

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212202

铝化物涂层对 T92 钢高温力学性能的影响

黄春林^{1,2}, 朱明², 鲁金涛¹, 黄锦阳¹, 党莹樱¹, 袁勇¹

(1.西安热工研究院有限公司清洁低碳热力发电系统集成及运维国家工程研究中心, 陕西 西安 710054;
2.西安科技大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 在高温下长时间暴露, 钢材表面的铝化物涂层与母材间容易发生元素互扩散, 对母材组织产生影响, 进而影响母材的力学性能。为研究超超临界机组用 T92 钢表面铝化物涂层的高温强度特性, 采用低温粉末包埋渗铝法在 T92 钢锅炉管内壁制备铝化物涂层, 并在室温至 625 °C 环境中进行拉伸试验以及在 625 °C 环境中进行持久试验, 结合扫描电镜 (SEM)、金相显微镜 (OM) 观察及 X 射线衍射分析, 研究铝化物涂层对 T92 钢基体拉伸性能与持久寿命影响行为。研究表明: 低温粉末包埋渗铝可在 T92 锅炉管内壁制备厚度约 30.4 μm 的双层结构铝化物涂层, 各层结构连续均匀且组织稳定, 与母材呈冶金结合; 在室温至 625 °C 拉伸过程中, 涂层为柱状晶结构且表面发生皴裂; 625 °C 长时持久蠕变过程中, Fe-Al 涂层裂纹数量分布多, 但裂纹深度浅, 极少数裂纹向基体扩展; 高应力状态下大应变导致涂层发生局部剥落。铝化物涂层经长时间蠕变形变, 仍与 T92 钢基体呈良好的冶金结合。

[关键词] 铝化物涂层; T92 钢; 高温拉伸; 高温持久; 锅炉管

[引用本文格式] 黄春林, 朱明, 鲁金涛, 等. 铝化物涂层对 T92 钢高温力学性能的影响[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 113-120.
HUANG Chunlin, ZHU Ming, LU Jintao, et al. Effect of aluminide coating on the mechanical properties of T92 steel[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 113-120.

Effect of aluminide coating on the mechanical properties of T92 steel

HUANG Chunlin^{1,2}, ZHU Ming², LU Jintao¹, HUANG Jinyang¹, DANG Yingying¹, YUAN Yong¹

(1. National Engineering Research Center of Integration and Maintenance of Clean and Low-carbon Thermal Power Generation System, Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. College of Material Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: It is known that the interdiffusion at the aluminide coating/matrix interface during the long time exposure at high temperature would change the microstructure of the matrix and deteriorate the mechanical properties of the matrix. To analyze the high temperature strength of aluminide coating on T92 steel for ultra-supercritical unit, aluminide coating is prepared on the inner wall of T92 steel boiler tube by low temperature powder embedding method, and the tensile test was carried out at room temperature to 625 °C and the durability test was carried out at 625 °C environment. The effect of aluminide coating on the tensile properties and durability life of T92 matrix are studied by combining scanning electron microscope (SEM), optical microscope (OM) and X-ray diffraction analysis (XRD). The results show that the aluminide coating prepared on the inner wall of T92 boiler tube by low temperature powder embedding aluminizing, which is metallurgically combined with the matrix, has a double-layer structure, and each layer is continuous and uniform. The total thickness of the prepared aluminide coating is about 30.4 μm. The coating has columnar crystal structure and the surface is cracked in the room temperature is increased to 625 °C. During the creep rupture process at 625 °C environment, FeAl coating have many cracks, but the crack depth is shallow and very few cracks extend to the matrix. The coating peels off locally large strains under the high stress state. It can be concluded that even deforms of the aluminide coating occurred during the long-time creep process, it can still has good metallurgical bonding with T92 matrix.

Key words: aluminide coating; T92 steel; high temperature tensile; high temperature creep rupture; boiler tube

修回日期: 2022-12-20 网络首发日期: 2023-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52271070); 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ20-H41)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52271070); Science and Technology Project of Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-H41)

第一作者简介: 黄春林 (1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电站高温材料, hcl2260526304@163.com.

目前,我国燃煤发电的主要机型为超超临界机组,而T92马氏体耐热钢(T92钢)是超超临界机组用关键材料^[1]。T92钢较T91钢具有良好的耐蚀性、抗氧化性,具有更高的持久-蠕变强度与许用应力以及高温稳定性,广泛应用于600℃/620℃等级超超临界发电机组高温过热蒸汽管道、高温再热蒸汽管道、集箱及集箱接管等主要部件^[1-3]。这些部件在高温及应力作用下长期运行,微观组织发生明显变化^[4-5],且表面难以形成具有保护性的Cr₂O₃氧化膜,使用寿命及服役温限受其氧化性能和蠕变强度的限制^[6],易导致T92钢部件的力学性能劣化,严重危害其服役安全性。

与使用高等级合金相比,对现有材料进行涂层防护处理是一种易实现且性价比较高的方法之一^[7-8]。其中,采用低温铝化物涂层制备工艺,不仅可以在合金表面得到FeAl、Fe₃Al涂层,还可以减少热渗工艺对基体组织和性能的影响^[9-10],具有广泛的应用前景。铝化物涂层在高温蒸汽氧化时可生成以Al₂O₃为主的氧化膜,进而大幅提高合金的抗氧化性能和耐冲刷性能^[8,11-12]。但铝化物涂层在高温服役过程中,涂层与基体间的元素互扩散会导致涂层抗高温性能的退化^[13-15]。目前针对高温涂层的研究多着重于涂层制备工艺及其在不同工况下短时防护特性方面,并取得了阶段性成果,但高温力学性能方面研究较少。

