低计算成本，截取轴向长度为 0.6 mm 的一段涂层双管系统进行有

限元分析。由于喷涂工艺的原因，LZO/YSZ 界面、YSZ/TGO 界面和 TGO/BC 界面粗糙不平，本研究采用理想的余弦形貌界面反映这一几何形貌特征，所使用的函数分别为：

$$y=A\cos(\pi x/0.1) \tag{1}$$

$$y=-A\cos(\pi x/0.05) \tag{2}$$

式中，幅值 A 的取值为 0.008 mm。

为了研究陶瓷层厚度比（LZO/YSZ）对涂层双管系统隔热性能和应力分布的影响，在基准模型基础上，保持涂层总厚度（0.8 mm）不变的条件下，通过改变外陶瓷层厚度来调控陶瓷层的厚度比。本研究中，LZO/YSZ 的取值分别为 100/700、200/600、300/500、400/400、500/300、600/200、700 μm/100 μm。此外，由于陶瓷层，尤其是外陶瓷层的材料参数和系统操作参数也会对涂层双管系统温度和应力分布产生影响，本研究进一步分析外陶瓷层导热系数、热膨胀系数、冷却蒸汽温度以及压力等关键特征参数对含双陶瓷结构的热障涂层系统温度场和应力场分布的影响，具体的关键特征参数变化范围如表 1 所示。

采用有限元顺次耦合方法进行含双陶瓷结构的新型涂层双管系统传热和应力分析。在传热和应力分析中，使用的单元类型分别为八节点二次轴对称传热四边形单元（DCAX8）和八节点双向二次轴对称四边形单元，减缩积分（CAX8R）。在双陶瓷结构新型涂层

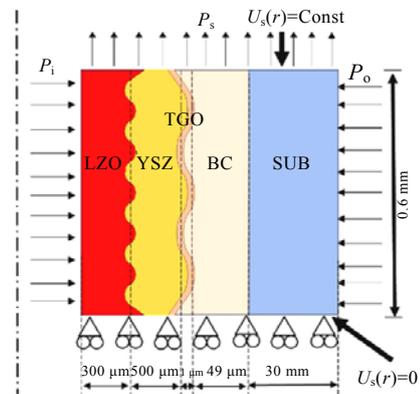


图 2 二维轴对称有限元模型的几何尺寸和边界条件示意图
Fig.2 Dimensions and boundary conditions for the axisymmetric finite element model

表 1 关键特征参数变化范围

Table 1 Value ranges of characteristic parameters

Key characteristic parameter	Value					
Cooling steam pressure/MPa	25	20	10	7.5	5	0
Cooling steam temperature/°C	500	450	300	200	100	-
Thermal conductivity of LZO/W·(m·°C) ⁻¹	0.1	0.3	0.6	0.8	0.87	1.0
Thermal expansion coefficient of LZO/×10 ⁻⁶ °C ⁻¹	6	8	9.1	10	12	14

双管系统的有限元模型中对热生长氧化物层 (TGO) 两侧的网格进行局部细化以便保证计算精度, 如图 3 所示。

1.2 材料参数和边界条件

本研究中, 新型涂层双管系统内外压强分别为 25 和 5 MPa。假设主蒸汽管道内蒸汽温度为 700 °C, 冷却蒸汽温度为 450 °C, 通过主蒸汽管道与冷却蒸汽管道间对流来降低主蒸汽管道温度。有限元模型边界条件如图 2 所示, 下边界施加轴向方向的对称约束, 限制轴向方向的位移; 上边界施加多点约束, 使上边界的所有节点都具有相同的轴向位移。在有限元模型中, 与温度有关的各层材料参数, 如热膨胀系数 (CTE)、热导率、密度和比热, 从文献中获得^[9-17], 并基于现

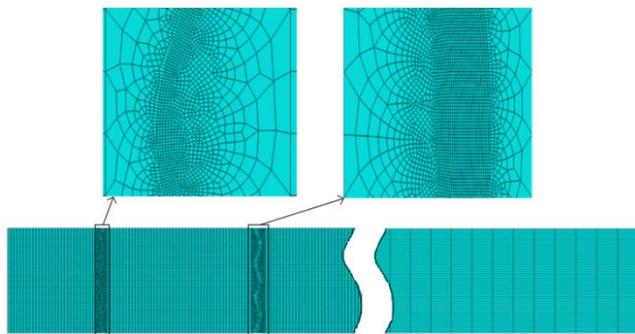


图 3 有限元模型及网格划分图

Fig.3 Finite element model and meshing diagram

有数据通过线性插值来估算宽温度范围内的其他材料参数, 如表 2 所示。

2 涂层双管系统的优化

2.1 优化模型

由于新型涂层双管系统是典型的多层材料体系, 各组元间存在显著不同的热膨胀系数及微观结构特征, 并且在服役过程中会受到力、热、化学等共同作用。通常 TGO 和 BC 界面处的热失配应力是导致 TBC 系统失效的关键因素。因此当前系统优化目标函数为:

$$F(\mathbf{X}) = |\sigma_0^T(\mathbf{X}) - \sigma_0^B(\mathbf{X})| \rightarrow \min \quad (3)$$

$$\mathbf{X} \in \mathbf{R}^n \quad (4)$$

$$\mathbf{B}_i^L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{B}_i^U \quad (5)$$

