

TGO 厚度和界面形貌对 700 °C 新型涂层双管系统应力分布的影响

郭晓峰¹, 秦磊¹, 张开宇¹, 袁博¹, 庞自强²

(1. 内蒙古科技大学, 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: 以 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, 开展了热机载荷作用下 TGO 厚度和界面形貌对系统应力分布的影响研究。结果表明: TGO 的厚度与其界面粗糙度均会对系统的 Mises 应力分布产生影响, 但是与 TGO 厚度相比, 粗糙度对 TGO/BC 界面靠近波峰处的 Mises 应力影响更加显著。此外, 在 TGO 界面幅值和波长一定的条件下, 不同的界面波形排列不会直接影响系统 TGO/BC 界面波峰处的 Mises 峰值应力; 由于幅值和波长变化有效地改变了 TGO 界面的曲率, 它们是控制涂层双管系统 TGO/BC 界面应力分布的关键特征参量。

关键词: 涂层双管系统; 热生长氧化物; 粗糙度; 界面应力; 界面形貌

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)02-0639-06

近年来, 在碳中和碳达峰背景下, 我国超超临界燃煤发电技术日益朝着大容量、高参数、高效率 and 低排放的方向发展。目前, 制约 630~700 °C 超超临界燃煤电站设计和建设的技术瓶颈仍然是耐热材料技术^[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^[2], 如图 1 所示。整个热障涂层(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。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。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^[4-5]。在高温和含氧环境下服役, 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。一方面, 热循环过程中, TGO 层逐渐由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 转变为以 Ni、Cr 为主的尖晶石氧化物 (NiAl_2O_4 、 NiCr_2O_4 、 CoAl_2O_4 、 CoCr_2O_4)^[6]; 另一方面, TGO 会在离子扩散作用下连续生长, 出现氧化膜厚度的增加。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, 甚至裂纹扩展与剥落^[7]。此外, 前期研究表明, 在热障涂层的制备过程中, 为了提升陶瓷层与粘结层之间的结合强度, 通常其界面形貌会存在一定粗糙度^[8]。高温稳态工作条件下, 随着

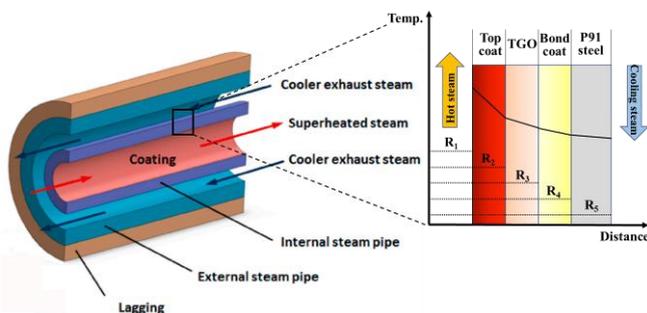


图 1 新型涂层双管系统结构示意图

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

收稿日期: 2022-06-08

基金项目: 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

TGO 在陶瓷层与粘结层界面处的形成与生长，会在 TGO 层界面处产生明显的应力集中，并且该应力集中程度会随着 TGO 的氧化生长不断加剧，最终导致涂层的剥落与失效^[9]。由上述可知，在热障涂层系统中，TGO 的厚度和界面形貌会在很大程度上影响其高温结构完整性和实际使用寿命。

本实验以含理想余弦渐变 TGO 形貌的新型涂层双管系统为研究对象，分析 TGO 厚度和界面形貌对系统 Mises 应力分布的影响，以期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 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，主蒸汽管道外径为 300 mm，厚度为 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，TC/TGO 界面和 TGO/BC 界面粗糙不平，基准模型中采用幅值相同的理想余弦界面形貌，其形貌函数为：