与航空工业高温短时服役需求不同,在石化、电力行业的高温长时环境下,发电设备及化工设备等高温部件的设计,一般参照20万h持久强度为基础进行研发^[13],在这种高温长时环境下,涂层服役退化对母材力学性能的影响尤其关键^[16-18]。Li等人^[19]的研究表明,施加铝化物涂层导致基体晶界处析出碳化物相,削弱晶粒之间的黏结强度,恶化基材的拉伸强度。Bates等人^[20]的研究表明,涂层厚度与基材抗蠕变强度呈负相关,且发现较薄、铝含量较低的涂层有助于涂层/基体的热膨胀系数匹配,降低基体中裂纹产生速率,避免涂层过早失效。Hou等人^[21]的研究表明,施加铝化物涂层导致基材高温强度恶化,但裂纹扩展局限于涂层与基体界面处。铝化物涂层对基材高温力学性能的影响机制尚有争论。另外,相关学者^[22-24]在研究时发现,虽然Fe-Al化合物相的本征脆性易产生微裂纹,但FeAl相(B₂结构)中充足的铝含量会作用于母材与涂层间的元素互扩散。涂层中产生的微裂纹是否对基材

的高温力学性能造成一定程度的影响尚无大量报道,但在热暴露过程中,涂层内的微裂纹会因氧化效应自动愈合,裂纹内较少的Al₂O₃并未加速裂纹的扩展^[25-26],而提高蒸汽压力则会促进涂层内裂纹的扩展^[27]。

目前,对T92钢基体上施加铝化物涂层的研究主要集中于涂层的性能和组织,对基材影响的研究偏少。本文采用低温粉末包埋法在T92钢表面制备铝化物涂层,主要研究了625℃不同应力下有/无涂层试样的持久强度,分析了涂层相结构、微观形貌和持久过程中的断裂方式,讨论了铝化物涂层长时间服役特性,并深入评估其高温持久性能和影响机制。本文的研究结果可为采用铝化物涂层方法处理的T92钢在超超临界机组上的应用提供理论依据。

1 试验过程

1.1 涂层制备

所用T92钢锅炉管化学成分的质量分数分别为:C 0.11%, Mn 0.45%, Si 0.37%, S 0.002%, P 0.009%, Cr 8.91%, Mo 0.38%, V 0.2%, W 1.53%, Nb 0.06%, Ni 0.22%, N 0.035%, Fe 余量。T92钢管线切割加工后,经50、19、13、12 μm砂纸依次打磨,确保表面无明显缺陷,用丙酮清洗并干燥备用。

利用粉末包埋法制备铝化物涂层,粉末是由中国医药集团有限公司生产的质量分数2%NH₄Cl+98%FeAl粉末混合物组成,FeAl粉粒度为100~150 μm, NH₄Cl为活化剂。按上述配方充分混合20 min并在640℃、氩气保护下烧结2 h,然后在640℃下退火4 h。

1.2 性能测试及组织观察

拉伸和持久实验方法可以参阅课题组前期发表的论文^[12-13]。拉伸实验测试温度为室温、100、200、300、400、500、600、625℃。持久实验测试温度为625℃,外加应力参考有关T92钢文献资料适当选取,保证数据的均匀性。最终确定的外加应力从低到高依次为120、130、140、160 MPa。实验均采用瓦片状试样,如图1所示^[13],距断口3 mm处取样。

使用D/MAX-RA型X射线衍射仪对涂层物相进行表征,通过金相显微镜对T92钢基体组织进行观察。采用ZEISS sigma扫描电子显微镜(SEM)观察有/无涂层试样断口及表面形貌,观察前需用丙酮进行超声波清洗,结束后,沿断口边缘轴向进行线切割,观察有/无涂层试样的截面形貌。

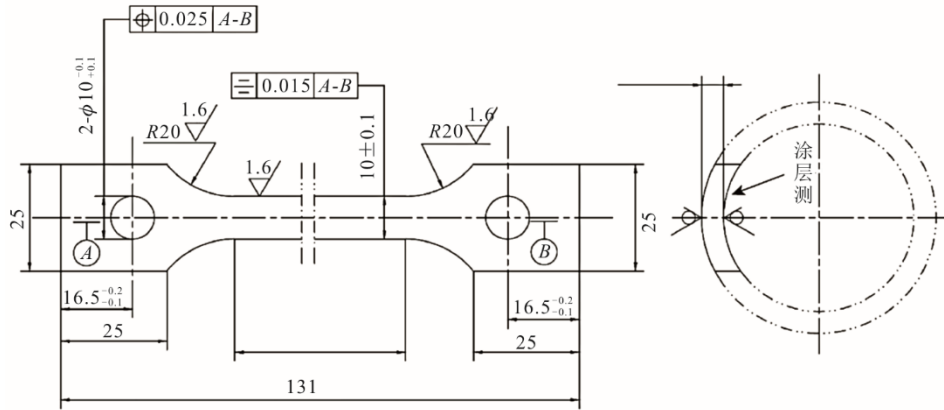


图 1 瓦片状拉伸/持久试样 (mm)
Fig.1 Tensile/stress rupture of tiles (mm)

