

基于 TC/TGO/BC 界面为理想余弦波形的新型涂层双管系统在热机载荷下的传热和应力分析

郭晓峰¹, 张开宇¹, 秦磊¹, 庞自强²

(1. 内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010)

(2. 北方联合电力有限责任公司 包头第一热电厂, 内蒙古 包头 014060)

摘要: 采用有限元顺次耦合的方法, 开展了热机载荷作用下新型涂层双管系统传热和应力分析, 初步研究了关键特征参量对系统传热和应力分布的影响。结果表明: 在稳态工作条件下, 热障涂层为主蒸汽管道提供了足够的隔热保护, 但由温度梯度产生的热应力对系统结构完整性产生了很大影响; 系统中环向应力远大于径向应力, 最大环向应力出现在 TGO/BC 界面靠近 TGO 侧的余弦波峰处; 此外, TC 层厚度、TC 层热膨胀系数、冷却蒸汽的温度和压力决定了系统的温度和应力分布。

关键词: 涂层双管系统; 有限元分析; 热生长氧化物

中图分类号: TG174.453; TQ174.75⁺8.16

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)01-0260-06

近年来, 为了实现节能减排的战略目标, 中国超超临界燃煤发电技术日益朝着大容量、高参数、高效率和低排放的方向发展。目前, 600 °C 超超临界是世界最先进的商用燃煤发电技术, 并且中国建设的 600 °C 超超临界燃煤电站已超过 300 座, 占世界同类电站的 90% 以上。长期以来, 各国学者不断地追求蒸汽温度和压力的进一步提高, 致力于开发 630~700 °C 先进超超临界燃煤发电技术。然而超超临界机组结构耐热材料技术成为制约 630~700 °C 先进超超临界燃煤电站设计和建设的技术瓶颈^[1]。

从超超临界技术的发展历程看, 要进一步提高超超临界电站的蒸汽参数, 机组结构耐热材料有以下几个途径可供选择: (1) 开发能够承受更高温度的耐热钢, 但难度大、周期长; (2) 更换新型镍基耐热合金, 但成本高, 目前其服役性能尚存在一定的问题^[1]。为了突破这一技术瓶颈, 作者前期在传统的 P91 耐热钢管内覆盖一层由氧化钇部分稳定氧化锆 (yttria-stabilized zirconia, YSZ) 制成的热障涂层, 并在管外配置了冷却蒸汽管, 设计出一种新型涂层双管系统, 如图 1 所示^[2]。整个热障涂层(thermal barrier coating, TBC)系统主要包括 4 种材料组元, 即陶瓷层(top coat, TC)、粘结层(bond coat, BC)、P91 钢基底以及在陶瓷层和粘结层之间形成的以氧化铝为主要成分的热生长氧化物

(thermally grown oxides, TGO)。该系统管内的热蒸汽温度高达 700 °C, 管外对流 450 °C 的冷却蒸汽, 以配合 TBC 用来降低耐热钢管的表面温度, 从而使得 700 °C 超超临界机组主蒸汽管避免使用镍基合金制造。

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。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。针对这一问题, 作者前期基于理想平直界面膜/基结构, 在忽略 TGO 结构的基础上, 初步开展了系统

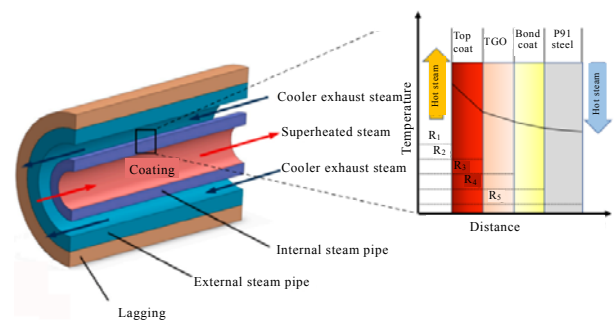


图 1 新型涂层双管系统结构示意图

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

收稿日期: 2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51805274)

