

不锈钢连接用改性磷酸盐粘接剂的制备及界面反应机理

霍少华, 李享成, 陈平安, 朱颖丽, 朱伯铨

(武汉科技大学, 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081)

摘 要: 为了提升磷酸盐胶黏剂的耐高温性能, 以自制的磷酸二氢铝为基体, 纳米 Al_2O_3 、Si 粉和低温熔融玻璃粉 (Zn-B-Si-Al-R) 等为填料, 制备出一种新型磷酸盐粘结剂, 并对其界面反应机理进行了分析。结果表明: 当 Fe_2O_3 、 ZrO_2 、 CuO 的添加量分别为 5%、10%、15% (质量分数) 时, 粘结剂在 500 °C 的高温拉伸强度为 5.28 MPa, 质量损失率仅为 7.8%。从室温至 500 °C, 粘结剂与不锈钢基体热膨胀系数匹配良好, 两者的差值始终小于 $1.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。同时, 电势差异促进了 Fe 与 Cu 的离子交换, 在界面处形成成分梯度层, 有效缓解因热失配而产生的热应力, 提高粘结剂在高温下的粘结强度。

关键词: 磷酸盐粘结剂; 热处理; 耐高温强度; 界面反应

中图分类号: TQ43, TG49 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)04-1042-07

网络出版时间: 2023-03-09



Preparation of Modified Phosphate Adhesive for Connection of Stainless Steel and Its Interface Reaction Mechanism

HUO Shaohua, LI Xiangcheng, CHEN Ping'an, ZHU Yingli, ZHU Boquan

(The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: A novel phosphate binder was prepared with homemade aluminum dihydrogen phosphate as a matrix and nano- Al_2O_3 , Si powder and low-temperature fused glass powder (Zn-B-Si-Al-R) as fillers to enhance the high-temperature resistance of phosphate adhesives. The interface reaction mechanism was analyzed. The results show that the high-temperature tensile strength of the adhesive is 5.28 MPa at 500 °C, and the mass loss is only 7.8% when the additions of Fe_2O_3 , ZrO_2 and CuO are 5% (in mass), 10% and 15%, respectively. From room temperature to 500 °C, the coefficient of thermal expansion of the adhesive matches well with the stainless steel substrate, and the difference is less than $1.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Meanwhile, the discrepancy of electric potentials promotes the ions exchange of Fe and Cu, forming the composition gradient layer at the interface, which effectively relieves the thermal stress caused by thermal mismatch and improves the bond strength of the adhesive at a high temperature.

Keywords: phosphate adhesive; heat treatment; high-temperature strength; interface reaction

近年来, 随着航空航天、航海、能源和电气设备等领域的迅猛发展, 对合金材料的需求量越来越大^[1-2]。然而合金材料在长期高温工作环境中极易磨损、断裂和失效^[3-5]。因此, 采用先进的粘结技术对损坏部件进行修复是具有重要意义的^[6]。现今, 大多数有机粘结剂是以改性树脂为主要成分, 它们在 300~400 °C 会发生分解失去粘结性能, 导致其应用

受到很大的限制^[7-9]。与之相比, 无机粘结剂因其出色的耐高温特性、低成本、对环境危害小等优点而受到大量关注^[10-11], 其中, 磷酸盐粘结剂是以磷酸盐为基体, 添加固化剂、缓凝剂及其它助剂配制而成, 粘接强度高, 固化温度较低, 可以在高温下保持极高的粘结强度和稳定性, 被广泛应用于粘接金属、陶瓷和非金属等耐热材料^[12-14]。但是, 常规方

收稿日期: 2022-09-26。 修订日期: 2022-10-12。

基金项目: 湖北省重点研发计划(2020BAA028); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2020CFA038); 国家自然科学基金(51774218)。

第一作者: 霍少华(1997—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 李享成(1978—), 男, 教授。

Received date: 2022-09-26. Revised date: 2022-10-12.

First author: HUO Shaohua (1997—), male, Master candidate.

E-mail: 3023445923@qq.com

Correspondent author: LI Xiangcheng (1978—), male, Professor.

E-mail: lixiangcheng@wust.edu.cn

法制备的磷酸盐粘结剂耐冲击性差, 易开裂, 不宜长时间在高温下使用^[15-16]。因此, 在高温下, 如何解决磷酸盐粘结剂与金属基体之间热膨胀系数不匹配的问题是亟不可待的。