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

式中，幅值 A 的取值为 0.008 mm。

在基准模型的基础上，通过改变 TGO 厚度 d_t 和界面幅值 A 来研究 TGO 厚度和粗糙度对涂层双管系统 Mises 应力分布的影响。本研究中忽略 TGO 的横向生长，仅考虑其厚度方向生长，TGO 厚度取值为 2、4、6、8 和 10 μm 。此外，考虑到 TGO 的界面幅值 A 与粗糙度 R_a 的比值为一定值^[10]，其值为： $A/R_a = \pi/2 = 1.55$ ，即可以通过改变幅值 A 的大小实现 TGO 界面粗糙度的变化。当前研究中，为了分析粗糙度对系统 Mises 应力分布的影响，借鉴 Yu^[11-12]等人的 TGO 形貌设计方法，采用一条简化的波长不变，幅值逐渐增大的余弦曲线来模拟 TGO 界面粗糙度的变化，其界面几何结构示意图如图 3 中 0 线所示。各波段范围与幅值变化如表 1 所示。

本研究中，为进一步分析界面形貌对涂层双管系统 Mises 应力分布的影响，以波形排列，幅值和波长为变量，构建了 5 组不同形貌的 TGO 界面近似模拟真实工况中的不规则界面，如图 3 中 1~5 线所示。其中，通过将不同幅值的余弦界面形貌进行重新排列，得到了幅值相等，波形排列不同的 TGO 界面形貌（即形貌 1 与形貌 2）；通过改变各波段波形的幅值，构造出波长、波形排列相同，但幅值不同的 TGO 界面形貌（即形貌 1 与形貌 3）；通过改变波长，得到了幅值相同但波长不同的

TGO 界面形貌（即形貌 4 与形貌 5）。各界面形貌下波形排列、幅值和波长的取值如下（ μm ）：

界面 1： $A=8$ ， $0 \leq x \leq 75$ ； $A=16$ ， $75 \leq x \leq 175$ ； $A=8$ ， $175 \leq x \leq 275$ ； $A=16$ ， $275 \leq x \leq 375$ ； $A=8$ ， $375 \leq x \leq 475$ ； $A=16$ ， $475 \leq x \leq 600$ ；

界面 2： $A=16$ ， $0 \leq x \leq 75$ ； $A=16$ ， $75 \leq x \leq 175$ ； $A=8$ ， $175 \leq x \leq 275$ ； $A=8$ ， $275 \leq x \leq 375$ ； $A=16$ ， $375 \leq x \leq 475$ ； $A=16$ ， $475 \leq x \leq 600$ ；

界面 3： $A=8$ ， $0 \leq x \leq 75$ ； $A=24$ ， $75 \leq x \leq 175$ ； $A=8$ ， $175 \leq x \leq 275$ ； $A=24$ ， $275 \leq x \leq 375$ ； $A=8$ ， $375 \leq x \leq 475$ ； $A=24$ ， $475 \leq x \leq 600$ ；

界面 4： $A=8$ ，波长为 200；

界面 5： $A=8$ ，波长为 300。

采用有限元顺次耦合方法进行涂层双管系统传热与应力分析。传热分析与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）。由于 TGO 层附近的应力较系统其他几层的应力更大，所以对模型中界面附近的网格进行了局部细化。当前模型中网格大小的精细程度能够保证仿真具有足够的计算精度。

1.2 材料参数和边界条件

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、

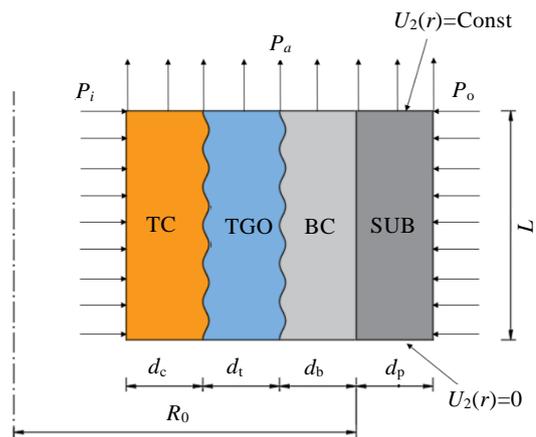


图 2 二维轴对称有限元模型的几何尺寸和边界条件示意图
Fig.2 Schematic of the geometry and boundary conditions for the axisymmetric FE model ($R_0=120$ mm, $d_p=30$ mm, $d_c=0.8$ mm, $d_t=0.001$ mm, $d_b=0.199$ mm, $L=0.6$ mm, $P_i=35$ MPa, $P_o=5$ MPa)

