

炭/炭复合材料硼硅酸盐玻璃涂层 制备及性能研究

Research on Preparation and Property of Borosilicate
Glass Coating for C/C Composites

黄 敏^{1,2}, 李克智², 李贺军², 付前刚², 王 宇¹, 吕祥鸿¹

(1 西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065; 2 西北工业大学
超高温复合材料实验室 炭/炭复合材料工程技术研究中心, 西安 710072)

HUANG Min^{1,2}, LI Ke-zhi², LI He-jun², FU Qian-gang²,
WANG Yu¹, LU Xiang-hong¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University,
Xi'an 710065, China; 2 C/C Composites Technology Research Center,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 系统研究了 SiO_2 与 B_2O_3 之比、高熔点添加剂种类(包括 MoSi_2 , Y_2O_3 , SiC)及含量对硼硅酸盐(SAB)玻璃涂层高温稳定性、高温流动性的影响规律和最佳工艺参数组合,采用涂刷法在带有疏松结构的 SiC 内涂层炭/炭(C/C)复合材料表面制备了高温稳定性和流动性良好的硼硅酸盐玻璃外层,并测试了带有不同 SiC /硼硅酸盐玻璃复合涂层 C/C 复合材料试样在 1500°C 静态空气中的抗氧化性能。结果表明:采用 SiO_2 、 B_2O_3 摩尔比为 4:1 时所得硼硅酸盐玻璃具有相对较高的高温流动性和高温稳定性;与添加 Y_2O_3 、 SiC 相比,在上述硼硅酸盐玻璃中添加 MoSi_2 可以较大幅度提高所得玻璃涂层对 C/C 基体的氧化保护性能,并且当硼硅酸盐玻璃外层中硼硅酸盐与 MoSi_2 的质量比为 4:1 时,所得硼硅酸盐玻璃外层对 SiC -C/C 表现出较好的氧化保护能力,氧化 17h 后涂层 C/C 试样的失重仅为 4.31%。

关键词: 炭/炭(C/C)复合材料;硼硅酸盐玻璃;涂层;抗氧化

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)07-0078-04

Abstract: The effects of the ratio of SiO_2 and B_2O_3 , the type of addition with high melting point including MoSi_2 , Y_2O_3 , SiC on the high temperature stability and fluidity of the borosilicate glass coating were studied. Borosilicate glass coating with good high temperature stability and fluidity was prepared on the surface of SiC coated carbon-carbon (C/C) composites. The isothermal oxidation resistance of SiC /borosilicate glass coated C/C composites was also tested under 1500°C in air. The study results showed that the borosilicate glass exhibits good high temperature stability and fluidity as the ratio of SiO_2 and B_2O_3 was 4:1. The addition of MoSi_2 can improve the oxidation resistance of borosilicate coating, and the better oxidation resistance borosilicate glass coating can be obtained as the mass ratio of borosilicate glass and MoSi_2 was 4:1. The mass loss of the SiC /borosilicate glass coated C/C composites was only 4.31% after oxidation for 17 h.

Key words: carbon-carbon (C/C) composite; borosilicate glass; coating; oxidation resistance

炭/炭(C/C)复合材料已经被证实是目前唯一可用于 2000°C 以上的高温复合材料,在航空、航天等都具有广阔的应用前景^[1-3],另一方面,由于碳在空气中 370°C 、在水蒸气中 650°C 、在 CO_2 中 750°C 就开始氧化^[4],这种在高温氧化性气氛下易于氧化的性能明显限制了 C/C 复合材料的应用。因此,如何防止 C/C 复合材料的高温氧化是其作为高温材料应用的前提^[5,6]。

与基体改性技术相比,抗氧化涂层技术可以提供更高温度下的防氧化能力,涂层技术的基本原理是利用涂层材料自身优异的高温稳定性防止氧气对 C/C 基体的入侵,或是通过自身与氧气反应生成稳定的氧化物消耗掉到达 C/C 表面的氧气实现对 C/C 基体的防氧化保护。研究表明,大多数涂层的失效包括:包埋法 SiC /硅酸钇涂层^[7]、包埋法 $\text{SiC}_w/\text{MoSi}_2$ 涂层^[8]、等离子喷涂法 Cr-Al-Si 合金涂层^[9] 等都归因于涂层表