研究表明: 加入填料对磷酸盐粘结剂进行改性是克服上述问题的有效方法。目前, 填料主要是由各种氧化物、硼化物和金属/非金属粉末等组成, 其中, Si 粉、B₄C 等这类填料高温氧化后会产生不同程度的体积膨胀, 可以补偿固化过程中的体积收缩, 对降低粘结剂与基体之间的热应力是有利的^[17]。Wang 等^[18]采用镍、硅、钛等对磷酸盐粘结剂进行改性, 经热处理后在界面处产生了以 TiSi 和 Ti₃Si₄ 为主的金属间化合物, 并且从室温~600 °C, 粘结剂与钛合金的热膨胀系数差值始终小于 $2.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 使得该粘结剂在 600 °C 的拉伸强度可达 5 MPa 以上, 但其保温 0.5 h 后强度降至 2 MPa。之后通过在粘结剂内部生成 AlPO₄, 铜金属间化合物, 硼酸铝等耐高温相, 使其在 1 000 °C 对莫来石陶瓷的粘结强度达 12 MPa^[19]。Ma 等^[20]通过添加 10%(质量分数)的纳米 AlN, 使胶黏剂中的偏磷酸铝由六方晶系转变为立方晶系, 提高了 Al³⁺ 的含量, 使其在室温的剪切强度达到 7.3 MPa, 但未报道高温性能。之后加入过量的纳米 AlN 会产生 NH₃, 导致粘结剂表面孔隙率增加, 粘结强度降低。Zhang 等^[21]通过在粘结剂内部生成 9Al₂O₃·B₂O₃ 难熔相和硼硅酸盐玻璃, 有效降低了高温下的热应力, 同时在界面处形成的 ZnFe₂O₄, Fe₂P, Cr₁₂O₇ 提高了界面结合强度, 使得粘结剂在 400 °C 的拉伸强度达到 5.0 MPa。Sui 等^[22]发现粘结剂中的 AlPO₄ 在热处理后由正交晶型转变为六方晶型, 并且在界面处形成了一个含有 P、Fe、O 元素的扩散层, 减少了由于热膨胀系数不匹配而产生的微裂纹, 使得粘结剂在 500 °C 的拉伸强度达到 3.9 MPa。然而, 继续提升磷酸盐粘结剂在高温下对合金材料的粘结强度, 仍然具有挑战性。

本工作采用低熔氧化物填料对粘结剂进行改性, 通过在粘结剂内部生成磷酸铝、焦磷酸盐等无机化合物, 并在界面处形成含有 Cu、Si 等元素的过渡层, 很好地解决了粘结剂和不锈钢基体之间热失配的问题, 提高了粘结剂的耐高温性能。对比本课题组之前的报道^[22], 样品在 500 °C 的高温拉伸强度提升了 35.4%。

1 实验

1.1 原料

氢氧化铝(分析纯, 国药集团股份有限公司), 磷酸(已稀释, 质量分数 70%, 天津天力化学试剂有限公司), 纳米 Al₂O₃(粒径 150 nm, 质量分数 99.9%, 淄博精进新材料有限公司), 低温熔融玻璃粉(型号 GT40, 广州歌林尔新材料有限公司), Fe₂O₃(质量分数 99.0%, 天津北联精细化学品开发有限公司), 纳米 ZrO₂(粒径 200 nm, 质量分数 99.9%, Aladdin), CuO(粒径 10 μm, 质量分数 99.9%, Aladdin)。

1.2 磷酸盐粘结剂的制备

将氢氧化铝、磷酸按照摩尔比 $n(\text{P}):n(\text{Al})=3:1$ 混合搅拌均匀, 放置在 80 °C 水浴锅中, 恒温持续搅拌反应 30 min, 生成磷酸二氢铝(固含量为 76%)^[23]。按照表 1 使用球磨机(转速 300 r/min, 时长 8 h)将各配方混合制得低熔氧化物填料。再将低熔氧化物填料与磷酸二氢铝按质量比 1.25:1.00 混合搅拌, 即得到改性多组分磷酸盐粘结剂。之后在室温下置于鼓风干燥箱中固化 5 h, 再在 110、180 °C 分别固化 3 h。然后对样品进行热处理, 在室温~300 °C 区间内, 升温速率为 10 °C/min。在 300~500 °C, 升温速率降低至 5 °C/min, 并将样品在 500 °C 保温 1 h。之后对样品进行拉伸强度测试, 如图 1 所示。

表 1 填料配方
Table 1 Filler composition

Sample No.	Mass fraction/%					
	Al ₂ O ₃	Si powder	Glass powder	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	CuO
A	35	20	30	0	10	5
B	30	20	30	5	0	15
C	35	20	30	5	10	0
D	20	20	30	5	10	15

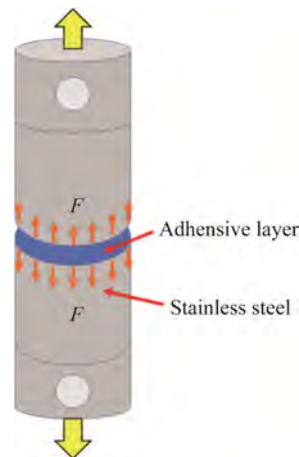


图 1 拉伸实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tensile experiment device