2 试验结果

2.1 涂层结构

图 2 为 T92 钢铝化物涂层的微观组织形貌及相应的 XRD 图谱。由图 2 可见：图 2b)所示的 T92 钢金相组织均匀，由马氏体组成；通过粉末包埋工艺在管内壁制备的涂层分布均匀、连续，与基体间呈冶金结合，且不影响基体组织。根据衬度不同，铝化物涂层分为外层和内层，涂层层次感分明，厚度均匀且无裂纹，外层主要为 FeAl 相，厚度约 11.25 μm，平均 Al 质量分数为 26%。结合 EDS、FeAl 相图及元素分布特征，表明内层主要为 Fe₃Al 相，厚度约 19.15 μm，平均 Al 质量分数为 5%。

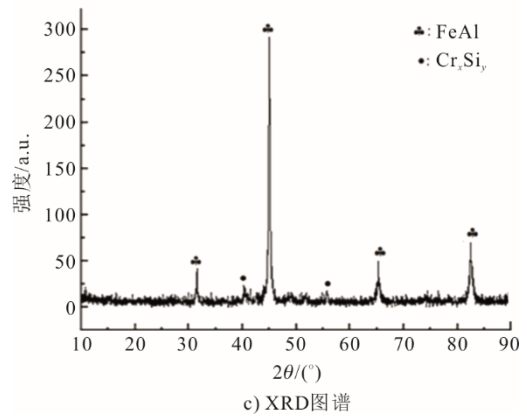
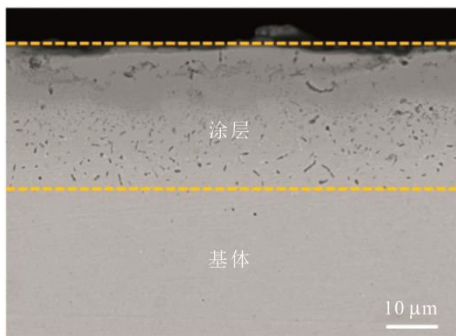


图 2 T92 钢铝化物涂层组织特征及 XRD 图谱
Fig.2 Microstructure characteristics and XRD pattern of aluminate coating on T92 steel



a) 涂层截面形貌



b) 基体金相组织

2.2 高温拉伸性能

不同温度环境中，铝化物涂层对 T92 钢拉伸性能的影响如图 3 所示。试验数据至少取 3 个试样测试的平均值。由图 3 可见，T92 钢铝化物涂层的屈服强度、抗拉强度均略高于基体 T92 钢。

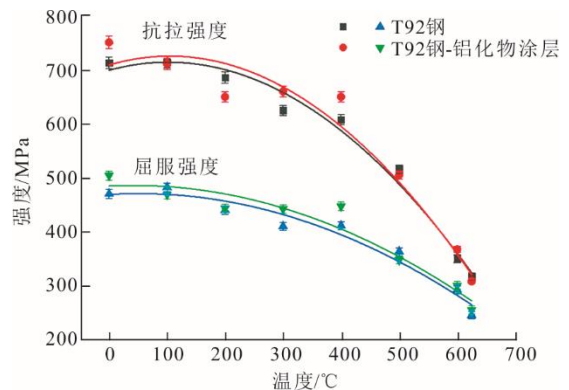


图 3 涂层与母材不同温度拉伸性能
Fig.3 Tensile strength of coating and base metal at different temperatures

图 4 为 T92 钢及其铝化物涂层在室温和 625 °C 拉伸断口形貌。由图 4 可见：T92 钢的断口面较粗糙，断口形貌呈韧窝特征；T92 钢涂层的断口面相对光滑，涂层主要呈柱状晶结构，部分区域发生明显剥落，但在基体界面处未观察到横向裂纹，仍与基材呈冶金结合；同时，625 °C 较室温下试样断口附近明显发生颈缩现象。

