

# 基于粗糙基底的W/316L不锈钢第一壁系统热应力的研究

刘泽<sup>1</sup> 冷青松<sup>2</sup> 唐琳<sup>1</sup> 王健<sup>3</sup> 张亚飞<sup>1</sup> 曹智<sup>4</sup> 孙付春<sup>2</sup>

1(成都大学 电子信息与电气工程学院 成都 610106)

2(成都大学 机械工程学院 成都 610106)

3(上海船用柴油机研究所 低温工程部 上海 201203)

4(中核四〇四有限公司 嘉峪关 735100)

**摘要** 第一壁系统中热应力的分布是决定聚变堆安全运行的关键因素之一。本文通过Ansys Workbench有限元软件,对具有粗糙基底的W/316L不锈钢系统中的热应力分布,以及影响热应力大小的诸如温度、涂层厚度、基底厚度等因素进行了深入分析。同时从系统中交界面剪切应力入手,研究了粗糙基底对涂层结合强度的影响。结果表明:粗糙基底系统中热应力随着温度、基底厚度的增加而增加,随着涂层厚度的增加而降低。除此之外,粗糙基底提升了系统中热应力的极值,在一定程度上提高了涂层与基底的结合强度。研究结果为后期高结合强度第一壁涂层系统的研发提供了一定的参考价值。

**关键词** W/316L不锈钢第一壁系统,粗糙基底,热应力

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100604

## Thermal stress of W/316L stainless steel first wall system based on rough substrate

LIU Ze<sup>1</sup> LENG Qingsong<sup>2</sup> TANG Lin<sup>1</sup> WANG Jian<sup>3</sup> ZHANG Yafei<sup>1</sup> CAO Zhi<sup>4</sup> SUN Fuchun<sup>2</sup>

1(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

2(School of Mechanical Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

3(Cryogenic Department, Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201203, China)

4(The 404 Co., Ltd., CNNC, Jiayuguan 735100, China)

**Abstract** [Background] The magnitude of the thermal stress in the first wall system is one of the key factors affecting the safe operation of the fusion reactor. [Purpose] This study aims to investigate the effect of a rough substrate on the thermal stress in the W/316L stainless steel first wall system. [Method] The finite-element analysis software Ansys Workbench was employed to analyze the distribution of thermal stress in a W/316L stainless steel first wall system with a rough substrate. Depth analysis was conducted on factors such as the temperature, coating thickness, and substrate thickness that affect the magnitude of thermal stress. Meanwhile, starting from the interface shear stress in the system, the influence of rough substrate on the bonding strength of coatings was simultaneously

模式识别与智能信息处理重点实验室(No.MSSB-2023-07)资助

第一作者: 刘泽, 男, 1986年出生, 2019年于四川大学获博士学位, 研究领域为反应堆结构材料

冷青松, 男, 2002年出生, 现为成都大学本科生, 研究领域为材料表面改性

通信作者: 曹智, E-mail: davidcz4@qq.com; 孙付春, E-mail: Sfc@cdu.edu.cn

收稿日期: 2022-10-31, 修回日期: 2023-06-24

Supported by Key Laboratory of Pattern Recognition and Intelligent Information Processing (No.MSSB-2023-07)

First author: LIU Ze, male, born in 1986, graduated from Sichuan University with a doctoral degree in 2019, focusing on nuclear material design

LENG Qingsong, male, born in 2002, studied in Chengdu University, focusing on surface modification

Corresponding author: CAO Zhi, E-mail: davidcz4@qq.com; SUN Fuchun, E-mail: Sfc@cdu.edu.cn

Received date: 2022-10-31, revised date: 2023-06-24

investigated. **[Results]** The simulation results indicate that the thermal stress in the rough substrate system increases with the the increase of temperature and substrate thickness, but decreases with the increase of coating thickness. The maximum thermal stress and the adhesive strength between the coating and the substrate are raised by the introduction of the rough substrate. **[Conclusions]** Results of this study can provide reference for the development of high-adhesive strength first wall coating systems.

**Key words** W/316L stainless steel first wall system, Rough substrate, Thermal stress

核聚变是解决人类未来能源问题的重要手段,托卡马克是实现可控核聚变的重要装置之一<sup>[1-2]</sup>。在托卡马克装置中,由于第一壁材料直接面对高温等离子体,因此要承受高通量热负荷、中子辐照以及超过 500 °C 的高温等苛刻的服役环境<sup>[3-6]</sup>。由于高热载荷、高粒子流与机械载荷的共同作用,需要使用具有高热导率、高熔点、抗辐照性能强的材料。钨(W)被认为是具有潜力的候选材料,因为它具有低氢同位素滞留率、高熔点、良好的热稳定性和低溅射率<sup>[7-10]</sup>。另一方面,316L 不锈钢具有强度高、塑性好等优势,被认为是理想的热沉材料<sup>[11-12]</sup>。因此,有研究人员提出,通过在 316L 不锈钢表面制备 W 涂层来作为第一壁材料,并取得了一定成果<sup>[13-15]</sup>。然而,由于 W 与 316L 不锈钢材料参数差异过大,在聚变堆高温环境温度下,系统内不可避免地产生较大的热应力。交界面的热应力可以转化成剪切应力,进而造成涂层的开裂、失效。因此,为了提高第一壁涂层的使用寿命,有必要对 W/316L 不锈钢系统中热应力进行深入探索。