作者简介: 郭晓峰, 男, 1986 年生, 博士, 讲师, 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

传热和应力分析^[2]。然而, 诸多研究表明: TGO 诱发的界面破坏是影响热障涂层热力学性能和持久性的关键因素^[3-6]。在高温和富氧环境下服役, 粘结层内的活性物质与穿过陶瓷层的氧之间发生化学反应, 在陶瓷层和粘结层界面处形成 TGO, 并且 TGO 的化学成分、厚度和形态均会随服役时间的延长而不断发生变化^[7,8]。在 TGO 生长过程中, 其体积的变化会受到周围材料的约束或受自身不协调生长变形作用, 加之其主要成分氧化铝的弹性模量很大, 使得 TGO 层应力水平比另外 3 层的应力高 1~2 个数量级, 往往在 TGO 层局部容易发生应力集中现象, 进而可能导致涂层界面产生裂纹, 甚至造成裂纹扩展与剥落^[9-14]。

鉴于此, 本研究将开展基于 TC/TGO/BC 界面为理想余弦波形的新型涂层双管系统在热机载荷下的传热和应力分析, 分析 TC 层厚度、TC 层热膨胀系数、冷却蒸汽的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。

1 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), 其中 TC 层厚度为 0.8 mm, TGO 厚度为 0.001 mm, BC 层厚度为 0.199 mm, 主蒸汽管道厚度为 30 mm, 内径为 240 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, TC/TGO 界面和 TGO/BC 界面粗糙不平, 本研究采用理想的余弦波形界面反映这一几何形貌特征, 所使用的函数为:

$$y = -0.008 \cos(\pi x / 0.05) \quad (1)$$

采用有限元顺次耦合方法进行涂层双管系统传热和应力分析。在传热和应力分析模型中, TGO 层附近的网格进行了局部细化, 模型中共 249 061 个节点, 80 883 个单元, 传热分析和应力分析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)。为避免由于网格划分的不同而带来计算精度的问题, 当前模型中网格大小能够保证仿真具有足够的计算精度。

1.2 边界条件及材料参数

本研究中, 主蒸汽管道内外压强分别为 35 和 5 MPa。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。

假设多组元材料各向同性且均质。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[9,13,15-21]中获得, 并基于现有数据的线性插值来估算宽温度范围内的其他材料参数值, 如表 1 所示。

2 结果与讨论

2.1 新型涂层双管系统的温度及应力分析

图 3 所示为稳态工作条件下涂层双管系统(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, 由于 TC 层的热导率较低, 系统壁面温度沿径向单调降低, 且内外壁之间存在较大的温度梯度。稳态条件下涂层双管系统内表面温度为 700 °C, 外表面的冷却蒸汽温度为 450 °C, 而基体 P91 管的表面温度大约为 591 °C。因此, 稳态工作条件下热障涂层为主蒸汽管道提供了足够的隔热保护。

此外, 由于各层材料的热膨胀系数存在很大差异, 在热机载荷的作用下, 导致涂层内的应力分布差异明显。在稳定工作条件下, 系统的环向应力远大于径向应力, 最大环向应力出现在 BC/TGO 界面靠近 TGO 侧的余弦波峰处。因此 TGO 是影响系统界面破坏的关键因素, 这与 Tomimatsu 等人^[22]的研究结果一致。图 4a 和 4b 分别是涂层双管系统在热载荷和热机载荷作用下的 Mises 应力分布云图。从图中可以看出, 与仅受热载荷作用下 TGO 处最大 Mises 应力相比, 热机载荷作用下该位置的 Mises 应力略高(约 190 MPa), 即由壁厚方向热梯度产生的热应力远大于系统内外压力作用产生的机械应力, 故稳态工作条件下系统热应力对结构完整性影响很大。

