

金属 Cu 和 5YSZ 陶瓷的“闪连”研究

李汶金, 娄程广, 张 帅, 苏兴华

(长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710061)

摘 要: 陶瓷与金属的连接能满足工程领域对高性能结构部件的需求。然而, 金属和陶瓷热膨胀系数的显著差异, 以及金属对陶瓷表面的润湿性较差, 使得陶瓷与金属的连接面临诸多挑战。本研究采用“闪连”技术, 在电场/电流的辅助作用下和相对低的温度下实现了金属 Cu 和 5YSZ(5%氧化钇稳定氧化锆, 摩尔分数)陶瓷的快速连接。研究了电场强度、电流密度和连接时间对金属 Cu 和 5YSZ“闪连”行为和连接程度的影响, 分析讨论了金属 Cu 和 5YSZ 的“闪连”机理。结果表明, 在温度为 753 °C、电流密度为 10 A/cm²、连接时间为 3 min 的条件下, 金属 Cu 和 5YSZ 的连接界面最致密。进一步提高温度、增大电流或延长“闪连”时间, 连接接头开始恶化, 甚至发生断裂。当“闪连”发生时, 样品中会发生电化学反应, 并产生氧空位缺陷。物相分析和微观结构分析表明, 在电化学反应作用下, 原子扩散促进了 Cu 和 5YSZ 的连接, 其中 Cu 原子扩散进入 5YSZ 晶格中, 被还原的 Zr 原子扩散进入 Cu 晶格中。此外, 电场方向对 Cu 和 5YSZ 的连接有极大影响。当电场方向从 5YSZ 到 Cu 时, 可实现良好连接; 当电场方向从 Cu 到 5YSZ 时, 二者无法实现连接。

关 键 词: 连接; 电场; 低温; 电化学反应; 氧空位

中图分类号: TB32 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2025)09-0957-07

Flash Joining of Metal Cu with 5YSZ Ceramics

LI Wenjin, LOU Chengguang, ZHANG Shuai, SU Xinghua

(School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Joining of ceramic and metal meets the engineering needs for high-performance structural components. However, the significant difference in thermal expansion coefficients between metals and ceramics, as well as the poor wettability of metals on ceramic surfaces, makes the joining of ceramics and metals face many challenges. In this study, “flash joining” technology was used to achieve the rapid connection of metal Cu and 5YSZ (5% yttria stabilized zirconia, molar fraction) ceramics at a relatively low temperature under the assistance of electric field/current. The effects of electric field, current density, and joining time on the “flash joining” behavior and the degree of bonding between Cu and 5YSZ were investigated. Moreover, the mechanism of “flash joining” between Cu and 5YSZ was discussed. The results showed that the densest joint between Cu and 5YSZ was obtained at a temperature of 753 °C, a current density of 10 A/cm² and a joining time of 3 min. However, the joint began to deteriorate and even fracture when the temperature, current and joining time were further increased. Electrochemical reactions occurred during the “flash joining” process, introducing oxygen vacancy defects. Phase

收稿日期: 2024-12-12; 收到修改稿日期: 2025-03-21; 网络出版日期: 2025-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(52472064) National Natural Science Foundation of China (52472064)

作者简介: 李汶金(2000–), 女, 硕士研究生. E-mail: 1691993742@qq.com

LI Wenjin (2000–), female, Master candidate. E-mail: 1691993742@qq.com

通信作者: 苏兴华, 教授. E-mail: suxinghua@chd.edu.cn

SU Xinghua, professor. E-mail: suxinghua@chd.edu.cn

and microstructural analyses indicated that atomic diffusion driven by electrochemical reactions facilitated the joining of Cu and 5YSZ, with Cu atoms diffusing into the 5YSZ lattice and reduced Zr atoms diffusing into the Cu lattice. In addition, the direction of the electric field had a significant impact on the bonding between Cu and 5YSZ. A good bond was achieved when the electric field was oriented from 5YSZ to Cu, while the bonding did not occur when the electric field direction was from Cu to 5YSZ.

Key words: joining; electric field; low temperature; electrochemical reaction; oxygen vacancy

陶瓷材料具有高强度、耐腐蚀、耐高温等优点,是工业领域必不可少的材料,但其脆性大、熔点高的特点又限制了其可加工性^[1]。金属具有良好的加工性和优异的导电性,将其与陶瓷进行连接形成陶瓷-金属复合结构,可弥补陶瓷材料可加工性差的缺陷,从而满足工程应用中对高性能结构部件的需求^[2-4]。现有的连接封装技术包括液态钎焊和固态扩散两大类。传统的液态钎焊采用比母材熔点低材料作为钎料,高温下中间层钎料熔融变成液相,润湿母材界面,从而实现焊接^[2, 5]。然而,钎焊工作温度高,极易引入杂质,进而影响接头的性能。固态扩散法^[6-7]是在一定温度和压力下,将焊接材料表面直接接触,通过原子间的接触使焊接区域成分和组织均匀化,从而形成牢固接头。然而,固态扩散法焊接时间较长、工作温度较高,不仅能耗大,而且易导致母材强度退化。随着新能源和电子领域的飞速发展,陶瓷-金属复合结构在封装领域的应用越来越广。因此,迫切需要开发一种新的连接技术,以实现金属和陶瓷的低温快速连接。