研究人员通过实验的方法对涂层系统中热应力进行了一定程度的探索,但是由于涂层厚度较薄,实验测量热应力比较困难。因此,有必要找到一种有效的方法来评估涂层中的热应力,而近些年来发展起来的有限元模拟方法为此提供了一种有效的解决方案。Liu 等<sup>[16]</sup>对涂层沉积到基底的过程进行了有限元模拟研究,结果表明涂层中孔隙率的含量会影响系统中热应力的大小;Bemporad 等<sup>[17]</sup>对涂层/基底系统中的热应力分布进行了研究,结果表明,交界面和边缘区域出现了明显的应力集中,且交界面位置应力集中的大小和涂层、基底的厚度比有关。为了降低涂层系统中的热应力,Huan 等<sup>[18]</sup>在涂层和基底中间引入功能梯度薄膜作为中间层的方法,通过有限元方法模拟发现系统中的最大热应力得到了有效的降低。上述研究均基于光滑表面基底系统,然而在涂层制备过程中,基底表面不可避免地具有一定的粗糙度。粗糙基底是否会影响系统中的热应力分布?基底形貌是否会影响涂层的结合强度?这是我们需要了解的问题。然而遗憾的是,对以上问题的相关研究较少。

基于上述问题,本文选取具有粗糙基底表面的 316L 不锈钢基底系统,利用 Ansys Workbench 数值模拟,深入研究基底表面形貌与热应力之间的关系,结果将为后期制备高结合强度 W/316L 不锈钢第一壁系统提供了一定的参考意义。

## 1 第一壁涂层系统模型的建立

### 1.1 热应力分析模型

Clyne 和 Tsui<sup>[19]</sup>提出了用于计算平面几何结构中热应力大小的分析模型。这个分析模型与 Stoney's 公式相结合,得到了用于测量薄膜中热应力的方程<sup>[20]</sup>:

$$\sigma_c = \frac{E'_1 \int_{T_0}^{T_a} (\alpha_2 - \alpha_1) dT}{1 + 4(E'_1/E'_2)(h/H)} \quad (1)$$

$$E'_1 = E_1/(1 - \nu_1), E'_2 = E_2/(1 - \nu_2) \quad (2)$$

式中: $E'_1$ 和 $E'_2$ 分别代表涂层和基底的弹性模量; $T_1$ 和 $T_0$ 分别代表室温和环境温度; $h$ 和 $H$ 代表涂层和基底的厚度; $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 代表涂层和基底的热膨胀系数; $\nu_1$ 和 $\nu_2$ 代表涂层和基底的泊松比。

### 1.2 几何模型

如图 1 所示,为用于计算的 W/316L 不锈钢有限元模型。其中,图 1(a)为具有光滑基底的三维模型。由于此模型具有轴对称性,因此可以将三维模型转化为二维模型进行分析。

图 1(b)为转化后的二维分析模型。316L 不锈钢基底的半径 $r$ 为 80  $\mu\text{m}$ ,厚度 $H$ 为 60  $\mu\text{m}$ ,W 涂层的厚度 $h$ 为 3.8  $\mu\text{m}$ 。如图 1(c)和(d)所示,为粗糙基底系统模型。根据相关文献<sup>[20-21]</sup>,粗糙基底表面可以简化为正弦函数来进行表征。如图 2 所示,为正弦函数的细节图。在粗糙基底系统中,涂层厚度可以规定为正弦线的中心线到涂层表面的距离。其中,振幅 $A$ 为 1.6  $\mu\text{m}$ ,半周期 $L$ 为 8  $\mu\text{m}$ 。粗糙基底系统的涂层厚度、基底厚度、半径与光滑基底系统中的对应参数相等。

图 3 为光滑和粗糙 316L 不锈钢系统中的网格划分情况。这两个模型均采用四节点结构进行网格划分。由于交界面附近容易产生应力集中,为了提

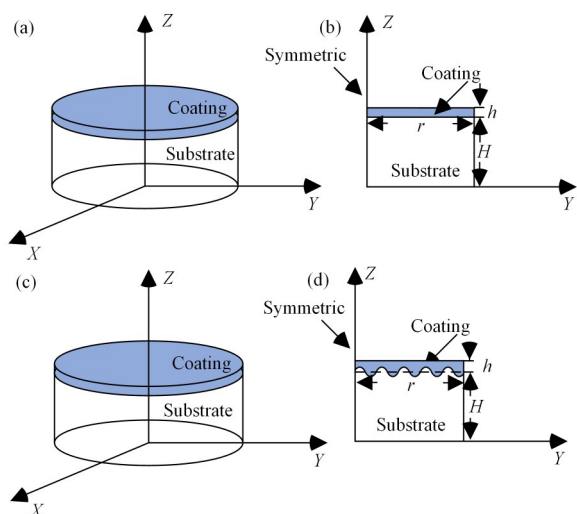


图1 W/316L不锈钢系统原理示意图 (a) 具有光滑基底的三维模型,(b) 具有光滑基底的二维模型,(c) 具有粗糙基底的三维模型,(d) 具有粗糙基底的二维模型