1.3 样品表征

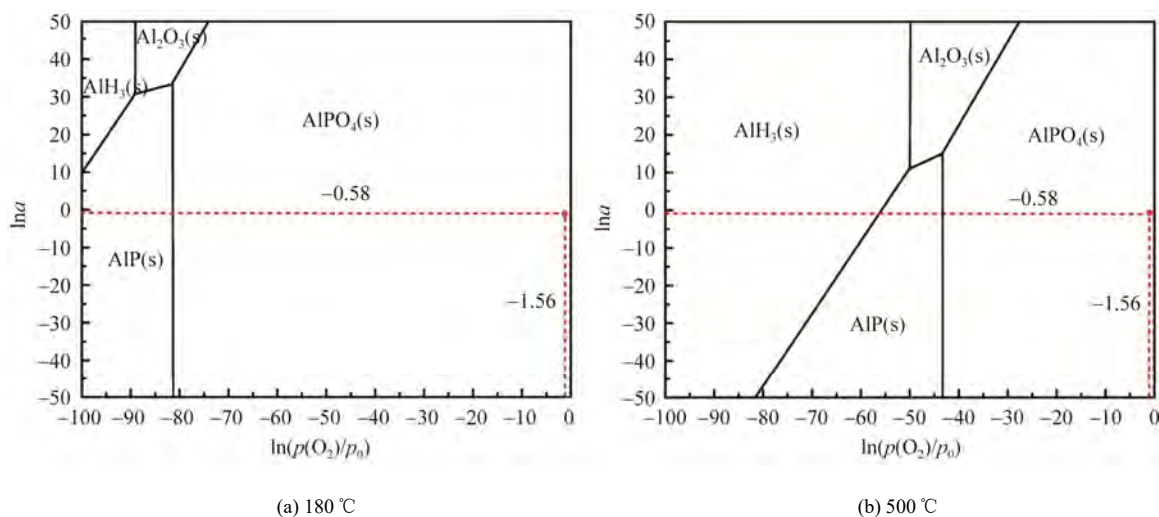
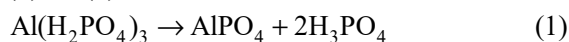
采用 X 射线衍射仪(XRD, X'Pert MPD Pro, 荷兰 Nalytical, Cu 靶, $K_{\alpha 1}=1.5506$)对不同样品中的物相进行了鉴定。利用场发射扫描电子显微镜(FESEM, Nova NanoSem 400, 美国 Thermo)和能谱仪对粘结剂热处理后的微观结构进行了表征。然后通过热膨胀分析仪(DIL 402PC, 德国耐驰)测试粘结剂在各个温度点的热膨胀系数。采用差示扫描量热(TG-DSC, STA 449 F3, 德国耐驰)测试了粘结剂的热稳定性。根据粘结剂拉力性能测试标准(ASTM D897—2008)测得粘结剂的拉伸强度。

2 结果与讨论

2.1 粘结剂的热力学分析

为了探究 Al-P-O-H 体系分别在固化和热处理

后的相组成,基于软件 FactSage, 计算了其在 180 °C 和 500 °C 的热力学优势区域相图(纵坐标标目中的 a 表示磷酸加入量与体系总质量的比值)。从图 2 可以看出, 各相的形成主要与磷酸的含量和 O_2 的分压有关。本工作是在空气气氛下进行的, 空气中氧气的分压是 2.1×10^4 Pa, 其与 1 个标准大气压(101.325 kPa)比值的自然对数值为 -1.56。同理, 磷酸的加入量与体系总质量比值的自然对数值为 -0.58。这 2 个值的交点就是优势区域点, 此点正好位于 $AlPO_4$ 相区^[22]。因此, 通过热力学分析得出在 180 °C 和 500 °C Al-P-O-H 体系的最终产物均为 $AlPO_4$, 并且可以推断出样品中磷酸铝的形成主要是通过反应式(1)~式(2)实现的^[24]。



a represents the ratio of phosphoric acid addition to the total mass of the system.

图 2 Al-P-O-H 体系的热力学优势区域相图

Fig. 2 Diagram of thermodynamic dominance region of Al-P-O-H system

2.2 粘结剂的物相分析

图 3 为磷酸盐粘结剂在 500 °C 热处理后的 XRD 谱。从图 3 可见, 4 条曲线中主要的物相有 $AlPO_4$ (JCDPS 11-0500)、焦磷酸盐和非晶态玻璃相等。在 $2\theta=21^\circ$ 和 28° 处有明显的 $AlPO_4$ 峰, 这是由于水浴反应生成的 $Al(H_2PO_4)_3$ 在 180 °C 发生分解, 形成磷酸铝相和磷酸。在 $2\theta=18^\circ$ 、 24° 、 30° 等处有 SiP_2O_7 (JCDPS 71-2073)、 $Cu_2P_2O_7$ (JCDPS 74-1614)、 ZrP_2O_7 (JCDPS 86-0778) 峰。这是由于在 519 K, 粘结剂中的磷酸分子失水形成焦磷酸, 其与 Cu^{2+} 、 Si^{4+} 、 Zr^{4+} 发生反应形成了焦磷酸盐。样品 C 中 ZrP_2O_7 峰较弱, 并且存在明显的 ZrO_2

(JCDPS 78-0047) 峰, 这可能是由于填料中的 ZrO_2 未参与反应, 以单斜晶型存在于体系中。与样品 B 相比, 样品 A、样品 C、样品 D 中均有 ZrP_2O_7 相存在。另外, 粘结剂中的磷酸铝属于石英型磷酸铝, 有 α 和 β 2 种晶型, 当温度为 500 °C 时, 磷酸铝会从正交晶系向六方晶系发生转变, 晶胞堆积密度增大。这主要是因为磷酸二氢铝在 258 °C 转变为无定型的玻璃相, 其内部含有多种形式的磷酸盐。当反应温度一定时, 以上磷酸盐便会转变成不同晶型的磷酸铝^[25-26]。此外, 低温熔融玻璃粉也会在热处理过程中变成非晶态玻璃相, 可以修补粘结剂固化过程中产生的孔洞和裂纹, 提高机械强度。