闪烧是一种新型的电场/电流辅助烧结技术,可将陶瓷与电源连接构成串联回路,在热场和电场/电流的协同作用下,样品会强烈发光,并快速实现致密化,该技术可以在远低于传统烧结温度下快速制备致密的陶瓷材料^[8-10]。受闪烧启发, Xia 等^[11]首次提出了“闪连”(Flash Joining)技术,通过对表面紧密接触的待连接样品施加一定的电场强度和电流密度,可以在闪烧现象发生的同时完成材料的连接。在“闪连”过程中,施加的电压主要促进闪烧,而电流则是影响接头强度的重要因素。在一定电流密度范围内,接头强度随着电流密度增大而提高^[12-14]。近年来,“闪连”技术得到了广泛关注,已实现了 $\text{ZrO}_2\text{-ZrO}_2$ ^[15]、 SiC-SiC ^[16]、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ ^[17]和 $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ^[18]等陶瓷与陶瓷的连接。在金属和陶瓷的连接方面也有相关的“闪连”研究报道,如 $\text{ZrO}_2\text{-不锈钢(AISI304、S-S)}$ ^[19]、 YAG-Ti6Al4V ^[20]、 $\text{BaTiO}_3\text{-NiCrFe}$ 中熵合金^[21]等的低温快速连接。

ZrO_2 陶瓷具有卓越的力学性能和高离子电导率,被广泛应用于工业领域^[22-26]。金属 Cu 具有优异的

导电性能和韧性,在电子工业领域有重要应用^[27-29]。目前,关于金属 Cu 和 ZrO_2 陶瓷的“闪连”研究未见报道。本工作开展了金属 Cu 和 ZrO_2 陶瓷的“闪连”研究,以期实现快速低温连接。同时,系统研究了电场、电流密度、连接时间、炉温对连接效果的影响,并讨论了连接机理。

1 实验方法

1.1 实验原料

实验原料为市售的 5YSZ(苏州茜恩特种陶瓷有限公司)和金属 Cu(合肥翁核金属材料有限公司),其中 5YSZ 陶瓷片的尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,金属 Cu 片的厚度为 0.2 mm ,依次用砂纸对样品的连接表面进行机械打磨和抛光,直至粗糙度达到 $1\text{ }\mu\text{m}$,然后超声清洗 30 min ,放入 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥箱中干燥 12 h 。

1.2 “闪连”连接

“闪连”连接装置如图 1 所示,将 Cu 片夹在 5YSZ 陶瓷片之间,然后通过铂片电极与直流稳压电源(HPS 0614,杭州蓝仪电子有限公司)连接构成串联回路,利用氧化铝片和氧化铝柱给连接样品施加约 1 MPa 的压力,以保证 Cu 片和 5YSZ 陶瓷片紧密接触。随后,将连接样品放置于马弗炉内进行热处理,升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,施加的电场强度为

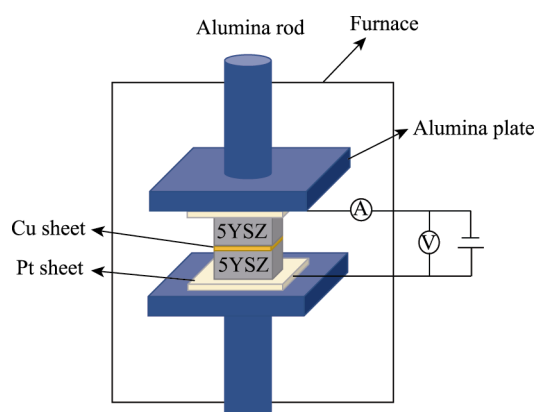


图 1 “闪连”连接装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the flash joining apparatus

80~140 V/cm。当达到某一温度时,发生闪烧现象,电源由电压控制模式转变为电流控制模式,在恒定的限制电流下保持 1~7 min 后,关闭电源和马弗炉,连接样品随炉自然冷却至室温。上述实验在氩气气氛下进行。

1.3 测试与表征

采用德国布鲁克 D8 Advance 型 X 射线衍射仪(X-ray Diffractometer, XRD)表征样品物相;采用日本日立 S-4800 型场发射电子扫描显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察样品接头的微观形貌,并用能量色散 X 射线谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)分析样品接头处的元素分布。