面存在的微裂纹,微裂纹的存在会使涂层材料防氧化作用发挥之前或者是防氧化过程中为氧气透过涂层进入 C/C 基体提供通道,从而降低甚至破坏涂层的防氧化效果。因此,减少涂层表面的微裂纹,提高涂层表面的致密性可以大大提高涂层对 C/C 基体的氧化保护能力。高温下具有流动性的玻璃材料可以填充涂层和孔洞等机械缺陷,并赋予涂层自愈合能力,适宜作为 C/C 复合材料抗氧化涂层的密封层使用^[10,11]。与其他玻璃相比,硼硅酸盐玻璃在高温下流动性较好,便于闭合涂层在冷热冲击过程中产生的裂纹;另一方面,硼硅酸盐玻璃涂层具有较低的氧扩散速率,在高温有氧环境下可有效阻止氧气的扩散,是一种比较理想的密封层材料。

为了制备出更加适合于作为 C/C 复合材料封孔剂使用的硼硅酸盐玻璃,本工作研究了玻璃组分、高熔点添加剂种类及含量对所得硼硅酸盐玻璃高温稳定性、流动性及抗氧化性能的影响。

1 实验

选择高纯度的 SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 粉,分别研磨后过 300 目筛网,按一定比例混合,并在球磨机中搅拌均匀后置于 1500°C 的高温炉中,在 Ar 气保护下,保温 1~2 h,烧制成为硼硅酸盐玻璃体。采用电子天平称取一定量的高熔点添加剂 MoSi_2 , Y_2O_3 , SiC 粉与所得玻璃体混合研磨 2 h 以上,加入适量的无水乙醇与蒸馏水,利用超声波分散 10~30 min,搅拌制成玻璃料浆。将制备好的料浆均匀地涂刷在表面积相同的 Al_2O_3 基片上和带有 SiC 内涂层的 C/C (SiC-C/C) 复合材料表面(C/C 复合材料 SiC 内涂层制备工艺见文献[12])。自然干燥后再置入温度为 120°C 的干燥箱中烘干,将烘干试样放入氩气气氛炉中,加热到 1500°C 并保温一段时间,使料浆充分扩散,制得硼硅酸盐玻璃涂层。将涂层试样置于 1500°C 静态空气气氛的电炉中,定期从炉内取出,冷却至室温后用分析天平称重,以 Al_2O_3 基片上硼硅酸盐玻璃涂层损失的质量分数表征硼硅酸盐的热稳定性能,以 SiC-C/C 试样的质量损失表征硼硅酸盐玻璃涂层的抗氧化性能。用 JSM-5800 型扫描电镜(SEM)观察硼硅酸盐玻璃的高温流动性性能。

2 结果与讨论

2.1 SiO_2 , B_2O_3 之比对硼硅酸盐玻璃性能的影响

其他组分含量相同, SiO_2 , B_2O_3 摩尔比分别为

3:1, 4:1, 5:1, 7:1 时所得硼硅酸盐玻璃涂层在 1500°C 下静态空气气氛中的氧化失重曲线如图 1(a)~(d) 所示。对比分析不同氧化失重曲线可以看出,除 $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$ 摩尔比为 3:1 时,所得玻璃涂层随氧化时间的延长具有较显著的失重外,其他 $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$ 配比下所得玻璃涂层的质量变化都几乎为零,这是因为硼硅酸盐玻璃主要由 SiO_2 , Al_2O_3 及 B_2O_3 组成, B_2O_3 含量较高时所得玻璃熔点低,挥发性较大。由此可以推断,当玻璃料浆中 SiO_2 含量较低, B_2O_3 含量较高时所得玻璃涂层高温稳定性较差。