式中, $F(\mathbf{X})$ 是目标函数, $\sigma_0^T(\mathbf{X})$ 和 $\sigma_0^B(\mathbf{X})$ 分别是 TGO 层靠近 BC 层的环向应力和 BC 层靠近 TGO 层的环向应力, \mathbf{X} 是优化变量 (n 维空间中的向量, \mathbf{R}^n), \mathbf{B}_i^L 和 \mathbf{B}_i^U 是 \mathbf{X} 的上下限。

考虑到材料分布、材料特征参数及环境工作温度和压力均会对系统温度和应力分布产生影响, 所以优化变量为:

$$\mathbf{X} = [w_1, w_2, k_1, k_2, \alpha_1, \alpha_2, T_i, P_c]^T \quad (6)$$

式中 w_1 、 w_2 分别为 LZO、YSZ 的厚度, k_1 、 k_2 为 LZO 和 YSZ 的导热系数, α_1 、 α_2 为 LZO 和 YSZ 的热膨胀系数, T_i 为冷却蒸汽的温度, P_c 为冷却蒸汽压力。

对于新型涂层双管系统而言, 热障涂层需要尽可

表 2 热障涂层材料的参数

Table 2 Parameters of thermal barrier coatings^[9-17]

Material	$T/^\circ\text{C}$	E/GPa	ν	Yield strength/ MPa	Density/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	CTE/ $\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Conductivity/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	Specific heat/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	Ref.
LZO	-	63	0.25	-	6300	9.1	0.87	460	[17]
8YSZ	20	204	0.10	-	6037	9.68	1.2	500	[9-11]
	800	179	0.11	-		9.88			
TGO	20	400	0.23	1000	3984	8	10	755	[15,16]
	1000	325	0.25	1		9.3	4		
NiCoCrAlY	20	200	0.30	868	7711	12.5	5.8	628	[13]
	800	145	0.32	191		14.3	14.5		
P91	20	218	0.3	488	7770	-	26	440	[12,14]
	100	213		461		10.9	27	480	
	200	207		441		11.3	28	510	
	300	199		427		11.7	28	550	
	400	190		396		12.1	29	630	
	450	186		-		12.1	29	630	
	500	181		360		12.3	30	660	
	550	175		331		12.4	30	710	
600	168	285	12.6	30	770				
650	162	206	12.7	30	860				

能厚，以便将主蒸汽管表面温度降低到要求的水平，然而目前公开文献制备的涂层最大厚度为 4 mm^[18]。但如果热障涂层过厚，通常会导致其加速失效。因此，本研究中将 w_1 、 w_2 的上下边界选取 0.1 到 2 mm 之间。为了覆盖更广泛的涂层材料^[19-20]， k_1 、 k_2 的上下边界分别选择在 0.6 到 1 W·(m·°C)⁻¹ 之间和 1 到 1.4 W·(m·°C)⁻¹ 之间， α_1 、 α_2 的上下边界分别选择在 8.5×10⁻⁶ 到 9.5×10⁻⁶ °C⁻¹ 之间和 9.5×10⁻⁶ 到 10×10⁻⁶ °C⁻¹ 之间。考虑到过低的冷却蒸汽会造成系统热效率降低，所以 T_1 的上下边界选择在 400 到 500 °C 之间， P_c 的上下边界选择在 5~10 MPa 之间。

在目前的双管系统中，700 °C 的过热蒸汽通过表面喷涂有热障涂层的 P91 耐热钢管输送。考虑到耐热钢管的高温蠕变性能限制，在服役过程中需要保证其表面最高温度不超过 580 °C。在优化模型中设置了主管道的温度约束。本研究中温度约束方程表示为：

$$T(\mathbf{X}) - T_0 \leq 0 \tag{7}$$

式中， $T(\mathbf{X})$ 为温度约束函数， T_0 为初始最高温度约束条件，即为 580 °C。

2.2 优化程序

为了确定涂层双管系统的最优几何尺寸和关键特征参数值，基于 MATLAB 和 ABAQUS 仿真平台构建了有限元模拟与优化算法相结合的结构优化方法。在联合优化方法中，使用 ABAQUS 实现涂层双管系统温度和应力场计算，即计算系统在热机载荷作用下的温度和应力分布；基于 2.1 节中建立的优化模型，在满足温度约束条件下采用 MATLAB 软件实现涂层双管系统结构优化。通过调用 MATLAB 优化工具箱中求解非线性多元函数 $Fmincon$ 来得到最优系统结构参数。此外，为了实现 ABAQUS 软件与优化算法间的实时数据传递，即向 ABAQUS 软件中输入系统结构参数信息，并将计算得出的温度和应力信息返回给优化算法，本研究开发了 ABAQUS 和 MATLAB 平台之间的数据交互程序。