2 结果与讨论

图 2 为在 80~140 V/cm 电场作用下,通过样品的电流密度随炉温的变化曲线。可以看出,随着炉温升高,电流缓慢增加,当炉温升至一定数值时,电流密度在短时间内急剧增大至设定极限值(10 A/cm^2),此时样品发生了“闪连”^[30]。当电场强度为 80、100、120、140 V/cm 时,样品分别在 753、684、641、615 °C 实现“闪连”。连接样品发生“闪连”的炉温随电场强度的增加而降低,这与闪烧研究中闪烧温度与电场强度的规律相一致^[31-32]。

图 3 为在 80~140 V/cm 电场强度下,连接样品的功率耗散随炉温的 Arrhenius 曲线。当温度升高到一定数值时,功率密度随温度的升高趋势由线性增加转变为非线性增加,这个现象进一步证实了“闪连”的发生^[31-33]。

为了研究“闪连”后连接样品的物相变化,将 5YSZ 陶瓷和 Cu 片剥离后,对 5YSZ 陶瓷进行 XRD 测试,结果如图 4 所示。XRD 图谱上的衍射峰分别对应于 ZrO_2 (PDF#80-0784)和 Cu (PDF#04-0836),表明“闪连”连接过程中,Cu 扩散进入了 5YSZ 陶瓷中。

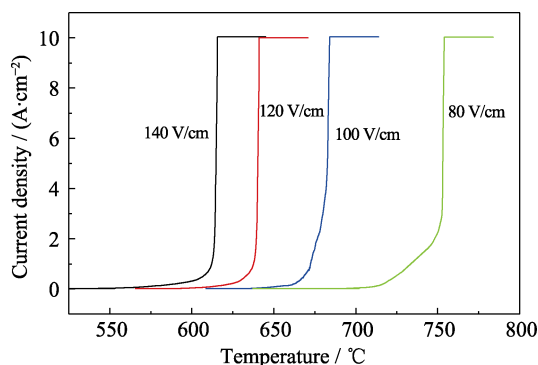


图 2 通过样品的电流密度随炉温的变化曲线

Fig. 2 Current density through the sample as a function of furnace temperature

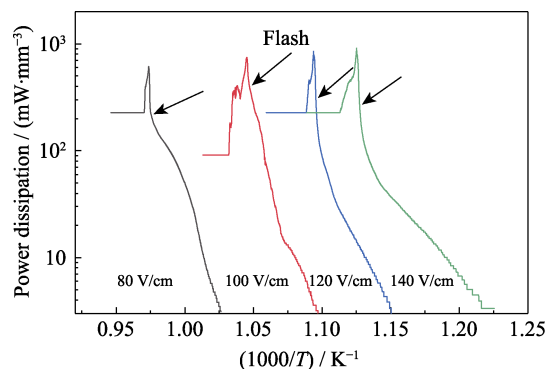


图 3 功率耗散随炉温的变化曲线

Fig. 3 Power dissipation as a function of furnace temperature

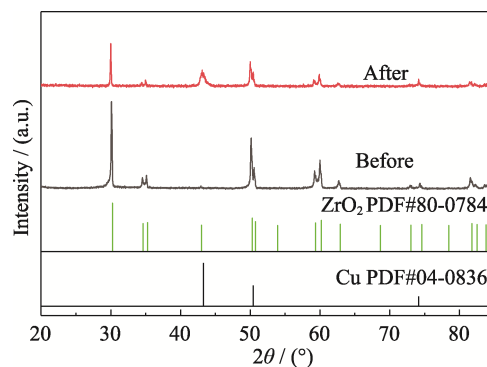


图 4 “闪连”前后 5YSZ 陶瓷的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of the 5YSZ ceramics before and after flash joining

在“闪连”实验中发现,电场方向显著影响 Cu 和 5YSZ 的连接。当电场方向从 5YSZ 到 Cu 时,二者可实现连接;而当电场方向从 Cu 到 5YSZ 时,二者无法实现连接。图 5 为“闪连”前后样品的实物照片,图中虚线左侧为“闪连”前样品,“闪连”发生后,三者独立分开;虚线右侧是“闪连”后样品,“闪连”后样品 1 和 2 实现了连接,样品 3 仍处于独立分开状态,且颜色变黑。这是因为样品中产生了大量氧空位,导致带隙变窄,对可见光的吸收增强^[34-36]。