Fig.1 Principle schematic diagram of the W/316L stainless steel system with flat and rough substrates  
(a) 3D model with a flat substrate, (b) 2D model with a flat substrate, (c) 3D model with a rough substrate, (d) 2D model with a rough substrate

高模拟精度,对交界面区域的网格进行了局部加密。同时,如图3(a)、(c)所示,为了计算模型与实际更为接近,限制了模型左下端节点沿X、Y方向的位移<sup>[22]</sup>。模拟设置的环境温度为400 °C,室温设置为25 °C。由于材料在高温下会产生一定的塑性应变,因此,本文采用弹塑性模型来进行计算。模拟中所涉及的材料属性见表1<sup>[23-24]</sup>。

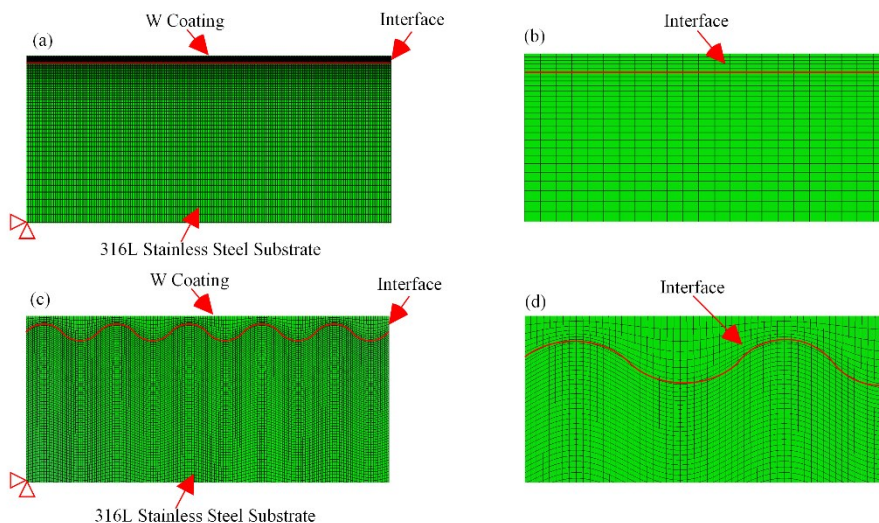


图3 对W/316L不锈钢系统模型的网格划分 (a) 光滑基底模型整体网格情况,(b) 光滑交界面网格情况,(c) 粗糙基底模型整体网格情况,(d) 粗糙交界面网格情况

Fig.3 Mesh partitioning of the W/316L stainless steel system model (a) Overall mesh of the model with a smooth substrate, (b) Mesh detail near the smooth interface, (c) Overall mesh of the model with a rough substrate, (d) Mesh detail near the rough interface

图5为基底表面振幅与系统热应力之间的关系。可以看出,系统中最大热应力随着振幅的增加

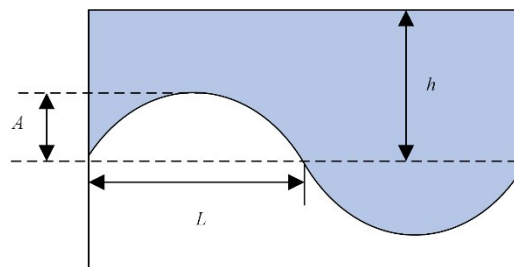


图2 粗糙基底系统交界面简化图

Fig.2 Simplified diagram of the interface of the system with a rough substrate

## 2 结果与讨论

### 2.1 热应力分布

在这部分中,主要讨论316L不锈钢基底形貌对系统热应力的影响。模拟得到的Von Mises应力来代表系统中的热应力<sup>[23]</sup>。如图4所示,为光滑和粗糙基底系统中热应力的分布云图。可以看出,在光滑基底系统中应力集中主要分布在除边界外的涂层区域。这是由于相比于中心区域,系统边缘位置在较高的环境温度下更容易产生变形。变形促进了能量的释放,进而造成边缘区域热应力值的梯度降低。如图4(b)所示,相比于光滑基底系统,粗糙基底的引入改变了交界面的应力分布规律。交界面正弦曲线波峰区域应力较大,沿着波峰到波谷的路径,涂层中热应力表现出降低的趋势。