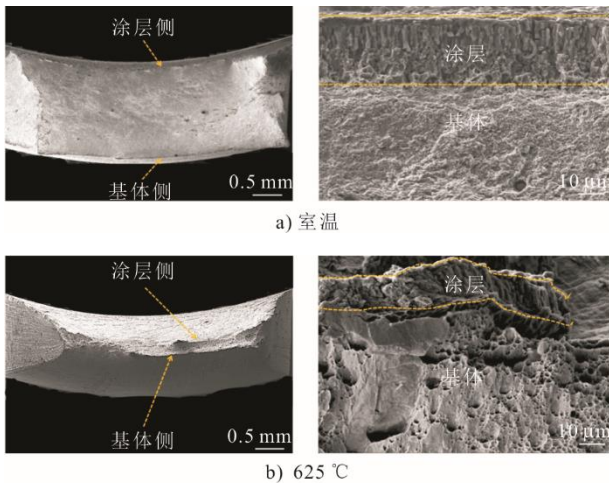


图 4 涂层试样拉伸断口形貌

Fig.4 Tensile fracture morphologies of the coating specimen

图 5 为 T92 钢及其铝化物涂层在室温和 625 °C 拉伸截面形貌。

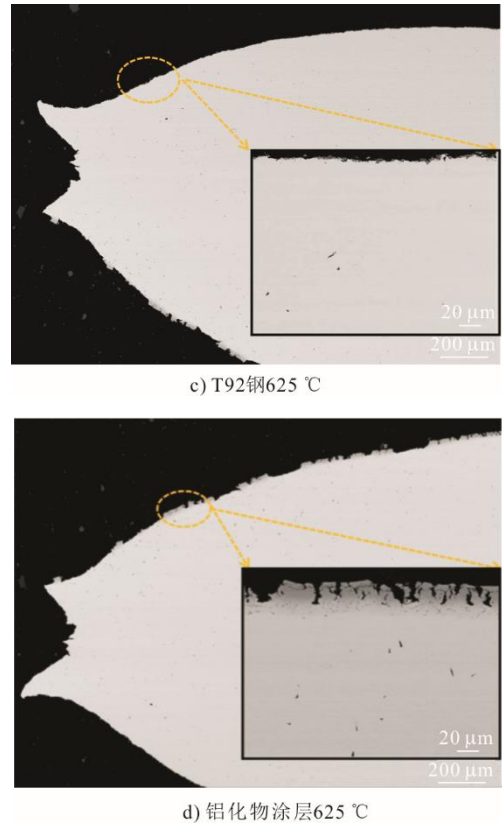
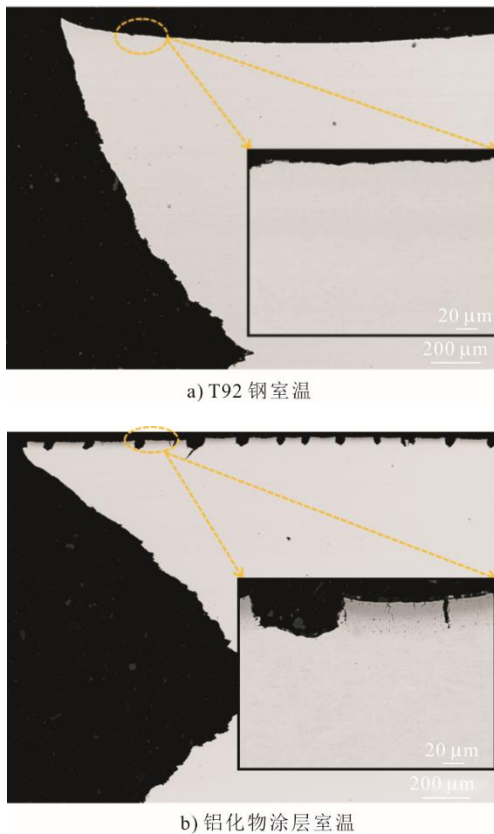


图 5 涂层试样拉伸截面形貌

Fig.5 Tensile cross-sectional morphologies of the coating specimen

由图 5 可见：基体侧出现微小撕裂，且 625 °C 下 T92 钢表面氧化膜较室温下明显增厚；涂层侧发生皴裂，涂层内部出现裂纹，数量较多，极少数裂纹延伸到涂层/基体界面；同时，室温较 625 °C 温度下有/无涂层侧裂纹扩展的速度慢。

2.3 高温持久性能

625 °C 下铝化物涂层对 T92 钢持久寿命的影响如图 6 所示。

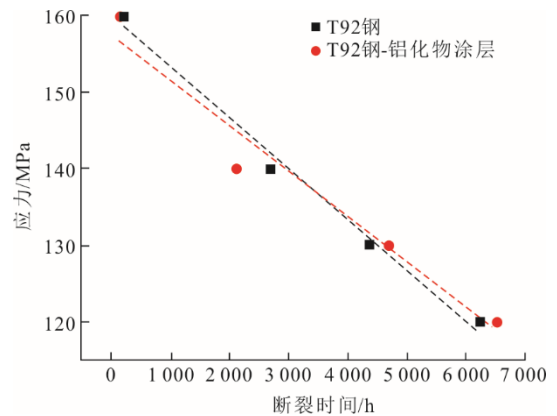


图 6 有/无涂层 T92 钢在 625 °C 的持久寿命
Fig.6 Creep rupture time of T92 with/without coating at 625 °C

由图 6 可见：低应力状态下，T92 钢涂层的持久寿命略高于基体；高应力状态下，T92 钢涂层的持久寿命略低于基体。

图 7 为 625 °C 中 T92 钢铝化物涂层经持久蠕变断裂后的断口形貌。由图 7 可见：经 140 MPa/

2 132.7 h 蠕变断裂后，断口出现明显的颈缩现象；基体侧部分区域已明显被氧化，断口形貌呈尺寸各异的韧窝特征；涂层侧断口附近断裂面相对光滑、平整，为脆性断裂，涂层的应用并未影响 T92 钢的组织及断裂方式。