在联合优化过程中，首先使用 MATLAB 对 ABAQUS 的输入文件(inp 文件)进行调用计算，即根据 2.1 节中提供的初始优化变量值对模型的前处理过程进行重新定义，进而调用 ABAQUS 对输入文件进行热机耦合分析。随后，通过开发 PYTHON 脚本，对 ABAQUS 结果文件(odf 文件)中 TGO/BC 界面的环向应力进行数据提取与保存。此时，MATLAB 对结果文件进入数据处理状态。当 MATLAB 通过算法对结果数据进行处理后，即可根据处理结果对优化变量值进行更新，并再次基于更新后的优化变量值对 ABAQUS 的输入文件(inp 文件)进行修改。每次修改后，都将

重复之前的过程，直至满足优化条件，优化流程如图 4 所示。

3 结果与讨论

3.1 新型涂层双管系统的温度和 Mises 应力分析

图 5 所示为稳态工作条件下含双陶瓷结构的新型涂层双管系统(基准模型)沿壁厚方向的温度分布和应力分布。从图中可以看出，在基准模型中系统的温度分布沿壁厚方向从内壁面向外壁面单调降低，且内、外壁面之间存在较大的温差。在当前的基准模型中，外陶瓷层外表面温度为 700 °C，主蒸汽管道 P91 外表面的冷却蒸汽温度为 450 °C，由于涂层系统中陶瓷材料的热导率较低，双陶瓷结构会为主蒸汽管道提供相应的隔热保护。稳态工作条件下，金属基体 P91 管与涂层接触的内表面温度大约为 590 °C，这一计算结果表明双陶瓷结构热障涂层能够为高温主蒸汽管道提供足够的隔热保护，使得主蒸汽管道可以在材料的许用温度范围内工作。此外，由于各层材料的热膨胀系数(物理性能)存在很大差异，在热机载荷的作用下，具有双陶瓷结构的新型涂层双管系统中的 Mises 应力分布存在明显差异。从图 5 中可以看到，在稳态工作条件下，双陶瓷结构新型涂层双管系统中环向应力远

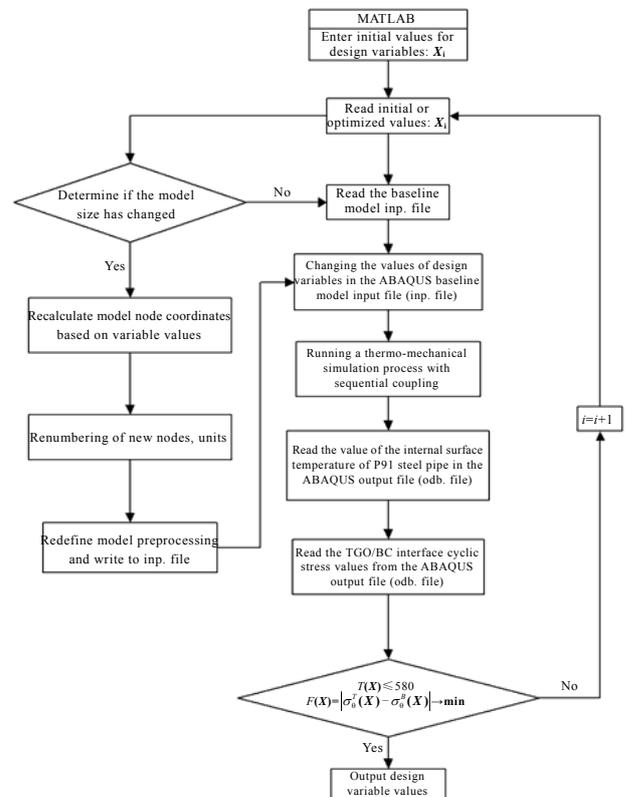


图 4 优化程序示意图

Fig.4 Flowchart of optimization process

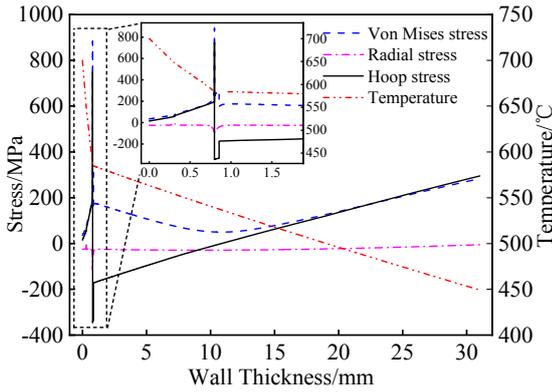


图 5 含双陶瓷结构的新型涂层双管系统沿壁厚方向的温度和应力分布

Fig.5 Temperature and stress distributions along wall thickness direction in the coated steam dual-pipe system

大于径向应力，这表明稳态工作条件下系统环向应力对双陶瓷结构新型涂层双管系统结构完整性的影响远大于径向应力。而最大 Mises 应力出现在涂层双管系统 TGO/BC 余弦界面波峰处，这表明热生长氧化物是影响涂层系统界面破坏的关键因素，这与 Ding 等人^[21]的研究结果一致。