而增加,并且最大热应力普遍集中在基底凸出部分所对应的涂层中。这是由于在基底凸出区域,刚度



表1 材料属性  
Table 1 Properties of materials

材料 Material	温度 Temperature / °C	弹性模量 Elastic modulus / MPa	泊松比 Poisson ratio	热膨胀系数 Coefficient of thermal expansion / $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	屈服强度 Yield strength / MPa
W	20	397 938	0.275	4.65	1 360.5
	200	397 270	0.280	4.71	1 154.17
	400	394 480	0.283	4.86	947.86
	600	389 508	0.286	5.00	764.79
316L stainless steel	20	198 600	0.28	14.7	500
	200	193 700	0.28	15.3	453
	400	189 600	0.28	16.2	402
	600	185 500	0.28	16.9	194

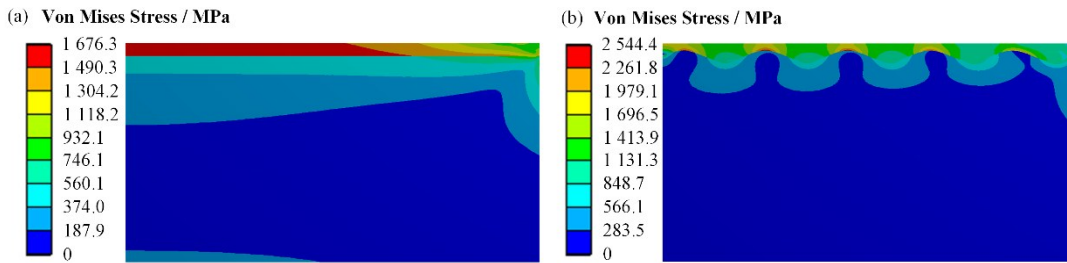


图4 W/316L不锈钢系统中热应力分布 (a) 光滑基底系统, (b) 粗糙基底系统  
Fig.4 Thermal distribution in the W/316L stainless steel system (a) Smooth substrate system, (b) Rough substrate system

较低的316L不锈钢扩展到了高刚度的W涂层中,316L不锈钢仅仅承担了小部分的热载荷,绝大部分热应力被薄且硬的W涂层所承担。所以当基底振幅增加时,对应的W涂层厚度降低,涂层中最大热应力值得到了迅速提升。系统中热应力与基底振幅之间的关系与作者前期的研究结果相类似<sup>[25]</sup>。

图6为基底表面半波长与系统热应力之间的关系。可以看出,系统中最大热应力随着半波长的增加而降低。这是由于在对应同一个表面振幅情况下,半波长越大,316L不锈钢基底所承受的载荷越多,剩余需要W涂层所承担的载荷降低,因此涂层中最大热应力得到了降低。综上所述,基底形貌会对系统中的最大热应力产生影响。

## 2.2 参数分析

此部分通过在模拟中改变某一参数值,同时固定其他参数的方法,来探索温度、基底厚度、涂层厚度对具有不同基底形貌系统热应力的影响。如在模拟中改变涂层厚度,将温度和基底厚度进行固定,来研究涂层厚度对热应力的影响。

图7为具有光滑和粗糙基底的W/316L不锈钢系统在100~600 °C温度下,最大热应力的变化趋势。在光滑基底系统中,模拟得到的热应力结果与通过式(1)计算得到的结果相吻合。随着温度的增加,两

个系统中热应力均表现出增加的趋势。并且,具有粗糙基底的系统中热应力的增长斜率高于光滑基底系统。光滑系统在此温度区间中最大热应力为2 501.7 MPa,粗糙基底系统最大热应力为4 035.4 MPa,增长了近80.01%。这是由于基底表面的形貌改变了交界面的热膨胀性质,进而对系统中热应力造成了影响<sup>[26]</sup>。

图8为W涂层厚度与系统热应力之间的关系。随着涂层厚度的增加,两个系统中热应力均表现出了降低的趋势。这是由于当涂层厚度增加时,系统的弯曲应变会导致应力松弛。并且,系统中应力的减小随着弯曲应变的降低而减少<sup>[27]</sup>。对于较薄的涂层,由于系统的刚度较低,热应力造成的弯曲效果可以被忽略不计。随着涂层厚度的增加,系统的弯曲应变随之增强。应变的增加促进了能量的释放,进而造成热应力的下降。当涂层厚度由1.8  $\mu\text{m}$ 增加到3.8  $\mu\text{m}$ 时,光滑基底系统中热应力降低了387.4 MPa,粗糙基底系统热应力降低了1 958.5 MPa。结果表明:随着W涂层厚度的增加,粗糙基底对系统热应力的影响更为明显。

图9为316L不锈钢基底厚度与系统热应力的关系。光滑基底系统中热应力变化趋势与经验公式(1)计算得到的结果相吻合。随着基底厚度的增加,两个系统中热应力增加。这是由于当基底厚度薄