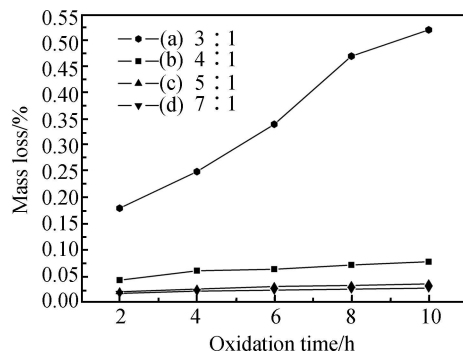


图 1 不同 SiO_2 , B_2O_3 配比所得玻璃在 1500°C 空气气氛中的氧化失重曲线

Fig. 1 Oxidation curves of silicate glass with different ratio of SiO_2 and B_2O_3 in air at 1500°C

图 2(a)~(d) 为其他玻璃组分相同, SiO_2 , B_2O_3 摩尔比分别为 3:1, 4:1, 5:1, 7:1 时所得硼硅酸盐玻璃涂层在 1500°C 下空气气氛中氧化 10 h 后的表面 SEM 形貌。对比不同的表面形貌可以看出, SiO_2 , B_2O_3 摩尔比为 3:1 时(图 2(a)) 所得玻璃涂层在 1500°C 下的氧化 10 h 后涂层表面产生了较多数量的气泡,这是由于此时玻璃组分中 SiO_2 含量较低,玻璃组分在高温下易于自身挥发而致;当玻璃组分中 SiO_2 , B_2O_3 摩尔比提高到 4:1(图 2(b)) 或 5:1(图 2(c)) 时,所得玻璃涂层在 1500°C 下的氧化 10 h 后涂层表面光滑致密,没有发现玻璃组分挥发时留下的气泡;当继续增大玻璃组分中 SiO_2 的含量,即 SiO_2 , B_2O_3 摩尔比为 7:1(图 2(d)) 时,所得玻璃涂层在 1500°C 下的氧化 10 h 后表面起伏较大,说明该配比下所得玻璃高温流动性较差。因此, SiO_2 含量较高时玻璃黏度过大,玻璃流动性较差。

同时,实验中通过观察涂刷在表面积相等的 Al_2O_3 基片上的相同质量玻璃经 1500°C 高温氧化 10 h 后的铺展面积,判断了不同 SiO_2 , B_2O_3 摩尔比对所得玻璃高温流动性的影响。结果表明, SiO_2 , B_2O_3 摩尔比为 3:1 时,所得玻璃在 Al_2O_3 基片上铺展面积较

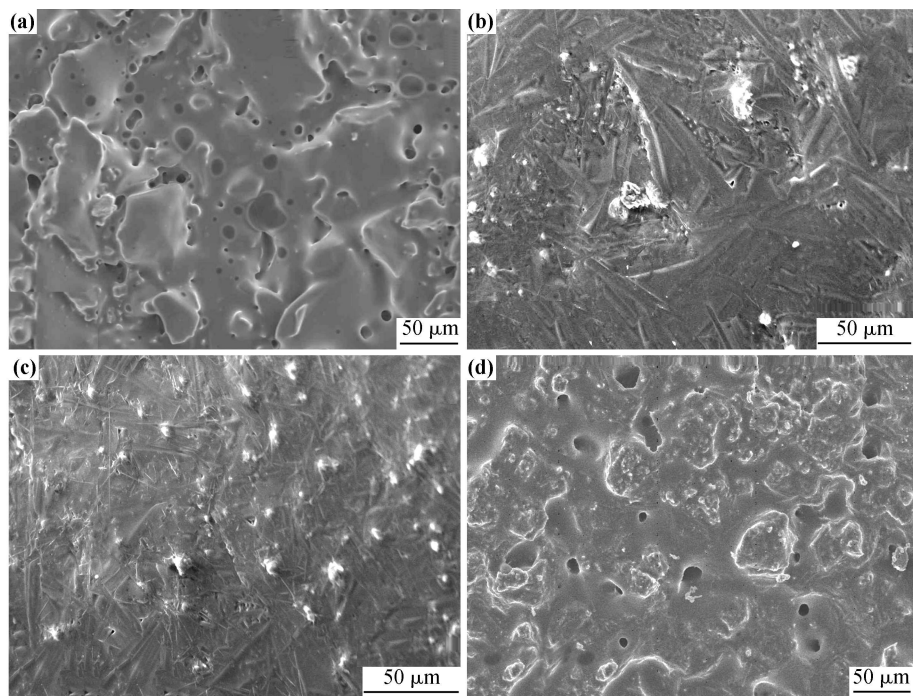


图2 不同 SiO₂ 与 B₂O₃ 之比所得硼硅酸盐玻璃涂层氧化 10h 后表面 SEM 形貌 (a) 3: 1; (b) 4: 1; (c) 5: 1; (d) 7: 1
Fig. 2 Surface SEM morphologies of as-prepared borosilicate glass coating with different ratio of SiO₂ and B₂O₃ after oxidation for 10h (a) 3: 1; (b) 4: 1; (c) 5: 1; (d) 7: 1