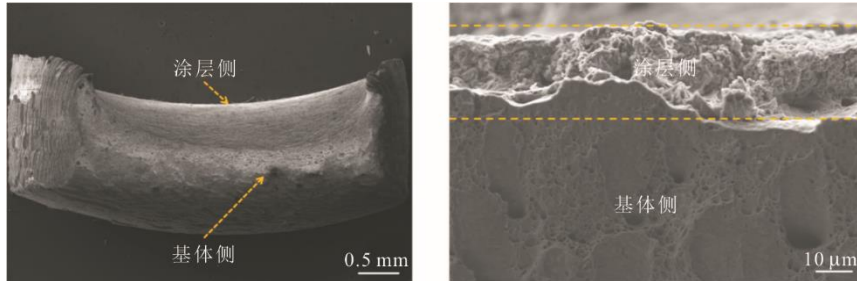


图 7 140 MPa/2 132.7 h 持久试样 625 °C 断口形貌
Fig.7 Fracture morphologies of 140 MPa/2 132.7 h creep rupture specimen at 625 °C

图 8 为 625 °C 中 T92 钢铝化物涂层经持久蠕变断裂后的表面形貌。由图 8 可见：涂层侧发生明显皴裂，局部发生剥落；基体侧发生撕裂，局部放

大，内部存在较多裂纹且深度各异，基体表面形成絮状氧化物。

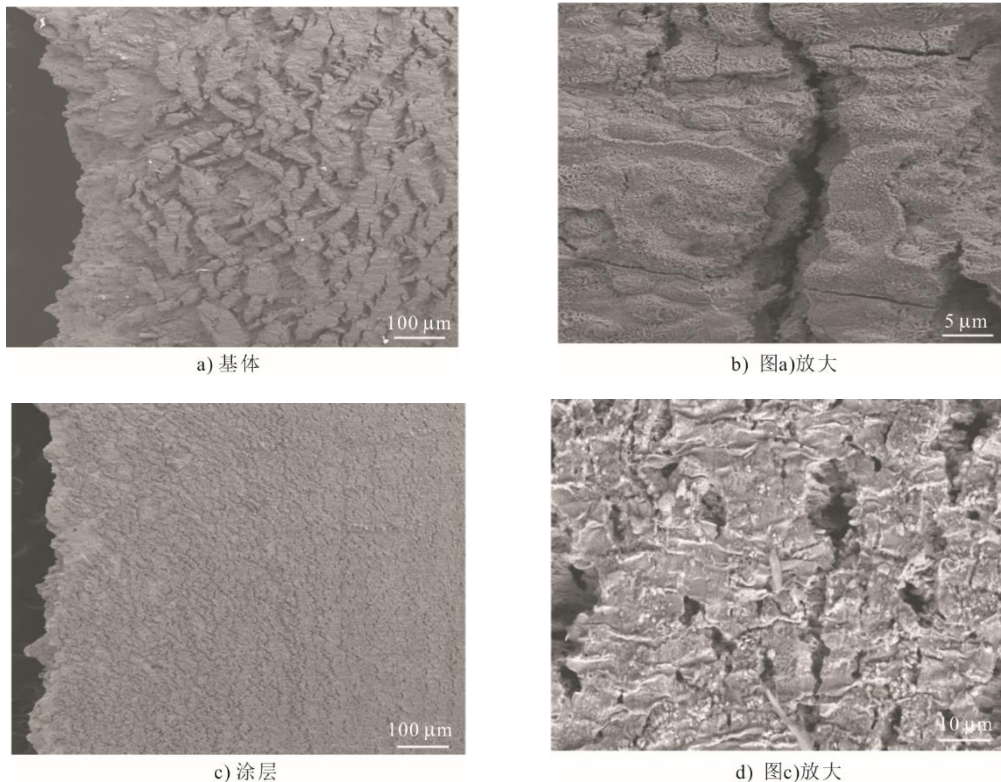


图 8 140 MPa/2 132.7 h 持久试样 625 °C 表面形貌
Fig.8 Surface morphologies of 140 MPa/2 132.7 h creep rupture specimen at 625 °C

图 9 为 625 °C 下 T92 钢铝化物涂层经持久蠕变断裂后的截面形貌。由图 9 可见：涂层侧部分区域发生皴裂，局部出现剥落，但涂层与基体之间结合良好；基体侧可观察到厚度约 38 μm 的氧化膜，

基体及表面氧化膜发生撕裂，局部放大后，存在深度各异的裂纹；此外，蠕变 2 132.7 h 断裂后，涂层中 Al 质量分数不低于 4%，仍具有形成 Al₂O₃ 膜的能力。

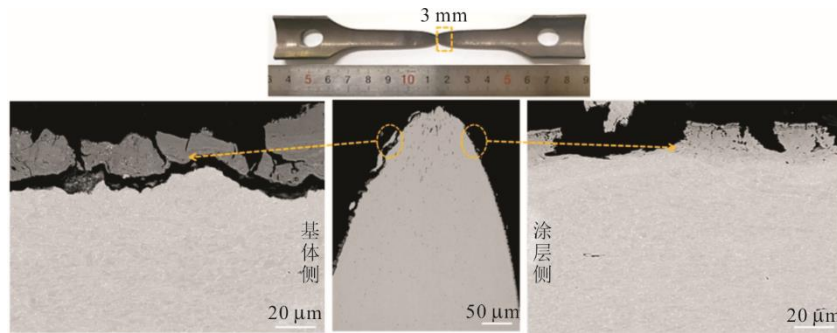


图9 140 MPa/2 132.7 h 持久试样 625 °C 截面形貌

Fig.9 Cross-sectional morphologies of 140 MPa/2 132.7 h creep rupture specimen at 625 °C