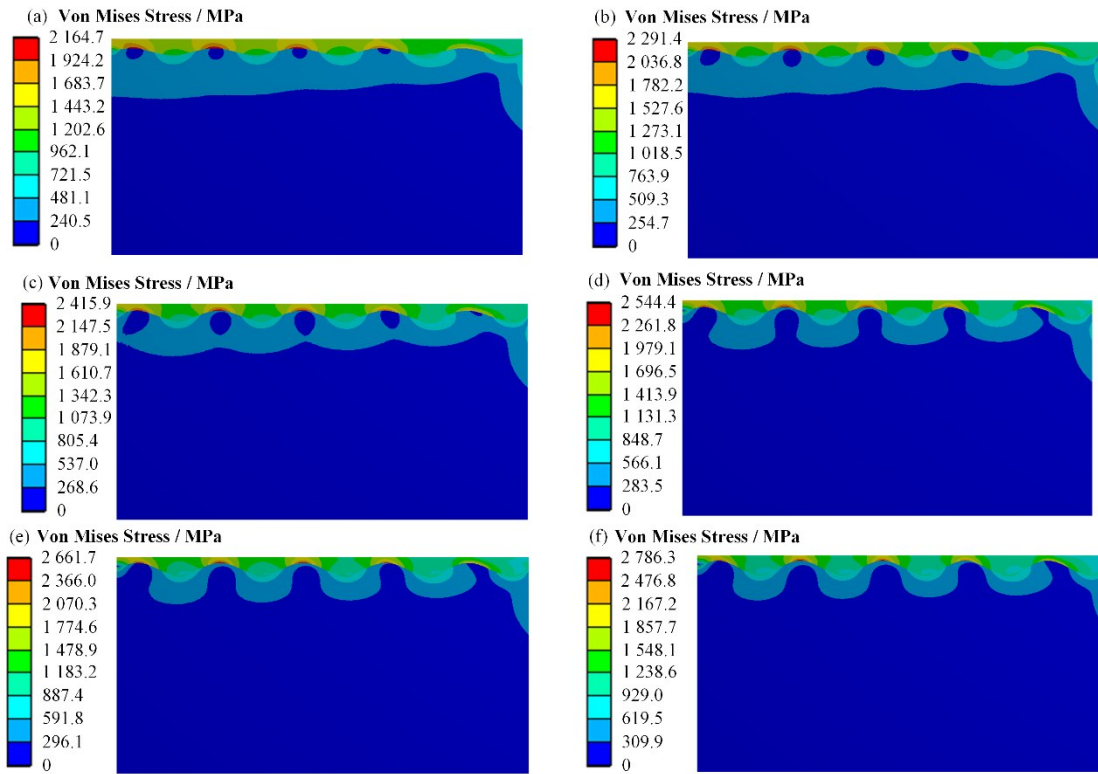


图5 316L 不锈钢基底表面振幅与系统热应力之间的关系云图

(a)  $A=1\ \mu\text{m}$ , (b)  $A=1.2\ \mu\text{m}$ , (c)  $A=1.4\ \mu\text{m}$ , (d)  $A=1.6\ \mu\text{m}$ , (e)  $A=1.8\ \mu\text{m}$ , (f)  $A=2.0\ \mu\text{m}$

Fig.5 Cloud contour of relationship between the surface amplitude of the 316L stainless steel substrate and the thermal stress of the system (a)  $A=1\ \mu\text{m}$ , (b)  $A=1.2\ \mu\text{m}$ , (c)  $A=1.4\ \mu\text{m}$ , (d)  $A=1.6\ \mu\text{m}$ , (e)  $A=1.8\ \mu\text{m}$ , (f)  $A=2.0\ \mu\text{m}$

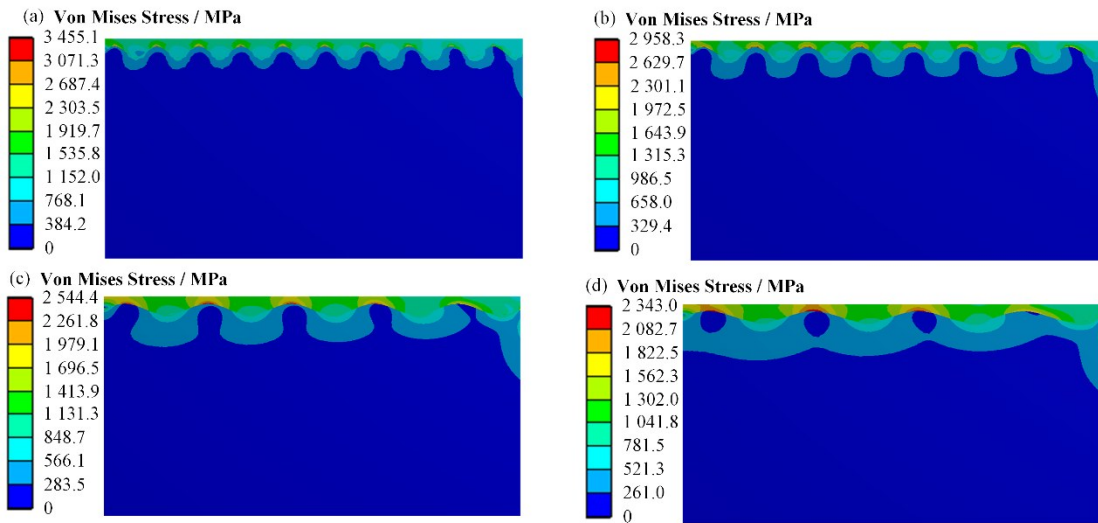


图6 316L 不锈钢基底表面半波长对系统热应力的影响 (a)  $A=1\ \mu\text{m}$ , (b)  $A=1.2\ \mu\text{m}$ , (c)  $A=1.4\ \mu\text{m}$ , (d)  $A=1.6\ \mu\text{m}$