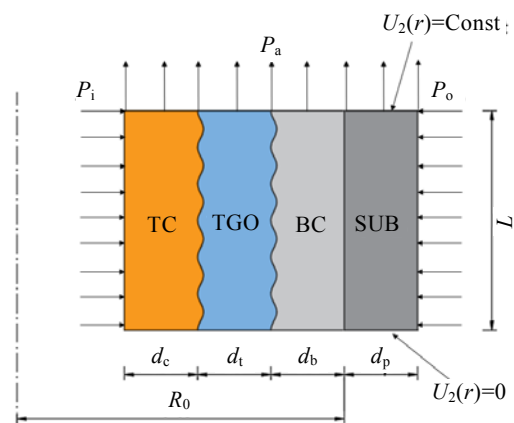


图 2 二维轴对称有限元模型的几何尺寸和边界条件示意图
Fig.2 Schematic diagram of the geometry dimensions and boundary conditions of the 2D axisymmetric FE model ($R_0=120$ mm, $d_p=30$ mm, $d_c=0.8$ mm, $d_t=0.001$ mm, $d_b=0.199$ mm, $L=0.6$ mm, $P_i=35$ MPa, $P_o=5$ MPa)

表 1 热障涂层的材料参数

Table 1 Material properties of TBC for a range of temperatures^[9,13,15-21]

Material	T/°C	E/GPa	ν	Yield strength/ MPa	Density/ kg·m ⁻³	CTE/ ×10 ⁻⁶ °C ⁻¹	Conductivity/ W·(m·°C) ⁻¹	Specific heat/ J·(kg·°C) ⁻¹
8YSZ	20	204	0.10		6037	9.68	1.2	500
	800	179	0.11			9.88		
TGO	20	400	0.23	1000	3984	8	10	755
	1000	325	0.25	1		9.3	4	
NiCoCrAlY	20	200	0.30	868	7711	12.5	5.8	628
	800	145	0.32	191		14.3	14.5	
P91	20	218	0.3	488	7770		26	440
	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			

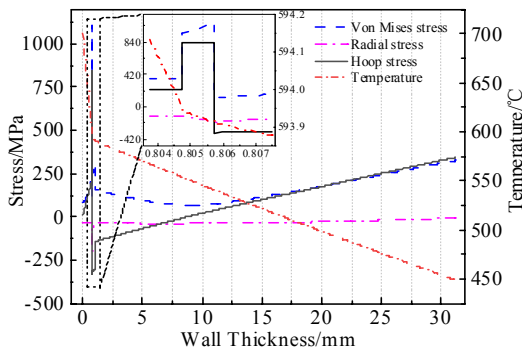


图 3 涂层双管系统壁厚方向的温度和应力分布

Fig.3 Temperature and stress distribution in the coated steam dual pipe system along the wall thickness direction

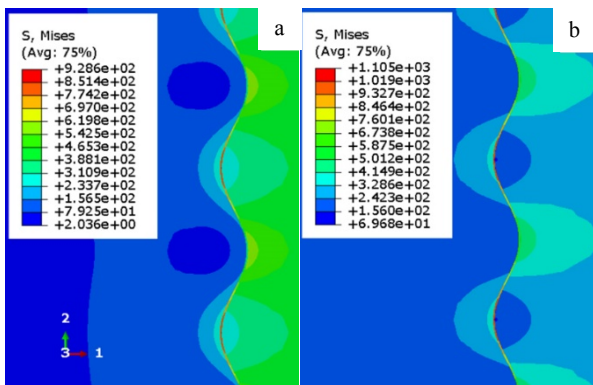


图 4 热载荷和热机载荷作用下涂层双管系统 TGO 附近的 Mises 应力分布云图

Fig.4 Mises stress distribution contour plot near TGO of the coated steam dual pipe system under thermal (a) and thermo-mechanical (b) loading