大,但薄厚不均匀,并且伴有大量的发泡,表明该组分配比下所得玻璃高温流动性最好,但稳定性较差; SiO₂, B₂O₃ 摩尔比为 7: 1 时,所得玻璃在 Al₂O₃ 基片上铺展面积最小,高温氧化前后玻璃覆盖面积几乎没有变化,说明该组分配比下所得玻璃在高温下的黏度最大,流动性较差; SiO₂, B₂O₃ 摩尔比为 4: 1 或 5: 1 时,所得玻璃在 Al₂O₃ 基片上铺展面积介于上述二者之间,并且也未发现表面明显的发泡现象,说明该组分配比下所得玻璃兼具适当的高温流动性和高温稳定性。

作为 C/C 复合材料高温抗氧化复合涂层体系中的密封层,所用硼硅酸盐玻璃必须具有良好的高温稳定性,以防止玻璃外涂层过渡挥发在涂层表面留下气孔;同时,所用硼硅酸盐玻璃应具有良好的高温流动性,以实现愈合其他涂层表面的微裂纹等缺陷,最终提高整个复合涂层体系对 C/C 基体的氧化保护。因此,综合以上实验分析结果,并参考 F. Smeacetto^[10]、付前刚^[11]等人的实验结果,得出当 SiO₂, B₂O₃ 摩尔比为 4: 1 时可以获得高温流动性和高温稳定性都比较优异的硼硅酸盐玻璃。

2.2 高熔点添加剂对硼硅酸盐玻璃稳定性的影响

为了进一步提高硼硅酸盐玻璃自身的热稳定性,在硼硅酸盐玻璃中加入了高熔点添加剂。图 3 (a) ~ (d) 分别为表面涂刷有纯硼硅酸盐玻璃、添加 MoSi₂,

Y₂O₃, SiC 颗粒的硼硅酸盐玻璃在 1500℃ 空气气氛中氧化 10h 后的失重曲线。与未加高熔点添加剂纯硼硅酸盐玻璃的稳定性相比,三种不同高熔点添加剂的加入均可以提高所得硼硅酸盐玻璃的稳定性。但相比而言,添加了 MoSi₂ 的硼硅酸盐玻璃的稳定性提高幅度最大,这主要是因为 MoSi₂ 自身具有较高的熔点^[13],优异的抗氧化及抗烧蚀性能。

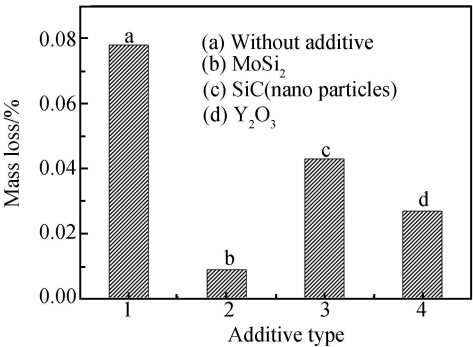


图3 不同种类高熔点添加剂硼硅酸盐玻璃在 1500℃ 空气气氛中氧化 10h 后氧化失重曲线
Fig. 3 Oxidation curve of borosilicate glass containing different type of additives after 10h oxidation in air at 1500℃