3 讨 论

T92 钢铝化物涂层的屈服强度、抗拉强度与母材的相对差值最大不超过 3% (图 3), 表明二者基本持平。FeAl 涂层具有相对较高的高温强度^[28], 可在某种特定情况下提高涂层/基材的屈服强度; 其次, 因其本征脆性^[29], 涂层抗拉强度的降低是因为在应力加载下其具有塑性易导致微裂纹产生。

同种涂层不同应力状态的试样持久蠕变时, 基体组织呈明显韧窝特征, 表明其断裂方式未改变, 为韧性断裂; 而涂层侧附近的断裂面相对光滑, 为脆性断裂, 在 Fe-Al 多晶体中这种断裂失效方式十分常见^[30]。在离断口较近的区域, 涂层发生皴裂, 可能是因为在持久蠕变过程中, 纵向伸长时高温塑性较好的基材会导致涂层撕裂, 而横向收缩会造成涂层因基体形变及应力产生局部剥落, 这可释放少许应力; 在离断口较远的区域, 拉应力作用下, 在垂直拉应力方向的涂层内产生裂纹, 但在涂层/基体界面处未观察到横向裂纹, 涂层未剥落。涂层与基体间均表现出良好的冶金结合, 可能是由于涂层中存在的本征生长应力及基材与涂层间热膨胀系数差异导致^[31]。

基体侧表面裂纹较少, 但裂纹极易扩展深长, 表面和裂纹内侧已生长一定厚度的氧化皮 (图 9), 表明在试样断裂前裂纹就已经出现。涂层侧的裂纹数量较多, 裂纹深度浅, 在离断口较近的区域, 可能是因为应力集中导致极少数裂纹扩展到涂层与基体界面处 (图 5), T92 钢铝化物涂层强度仍基本取决于 T92 钢强度。虽然, Fe-Al 金属间化合物的高温强度与抗氧化性能较强^[32-33], 但通常难以作为结构材料使用 (脆性失效)。对涂层材料而言, FeAl 涂层因其本征强度和脆性失效特性易产生较多微裂纹, 但大量微裂纹的形成可在一定程度上释

放应力, 避免应力集中。另外, 涂层中存在的本征应力, 可抑制裂纹的形成和扩展^[31,34], 同时随着热暴露时间的延长, 涂层与基材界面的析出相、孔洞和氮化物等也会阻碍裂纹向基体内部扩展^[35-36], 避免涂层侧发生断裂。对于涂层试样发生持久强度局部降低的原因, 可能是涂层的应用导致基体有效承载截面面积减小^[37-38]或靠近涂层的母材侧 N 的析出^[39-40], 但满足 ASME 标准中高压锅炉无缝钢管对该合金持久性能的要求。

与 Fe-Al 化合物相比, 母材的高温强度相对较弱^[41], 应力集中条件下, 基体表面形成的裂纹将持续增长, 因此导致试样持久断裂的最大裂纹来自基体侧, 涂层未对 T92 钢持久蠕变产生明显影响。另外, 在静态时效过程中, 铝化物涂层表面仅形成 0.3 μm 厚的氧化膜, 涂层与基体呈冶金结合^[42]。与之相比, 在应力加载过程中铝化物涂层表面很难观察到氧化膜, 涂层内部虽存在微裂纹, 但仍与基体呈冶金结合, 组织和性能未出现明显变化, 具备良好的抗高温氧化能力。综上, 施加铝化物涂层未能使 T92 钢的高温强度和抗高温氧化能力同时达到最优化。

4 结 论

1) 采用低温粉末包埋法可在 T92 钢表面制备约 30.4 μm 的双层铝化物涂层, 各层结构均匀且无裂纹等缺陷存在。

2) T92 钢铝化物涂层样品在不同温度环境中, 强度和断裂韧性与基材相当。铝化物涂层为柱状晶结构, 625 °C 时, 断口附近发生明显颈缩现象且涂层出现明显剥落。

3) T92 钢铝化物涂层持久寿命与基体持平, 蠕变断裂位置发生在无涂层侧, 涂层对基材的高温持久性能无显著影响。

[参考文献]