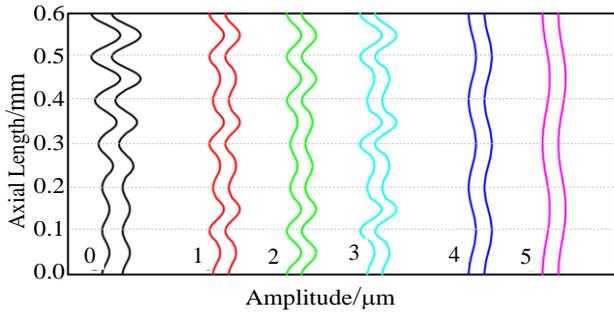


图 3 不同 TGO 厚度和界面形貌的几何结构示意图

Fig.3 Geometric structure diagram of different TGO thicknesses and interface morphologies

密度和比热容, 从文献中获得^[13-20], 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, 这些数据在表 2 中给出。

2 结果与讨论

2.1 TGO 厚度与粗糙度对涂层双管系统应力分布的影响

为了研究 TGO 厚度对系统 Mises 应力分布的影响, 沿 TGO/BC 界面处分析不同 TGO 厚度条件下的 Mises 应力分布, 如图 4 所示。从图中可以看出, 在

TGO 厚度分别为 2、4、6、8、10 μm 条件下得出的 5 条 Mises 应力分布曲线基本重合, 但 TGO 的厚度会对 TGO/BC 界面波峰处的 Mises 峰值应力产生影响, 如图 4 中的 1~4 区域所示。为了进一步分析上述区域的 Mises 应力分布, 图 5 所示为 TGO 界面幅值渐变条件下 TGO/BC 界面波峰处 Mises 峰值应力随 TGO 厚度变化的曲线。由图可知, 随着 TGO 厚度的增加, TGO/BC 界面各波峰处的 Mises 峰值应力连续增大, 这与 A. Ahmed^[21]等人的研究结果一致。

此外, 与 TGO 厚度相比, 粗糙度显著地影响了系统的 Mises 应力分布, 如图 4 所示。对图 4 中 1~4 区域进一步分析表明, 在 TGO/BC 界面处的粗糙度分别为 5.16、10.32、15.48 和 20.65 μm (由公式 $A/R_a=1.55$ 计算所得^[7], 其中图 1~4 区域的幅值 A 为 8、16、24 和 32 μm) 条件下, 随着粗糙度的增大, TGO/BC 界面波峰处的 Mises 应力显著增加 (如图 6 所示), 这与唐健江^[22]等人的研究结果一致。以 TGO 厚度为 10 μm 时为例, 从图 6 中可以看到, 随着 TGO/BC 界面粗糙度由 5.16 μm 增加至 20.65 μm, TGO/BC 界面波峰处的 Mises 应力由 1034.6 MPa 增加到 1445.9 MPa, 增长了 39.8%。TGO/BC 界面粗糙度的增大导致了 TGO/BC 界面靠近波峰处产生了明显的应力集中, 从而使得波峰处的 Mises 应力连续单调增大。

表 1 不同界面形貌条件下各波段内的幅值变化

Table 1 Magnitude of the amplitude in each wave band under different interface morphologies