3.2 关键特征参数对涂层双管系统温度和应力的影响

3.2.1 陶瓷层厚度比对涂层双管系统传热与应力分布的影响

陶瓷层厚度比对涂层双管系统隔热性能的影响如图 6 所示。从图中可以看出，在陶瓷层总厚度(0.8 mm)不变条件下当外陶瓷层厚度从 100 μm 增加到 700 μm 过程中，BC/P91 界面靠近基体侧的温度从 690 °C 降至 575 °C。在当前研究中，由于外陶瓷材料 (LZO) 的导热系数 (0.87 W·(m·°C)⁻¹) 比内陶瓷材料 (YSZ) 的

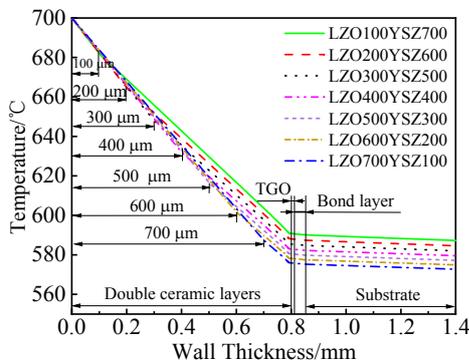


图 6 不同陶瓷层厚度比条件下涂层双管系统沿壁厚方向的温度分布

Fig.6 Temperature distribution along wall thickness direction with variable thickness ratios of ceramic layers

导热系数 (1.2 W·(m·°C)⁻¹) 更低，这使得 LZO 材料具有更好的隔热效果。随着双陶瓷结构中外陶瓷 (LZO) 层厚度的增加，双陶瓷结构具有更好的隔热性能。然而，当前涂层双管系统中，复杂的异质多层结构及其所产生的热膨胀不匹配性将导致系统界面产生极大的失配应力。任晓雪等人^[22]的研究表明，具有双陶瓷热障涂层的热震寿命、剥离速率以及失效模式均与陶瓷层的厚度比密切相关，而合适的厚度比可以避免界面应力过大，进而有效地保护涂层结构的完整性。图 7 所示为不同陶瓷层厚度比条件下涂层双管系统沿 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布。从图中可以看出，当外陶瓷层厚度从 100 μm 增加到 700 μm 过程中，系统中最大 Mises 应力从 833 MPa 连续单调增加到 850 MPa，且最大 Mises 应力均出现在 TGO 界面波峰处，这一结果表明，在稳态工作条件下 TGO/BC 界面是涂层系统剥落失效的关键部位。

3.2.2 外陶瓷导热系数对涂层双管系统温度分布的影响

陶瓷层导热系数是影响热障涂层隔热效果的关键物性参数。在陶瓷层厚度比为 300:500 (μm) 条件下，仅通过改变外陶瓷层 (LZO) 的导热系数，分析不同导热系数对涂层双管系统温度分布的影响。图 8 所示为不同导热系数条件下涂层双管系统沿壁厚方向的温度场分布图。由图可知，稳态运行情况下，随着外陶瓷层 (LZO) 导热系数由大到小变化，涂层部分降温速率明显加快，隔热效果更加明显，这使得金属基体材料的界面温度降低。通常，外陶瓷层材料的导热系数与其本身的微观结构密切相关。从当前研究可见，如要进一步减小外陶瓷层材料的导热系数，这需要有

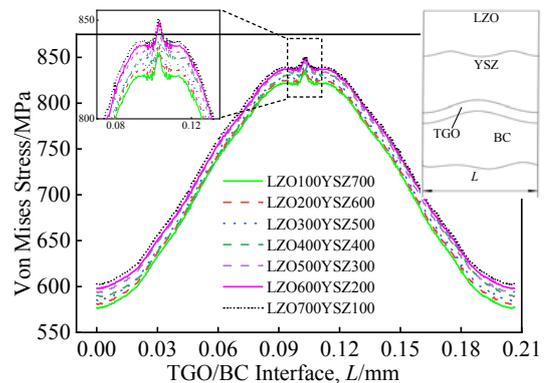


图 7 不同陶瓷层厚度比条件下沿 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布

Fig.7 Mises stress distribution on the TGO side along the TGO/BC interface with variable thickness ratios of ceramic layers

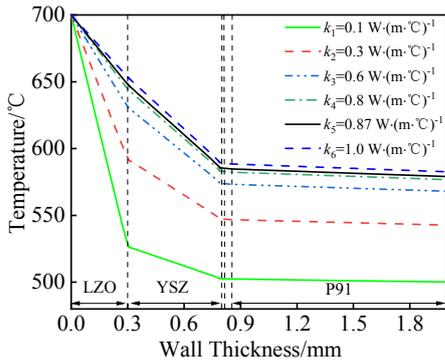


图 8 不同导热系数条件下涂层双管系统沿壁厚方向的温度场分布

Fig.8 Temperature distribution along wall thickness direction with variable thermal conductivity