- [1] 王伟, 唐丽英, 李文胜, 等. T92 钢内压蠕变试验组织性能老化规律[J]. 热力发电, 2016, 45(9): 1-6.
WANG Wei, TANG Liying, LI Wensheng, et al. Microstructure and properties evolution of T92 steel used for boiler tube during internal pressure creep test[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(9): 1-6.
- [2] SHIGETA J I, HAMA O Y, AOKI H, et al. Development of a coal ash corrosivity index for high temperature corrosion[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1987, 109(4): 299-305.
- [3] 王静静, 周云龙. 过热器再热器爆漏事故的原因分析及对策[J]. 应用能源技术, 2010(6): 33-36.
WANG Jingjing, ZHOU Yunlong. Cause and analysis on superheater and reheater tube explosion and its countermeasures[J]. Applied Energy Technology, 2010(6): 33-36.
- [4] ABE F, HORIUCHI T, TANEIKE M, et al. Stabilization of martensitic microstructure in advanced 9Cr steel during creep at high temperature[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 378(1/2): 299-303.
- [5] 王学, 于淑敏, 任瑶瑶, 等. P92 钢时效的 Laves 相演化行为[J]. 金属学报, 2014, 50(10): 1195-1202.
WANG Xue, YU Shumin, REN Yaoyao, et al. Laves phase evolution in P92 steel during ageing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(10): 1195-1202.
- [6] CHANDRA K, KRANZMANN A, SALIWAN NEUMANN R, et al. High temperature oxidation behavior of 9-12 % Cr ferritic/martensitic steels in a simulated dry oxyfuel environment[J]. Oxidation of Metals, 2014, 83(3/4): 291-316.
- [7] 党莹樱, 鲁金涛, 黄锦阳, 等. AISi 涂覆的 TP347H FG 高温持久行为[C]//中国电机工程学会. 中国电机工程学会年会论文集: 2019 年卷. 武汉: 国网电力科学研究院, 2019: 224-228.
DANG Yingying, LU Jintao, HUANG Jinyang, et al. High temperature creep rupture behavior of slurry Al-Si coating on TP347H FG[C]//Chinese Society Electrical Engineering. Annual Meeting Proceedings of Chinese Society Electrical Engineering: Vol. 2019. Wuhan: State Grid Electric Power Research Institute, 2019: 224-228.
- [8] AGÜERO A, SPIRADEK K, HÖFINGER S, et al. Microstructural evolution of slurry Fe aluminide coating during high temperature steam oxide[C]//Materials Science Forum. 7th International Symposium on High Temperature Corrosion and Protection of Materials. Les Embiez: Trans Tech Publications Ltd, 2008, 595: 251-259.
- [9] 周永莉, 鲁金涛, 党莹樱, 等. 低温渗铝涂层对 P92 钢 650 °C 饱和蒸汽氧化行为的影响[J]. 动力工程学报, 2019, 39(9): 770-776.
ZHOU Yongli, LU Jintao, DANG Yingying, et al. Effect of low-temperature aluminized coating on oxidation behavior of P92 steel in saturated steam at 650 °C [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(9): 770-776.
- [10] 罗新民, 许勇, 陈康敏. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢渗铝层结构及其抗氧化性能[J]. 金属热处理, 2008, 33(12): 42-45.
LUO Xinmin, XU Yong, CHEN Kangmin. Microstructure and oxidation resistance of diffusion-treated aluminizing layer on 1Cr18Ni9Ti stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(12): 42-45.
- [11] 董猛, 谢道原, 朱阳存, 等. G115 和 T92 钢表面 FeAl 渗层制备及其抗高温水蒸汽氧化性能[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(5): 135-142.
DONG Meng, XIE Xiaoyuan, ZHU Yangcun, et al. Preparation of FeAl penetration layer on G115 and T92 steel surface and its oxidation resistance to high temperature steam [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(5): 135-142.
- [12] LU J, DANG Y, HUANG J, et al. Preparation and characterization of slurry aluminide coating on Super304H boiler tube in combination with heat-treatment process[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 370: 97-105.
- [13] 鲁金涛, 党莹樱, 黄锦阳, 等. 火电机组过/再热器锅炉管内壁铝化物涂层研究(II): 蒸汽氧化、强度及组织演化[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 269-276.
LU Jintao, DANG Yingying, HUANG Jinyang, et al. Aluminide coating on inner wall of boiler tubes for overheater/reheater of thermal power generating unit (II): steam oxidation, strength and microstructure evolution[J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 269-276.
- [14] GALETZ M C, OSKAY C, MADLOCH S. Microstructural degradation and interdiffusion behavior of NiAl and Ge-modified NiAl coatings deposited on Alloy 602 CA[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 364: 211-217.
- [15] SMIALEK J L, LOWELL C E. Effects of diffusion on aluminum depletion and degradation of NiAl coatings[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1974, 121(6): 800.
- [16] LATIEF F H, KAKEHI K. Influence of heat treatment on anisotropic creep behavior of aluminide coating on a Ni-base single crystal superalloy[J]. Materials & Design, 2013, 52: 134-142.
- [17] ALAM M Z, SATYANARAYANAN D V V, CHATTERJEE D, et al. Effect of prior cyclic oxidation on the creep behavior of bare and Pt-Aluminide coated directionally solidified CM-247LC Alloy[J]. Procedia Engineering, 2013, 55: 835-841.
- [18] VEYS J M, MEVREL R. Influence of protective coatings on the mechanical properties of CMSX-2 and Cotac 784[J]. Materials Science and Engineering, 1987, 88: 253-260.
- [19] LI W, CHEN H, LI C, et al. Microstructure and tensile properties of AISI 321 stainless steel with aluminizing and annealing treatment[J]. Materials & Design, 2021, 205: 109729.
- [20] BATES B L, ZHANG Y, DRYEPONDT S, et al. Creep behavior of pack cementation aluminide coatings on Grade 91 ferritic-martensitic alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 240: 32-39.
- [21] HOU X, ZHANG H, SERAFFON M, et al. Steam oxidation and mechanical performance of a ferritic-martensitic steel with slurry aluminide coating[J]. Materials and Corrosion, 2020, 71(8): 1310-1320.
- [22] AGÜERO A, GONZÁLEZ V, GUTIÉRREZ M, et al. Comparison between field and laboratory steam oxidation testing on aluminide coatings on P92[J]. Materials and Corrosion, 2011, 62(6): 561-568.
- [23] AGÜERO A, MUELAS R, GUTIÉRREZ M, et al. Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(14): 6253-6260.
- [24] 高海燕, 贺跃辉, 沈培智. FeAl 金属间化合物研究现状[J]. 材料导报, 2008(7): 68-71.
GAO Haiyan, HE Yuehui, SHEN Peizhi. Research status of FeAl intermetallics compound[J]. Materials Review, 2008(7): 68-71.