2.2 关键参数对涂层双管系统温度和应力分布的影响

基于上述结果可以看出，在稳态工作期间，由于多组元之间存在不同的热导率和热膨胀系数，TC、TGO、BC 和基体之间将产生很大的温度梯度和应力。在模型中，由于温度和应力分布与涂层双管系统的几何参数、材料参数和系统操作参数密切相关，下面将分析 TC 层厚度、TC 层热膨胀系数、冷却蒸汽温度以及压力等关键特征参数对系统温度和应力分布的影响。由于当前涂层双管系统有限元模型具有周期性几何形貌特征，最大应力分布均在 TGO/BC 界面靠 TGO 侧，且各周期对应点的应力值具有一致性，故本节仅取 TGO/BC 界面余弦路径上一个周期长度内的数据来分析关键参数对温度和应力分布的影响。

2.2.1 TC 层厚度对涂层管道系统温度和应力分布的影响

保持基准模型中各参数不变，仅改变 TC 层厚度 (0.1~3 mm 范围内取值)，建立有限元模型，分析 TC 层厚度对涂层管道系统温度和应力分布影响。图 5 是不同 TC 层厚度条件下涂层双管系统沿壁厚方向的温度分布。从图中可以看出，在其他条件保持不变的情况下，TC 层厚度越厚，热障涂层的隔热效果越好。图 6 为沿 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布。随 TC 层厚度的增加，涂层系统最大 Mises 应力连续增大。显然，TC 层厚度的增加，一方面产生了更好的隔热作用；另一方面其导致 TGO/BC 界面处应力随之增大。因此为了降低系统的局部最大应力，需要在保证隔热效果的前提下，有效地控制 TC 层的厚度。从当前的有限元分析结果来看，为了给 P91 基底提供足够的隔热保护并有效地控制系统应力，TC 层厚度应控制在 0.8 mm 左右。

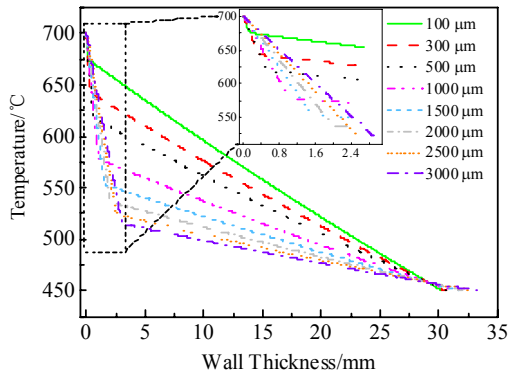


图 5 不同 TC 层厚度条件下涂层双管系统沿壁厚方向的温度分布

Fig.5 Temperature distribution along the wall thickness direction of the coated steam dual pipe system with different TC thicknesses

2.2.2 TC 层热膨胀系数对涂层管道系统应力分布的影响

涂层管道系统中各层材料的物理性能和力学性能的差异非常明显，而热膨胀失配是涂层系统中各层之间产生应力的主要原因之一。为了分析 TC 层热膨胀系数对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 TC 层热膨胀系数作为变量进行系统应力分析。图 7 是不同 TC 层热膨胀系数条件下 TGO/BC 界面处的 Mises 应力分布。从图中可以看出，TC 层热膨胀系数对 TGO 附近的应力分布影响比较复杂，随着 TC 层的热膨胀系数的增大，TGO 层波峰处应力连续降低，而波谷处的应力显著增大。当 TC 层热膨胀系数等于 $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 时，即与 P91 钢

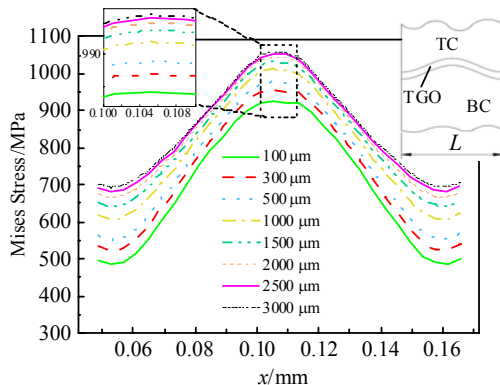


图 6 不同 TC 层厚度条件下 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布

Fig.6 Mises stress distribution on the TGO side of the TGO/BC interface with different TC thicknesses