2.3 MoSi₂ 含量对硼硅酸盐玻璃抗氧化性能的影响
由于 MoSi₂ 自身具有较高的热膨胀系数,当其含量较高时容易引起玻璃涂层热膨胀系数的增加。F.

Smeacetto 等人的实验结果表明^[10], 不添加 MoSi_2 的硼硅酸盐组分玻璃在 $300\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围的热膨胀系数仅为 $1.76\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 在硼硅酸盐玻璃中加入一定量(硼硅酸盐组分: $\text{MoSi}_2=2:1$, 质量比)的 MoSi_2 后, 该玻璃的热膨胀系数在相同的温度范围内增大到了 $2.9\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 玻璃热膨胀系数的增大可能引起玻璃外涂层的脱落。为了同时获得可以提高涂层抗氧化性能, 但不会因热膨胀系数增大而导致玻璃外涂层脱落的玻璃涂层, 分别研究了硼硅酸盐玻璃与 MoSi_2 质量比为 $3:1, 4:1, 5:1$ 时所得玻璃涂层的抗氧化性能。将 MoSi_2 添加量不同的硼硅酸盐玻璃分别涂刷在带有疏松结构的 SiC 内涂层 C/C 复合材料表面, 并在 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 静态空气气氛中依次测试了不同硼硅酸盐玻璃外涂层的 SiG-C/C 复合材料试样的氧化失重曲线, 如图 4(a)~(d) 所示。从图中可以看出, 与其他涂层 C/C 试样相比, 仅带有单一 SiC 内涂层 C/C 基体的氧化失重随氧化时间的延长呈直线型增加, $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 氧化 10 h 后的失重为 6.82% ; 在 SiC 内涂层表面添加玻璃外涂层后, 带有硼硅酸盐玻璃/ SiC 双涂层 C/C 基体的氧化失重均有所降低。同时可以看出, 含有不同 MoSi_2 的硼硅酸盐玻璃外涂层对 SiG-C/C 的抗氧化保护也有所差异。在相同氧化时间内, 与未添加 MoSi_2 的硼硅酸盐玻璃相比, 添加了 MoSi_2 的硼硅酸盐玻璃外涂层的氧化失重显著降低, 当硼硅酸盐玻璃外涂层中硼硅酸盐与 MoSi_2 的质量比为 $4:1$ 时, 所得硼硅酸盐玻璃外涂层对 SiG-C/C 表现出较好的氧化保护能力, 氧化 17 h 后涂层 C/C 试样的失重仅为 4.31% 。这主要是因为 MoSi_2 的添加可以提高硼硅酸盐玻璃自身的稳定性, 但是 MoSi_2 含量过高时, 硼硅酸盐玻璃的流动性受到了限制, 氧化过程中玻璃涂层不能及时愈合 SiC 内涂层表面的微裂纹等缺陷, 以致于当硼硅酸盐玻璃与 MoSi_2 的质量比为 $3:1$ 时, 所得涂层试样的抗氧化性能反而低于不加 MoSi_2 的硼硅酸盐玻璃/ SiC 涂层试样。

综上所述, 采用 $\text{SiO}_2, \text{B}_2\text{O}_3$ 摩尔比为 $4:1$ 时所得硼硅酸盐玻璃具有相对较高的高温流动性和高温稳定性。在上述硼硅酸盐玻璃中添加 MoSi_2 可以进一步提高所得玻璃涂层对 C/C 基体的氧化保护性能, 并且当硼硅酸盐玻璃外涂层中硼硅酸盐与 MoSi_2 的质量比为 $4:1$ 时, 所得硼硅酸盐玻璃外涂层对 SiG-C/C 表现出较好的氧化保护能力。

3 结论

(1) 硼硅酸盐玻璃组成中的 B_2O_3 含量较高时所得玻璃涂层高温稳定性较差, SiO_2 含量较高时玻璃黏

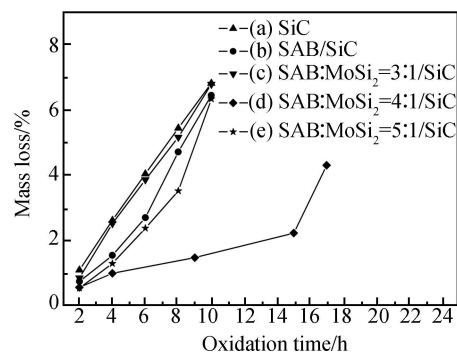


图 4 带有 SiC 内涂层与不同 MoSi_2 含量硼硅酸盐玻璃外涂层 C/C 复合材料试样 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 空气气氛中的氧化失重曲线