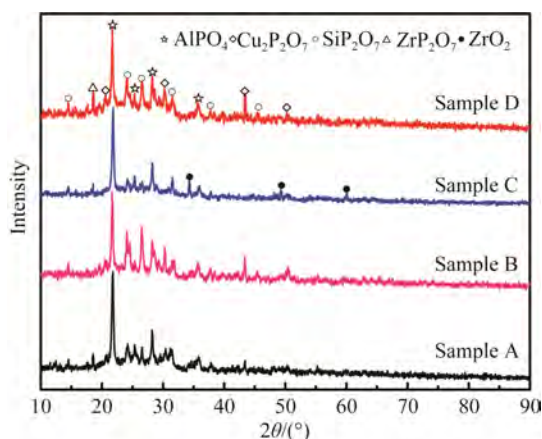


图 3 粘结剂热处理后的 XRD 谱

Fig. 3 XRD patterns of the binder after heating treatment

2.3 粘结剂的显微结构分析

图 4 为磷酸盐粘结剂经过热处理后的微观结构及能谱(EDS)图。从图 4 可以看出, 500 °C 热处理后, 样品内部主要以 AlPO_4 相为主。样品 A 的孔洞分布较为均匀, 并且表面有一些柱状结晶和明显的隆起现象。通过分析点 1, 可以得到样品 A 中片状结晶的主要成分是 AlPO_4 。相较于样品 A, 样品 C 的孔洞多且集中, 表面存在较大缺陷, 这是因为在升温过程中, 样品发生脱水, 产生气体膨胀。样品 B、样品 D 表面平整, 无明显孔洞, 这是由于在热处理过程中, 样品中产生的非晶态玻璃相对孔洞进行了

填充, 并且其内部的 $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ 与 Cu、Zr、Si 等元素发生了充分的聚合反应, 形成多种焦磷酸盐, 使得样品中没有多余的焦磷酸进行脱水反应, 减少了气体的生成^[27-28]。

图 5 为样品 D 粘结界面处的微观结构和 EDS 线扫描分析, 左边是不锈钢基体, 右边是磷酸盐粘结剂。从图 5a 可以看出, 经过热处理后, 颗粒堆积紧密, 没有较大空隙, 粘结剂与不锈钢基体粘结情况良好, 形成了连续致密的界面。从图 5b 可以看出, P、O、Si、Zr、Cu、Fe 这 6 种元素在界面处形成一个成分梯度层, 这可以有效缓解因热失配而产生的热应力, 其中 Si、Cu 的扩散相对比较明显, 表明在粘结剂与不锈钢基体之间发生了离子扩散。这主要是因为粘结剂中的磷酸组分与填料发生反应, 形成了含有 Cu^{2+} 、 $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ 、 PO_4^{3-} 和 H_2PO_4^+ 等离子的浆状液体^[29]。由于 Fe 元素的电位较高, 在粘结剂固化初期, 会在不锈钢表面发生离子的取代反应[式(5)~式(6)]^[30]。在电化学反应过程中, $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ 、 PO_4^{3-} 等离子也会参与其中, 使得粘结剂内部的 Si、Zr 等元素进入到不锈钢基体中, 在界面周围形成一个离子交换的过渡层, 其反应机理如图 6 所示。因此, 粘结剂与合金的电化学反应可以有效提高粘结强度。

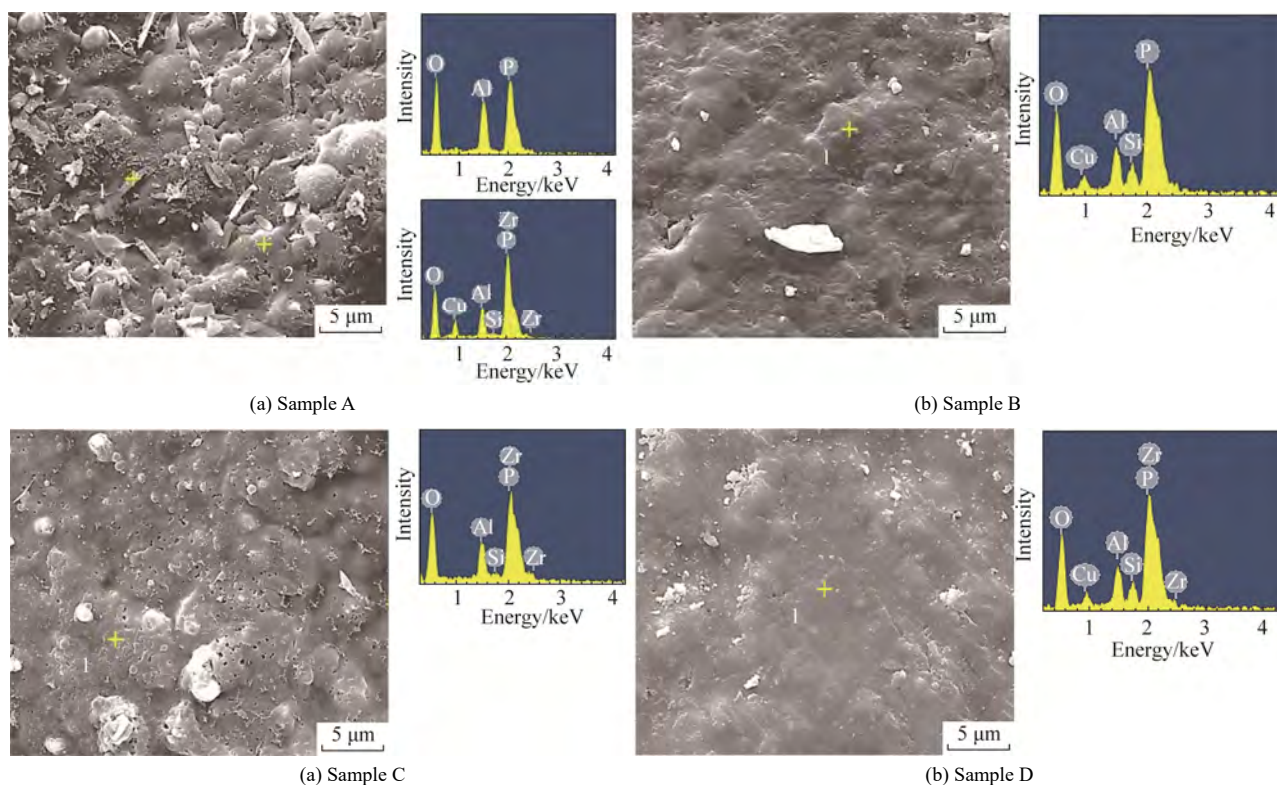
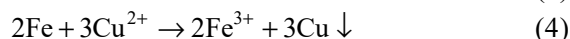
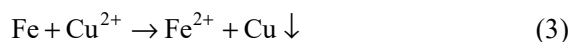