效地改变外陶瓷层的微观结构特征。

3.2.3 外陶瓷热膨胀系数涂层双管系统应力分布的影响

在含双陶瓷结构新型涂层双管系统中，各级涂层材料的物理性能参数，尤其是热膨胀系数存在显著的差异，而因热膨胀失配所产生的热膨胀失配应力会破坏涂层的结构完整性。为了分析陶瓷层热膨胀系数对涂层双管系统应力分布的影响，保持基准模型中其他材料参数和热机载荷不变，以外陶瓷层（LZO）材料热膨胀系数作为变量进行 Mises 应力分析，如图 9 所示。从图中可以看到，由于 LZO 与 YSZ 材料热膨胀系数存在差异，陶瓷层 LZO 与 YSZ 界面应力产生了较大的应力突变，这与 Doleker 等^[23]人的研究结果相一致。在当前研究中，外陶瓷层材料热膨胀系数的连续变化，其实质反映的是双陶瓷层内部成分界面的突

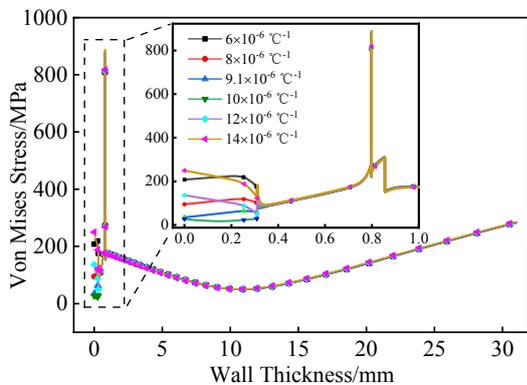


图 9 不同热膨胀系数条件下涂层双管系统沿壁厚方向 Mises 应力的分布

Fig.9 Mises stress distribution along wall thickness direction with variable thermal expansion coefficients

变。不同涂层材料的热膨胀系数非连续变化本身会导致相邻材料之间产生较大的界面应力突变，加之陶瓷层表面温度变化速率要比基体更大，且陶瓷层需要承受环境介质，如 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 硅酸盐环境沉积物(calcium magnesium aluminum silicate, CMAS)和水蒸汽侵蚀，在实际服役过程中陶瓷层，尤其是陶瓷层界面会产生更大的失效可能。当 LZO 材料热膨胀系数(约为 10×10⁻⁶ °C⁻¹)与 YSZ 材料热膨胀系数相近时，陶瓷层 LZO/YSZ 界面应力差别不大，这时陶瓷层 LZO/YSZ 界面应力突变差最小，能够有效预防陶瓷层内部的界面脱落。此外，从图 9 中可以看到，不同热膨胀系数条件下，涂层双管系统的最大 Mises 应力出现在 TGO/BC 界面处。为了进一步分析稳态工作条件下外陶瓷层热膨胀系数对系统最大 Mises 应力的影响，图 10 所示为不同热膨胀系数条件下 TGO/BC 界面处 Mises 应力分布。由图 10 可见，随着外陶瓷层（LZO）材料的热膨胀系数的增大，TGO 层波峰处应力持续增大，但增加幅度不明显。

3.2.4 冷却蒸汽温度对涂层双管系统应力分布的影响

保持各层几何参数、材料物理性能参数不变，研究不同冷却蒸汽温度对新型涂层双管系统应力分布的影响。如图 11 所示为不同冷却蒸汽温度条件下沿 TGO/BC 界面的 Mises 应力分布。从图中可以看出，冷却蒸汽温度对涂层双管系统 TGO/BC 界面 Mises 应力分布产生了显著影响。随着冷却蒸汽温度从 100 °C 提高到 500 °C，涂层双管系统内外壁面将由于温度差异而产生不同的热应力，这一热应力变化导致了 TGO/BC 界面波峰和波谷处的 Mises 应力分布相对比较复杂。从图 11 中可以看到，冷却蒸汽温度的变化极大地改变了 TGO/BC 界面附近 Mises 应力分布曲线特

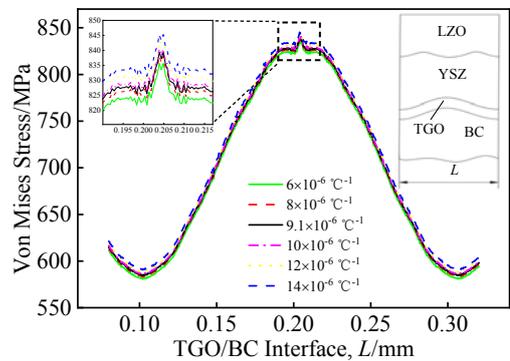


图 10 不同热膨胀系数条件下涂层双管系统沿 TGO/BC 界面靠 TGO 侧 Mises 应力的分布

Fig.10 Mises stress distribution on the TGO side along the TGO/BC interface with variable thermal expansion coefficients

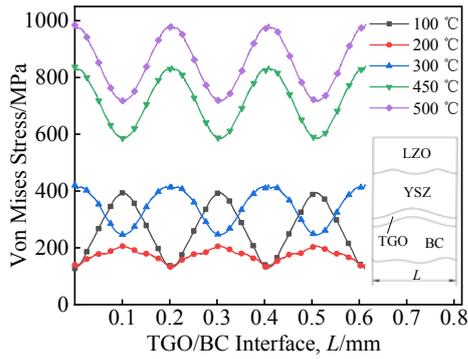


图 11 不同冷却蒸汽温度条件下涂层双管系统沿 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布

Fig.11 Mises stress distribution on the TGO side along the TGO/BC interface at variable cooling steam temperatures