Parameter	Axial length, $\lambda/\mu\text{m}$	Wave 1	Wave 2	Wave 3	Wave 4
x/mm	100	$0 \leq x \leq 0.225$	$0.225 \leq x \leq 0.325$	$0.325 \leq x \leq 0.425$	$0.425 \leq x \leq 0.6$
$A/\mu\text{m}$	100	8	16	24	32
$R_a/\mu\text{m}$	100	5.16	10.32	15.48	20.65

表 2 热障涂层的材料参数

Table 2 Material parameters of thermal barrier coating^[13-20]

Material	$T/^\circ\text{C}$	E/GPa	ν	Yield strength/ MPa	Density/ kg m^{-3}	CTE/ $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Conductivity/ $\text{W (m } \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}^{-1}$	Specific heat/ $\text{J (kg } \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}^{-1}$	Reference
8YSZ	20	204	0.10	-	6037	9.68	1.2	500	[13-15]
	800	179	0.11	-	6037	9.88	1.2	500	
TGO	20	400	0.23	1000	3984	8	10	755	[19-20]
	1000	325	0.25	1	3984	9.3	4	755	
NiCoCrAlY	20	200	0.30	868	7711	12.5	5.8	628	[17]
	800	145	0.32	191	7711	14.3	14.5	628	
P91	20	218	0.3	488	7770	-	26	440	[16,18]
	100	213	0.3	461	7770	10.9	27	480	
	200	207	0.3	441	7770	11.3	28	510	
	300	199	0.3	427	7770	11.7	28	550	
	400	190	0.3	396	7770	12.1	29	630	
	450	186	0.3	-	7770	12.1	29	630	
	500	181	0.3	360	7770	12.3	30	660	
	550	175	0.3	331	7770	12.4	30	710	
	600	168	0.3	285	7770	12.6	30	770	
650	162	0.3	206	7770	12.7	30	860		

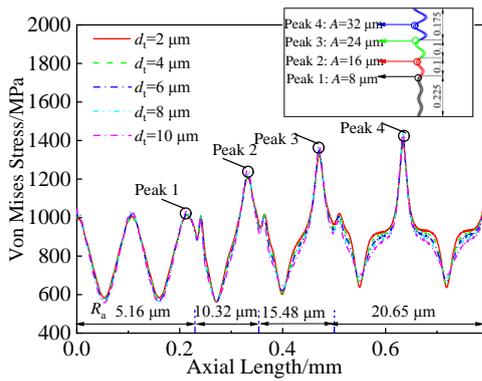


图 4 TGO 界面幅值渐变条件下沿 TGO/BC 界面处的 Mises 应力分布曲线

Fig.4 Mises stress distribution along TGO/BC interface under gradient interface morphology of TGO

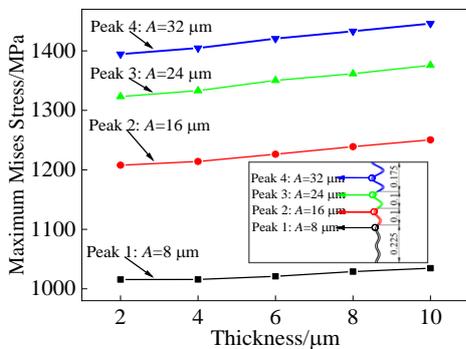


图 5 TGO 界面幅值渐变条件下 TGO/BC 界面波峰处 Mises 峰值应力随 TGO 厚度的变化

Fig.5 Variation of maximum Mises stress at the peak of TGO/BC interface with TGO thickness under gradient interface morphology of TGO

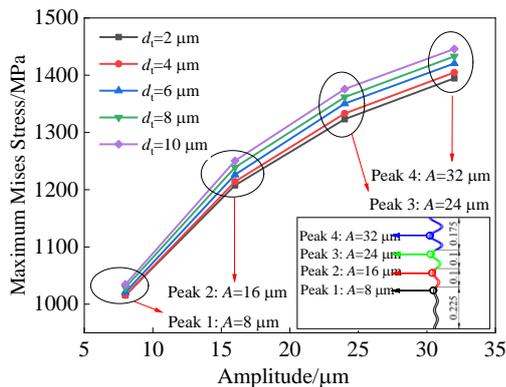


图 6 TGO 界面幅值渐变条件下沿 TGO/BC 界面波峰处 Mises 峰值应力随幅值的变化

Fig.6 Variation of maximum Mises stress at the peak of TGO/BC interface with amplitude under gradient interface morphology of TGO