图 4 粘结剂热处理后的微观结构及能谱图

Fig. 4 Microstructures and EDS spectra of the adhesive after heat treatment

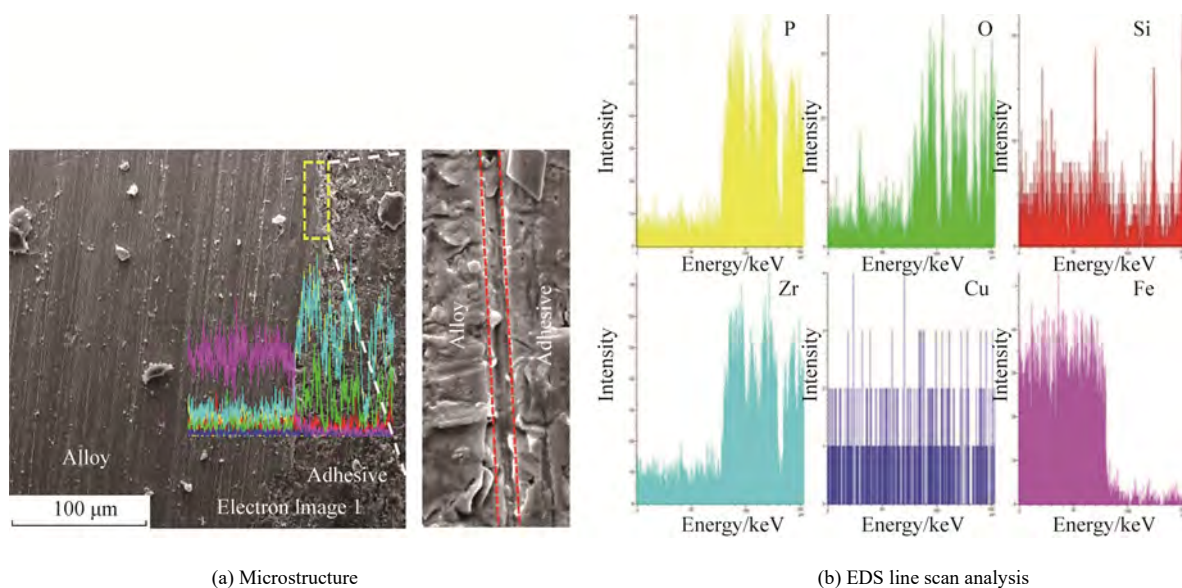


图 5 样品 D 粘结界面处的显微结构和 EDS 线扫描分析

Fig. 5 Microstructure and EDS line scan analysis of sample D at the bonding interface