Fig.6 Effect of the surface half wavelength of the 316L stainless steel substrate on the thermal stress of the system (a)  $A=1\ \mu\text{m}$ , (b)  $A=1.2\ \mu\text{m}$ , (c)  $A=1.4\ \mu\text{m}$ , (d)  $A=1.6\ \mu\text{m}$

时,较高的环境温度容易造成系统产生形变,进而产生热应力释放。然而,逐渐增加的基底厚度阻碍了系统在热环境下的变形效果,因此对能量的释放产生了一定的抑制作用,这就造成系统中热应力的积

聚。除此之外,光滑基底系统中的最大热应力为 1 676.3 MPa,粗糙基底系统中最大热应力为 2 544.4 MPa,增长了 51.79%。因此,可以看出基底的厚度对粗糙系统中热应力的影响更为显著。

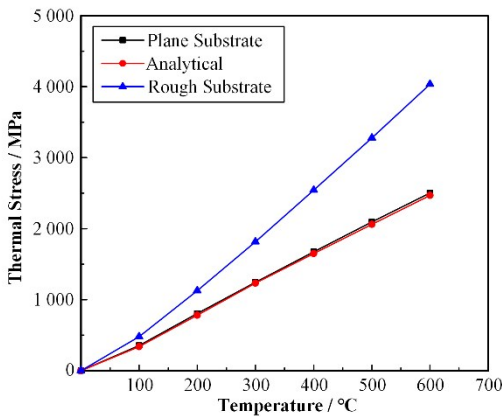


图7 温度对W/316L不锈钢系统热应力的影响

Fig.7 Effect of the temperature on the thermal stress of the W/316L stainless steel system

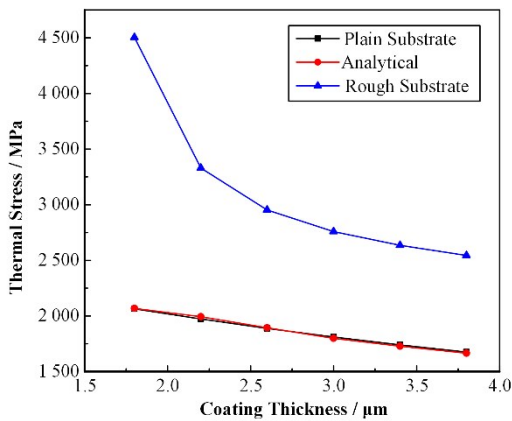


图8 涂层厚度对W/316L不锈钢系统热应力的影响

Fig.8 Effect of the coating thickness on the thermal stress of the W/316L stainless steel system

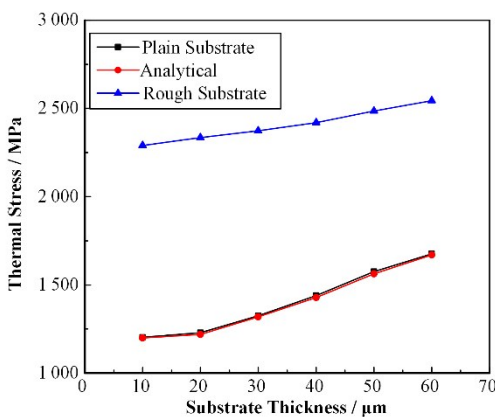


图9 基底厚度对W/316L不锈钢系统热应力的影响

Fig.9 Effect of the substrate thickness on the thermal stress of the W/316L stainless steel system

### 2.3 交界面应力分布

图10(a)为光滑316L不锈钢基底系统沿交界面的剪切应力分布。由于基底表面平滑,对应的交界

面剪切应力也表现出光滑的分布规律。在中心区域( $X=0$ ),剪切应力值较小,随着路径靠近系统边缘区域,压缩剪切应力逐渐增加。如图10(b)所示,基底表面形貌的改变直接影响了交界面剪切应力的分布规律。粗糙基底系统中,交界面应力呈现出对称的变化趋势。随着路径由中心延展到边缘过程,每个周期内代表压缩剪切应力的波谷最大值逐渐增加。压缩剪切应力有助于提高涂层与基底的结合强度<sup>[28]</sup>。通过图10(a)、(b)的比较可以看出,粗糙基底交界面的压缩剪切应力相比于光滑系统有一定程度的增加。因此粗糙度的引入,有效提升了W涂层与基底的结合强度。