综上所述, TGO 的厚度以及其界面粗糙度均会对涂层双管系统 Mises 应力的分布产生影响。其中, 随着 TGO 厚度的增加, TGO/BC 界面靠近波峰处的 Mises 应力单调增大; 但是与 TGO 厚度的影响相比, 粗糙度对系统 TGO/BC 界面靠近波峰处的 Mises 应力影响更加显著。

2.2 TGO 界面形貌对涂层双管系统应力分布的影响

在涂层双管系统的制备过程中, 粘结层的表面毛化处理是形成涂层结合界面形态结构的关键因素, 并且直接影响稳态工作条件下系统的应力分布^[23]。除了上述 TGO 厚度和界面粗糙度外, TGO 的界面几何特征, 如波形排列、幅值和波长等因素均可能影响系统的应力分布。本节将以波形排列、幅值和波长为变量, 通过构建不同的 TGO 界面几何形貌特征, 分析各种特征参数对系统应力分布的影响。

2.2.1 波形排列对涂层双管系统应力分布的影响

为了分析波形排列对涂层双管系统应力分布的影响, 保持其他材料参数、载荷与边界条件不变, 以波形排列为变量, 构建了幅值相等、波形排列不同的 TGO 界面形貌, 即图 3 所示的形貌 1 和形貌 2。图 7 所示为不同波形排列条件下沿 TGO/BC 界面处的 Mises 应力分布。从图中可以看到, 在幅值和波长一定的情况下, 仅重新排列波形 (模型中 TGO 界面为形貌 1 和形貌 2) 并没有改变系统 TGO/BC 界面处的 Mises 峰值应力 (约 1200 MPa), 这与王力彬^[10]的研究结果一致。

在当前研究中, 由于波长为定值, TGO/BC 界面处的 Mises 应力差异仅体现在幅值不同的波形区域, 这一结果表明, 单一改变 TGO 界面波形排列并不会直接影响系统 TGO/BC 界面波峰处的 Mises 峰值应力, 而幅值才是影响系统应力分布的重要因素。

2.2.2 幅值对涂层双管系统应力分布的影响

保持模型中各参数不变, 仅改变幅值 (在 8~24 μm 范围内取值) 建立有限元模型, 分析幅值大小对涂层双管系统应力分布的影响。图 8 为不同幅值条件下 TGO/BC 界面处的 Mises 应力分布。从图中可以看出, 在波长和波形排列相同的条件下, 由于形貌 3 中 2、4、6 波段的幅值 (24 μm) 大于形貌 1 中 2、4、6 波段的幅值 (16 μm), 故形貌 3 中 TGO/BC 界面对应位置处的峰值应力均高于形貌 1 相应位置的 Mises 峰值应力; 这与 Yu^[11]的研究结果一致。在 TGO/BC 界面上, 幅值的增大使界面波形曲率变大, 导致 TGO/BC 界面处产生应力集中, 从而产生了更大的 Mises 峰值应力,

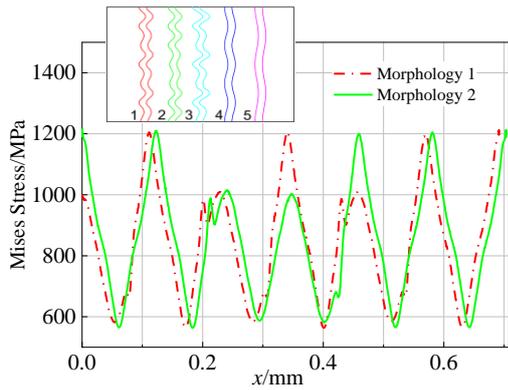


图 7 不同波形排列条件下沿 TGO/BC 界面处的 Mises 应力分布

Fig.7 Mises stress distribution along TGO/BC interface under different waveform arrangements