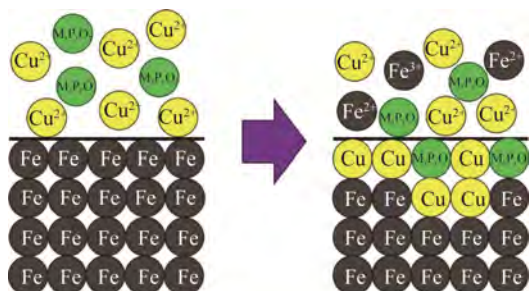


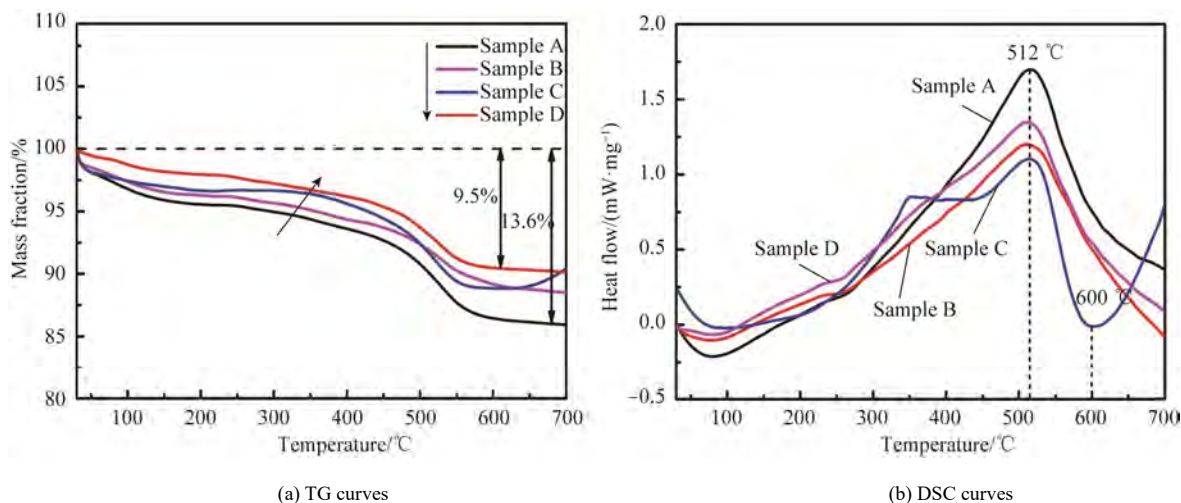
图 6 粘结界面处电化学反应机理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the electrochemical reaction mechanism at the bonding interface

2.4 热重—差热分析

图 7 为样品的 TG—DSC 曲线。从图 7 可以看出，样品 D 的质量损失率最低，仅有 9.5%。在图 7a 中，

第 1 阶段从室温~150 °C，TG 曲线呈缓慢下降的趋势，质量损失约为 3%。与其对应的 DSC 曲线上在 100 °C 左右出现了较为明显的吸热峰，这是由于粘结剂内部游离水的蒸发造成的。第 2 阶段从 350~550 °C，TG 曲线有 1 个快速的质量损失，对应的 DSC 曲线上在 512 °C 处出现了 1 个明显的放热峰。这是因为粘结剂内部发生化合反应生成多种焦磷酸盐，并且磷酸铝相在晶型转变过程中也会释放大量的热量。此外，样品 C 在 350 °C 处的放热峰是因为其内部多余的磷酸脱水形成偏磷酸^[27]，而在 600 °C 处出现吸热峰，这可能是磷酸分解生成的 P_2O_5 发生升华^[31]。综上，可以得出样品 A、样品 B、样品 C、样品 D 经热处理后内部均生成了 $AlPO_4$ ，与 XRD 结果一致。



(a) TG curves

(b) DSC curves

图 7 样品 A、样品 B、样品 C、样品 D 的 TG 和 DSC 曲线

Fig. 7 Thermogravimetry (TG) and differential scanning calorimetry (DSC) diagrams of samples

2.5 粘结剂的热膨胀系数

图 8 为不同温度下粘结剂的线膨胀系数。从图 8 可以看出, 随着温度升高, 4 组样品的线膨胀系数都是在 100 °C 左右增大, 然后趋于稳定, 其中, 样品 D 和样品 B 的线膨胀系数明显高于样品 A 和样品 C。在 100~200 °C, 粘结剂发生一定的体积收缩, 这是由于粘结剂内部脱水造成的。之后从 200 °C 升到 500 °C, 填料中的 Si 粉和低熔玻璃粉等发生氧化反应, 产生不同程度的体积膨胀, 补偿了之前的体积收缩, 降低粘结剂的内应力^[21]。样品 D 的线膨胀系数与 316L 不锈钢最接近, 易于形成连续致密的界面, 有助于提高高温结合强度。然而在 500 °C 时, 未加 CuO 的样品 C 与 316L 不锈钢的线膨胀系数相差近 25%, 导致粘结界面处产生较大的内应力。

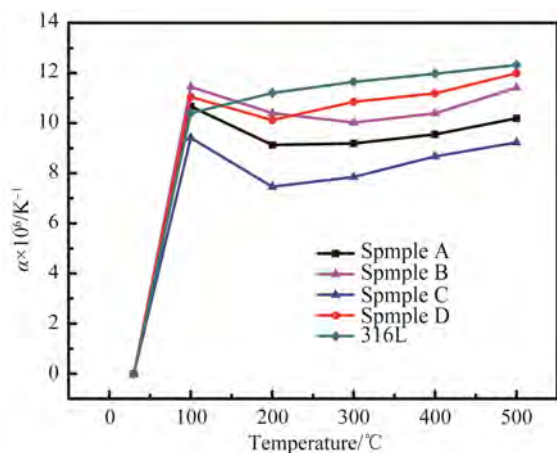


图 8 磷酸盐粘结剂的线膨胀系数(α)