Fig. 4 Oxidation curve of SiC coated C/C composites with outer borosilicate glass coating with different content of MoSi_2 in air at $1500\text{ }^\circ\text{C}$

度过大, 玻璃流动性较差; 当 $\text{SiO}_2, \text{B}_2\text{O}_3$ 摩尔比为 $4:1$ 时可以获得高温流动性和高温稳定性都较为优异的硼硅酸盐玻璃。

(2) 高熔点添加剂的加入可以提高所得硼硅酸盐玻璃的稳定性, MoSi_2 的添加会显著提高硼硅酸盐玻璃的稳定性, 并且当硼硅酸盐与 MoSi_2 的质量比为 $4:1$ 时, 可以为 SiG-C/C 提供 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 空气气氛中较好的氧化保护。

参考文献

- [1] 郭正, 赵稼祥. C/C 复合材料的研究与发展[J]. 宇航材料工艺, 1995, (4): 1-7.
- [2] 戴永耀. 炭/炭复合材料及其在航空上的应用前景[J]. 材料工程, 1993, (11): 43-46.
- [3] 李贺军, 罗瑞盈, 杨峥. 炭/炭复合材料在航空领域的应用研究现状[J]. 材料工程, 1997, (8): 8-10.
- [4] TORSTEN W, GORDON B. Carbon-carbon composites: A summary of recent developments and applications[J]. Mater & Design, 1997, 18(1): 11-15.
- [5] SHEEHAN J E. Carbon-carbon composites[J]. Annu Rev Mater Sci, 1994, 24: 19-44.
- [6] BUCKLEY J D. A carbon-carbon overview[J]. Am Ceramic Bulletin, 1988, 67(2): 364-368.
- [7] HUANG J F, LI H J, ZENG X R, et al. A new $\text{SiC}/\text{yttrium silicate}/\text{glass}$ multi-layer oxidation protective coating for carbon-carbon composites[J]. Carbon, 2004, 42(11): 2356-2359.
- [8] FU Q G, LI H J, LI K Z, et al. SiC whisker-toughened $\text{MoSi}_2\text{-SiG-Si}/\text{glass}$ coating to protect carbon-carbon composites against oxidation[J]. Carbon, 2006, 44(9): 1866-1869.
- [9] HUANG M, LI K Z, LI H J, et al. A Cr-Al-Si oxidation resistant coating for carbon-carbon composites by slurry dipping[J]. Carbon, 2007, 45(5): 1124-1126.

元件, R_c 代表膜层电阻。焊接接头 3 个区域 CO_2 腐蚀的电化学阻抗谱均呈现 3 个时间常数, 即高频容抗弧、低频感抗弧和低频容抗弧。高频容抗弧与双电层电容和电荷传递电阻有关, 低频感抗弧可能与吸附中间产物有关, 而低频容抗弧则可能与表面腐蚀产物膜的沉积有关。从母材、热影响区到焊缝高频容抗弧半径逐渐增大, 表明双电层电容 Q_{dl} 逐渐减小, 电荷传递电阻 R_t 增大。根据上述等效电路对 Nyquist 阻抗谱拟合, 所得极化电阻 R_p 分别为 $280, 330, 425 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 表明母材区的电极反应极化阻力最小, 腐蚀反应易于进行, 焊缝区电极反应的极化阻力最大, 腐蚀反应不易发生, 具有较好的抗 CO_2 腐蚀性能, 这与极化曲线及模拟实验分析结果一致。

3 结论

(1) Cr 含量高低对焊接接头腐蚀产物膜特征影响显著, Cr 含量较高的焊缝区域腐蚀产物膜的生长方式为自基体表面向外扩展, 且膜中 Cr 元素富集, 使该区域产物膜较其他区域更致密, 有效阻止基体进一步腐蚀溶解和抑制局部腐蚀的发生。Cr 含量一致、组织不同的热影响区与母材产物膜差别不大, 组织对产物膜特征影响不显著。