- [25] BOULESTEIX C, GRÉGOIRE B, PEDRAZA F. Oxidation performance of repaired aluminide coatings on austenitic steel substrates[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 326: 224-237.
- [26] BOULESTEIX C, PEDRAZA F, PROY M, et al. Steam oxidation resistance of slurry aluminum and aluminum/silicon coatings on steel for ultrasupercritical steam turbines[J]. *Oxidation of Metals*, 2017, 87(3/4): 469-479.
- [27] BOULESTEIX C, KOLARIK V, PEDRAZA F. Steam oxidation of aluminide coatings under high pressure and for long exposures[J]. *Corrosion Science*, 2018, 144: 328-338.
- [28] SUNDAR R S, DEEVI S C. High-temperature strength and creep resistance of FeAl[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 357(1/2): 124-133.
- [29] 周瑾, 白亚平, 成超, 等. B2 结构 FeAl 金属间化合物研究现状[J]. *铸造技术*, 2019, 40(8): 858-861.
ZHOU Jin, BAI Yaping, CHENG Chao, et al. Research status of FeAl intermetallic compounds with B2 structure[J]. *Foundry Technology*, 2019, 40(8): 858-861.
- [30] PELLEGGI J. Fracture in B2 intermetallics, basic compounds for superalloys mechanical properties[M]. Amsterdam: Elsevier, 2018: 517-551.
- [31] 李明升, 冯长杰, 王福会. 施加氮化钛铝涂层对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢力学性能的影响[C]//中国功能材料及其应用学术会议. 第六届中国功能材料及其应用学术会议论文集. 重庆: 重庆材料研究院, 2007, 10: 178-181.
LI Mingsheng, FENG Changjie, WANG Fuhui. Effect of titanium aluminum nitride coating on mechanical properties of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel[C]//China National Conference on Functional Materials and Applications. Proceedings of the 6th China National Conference on Functional Materials and Applications. Chongqing: Chongqing Institute of Materials Science, 2007, 10: 178-181.
- [32] FÄHSING D, RUDOLPHI M, KONRAD L, et al. Fireside corrosion of chromium and aluminum coated ferritic-martensitic steels[J]. *Oxidation of Metals*, 2016, 88(1/2): 155-164.
- [33] XIANG Z D, ZENG D, ZHU C Y, et al. Steam oxidation resistance of Ni-aluminide/Fe-aluminide duplex coatings formed on creep resistant ferritic steels by low temperature pack cementation process[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(1): 496-502.
- [34] 张德丰, 陆建生, 宋鹏, 等. 铂改性铝化物涂层的热生长层内应力研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(11): 1956-1960.
ZHANG Defeng, LU Jiansheng, SONG Peng, et al. TGO stress growth for Pt-modified aluminide bond coats during high temperature oxidation[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(11): 1956-1960.
- [35] TEXIER D, MONCEAU D, HERVIER Z, et al. Effect of interdiffusion on mechanical and thermal expansion properties at high temperature of a MCrAlY coated Ni-based superalloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 307: 81-90.
- [36] GALIULLIN T, CHYRKIN A, PILLAI R, et al. Effect of alloying elements in Ni-base substrate material on interdiffusion processes in MCrAlY-coated systems[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 350: 359-368.
- [37] BELLUCCI A, MATERA S, FRY A, et al. The steam oxidation and mechanical performance of a ferritic-martensitic steel coated with slurry and pack cementation aluminide coating[C]//EPRI. International Conference on Corrosion in Power Plants. San Diego: EPRI, 2015, 1: 1-12.
- [38] DRYEPONDT S, ZHANG Y, PINT B A. Creep and corrosion testing of aluminide coatings on ferritic-martensitic substrates[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(7): 3880-3884.
- [39] AGÜERO A, MUELAS R. Steam oxidation of slurry aluminide coatings on ferritic steels for advanced coal-fired steam power plants[C]//Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd. Les Embiez: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, 2004, 461: 957-964.
- [40] 刘亚梅. 9%Cr 热强钢焊接金属时效微观组织与力学性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015: 44-54.
LIU Yamei. Study on microstructure and mechanical properties of 9% Cr ferrite heat-resistant steel weld metal after aging[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015: 44-54.
- [41] SUN Y, DONG J, ZHAO P, et al. Formation and phase transformation of aluminide coating prepared by low-temperature aluminizing process[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 330: 234-240.
- [42] 黄春林, 朱明, 鲁金涛, 等. T92 钢表面铝化物涂层的组织演化[J]. *中国表面工程*, 2022, 35(4): 213-222.
HUANG Chunlin, ZHU Ming, LU Jintao, et al. Microstructure evolution of aluminide coating on T92 steel[J]. *China Surface Engineering*, 2022, 35(4): 213-222.

(责任编辑 邓玲惠)