的热膨胀系数基本匹配，系统热膨胀失配产生的最大 Mises 应力值相对最小。在这种条件下，TGO 中最大应力分布在波峰两侧。然而，从实际情况来看，由于通常很难完全匹配 TC 和 P91 基底材料的热膨胀系数，因此结构设计中可能需要 3 层或 4 层涂层系统，以便有效地降低系统的应力。

2.2.3 冷却蒸汽温度对涂层管道系统应力分布的影响

保持各层几何参数、材料参数不变，研究不同冷却蒸汽温度对系统应力分布的影响。如图 8 所示为不同冷却蒸汽温度对 TGO 处应力的影响。从图中可以看出，冷却蒸汽温度对 TGO/BC 界面 Mises 应力分布产生了显著影响，但波峰和波谷处的 Mises 应力变化相对复杂，这主要归因于系统内外壁面温度不同所产生的热应力存在差异。当前涂层双管系统中管内的热蒸汽温度高达 $700 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，管外对流不同温度的冷却蒸汽。

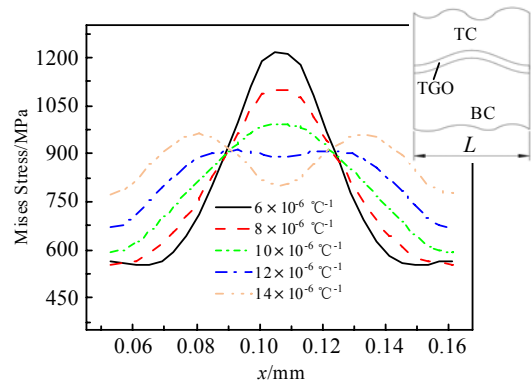


图 7 不同 TC 层热膨胀系数条件下 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布

Fig.7 Mises stress distribution on the TGO side of the TGO/BC interface with different TC thermal expansion coefficients

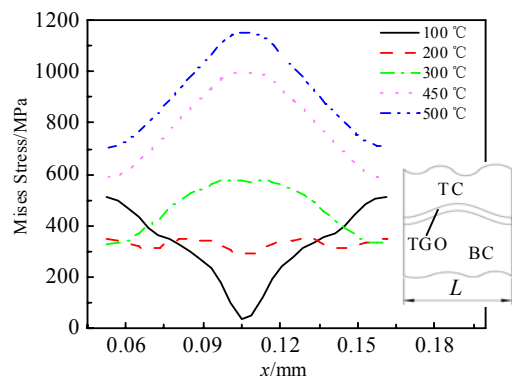


图 8 不同冷却蒸汽温度条件下 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布

Fig.8 Mises stress distribution on the TGO side of the TGO/BC Interface at different cooling steam temperatures

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，该系统内的冷却蒸汽使得系统 TGO/BC 界面处存在较大的温度梯度和热应力，且热应力随冷却蒸汽温度的变化差异明显。图 9 所示为在不同冷却蒸汽温度下模型沿壁厚方向的应力分布。冷却蒸汽温度的降低极大地增加了 TC、BC 以及 P91 中的 Mises 应力。显然，冷却蒸汽温度也是影响系统结构完整性的关键参数之一。当前，考虑到冷却蒸汽温度的降低会显著地影响系统的热效率，结构设计中需要优先确定该参量，以便更好地控制系统中各层材料之间的应力水平。