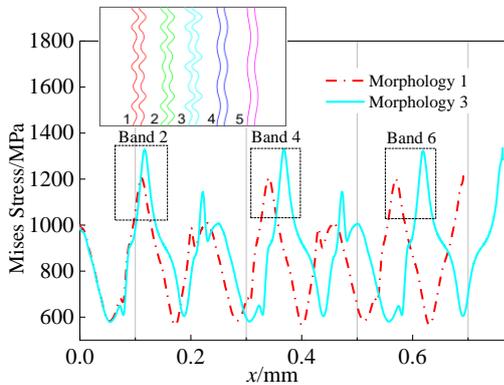


图 8 不同幅值条件下沿 TGO/BC 界面处的 Mises 应力分布
Fig.8 Mises stress distribution along TGO/BC interface under different amplitude conditions

这些部位产生的 Mises 应力极易导致涂层系统过早分离,使系统出现破坏。因此,在制备热障涂层过程中,粘结层的毛化处理应严格控制界面幅值,这将有助于提高热障涂层系统的使用寿命。

2.2.3 波长对涂层双管系统应力分布的影响

保持各层几何参数、材料参数不变,在界面幅值一定的条件下,仅分析波长对系统应力分布的影响。本节选取波长参数为 200 和 300 μm 分别建立有限元模型。图 9 所示为不同波长条件下沿 TGO/BC 界面处的 Mises 应力分布,其中基于基准模型得到的 Mises 应力分布曲线也包含在内。从图中可以看出,与基准模型的应力分布曲线相比,形貌 4 (波长 200 μm) 和形貌 5 (波长 300 μm) 均呈现出相对较低的 Mises 峰值应力,这与 Yu^[12]等人的研究结果一致。在幅值一定的条件下,波长的增大将导致单一界面波段的波形趋

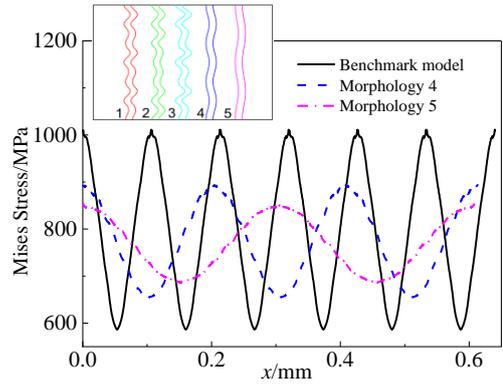


图 9 不同波长条件下沿 TGO/BC 界面处的 Mises 应力分布
Fig.9 Mises stress distribution along TGO/BC interface at different wavelengths

于平缓,即 TGO/BC 界面的曲率降低,从而导致界面应力集中程度下降。由上述分析可知,在热障涂层制备过程中,除了有效地控制幅值大小外,合理的调整 TGO/BC 界面波长,控制粘结层表面的平整度,也可有效地降低界面 Mises 峰值应力。

3 结 论

1) TGO 的厚度及其界面粗糙度影响涂层双管系统的 Mises 应力分布,TGO/BC 界面波峰处产生了较大的应力集中,且波峰处的 Mises 应力随着 TGO 的厚度和界面粗糙度单调增大。随着 TGO 界面粗糙度从 5.16 μm 增加到 20.65 μm ,界面峰处的 Mises 应力增加 39.8%。在涂层双管系统热障涂层制备过程中,通过对金属粘接表面的平整度控制可有效抑制界面波峰处的 Mises 应力。