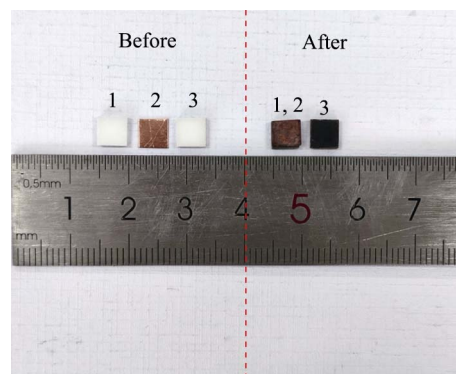


图 5 “闪连”前(左: 1-5YSZ; 2-Cu; 3-5YSZ)后(右: 1, 2-Cu-5YSZ; 3-5YSZ)样品的照片

Fig. 5 Photographs of the samples before (left: 1-5YSZ; 2-Cu; 3-5YSZ) and after flash joining (right: 1, 2-Cu-5YSZ joined sample; 3-5YSZ)

在电场强度为 80 V/cm、电流密度为 10 A/cm²、“闪连”温度为 753 °C 的条件下,研究了“闪连”时间(2、3、5、7 min)对接头的影响。图 6 展示了该条件下得到的接头的 SEM 照片。当“闪连”时间为 2 min 时,样品连接处存在孔隙,此时 Cu 和 5YSZ 的连接面积较小,连接不紧密,如图 6(a)所示。当“闪连”时间延长到 3 min 时,样品接头处致密无孔隙,说明 Cu 和 5YSZ 连接良好(图 6(b))。当“闪连”时间延长到 5 min 时,接头处出现较大空隙(图 6(c))。当“闪连”时间达到 7 min 时,连接界面处产生断裂,Cu 和 5YSZ 彻底分开(图 6(d))。这些结果表明,“闪连”时间严重影响连接效果。当“闪连”时间较短时,Cu 和 5YSZ 接头处原子的扩散受到限制,连接处存在空隙。随着“闪连”时间延长,接头处原子扩散增强,连接面积增加,当“闪连”时间达到 3 min 时,接头处原子扩散充分完成,实现良好连接。但是随着“闪连”时间继续延长,接头处产生的氧空位增加,导致接头处产生气孔,连接面发生开裂。

对不同“闪连”时间所得样品的连接界面进行了电子顺磁共振(EPR)测试,以评估氧空位的含量。如图 7 所示,不同时间处理后的样品均显示相似的 EPR 信号($g=2.003$),表明样品中存在氧空位^[37]。“闪连”5 min 的样品表现出更高的 EPR 信号强度,说明随着“闪连”时间的延长,氧空位的含量增加。

进一步研究“闪连”温度对连接的影响。图 8 是电流密度为 10 A/cm²、“闪连”时间为 3 min、“闪连”温度分别为 641 °C(电场强度为 120 V/cm)和 780 °C(电场强度为 60 V/cm)条件下所得接头的 SEM 照片。当“闪连”温度从 641 °C(图 8(a))升至 753 °C(图 6(b))时,

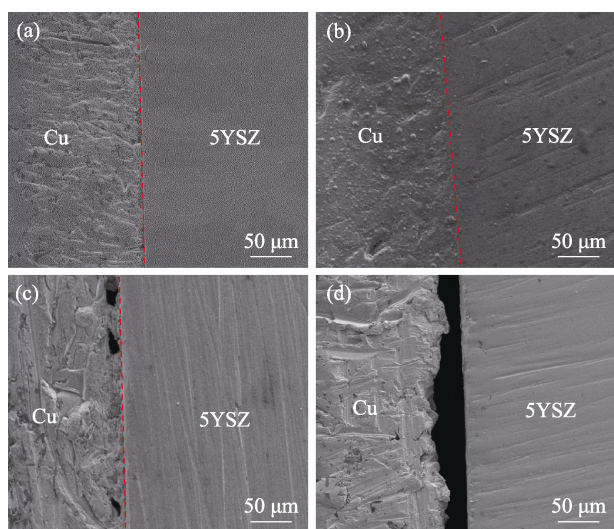


图 6 不同“闪连”时间所得接头的 SEM 照片

Fig. 6 SEM images of the joints with different flash joining times (a) 2 min; (b) 3 min; (c) 5 min; (d) 7 min. Preparation condition: 80 V/cm, 10 A/cm², 753 °C

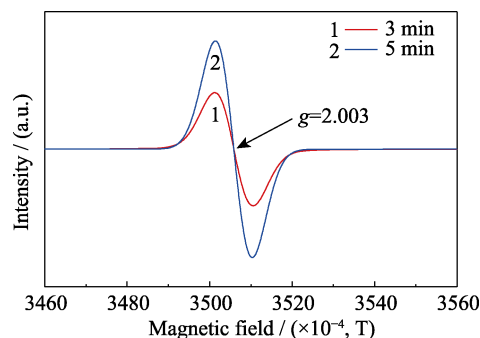


图 7 不同“闪连”时间下样品的 EPR 图谱

Fig. 7 EPR spectra of the samples with different flash joining times

Preparation condition: 80 V/cm, 10 A/cm²

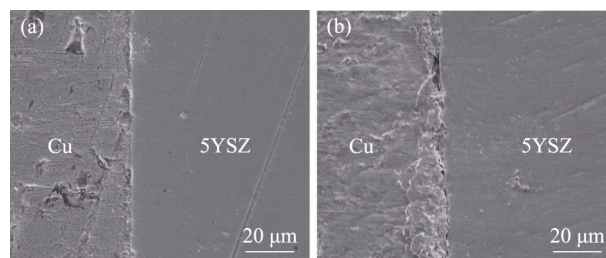


图 8 不同“闪连”温度所得接头的 SEM 照片

Fig. 8 SEM images of the joints flash-jointed at different flash joining temperatures