2.2.4 冷却蒸汽压力对涂层管道系统应力分布的影响

保持各层几何参数、材料参数以及热载荷不变，仅分析冷却蒸汽压力对系统应力分布的影响。图 10 所示为不同冷却蒸汽压力条件下 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布。从图中可以看到，冷却蒸汽压力从 0 MPa 到 35 MPa 变化的过程中，TGO/BC 界面各处的 Mises 应力随着冷却蒸汽压力增大而降低。当前模型中，系统的 Mises 应力是由温度梯度导致的热应力和外载荷产生的机械应力共同组成。由于模型温度场相同，即由温度梯度产生的热应力不变，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 应力的变化。另一方面，冷却蒸汽压力也会对整个系统应力分布产生影响，如图 11 所示。与 TGO 和 BC 中应力单调变化的规律相比，TC 和 P91 中的应力变化规律相对比较复杂。外压改善了 TGO/BC 界面 Mises 应力分布，但同时极大地增加了 P91 靠 BC 侧的局部应力。结合 P91 钢在高温条件下的蠕变持久强度，对于当前系统进行结构设计时，冷却蒸汽压力不宜过大，应控制在 5~10 MPa 之间。

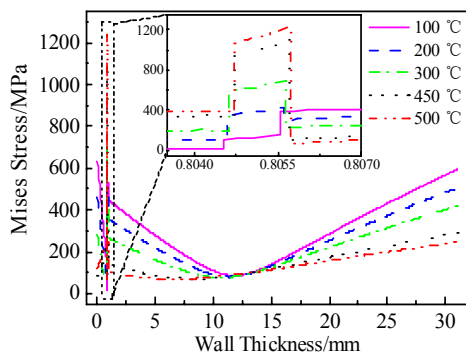


图 9 不同冷却蒸汽温度条件下涂层双管系统沿壁厚方向的 Mises 应力分布
Fig.9 Mises stress distribution along the wall thickness direction of the coated steam dual pipe system at different cooling steam temperatures

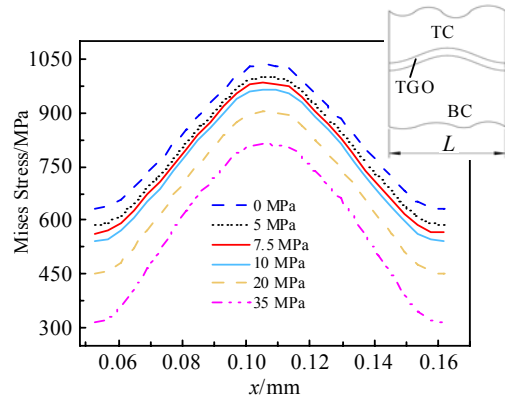


图 10 不同冷却蒸汽压力条件下 TGO/BC 界面靠 TGO 侧的 Mises 应力分布
Fig.10 Mises stress distribution on the TGO side of the TGO/BC interface under different cooling steam pressures

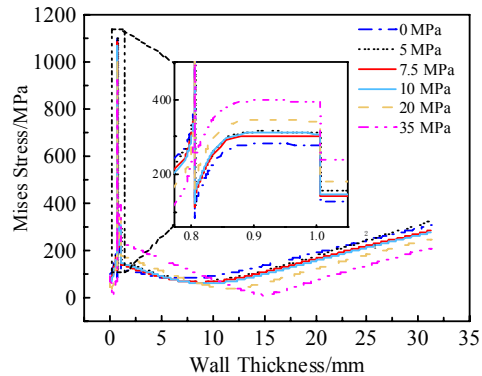


图 11 不同冷却蒸汽压力条件下涂层双管系统沿壁厚方向的 Mises 应力分布
Fig.11 Mises stress distribution along the wall thickness direction of the coated steam dual pipe system under different cooling steam pressures

3 结 论

1) 在稳态运行期间，由于各层材料的热性能和机械性能存在显著差异，涂层双管系统会产生很大的应力，最大 Mises 应力出现在基准模型 TGO/BC 余弦界面靠近 TGO 侧的波峰处，TGO 可能是诱发界面破坏的关键因素；由温度梯度产生的热应力远大于由系统内外压产生的机械应力，热应力是影响系统涂层寿命的主要因素。