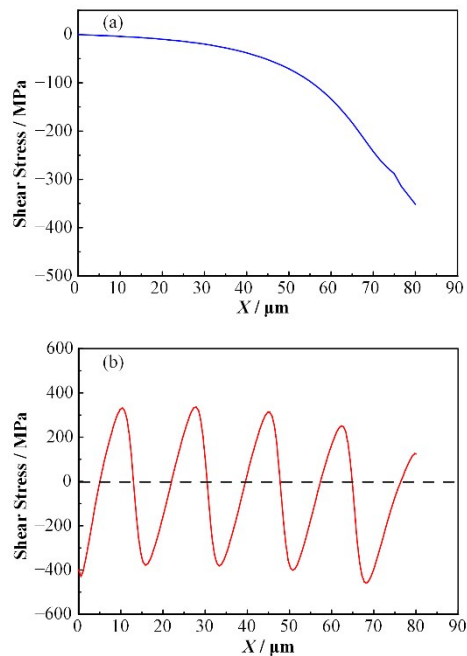


图10 交界面剪切应力的分布

(a) 光滑基底系统, (b) 粗糙基底系统

Fig.10 Distribution of shear stress along the interface  
(a) Smooth substrate system, (b) Rough substrate system

### 3 结语

本文通过 Ansys Workbench 有限元软件模拟了具有光滑和粗糙基底的 W/316L 不锈钢系统中热应力的分布情况。并且深入研究了具有粗糙基底系统的热应力与温度、涂层厚度、基底厚度之间的关系。同时为了保证模拟的合理性与准确性,通过经验公式对计算结果进行了验证。结果表明:随着温度和基底厚度的增加,系统中的热应力也增加。然而,随着涂层厚度的增加,热应力表现出降低的趋势。除此之外,基底表面粗糙度的引入,促进了热应力的提升。相比于光滑基底系统,粗糙基底系统中交界面的压缩剪切应力有了一定程度的增加,这将有利于

提升涂层与基底的结合强度。这些研究结果为后续高结合强度第一壁涂层系统的开发提供了参考。

**作者贡献声明** 刘泽负责酝酿实验；冷青松负责模拟实验；唐琳负责采集数据；王健、张亚飞负责采集数据；曹智负责文章的审阅；孙付春负责模拟指导。

### 参考文献

- Sethian J D, Raffray A R, Latkowski J, *et al.* An overview of the development of the first wall and other principal components of a laser fusion power plant[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2005, **347**(3): 161 - 177. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2005.08.019](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2005.08.019).
- Andrew P, Coad J P, Ehrenberg J, *et al.* Experiments on the release of tritium from the first wall of JET[J]. *Nuclear Fusion*, 1993, **33**(9): 1389 - 1404. DOI: [10.1088/0029-5515/33/9/i11](https://doi.org/10.1088/0029-5515/33/9/i11).
- Rödiger M, Duwe R, Kühnlein W, *et al.* Testing of actively cooled high heat flux mock-ups[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1998, **258** - **263**: 967 - 971. DOI: [10.1016/S0022-3115\(98\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(98)00081-6).
- Ge C C, Zhou Z J, Song S X, *et al.* Progress of research on plasma facing materials in University of Science and Technology Beijing[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, **363** - **365**: 1211 - 1215. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2007.01.173](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.01.173).
- Mattas R F, Garner F A, Grossbeck M L, *et al.* The impact of swelling on fusion reactor first wall lifetime[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1984, **122**(1 - 3): 230 - 235. DOI: [10.1016/0022-3115\(84\)90601-9](https://doi.org/10.1016/0022-3115(84)90601-9).
- Smith D L, Chung H M, Loomis B A, *et al.* Development of vanadium-base alloys for fusion first-wall—blanket applications[J]. *Fusion Engineering and Design*, 1995, **29**: 399 - 410. DOI: [10.1016/0920-3796\(95\)80046-Z](https://doi.org/10.1016/0920-3796(95)80046-Z).
- Klein F, Wegener T, Litnovsky A, *et al.* Oxidation resistance of bulk plasma-facing tungsten alloys[J]. *Nuclear Materials and Energy*, 2018, **15**: 226 - 231. DOI: [10.1016/j.nme.2018.05.003](https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.05.003).
- Bolt H, Barabash V, Krauss W, *et al.* Materials for the plasma-facing components of fusion reactors[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, **329** - **333**: 66 - 73. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2004.04.005](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.04.005).
- Gruber O, Sips A, Dux R, *et al.* Compatibility of ITER scenarios with full tungsten wall in ASDEX Upgrade[J]. *Nuclear Fusion*, 2009, **49**(11): 115014 DOI: [10.1088/0029-5515/49/11/115014](https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/11/115014).
- Pitts R A, Carpentier S, Escourbiac F, *et al.* A full tungsten divertor for ITER: physics issues and design status[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, **438**: S48 - S56. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2013.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.008).
- Norajitra P, Gervash A, Giniyatulin R, *et al.* Helium-cooled divertor for DEMO: manufacture and high heat flux tests of tungsten-based mock-ups[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, **386** - **388**: 813 - 816. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2008.12.233](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.12.233).
- Missiaen J M, Raharijaona J J, Antoni A, *et al.* Design of a W/steel functionally graded material for plasma facing components of DEMO[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, **416**(3): 262 - 269. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2011.05.054](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.05.054).
- Firdaouss M, Desgranges C, Hernandez C, *et al.* Overview of the different processes of tungsten coating implemented into WEST tokamak[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2017, **124**: 207 - 210. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2017.02.087](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.087).
- Davis J W, Slattery K T, Driemeyer D E, *et al.* Use of tungsten coating on iter plasma facing components[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1996, **233** - **237**: 604 - 608. DOI: [10.1016/S0022-3115\(96\)00209-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00209-7).
- Cambe A, Gauthier E, Layet J M, *et al.* Development of tungsten coating for fusion applications[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2001, **56** - **57**: 331 - 336. DOI: [10.1016/S0920-3796\(01\)00350-7](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(01)00350-7).
- 刘红兵, 陶杰, 张平则, 等. 316L 不锈钢基材功能梯度 Al 涂层残余热应力分析[J]. *核技术*, 2008, **31**(2): 105 - 110. LIU Hongbing, TAO Jie, ZHANG Pingze, *et al.* Stimulation of residual stresses in functionally gradient Al coatings on 316L substrate[J]. *Nuclear Techniques*, 2008, **31**(2): 105 - 110.
- Bemporad E, Sebastiani M, Casadei F, *et al.* Modelling, production and characterisation of duplex coatings (HVOF and PVD) on Ti-6Al-4V substrate for specific mechanical applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, **201**(18): 7652 - 7662. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2007.02.041](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.02.041).
- Huang Q Y. Development status of CLAM steel for fusion application[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, **455**(1 - 3): 649 - 654. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2014.08.055](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.08.055).
- Tsui Y C, Clyne T W. An analytical model for predicting residual stresses in progressively deposited coatings Part 3: further development and applications[J]. *Thin Solid Films*, 1997, **306**(1): 52 - 61. DOI: [10.1016/S0040-6090](https://doi.org/10.1016/S0040-6090)