(a) 641 °C; (b) 780 °C. Preparation condition: 10 A/cm², 3 min

接头致密程度增强;当“闪连”温度升高至 780 °C 时(图 8(b)),接头处产生空隙,这可能是温度过高,氧空位的快速迁移积聚所致^[32]。然而,“闪连”温度过低也无法实现 Cu 和 5YSZ 的连接。实验结果表明,当“闪连”温度为 630 和 610 °C 时,即使电流密度增加至 12 A/cm²,连接时间延长为 5 min,也无法实现连接。这主要是因为“闪连”是在电场和热场协同作用下的原子扩散传质过程,在较低温度下,原子的扩散动力学过程难以发生,导致金属和陶瓷无法连接。在本研究中,当“闪连”温度分别为 641 和 753 °C 时,Cu 和 5YSZ 的接连面积增大,可实现最佳连接,如图 8(a)和图 6(b)所示。

图 9 为“闪连”温度为 753 °C、电流密度为 12 A/cm²、“闪连”时间为 3 min 条件下所得接头的 SEM 照片。随着电流密度从 10 A/cm²(图 6(b))增大至 12 A/cm²,接头处开始产生连续的孔隙,而且在靠近 5YSZ 的连接处,陶瓷有碎裂现象,连接界面恶化。这主要是因为电流密度的增加引起 5YSZ 中氧空位浓度的增大,进而导致空隙增多,降低接头质量^[10-11]。因此,电流密度对 Cu 和 5YSZ 的连接也有重要影响,过大的电流密度会恶化连接效果。在本研究中,最佳的电流密度为 10 A/cm²。

通过 EDS 分析了“闪连”温度为 753 °C、电流密度为 10 A/cm²、“闪连”时间为 3 min 条件下所得接头

的元素分布情况, 如图 10 所示。接头处主要以锆(Zr)和铜(Cu)元素为主, 而连接界面处发生连续变化, Zr 和 Cu 相互均匀扩散在接头界面两侧, 再次证实 5YSZ 与 Cu 连接良好。

此外, 对剥离掉 Cu 后的 5YSZ 进行了 X 射线光电子能谱(XPS)测试, 结果如图 11 所示。“闪连”后, 在 529.0、529.9 和 531.2 eV 位置处的特征峰分别对应晶格氧(O_L)、氧空位(O_V)和吸附氧(O_C)^[36, 38], 且氧空位含量最高。在 Cu 元素的 XPS 测试中, Cu2p 谱图中 932.7 和 952.5 eV 位置处对应 Cu^0 , 并在 934.8 和 955.1 eV 位置处发现极少 Cu^{2+} , 而在 Cu 俄歇谱图(CuKLL)的 565.4、568.0、570.5 和 573.0 eV 位置处均发现存在 Cu^0 , 这与前人的研究结果一致^[39-41]。综合 Cu2p 与 CuKLL 分析, 可判定“闪连”后的焊缝处确有大量金属 Cu 存在。

对 Cu 与 5YSZ 的连接过程进行了机理分析, 如

图 12 所示。在“闪连”过程中, 当电场方向从 5YSZ 到 Cu 时, 可以把 5YSZ 当作正极, Cu 当作负极。在电场作用下, 5YSZ 中产生大量的带正电荷的氧空位, 如反应(1)所示^[42]。

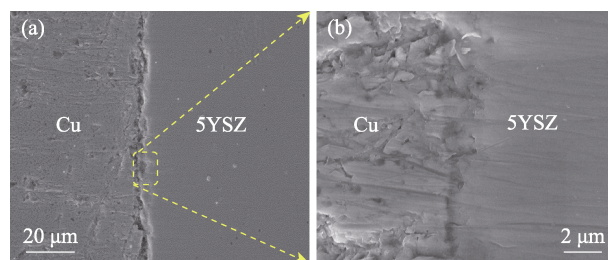


图 9 电流密度 12 A/cm²、“闪连”温度 753 °C、“闪连”时间 3 min 条件下所得接头的 SEM 照片

Fig. 9 SEM images of the joint flash-jointed at a current density of 12 A/cm², a flash joining temperature of 753 °C, and a flash joining time of 3 min