Fig. 8 Coefficient of thermal expansion (α) of phosphate adhesive

2.6 粘结剂的力学性能测试

图 9 为样品固化后在室温下的拉伸强度和热处理后在 500 °C 的拉伸强度。从图 9 可以看出, 样品在 500 °C 的拉伸强度显著高于室温的拉伸强度。这是由于在热处理过程中, 除生成磷酸铝相外, 粘结剂中大量的 $P_2O_7^{4-}$ 与填料反应形成焦磷酸盐, 这些大分子结构相互交错, 形成更高的的粘结强度; 另一方面, 粘结剂与不锈钢基体表面发生电化学反应, 产生离子交换, 使连接更加牢固。此外, 样品 D 在 2 个温度点的强度都高于其它样品。这是由于样品 D 的缺陷极少, 其热膨胀系数与不锈钢基体最为接近, 并且在热处理过程中形成了多种焦磷酸盐, 使得粘结剂具有更高的耐高温性。

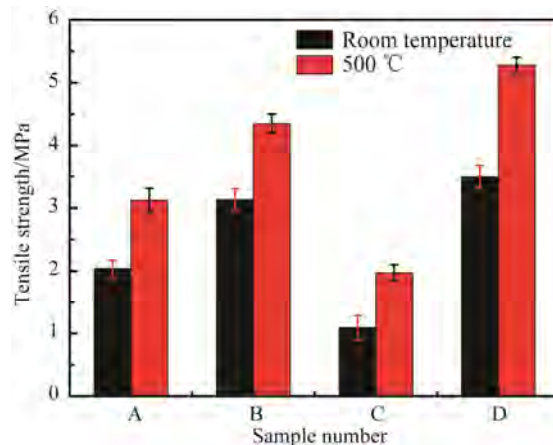


图 9 样品在室温和 500 °C 的拉伸强度

Fig. 9 Tensile strength of samples at room temperature and 500 °C

3 结论

1) 粘结剂中磷酸铝在热处理过程中由正交晶系转变为六方晶系, 晶胞堆积密度增大, 提高了粘结剂的致密性。

2) 随着填料组分的改变, 室温下样品的抗拉强度由 1.09 MPa 提高到 3.49 MPa。500 °C 时样品的抗拉强度由 1.97 MPa 提高到 5.28 MPa。当 Fe_2O_3 、 ZrO_2 、CuO 的添加量分别为 5%、10%、15%(质量分数)时, 粘结剂的高温拉伸强度最高。

3) 样品在 500 °C 的粘结强度均高于室温的。这是因为热处理后粘结剂内部形成了多种焦磷酸盐, 增强了粘结剂的耐高温性能, 并在界面处形成一个含有 Cu、Si、Zr 等元素的过渡层, 很好地解决了粘结剂和不锈钢基体之间热失配的问题。

参考文献:

- [1] ZHU Yang, ZHANG Qiang, MENG Xiangli, et al. Adhesive joint properties of advanced carbon/ceramic composite and tungsten-copper alloy for the hybrid rocket nozzle[J]. Int J Adhes Adhes, 2020, 102: 102670.
- [2] BANE A M D, ROSIOARA M, CARBAS R J C, et al. Multi-material adhesive joints for automotive industry[J]. Compos Part B-Eng, 2018, 151: 71-77.
- [3] WANG Y M, VOISIN T, MCKEOWN J T, et al. Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility[J]. Nat Mater, 2018, 17(1): 63-71.
- [4] 魏青松, 衡玉花, 毛貽槐, 等. 金属粘结剂喷射增材制造技术发展展望[J]. 包装工程, 2021, 42(18): 103-119.
- [5] WEI Qingsong, HENG Yuhua, MAO Yiwei, et al. Packing Eng (in Chinese), 2021, 42(18): 103-119.
- [6] ZHENG Rui, LIN Jianping, WANG Peichung, et al. Effect of adhesive characteristics on static strength of adhesive-bonded aluminum alloys[J]. Int J Adhes Adhes, 2015, 57: 85-94.