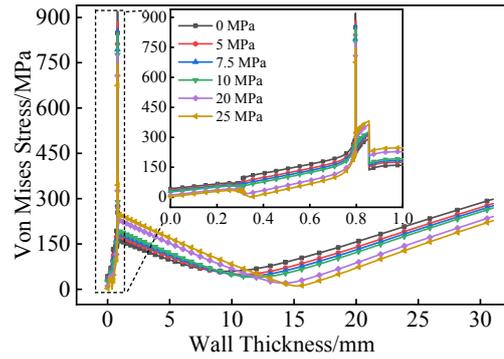


图 12 不同冷却蒸汽压力条件下涂层双管系统沿壁厚方向的 Mises 应力分布

Fig.12 Mises stress distribution along wall thickness direction under variable cooling steam pressures

征，并且在低温（低于 200 °C）与高温（高于 200 °C）条件下系统沿 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布曲线表现出相反的特征。这主要是归因于涂层双管系统内外壁面温度不同所产生的热应力存在较大差异。由于当前系统中主蒸汽管道内外的蒸汽温度相差较大，使得 TGO 界面处存在较大的温度梯度和热应力，且热应力会随冷却蒸汽温度变化出现明显的改变。

3.2.5 冷却蒸汽压力对涂层双管系统应力分布的影响

保持双陶瓷结构新型涂层双管系统各层几何参数、材料物理性能参数以及热载荷不变，仅分析冷却蒸汽压力对涂层双管系统应力分布的影响。图 12 所示为不同冷却蒸汽压力条件下沿壁厚方向的 Mises 应力分布。由图 12 可见，冷却蒸汽压力有效地改变了涂层双管系统中 Mises 应力的分布，且最大 Mises 应力出现在 TGO/BC 界面处。为了进一步分析不同冷却蒸汽压力对 TGO/BC 界面的 Mises 应力分布的影响，本节研究了不同冷却蒸汽压力条件下涂层双管系统沿 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布，如图 13 所示。从图中可以看到，冷却蒸汽压力从 0 MPa 增加到 25 MPa 的过程中，TGO/BC 界面处的 Mises 应力由 900 MPa 连续单调减小至 750 MPa。当前模型中，系统的 Mises 应力是由温度梯度导致的热应力和高温蒸汽产生的机械应力共同组成。由于当前模型中温度场相同，即由温度梯度产生的热应力不变，涂层双管系统在内压和外压共同作用下使得机械应力发生了变化，进而导致了 TGO/BC 界面处 Mises 应力产生变化。基于以上分析可知，冷却蒸汽压力有效地改善了涂层双管系统沿壁厚方向的 Mises 应力分布。

综上所述，陶瓷层厚度比、外陶瓷层导热系数、热膨胀系数及冷却蒸汽温度和压力均会对当前涂层双

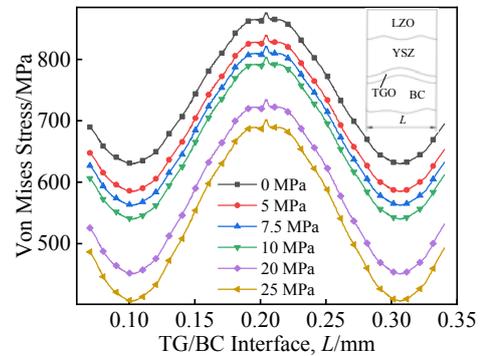


图 13 不同冷却蒸汽压力条件下涂层双管系统沿 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布

Fig.13 Mises stress distribution along the TGO/BC interface under variable cooling steam pressures

管系统温度和应力分布产生重要影响。受到上述材料物理性能参数、多层异质结构尺寸和服役环境等多重因素的耦合影响，涂层双管系统内材料分布和多尺度结构特征尺寸对结构性能的耦合影响规律复杂，需要对系统进行材料、结构与性能之间的优化设计，以实现结构与性能多场精确调控。

3.3 系统优化分析

3.3.1 系统优化参数

本节将基于第 2 节中所建立的优化模型及方法来确定系统涂层双管系统的优化参数。优化过程中，为了避免优化变量数量级差异对系统优化结果的影响，优化前对各优化变量进行了归一化处理。优化过程从各优化变量初始值开始，通过执行迭代来寻找系统中 TGO/BC 界面处环向失配应力的最小值。各优化变量的收敛过程如图 14 所示。结果表明，经过 50 次迭代后，由热应力和机械应力引起的 TGO/BC 界面处的环