(b) Local area magnification of Fig. (a)

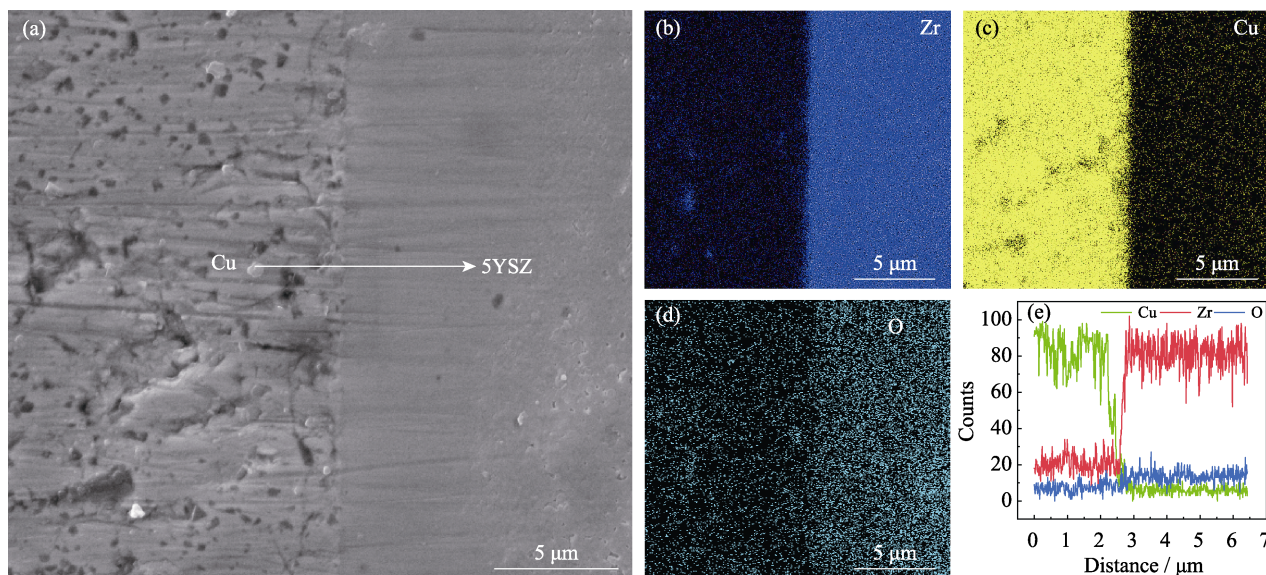


图 10 电流密度 10 A/cm²、“闪连”温度 753 °C、“闪连”时间 3 min 条件下所得接头的(a) SEM 照片及(b-e)元素分布图

Fig. 10 (a) SEM image and (b-e) element distributions of the joint flash-jointed at a current density of 10 A/cm², a flash joining temperature of 753 °C, and a flash joining time of 3 min

Colorful figures are available on website

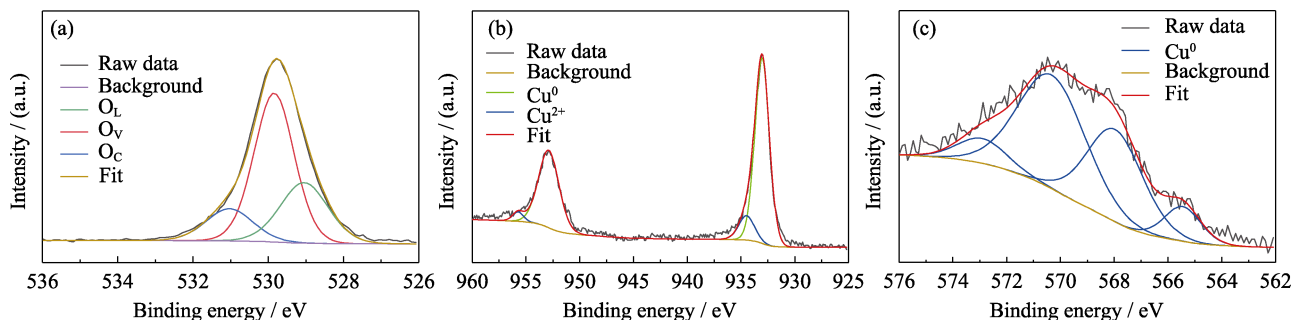


图 11 “闪连”后样品的(a) O1s、(b) Cu2p 和(c) CuKLL 的 XPS 谱图

Fig. 11 XPS spectra of (a) O1s, (b) Cu2p and (c) CuKLL of the samples after flash joining