2) 在幅值和波长一定的情况下,改变 TGO 界面波形排列不会直接影响涂层双管系统 TGO/BC 界面波峰处的 Mises 应力;由于幅值和波长变化有效地改变了 TGO 界面的曲率,它们会导致涂层双管系统 TGO/BC 界面波峰处产生了较大的 Mises 应力。

3) 对新型涂层双管系统,TGO 和粘接层在热机循环载荷下的应变和形貌变化必须加以研究,降低局部曲率是抑制界面应力集中和提升使用寿命的有效方法。

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] Padture N P, Gell M, Jordan E H. *Science*[J], 2002, 296(5566): 280
- [5] Beck T, Herzog R, Trunova O *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2008, 202(24): 5901
- [6] Ranjbar-Far M, Absi J, Mariaux G *et al. Materials & Design*[J], 2010, 31(2): 772
- [7] Wei Xinlong(魏新龙), Zhu Wuyan(朱无言), Zhu Dejia(朱德佳) *et al. Journal of Nanjing Tech University, Natural Science Edition*(南京工业大学学报,自然科学版)[J], 2020, 42(1): 1
- [8] Hsueh C H, Fuller E R. *Scripta Materialia*[J], 2000, 42(8): 781
- [9] Liu H F, Li Q L, Li S L *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2011, 40(S4): 164
- [10] Wang Libin(王力彬). *Study on Influence of Morphology and Thickness of TGO on Failure Mechanism of Thermal Barrier Coatings*(界面形貌以及 TGO 厚度对热障涂层失效机理的影响研究)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015
- [11] Yu Q M, He Q. *Ceramics International*[J], 2018, 44(3): 3371
- [12] Yu Q M, Zhou H L, Wang L B. *Ceramics International*[J], 2016, 42(7): 8338
- [13] Tang W Z, Yang L, Zhu W *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2016, 32(5): 452
- [14] Dong H, Yang G J, Cai H N *et al. Ceramics International*[J], 2015, 41(9): 11 046
- [15] Gadag S, Subbarayan G, Barker W. *Journal of Materials Science*[J], 2006, 41(4): 1221
- [16] Ranjbar-Far M, Absi J, Shahidi S *et al. Materials & Design*[J], 2011, 32(2): 7328
- [17] Hani A E H, Bhattacharyya A, Maurice D. *Mechanics of Materials*[J], 2018, 122: 159
- [18] Vallourec & Mannesmann Tubes. *T/P91 Tubing Handbook* [M]. Boulogne: Vallourec & Mannesmann Tubes, 2012
- [19] Rösler J, Bäker M, Aufzug K. *Acta Materialia*[J], 2004, 52(16): 4809
- [20] Zhong Jianln(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
- [21] Ahmed A, Khaled A. *Ceramics International*[J], 2021, 47(14): 20 064
- [22] Tang Jianjiang(唐健江), Yu Fangli(于方丽), Zhang Haihong(张海鸿) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2019, 39(5): 113
- [23] Chun-Hway H, Edwin R F. *Materials Science and Engineering*[J], 2000, 283(1-2): 46

Effects of TGO Thickness and Interface Morphology on Stress Distribution of 700 °C Novel Coated Dual Pipe System

Guo Xiaofeng¹, Qin Lei¹, Zhang Kaiyu¹, Yuan Bo¹, 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 research studied the stress distribution of a 700 °C novel coated steam dual pipe system under thermal-mechanical loading. By running the sequentially coupled simulation, it is shown that Mises stress distribution is strongly correlated with the TGO thickness and morphology, particularly that at the peaks of TGO/BC interface is more sensitive to the roughness. In addition, under the constant amplitude and wavelength of TGO, the maximum value of Mises stress at the peak of TGO/BC interface is directly determined by the local curvature of the interface rather than the arrangement of various waveforms. It is revealed that amplitude and wavelength of TGO are the crucial parameters controlling the stress distributed at the TGO/BC interface in the coated dual pipe system.

Key words: coated dual pipe system; thermally grown oxides; roughness; interface stress; interface morphology

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