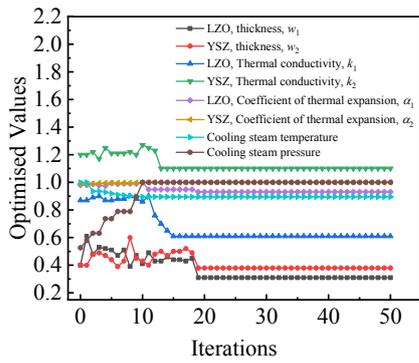


图 14 优化参数值与迭代图

Fig.14 Convergence curves of optimized characteristic parameters

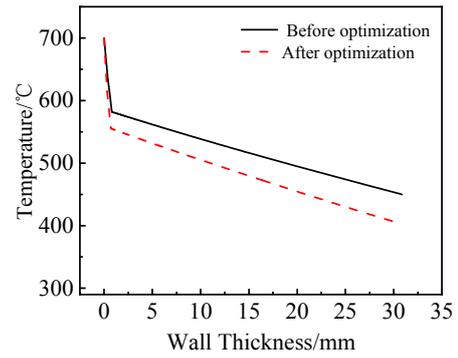


图 16 优化前后涂层双管系统沿壁厚方向的温度分布

Fig.16 Temperature distribution along wall thickness direction before and after optimization

向失配应力达到最小值（见图 15）。优化后 TGO/BC 界面的环向应力差值由优化前的 1090.87 MPa 降为 971.1 MPa。优化前后各设计变量值如表 3 所示。

3.3.2 初始和优化模型中温度和应力比较

图 16 为优化前后涂层双管系统沿壁厚方向的温度分布。从图中可以看到，由于系统各参量的优化，

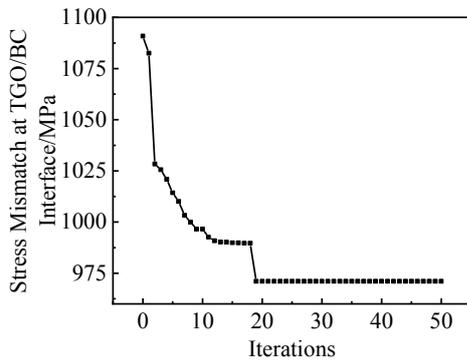


图 15 TGO/BC 界面环向失配应力随迭代次数优化曲线

Fig.15 Convergence curve of the optimized circumferential stress due to thermal mismatch at the TGO/BC interface

表 3 优化前后各参数变化值

Table 3 Values of characteristic parameters before and after optimization

Optimized variable	Initial guess value	Optimized value
w_1/mm	0.4	0.31
w_2/mm	0.4	0.38
$T_v/^\circ\text{C}$	450	403
$k_1/W \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	0.87	0.61
$k_2/W \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	1.2	1.1
$\alpha_1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	9.1	8.6
$\alpha_2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	9.88	9.99
P_c/MPa	5	9.5

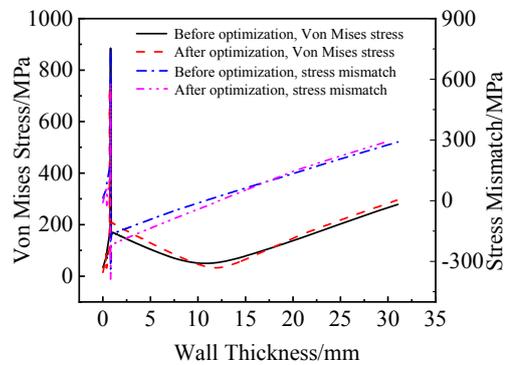


图 17 优化前后涂层双管系统沿壁厚方向的应力分布

Fig.17 Mises stress distributions along wall thickness before and after optimization

优化后 P91 钢管内表面温度由优化前的 582 °C 降低到 555 °C 与此同时，下降约 27 °C，系统 TGO/BC 界面处应力突变显著减小（见图 17），且 TGO/BC 界面处的最大 Mises 应力由 885 MPa（优化前）降低至 734 MPa（优化后），下降约 151 MPa。在本研究中上述优化前后的计算结果说明了当前优化方法的有效性。

4 结 论

1) 陶瓷层厚度比是直接影响涂层双管系统温度和应力分布的因素之一。在陶瓷层总厚度 0.8 mm 不变的条件下，当外陶瓷层厚度从 100 μm 增加到 700 μm 过程中，BC/P91 界面靠近基体侧的温度从 690 °C 降至 575 °C，但系统最大 Mises 应力从 833 MPa 连续增加到 850 MPa，且最大 Mises 应力均出现在 TGO 界面波峰处。

2) 外陶瓷层导热系数和热膨胀系数会对涂层双管系统的温度场和应力场产生重要影响。稳定运行情

况下, 随着外陶瓷层导热系数由大到小变化, 涂层部分降温速率明显加快, 隔热效果更加明显。由于 LZO 与 YSZ 材料的热膨胀系数存在差异, 两者在界面处会产生应力突变, 不同热膨胀系数条件下, 系统中最大 Mises 应力出现在 TGO/BC 界面处, 且界面波峰处的应力随外陶瓷层热膨胀系数的增大而连续增大, 但增加幅度不明显。

3) 冷却蒸汽温度和压力是影响涂层双管系统结构完整性的重要变量。随着冷却蒸汽温度从 100 °C 提高到 500 °C, 系统由温差而产生的不同大小的热应力极大地改变了 TGO/BC 界面附近 Mises 应力分布曲线特征。冷却蒸汽压力从 0 MPa 增加到 25 MPa 过程中, 系统中 TGO/BC 界面处 Mises 应力由 900 MPa 连续单调减小到 750 MPa。冷却蒸汽压力可以有效地改善涂层双管系统沿壁厚方向的 Mises 应力分布。