(2) 极化曲线和电化学阻抗谱测试分析表明, 焊接接头在 CO_2 腐蚀介质中母材区域作为阳极首先发生腐蚀, 而焊缝和热影响区作为阴极得到保护。

参考文献

- [1] WINNING I G, BRETHERTON N, MCMAHON A, et al. Evaluation of weld corrosion behavior and the application of corrosion inhibitors and combined scale, corrosion inhibitors [A]. The 59th NACE Annual Conference [C]. Houston: Omnipress, 2004.
- [2] JOOSTEN M W, KOLTS J, HUMBLE P G. Aspects of selective weld and HAZ attack in CO_2 containing production environments
- (上接第 81 页)
- [10] SMEACETTO F, FERRARIS M. Oxidation protection multi-layer coatings for carbon-carbon composites [J]. Carbon, 2002, 40 (4): 583–587.
- [11] FU Q G, LI H J, SHI X H, et al. Oxidation protective glass coating for SiC coated carbon/carbon composites for application at 1773K [J]. Mater Lett, 2006, 60(3): 431–434.
- [12] HUANG M, LI K Z, LI H J, et al. Influence of silicon content on the oxidation resistance of SiC coating [J]. Surf Eng, 2007, 23(4): 253–256.

[A]. The 51st NACE Annual Conference [C]. Houston: Omnipress, 1996.

- [3] LEE C M, BOND S, WOOLLIN P. Preferential weld corrosion effects of weldment microstructure and composition [A]. The 60th NACE Annual Conference [C]. Houston: Omnipress, 2005.
- [4] SINGH R K, MUDDLE B. C. Role of high temperature corrosion in life assessment and microstructural degradation of Cr-Mo steel weldments [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000, 77 (2–3): 117–123.
- [5] 孙建波, 柳伟, 常伟, 等. 低铬 X65 管线钢 CO_2 腐蚀产物膜的特征及形成机制 [J]. 金属学报, 2009, 45(1): 84–90.
- [6] 张雷, 胡丽华, 孙建波, 等. 抗 CO_2 腐蚀低 Cr 管线钢组织和性能研究 [J]. 材料工程, 2009, (5): 6–10.
- [7] TAKABE H, UEDA M. Corrosion resistance of low Cr bearing steel in sweet and sour environments [A]. The 57th NACE Annual Conference [C]. Houston: Omnipress, 2002.
- [8] TAKABE H, UEDA M. The relationship between CO_2 corrosion resistance and corrosion products structure on carbon and low Cr bearing steels [J]. Corrosion Engineering, 2007, 56(11): 514–520.
- [9] 王献昉, 董振江, 梁拥军, 等. 经济型低 Cr 抗 CO_2 腐蚀合金石油管材钢开发现状 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(06): 436–439.
- [10] 陈长风, 赵国仙, 严密林, 等. 含 Cr 油套钢管 CO_2 腐蚀产物膜特征 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(6): 335–338.
- [11] BOSCH C, JANSEN J P, POEPPERLING R K. Influence of chromium contents of 0.5% to 1.0% on the corrosion behavior of low alloy steel for large-diameter pipes in CO_2 containing aqueous media [A]. 58th NACE Annual Conference [C]. Houston: Omnipress, 2003.

基金项目: 国家科技重大专项资助(2008ZX05026-003-04)

收稿日期: 2009-07-26; 修订日期: 2010-03-26

作者简介: 胡丽华(1980—), 女, 博士研究生, 主要从事低合金管线钢组织、焊接及耐蚀性能研究, E-mail: huluhua0701@126.com

通讯作者: 张雷, 联系地址: 北京市海淀区学院路 30 号 北京科技大学腐蚀与防护中心 208 室(100083), E-mail: zhanglei@ustb.edu.cn

- [13] FU Q G, LI H J, SHI X H, et al. Silicide coating for protection of C/C composites at 1873K [J]. Surf Coat Tech, 2006, 201: 3082–3086.

基金项目: 西安石油大学科技基金项目(Z08023)

收稿日期: 2009-04-20; 修订日期: 2010-03-25

作者简介: 黄敏(1979—), 女, 讲师, 博士, 主要从事材料表面改性方面研究, 联系地址: 西安石油大学材料科学与工程学院(710065), E-mail: mhuang@xsyu.edu.cn