2) 稳态工作条件下，涂层双管系统所受环向应力远大于径向应力，其对系统的结构完整性会产生很大影响。

3) TC 层厚度、TC 层热膨胀系数、冷却蒸汽的温

度与压力等参数均对稳态条件下系统的温度和应力分布产生很大影响。其中, TC 层厚度和冷却蒸汽温度可能是影响涂层双管系统结构完整性的最敏感因素。

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 F, Sun W, Becker A *et al. International Journal of Pressure Vessels and Piping*[J], 2019, 176: 103 933
- [3] Padture N P, Gell M, Jordan E H. *Science*[J], 2002, 296(5566): 280
- [4] Beck T, Herzog R, Trunova O *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2008, 202(24): 5901
- [5] Karlsson A M, Evans A G. *Acta Materialia*[J], 2001, 49(10): 1793
- [6] Wang Libin(王力彬), Yu Qingmin(于庆民). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2014, 43(12): 3095
- [7] Evans A G, He M Y, Hutchinson J W. *Progress in Materials Science*[J], 2001, 46(3-4): 249
- [8] Laxman S, Franke B, Kempshall B W *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2004, 177-178: 121
- [9] Tang W Z, Yang L, Zhu W *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2016, 32(5): 452
- [10] Sridharan S, Xie L D, Jordan E H *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2004, 179(2-3): 286
- [11] Sridharan S, Xie L D, Jordan E H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 393(1-2): 51
- [12] Evans A G, Clarke D R, Levi C G. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2008, 28(7): 1405
- [13] Yu Q M, Zhou H L, Wang L B. *Ceramics International*[J], 2016, 42(7): 8338
- [14] 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
- [15] Dong H, Yang G J, Cai H N *et al. Ceramics International*[J], 2015, 41(9): 11 046
- [16] Gadag S, Subbarayan G, Barker W. *Journal of Materials Science*[J], 2006, 41(4): 1221
- [17] ASTM A335/A335M[S]. 2015
- [18] Hawa H A E, Bhattacharyya A, Maurice D. *Mechanics of Materials*[J], 2018, 122: 159
- [19] Vallourec & Mannesmann Tubes. *T/P91 Tubing Handbook*[M]. Boulogne: Vallourec & Mannesmann Tubes, 2012
- [20] Rösler J, Bäker M, Aufzug K. *Acta Materialia*[J], 2004, 52(16): 4809
- [21] 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
- [22] Tomimatsu T, Zhu S, Kagawa Y. *Acta Materialia*[J], 2003, 51(8): 2397

Thermal Transmit and Stress Analysis of a Novel Coated Steam Dual Pipe System Under Thermo-Mechanical Loading Based on Ideal Cosine Wave of TC/TGO/BC Interface

Guo Xiaofeng¹, Zhang Kaiyu¹, Qin Lei¹, Pang Ziqiang²

(1. School of Mechanical Engineering, 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: Using a sequentially coupled simulation procedure, the thermal transfer and stress analysis of a novel coated steam dual pipe system under thermo-mechanical loading were carried out. The influences of key characteristic parameters on the temperature and stress distribution of the system were investigated. The results show that under steady state working conditions, the thermal barrier coating contributes to the effective thermal insulating protection for the primary steel pipe, but the thermal stress generated due to the significant temperature gradient has a significant impact on the structural integrity of the system. The hoop stress in the system is much larger than the radial stress, and the maximum hoop stress is located at the cosine peak of the TGO/BC interface near the TGO side. In addition, the thickness of the TC, the thermal expansion coefficient of the TC, and the temperature and pressure of the cooling steam determine the temperature and stress distribution of the system.

Key words: coated steam dual pipe system; finite element analysis; thermally grown oxides

Corresponding author: Guo Xiaofeng, Ph. D., Lecturer, 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