4) 基于 MATLAB 和 ABAQUS 平台, 开发了一种优化算法与有限元相结合的多层异质涂层系统结构优化方法。该方法可以通过计算热机载荷作用下系统在 TGO/BC 界面产生的环向失配应力, 自动确定结构的最优关键特征参数, 如结构几何尺寸、陶瓷层物理性能参数等。优化结果表明, P91 管的内表面温度下降约 27 °C, 系统 TGO/BC 界面处的最大 Mises 应力下降约 151 MPa。

参考文献 References

- [1] Liu Zhengdong(刘正东), Chen Zhengzong(陈正宗), He Xikou(何西扣) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2020, 56(4): 539
- [2] Guo X, Sun W, Becker A *et al. International Journal of Pressure Vessels and Piping*[J], 2019, 176: 103 933
- [3] Wang Tiejun(王铁军), Fan Xueling(范学领), Sun Yongle(孙永乐) *et al. Chinese Journal of Solid Mechanics(固体力学学报)*[J], 2016, 37(6): 477
- [4] Zhao X L, Liu W, Li C *et al. Coatings*[J], 2022, 12(11): 1638
- [5] Liu Q, Hu X P, Zhu W *et al. Ceramics International*[J], 2022, 48(17): 24 402
- [6] Chen S, Zhou X, Cao X *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 908: 164 442
- [7] Zhou X, Wang J, Yuan J *et al. Journal of the European Ceramic Society*[J], 2018, 38(4): 1897
- [8] Liu G X, Shen Z Y, He L M *et al. Materialia*[J], 2023, 27: 101 661
- [9] Tang W Z, Yang L, Zhu W *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2016, 32(5): 452
- [10] Dong H, Yang G J, Cai H N *et al. Ceramics International*[J], 2015, 41(9): 11 046
- [11] Gadag S, Subbarayan G, Barker W. *Journal of Materials Science*[J], 2006, 41(4): 1221
- [12] Ranjbar-Far M, Absi J, Shahidi S *et al. Materials & Design* [J], 2011, 32(2): 7328
- [13] Hani A E H, Bhattacharyya A, Maurice D. *Mechanics of Materials*[J], 2018, 122: 159
- [14] Vallourec & Mannesmann Tubes. *T/P91 Tubing Handbook* [M]. Boulogne: Vallourec & Mannesmann Tubes, 2012
- [15] Rösler J, Bäker M, Aufzug K. *Acta Materialia*[J], 2004, 52(16): 4809
- [16] Zhong Jianlan(钟建兰), Ao Bo(敖波), Gu Yuqi(古玉祺). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(7): 2100
- [17] Vassen R, Cao X, Tietz F *et al. Journal of the American Ceramic Society*[J], 2004, 83(8): 2023
- [18] Chun-Hway H, Edwin R F. *Materials Science and Engineering*[J], 2000, 283(1-2): 46
- [19] Wang Jing(王璟), Bai Shuxing(白书欣), Li Shun(李顺) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2010, 39(5): 827
- [20] Yu Qingmin(于庆民), Shi Yongzhi(石永志). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(10): 3057
- [21] Ding K Y, Zhang T, Wang Z *et al. Materials*[J], 2022, 15(23): 8442
- [22] Ren Xiaoxue(任晓雪), Jiang Peng(江鹏), Fan Xueling(范学领). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(12): 3703
- [23] Doleker K M, Ozgurluk Y, Karaoglanli A C. *Surface and Coatings Technology*[J], 2021, 415: 127 135

Key Characteristic Parameters Analysis and Structural Optimization of a Novel Coated Steam Dual Pipe System at 700 °C

Guo Xiaofeng¹, Zhang Zilong¹, Qin Lei¹, Yuan Bo¹, Gao Junxiang¹, Pang Ziqiang²

(1. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

(2. Baotou No.1 Thermal Power Plant, China Huaneng Group Co., Ltd, Baotou 014060, China)

Abstract: This work studied the influence of characteristic parameters on the heat transfer and stress distribution for the thermal barrier coatings used in a novel 700 °C dual-pipe system. The finite element sequential coupling method was used on this basis, a structural optimization method for the multilayer heterogeneous coating system was developed by MATLAB and ABAQUS platforms. And the optimal geometric sizes and material properties were identified. Results reveal that the thickness ratio of the ceramic layers, thermal conductivity of the outer ceramic layer, thermal expansion coefficient, cooling steam temperature, and pressure simultaneously have significant effects on the temperature and stress distribution of the coated steam dual-pipe system. The inner surface temperature of P91 steel pipes can be decreased by about 27 °C and the maximum Mises stress at the interface between thermal growth oxide and bond coat can be decreased by about 151 MPa, suggesting that the proposed systematic optimization method can be used to automatically determine the optimal key characteristic parameters of multilayer heterogeneous coating systems, resulting in improved thermal management and reduced stress on critical components.

Key words: dual-pipe system; double thermal barrier coatings; interfacial stress; structural optimization

Corresponding author: Guo Xiaofeng, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, P. R. China, Tel: 0086-472-5951574, E-mail: guoxiaofeng@imust.edu.cn