- [6] LU Yao, ZHU Meixiong, ZHANG Qi, et al. Microstructure evolution and bonding strength of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ interface brazed via Ni–Ti intermetallic phases[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2020, 40(4): 1496–1504.
- [7] ZHANG X, WANG H, HICKEL T, et al. Mechanism of collective interstitial ordering in Fe–C alloys[J]. *Nat Mater*, 2020, 19(8): 849–854.
- [8] 陈洋, 邓承继, 丁军, 等. Al–Si 系无机高温粘结剂的制备与性能研究[J]. *中国陶瓷工业*, 2017, 24(6): 5–9.
CHEN Yang, DENG Chengji, DING Jun, et al. *Chin Ceram Ind (in Chinese)*, 2017, 24(6): 5–9.
- [9] WANG Yifeng, LIU Manqin, ZHANG Hao, et al. Fabrication of reliable ZTA composite/ $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloy joints via vacuum brazing method: Microstructural evolution, mechanical properties and residual stress prediction[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2021, 41(7): 4273–4283.
- [10] MAGGIORE Sofia, PEDEMONTE Matteo, BAZURRO Alessio, et al. Characterization of the effect of an epoxy adhesive in hybrid FSW-bonding aluminium–steel joints for naval application[J]. *Int J Adhes Adhes*, 2020, 103: 102702.
- [11] KUMAR S, WARDLE B L, ARIF M F. Strength and performance enhancement of bonded joints by spatial tailoring of adhesive compliance via 3D printing[J]. *ACS Appl Mater Inter*, 2017, 9(1): 884–891.
- [12] TUNCKAN Orkun, YURDAKUL Hilmi, TURAN Servet. Unveiling the reaction products in heat treated Si_3N_4 –Ti joined ceramics by transmission electron microscopy[J]. *J Adv Ceram*, 2019, 8(4): 500–508.
- [13] 李潇咏, 廖欢, 莫友彬, 等. 磷硅酸铝高温粘结剂的制备及耐高温性能研究[J]. *化工技术与开发*, 2021, 50(9): 44–46, 49.
LI Xiaoyong, LIAO Huan, MAO Youbin, et al. *Technol Dev Chem Ind (in Chinese)*, 2021, 50(9): 44–46, 49.
- [14] LIU Guiwu, ZHANG Xiangzhao, YANG Jian, et al. Recent advances in joining of SiC-based materials (monolithic SiC and SiC_f/SiC composites): Joining processes, joint strength, and interfacial behavior[J]. *J Adv Ceram*, 2019, 8(1): 19–38.
- [15] WANG Hongyang, MA Yuqing, LIU Liming. Effect of adhesive on laser-arc hybrid welding of aluminum alloy to high-strength steel joint[J]. *J Iron Steel Res Int*, 2020, 27(9): 1099–1107.
- [16] BENYAHIA F, BOUANANI M F, ALBEDAH A, et al. Effect of water absorption on the adhesive damage in bonded composite repair of aircraft structures[J]. *Mater Des*, 2014, 57: 435–441.
- [17] AKPINAR Iclal Avinc, GÜLTEKİN Kürşat, AKPINAR Salih, et al. Experimental analysis on the single-lap joints bonded by a nanocomposite adhesives which obtained by adding nanostructures[J]. *Compos Part B-Eng*, 2017, 110: 420–428.
- [18] WANG Mingchao, LI Kun, LU Ruoyun, et al. Advanced high-temperature resistant (RT–1 000 °C) aluminum phosphate-based adhesive for titanium superalloys in extreme environments[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(23): 32988–33001.
- [19] WANG Mingchao, SONG Qinggong, GU Yuqing, et al. Multiple high-temperature resistant phases modified phosphate-based adhesive for engineering ceramic connection in extreme environment[J]. *Ceram Int*, 2019, 45(1): 516–521.
- [20] MA C, CHEN H, WANG C, et al. Effects of nano-aluminum nitride on the performance of an ultrahigh-temperature inorganic phosphate adhesive cured at room temperature[J]. *Materials*, 2017, 10(11): 1266.
- [21] ZHANG Xueqi, WANG Mingchao, JIA Tao, et al. A heat-resistant glass-modified multi-component phosphate adhesive for repair and connection of superalloy in extreme environment[J]. *J Alloys Compd*, 2018, 745: 868–873.
- [22] SUI Longxiang, YIN Chaofan, LI Xiangcheng, et al. Preparation of a modified phosphate-based adhesive and its hot bonding performance on 316L stainless steel[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(11): 15585–15593.
- [23] WANG Mingchao, ZHANG Jing, TONG Wei, et al. Effect of Al:P ratio on bonding performance of high-temperature resistant aluminum phosphate adhesive[J]. *Int J Adhes Adhes*, 2020, 100: 102627.
- [24] 杨保平, 丁勇, 易戈文, 等. 磷酸盐基耐高温粘结涂层性能及功能填料对其性能的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2011, 29(3): 346–350.
YANG Baoping, DING Yong, YI Gewen, et al. *J Mater Sci Eng (in Chinese)*, 2011, 29(3): 346–350.
- [25] 崔韶丽, 陈宁, 霍冀川. 磷酸铝系晶型转变与控制的研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2013, 42(1): 93–98.
CUI Shaoli, CHEN Ning, HUO Jichuan. *J Syn Crys (in Chinese)*, 2013, 42(1): 93–98.
- [26] SHANG X, MARQUES E A S, J. MACHADO J M, et al. Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends[J]. *Compos Part B-Eng*, 2019, 177(C): 107363.
- [27] APANASEVICH Natalia, SOKAL Aliaksei, LAPKO Konstantin, et al. Phosphate ceramics–carbon nanotubes composites: Liquid aluminum phosphate vs solid magnesium phosphate binder[J]. *Ceram Int*, 2015, 41(9): 12147–12152.
- [28] 李良锋, 吕福特, 马雪, 等. 固化剂对磷酸盐粘结剂固化行为的影响研究[J]. *人工晶体学报*, 2014, 43(5): 1311–1316.
LI Liangfeng, LYU Fute, MA Xue, et al. *J Syn Crys (in Chinese)*, 2014, 43(5): 1311–1316.
- [29] JIA Yulong, WAN Hongqi, CHEN Lei, et al. Effects of phosphate binder on the lubricity and wear resistance of graphite coating at elevated temperatures[J]. *Surf Coating Technol*, 2017, 315: 490–497.
- [30] HAO Ruihua, LIU Jiachen, DONG Xue, et al. High-temperature shear strength and bonding mechanism of the mullite ceramic/fiber brick component joined by phosphate adhesive[J]. *Int J Appl Ceram Technol*, 2013, 10(6): 978–985.
- [31] KIJKOWSKA Regina. Thermal decomposition of lanthanide orthophosphates synthesized through crystallisation from phosphoric acid solution[J]. *Thermochim Acta*, 2003, 404(1–2): 81–88.