(97)00208-3.

- 20 Zhang W X, Fan X L, Wang T J. The surface cracking behavior in air plasma sprayed thermal barrier coating system incorporating interface roughness effect[J]. Applied Surface Science, 2011, **258**(2): 811 - 817. DOI: [10.1016/j.apsusc.2011.08.103](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.08.103).
- 21 Liu Z, Bai X, Sun S, *et al.* Simulation of the surface cracking behavior in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating as tritium penetration barrier by extended finite element analysis[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, **173**: 112901. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2021.112901](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112901).
- 22 Haider J, Rahman M, Corcoran B, *et al.* Simulation of thermal stress in magnetron sputtered thin coating by finite element analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, **168**(1): 36 - 41. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2004.09.093](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.093).
- 23 Liu H B, Tao J, Gautreau Y, *et al.* Simulation of thermal stresses in SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite tritium penetration barrier by finite-element analysis[J]. Materials & Design, 2009, **30**(8): 2785 - 2790. DOI: [10.1016/j.matdes.2009.01.025](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.025).
- 24 马运柱, 刘昊阳, 刘文胜, 等. 扩散焊接钨/钢接头残余应力的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2014, **24**(9): 2280 - 2286. DOI: [10.19476/j.ysxb.1004.0609.2014.09.012](https://doi.org/10.19476/j.ysxb.1004.0609.2014.09.012).
- MA Yunzhu, LIU Haoyang, LIU Wensheng, *et al.* Numerical simulation of residual stress in tungsten/steel diffusion bonded joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, **24**(9): 2280 - 2286. DOI: [10.19476/j.ysxb.1004.0609.2014.09.012](https://doi.org/10.19476/j.ysxb.1004.0609.2014.09.012).
- 25 Liu Z, Tang L, Tang W, *et al.* Finite element simulation of thermal stress in RF magnetron sputtered SiC coating as tritium penetration barrier[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, **446**: 128747. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2022.128747](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128747).
- 26 Ohring M. Materials science of thin films[M]. 2nd Ed. San Diego: Academic Press, 2001.
- 27 Chawla V, Jayaganthan R, Chandra R. Finite element analysis of thermal stress in magnetron sputtered Ti coating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, **200**(1 - 3): 205 - 211. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2007.09.036](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.036).
- 28 Islamoglu Y, Celik E, Parmaksizoglu C, *et al.* Effects on residual stresses of annealing parameters in high-temperature ZrO<sub>2</sub> insulation coatings on Ag/Bi-2212 superconducting tapes using finite element method[J]. Materials & Design, 2002, **23**(6): 531 - 536. DOI: [10.1016/S0261-3069\(02\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(02)00029-8).