Colorful figures are available on website

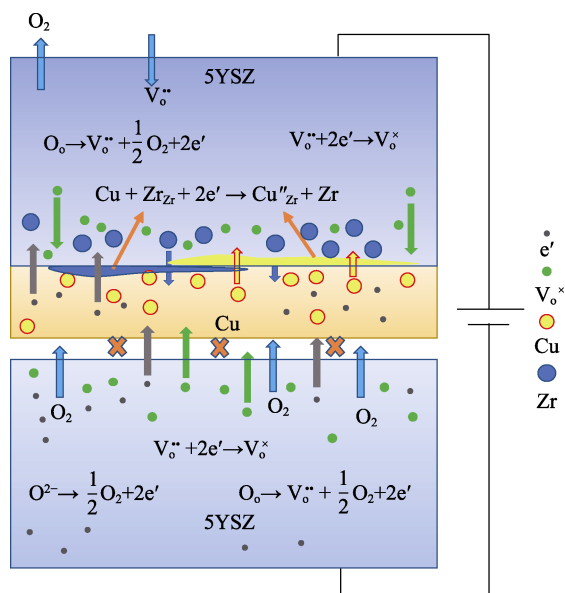
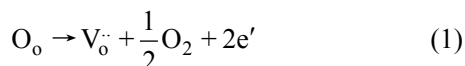


图 12 “闪连”机理图

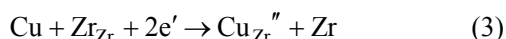
Fig. 12 Diagram of flash joining mechanism



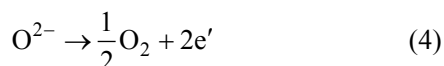
这些带正电荷的氧空位在电场作用下扩散迁移至靠近 Cu 负极一侧, 捕获电子形成不带电的氧空位(反应(2))^[42-44]。



这些不带电的氧空位逐渐积聚形成气孔。随着电流密度的增加, “闪连”温度的升高, 以及“闪连”时间的延长, 氧空位快速积聚, 在 5YSZ 和 Cu 的接头处形成孔洞, 导致连接效果不佳, 如图 6(c)、图 8(b)和图 9 所示。同时, 在 Cu 与 5YSZ 的连接界面处, 发生如下反应:



通过该反应, Cu 扩散进入 5YSZ 中, 而 Zr 扩散进入 Cu 中, 从而实现了 Cu 和 5YSZ 的良好连接。因此, Cu 与 5YSZ 的“闪连”实质上是由电化学反应引发的原子扩散过程^[45]。此外, 氧空位的形成也促进了原子扩散。当电流密度较小时, 反应(3)的反应速率较慢, 氧空位的生成速率也较慢, 这些因素总体上导致连接效果不佳。随着电流密度增加, 反应速率和氧空位生成速率加快, 使得原子的扩散速率增大, 此时形成良好的连接。然而, 当电流密度超过一定数值后, 生成的大量氧空位导致出现孔洞^[46], 恶化连接质量。当电场方向从 Cu 到 5YSZ 时, 上述反应无法实现, 不能实现二者的连接^[13]。当电场方向从金属 Cu 到 5YSZ 陶瓷时, 在靠近连接界面的 5YSZ 侧发生反应(1)和反应(4):



这些反应在连接界面处产生大量氧气, 氧气不能及时释放导致产生大量孔洞。与此同时, 在金属 Cu 和 5YSZ 连接界面处还会继续发生电化学反应(2), 形成大量氧空位。

当发生闪烧时, 电流激增, 提高了电化学反应(1)、(2)和(4)的速率, 导致在极短时间内产生大量氧空位, 氧空位聚集会成为气孔或孔洞, 从而破坏 Cu 与 5YSZ 的连接。

3 结论

利用“闪连”技术, 在电场强度为 80~140 V/cm、电流密度为 10~12 A/cm² 以及相对低的温度(753 °C)下, 3 min 内实现了 Cu 与 5YSZ 的快速连接。研究发现, “闪连”实质上是电化学反应引发的原子扩散过程。电场作用下氧空位的生成为原子扩散提供了路径, 紧密接头的形成主要是由于 Cu 原子扩散进入 5YSZ 中, 被还原的 Zr 原子扩散进入 Cu 中。当电场方向从 5YSZ 到 Cu 时, 可实现良好连接; 当电场方向从 Cu 到 5YSZ 时, 二者无法实现连接。

参考文献:

- [1] HUANG J, DU K F, WANG P L, *et al.* Electrochemical preparation and homogenization of face-centered FeCoNiCu medium entropy alloy electrodes enabling oxygen evolution reactions. *Electrochimica Acta*, 2021, **378**: 138142.
- [2] CAO Y, XU G C, SHEN P. Flash joining of 3YSZ and 430 SS using Ag-CuO filler. *Ceramics International*, 2022, **48**(3): 4005.
- [3] LIU Y H, HU J D, ZHANG Y P, *et al.* Joining of zirconia and Ti-6Al-4V using a Ti-based amorphous filler. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, **27**(7): 653.
- [4] HANSON W B, IRONSIDE K I, FERNIE J A. Active metal brazing of zirconia. *Acta Materialia*, 2000, **48**(18/19): 4673.
- [5] CAI Q S, LIU W S, MA Y Z, *et al.* Diffusion brazing of tungsten and steel using Ti-Ni liquid phase forming interlayer. *Fusion Engineering and Design*, 2015, **91**: 67.
- [6] POLANCO R, MIRANZO P, OSENDI M I. Fabrication and microstructure of a ZrO₂-Ni functionally graded bonding interlayer using the airbrush spraying method. *Acta Materialia*, 2006, **54**(8): 2215.
- [7] POLANCO R, MIRANZO P, OSENDI M I. ZrO₂-Ni functionally graded joining interlayers: microstructure and properties. *Advanced Engineering Materials*, 2007, **9**(11): 1005.
- [8] COLOGNA M, RASHKOVA B, RAJ R. Flash sintering of nanograin zirconia in <5 s at 850 °C. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, **93**(11): 3556.
- [9] STEIL M C, MARINHA D, AMAN Y, *et al.* From conventional AC flash-sintering of YSZ to hyper-flash and double flash. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, **33**(11): 2093.
- [10] DOWNS J A, SGLAVO V M. Electric field assisted sintering of cubic zirconia at 390 °C. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, **96**(5): 1342.
- [11] XIA J B, REN K, WANG Y G. One-second flash joining of

- zirconia ceramic by an electric field at low temperatures. *Scripta Materialia*, 2019, **165**: 34.
- [12] MUNDRA R, GUPTA P, EQBAL A, *et al.* Flash joining of metal-ceramic multi-layered sandwich structure. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, **44(1)**: 353.
- [13] XIA J B, REN K, WANG Y G, *et al.* Reversible flash-bonding of zirconia and nickel alloys. *Scripta Materialia*, 2018, **153**: 31.
- [14] YANG B, SHEN P, YU L T, *et al.* Electrochemically-driven direct joining of Ni and ZrO₂. *Scripta Materialia*, 2017, **141**: 41.
- [15] XIA J B, REN K, LIU W, *et al.* Ultrafast joining of zirconia ceramics using electric field at low temperatures. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, **39(10)**: 3173.
- [16] ZHOU L, LI C, SI X Q, *et al.* Flash joining of SiC at ultra-low temperature. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, **43(6)**: 2713.
- [17] XIA J B, REN K, WANG Y G. Flash joining of alumina ceramics under a small current density. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, **41(4)**: 2782.
- [18] XIA J B, REN K, WANG Y G. Rapid joining of heterogeneous ceramics with a composite interlayer under the action of an electric field. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, **41(14)**: 7164.
- [19] LIU G W, QIAO G J, WANG H J, *et al.* Pressureless brazing of zirconia to stainless steel with Ag-Cu filler metal and TiH₂ powder. *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, **28(14)**: 2701.
- [20] GAMBARO S, VALENZA F, PASSERONE A, *et al.* Brazing transparent YAG to Ti6Al4V: reactivity and characterization. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, **36(16)**: 4185.
- [21] XIA J B, REN W. Flash joining of BaTiO₃ ceramic to NiCrFe medium-entropy alloy by using an electric field. *Ceramics International*, 2023, **49(24)**: 40924.
- [22] WANG L, YU H, HAO Z D, *et al.* Investigating the effect of solid loading on microstructure, mechanical properties, and translucency of highly translucent zirconia ceramics prepared via stereolithography-based additive manufacturing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, **144**: 105952.
- [23] LIU C, ZHENG J J, LIU X F, *et al.* Facile laser-based process of superwetting zirconia ceramic with adjustable adhesion for self-cleaning and lossless droplet transfer. *Applied Surface Science*, 2023, **638**: 158069.
- [24] GHAEMI M H, REICHERT S, KRUPA A, *et al.* Zirconia ceramics with additions of alumina for advanced tribological and biomedical applications. *Ceramics International*, 2017, **43(13)**: 9746.
- [25] LIU D G, FAN J Y, ZHAO K, *et al.* Preparation of super-strong ZrO₂ ceramics using dynamic hot forging. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, **43(2)**: 733.
- [26] BICALHO L A, BAPTISTA C A R P, SOUZA R C, *et al.* Fatigue and subcritical crack growth in ZrO₂-bioglass ceramics. *Ceramics International*, 2013, **39(3)**: 2405.
- [27] YANG H Y, MA Z C, LEI C H, *et al.* High strength and high conductivity Cu alloys: a review. *Science China Technological Sciences*, 2020, **63(12)**: 2505.
- [28] LI X W, ZHANG D T, QIU C, *et al.* Microstructure and mechanical properties of dissimilar pure copper/1350 aluminum alloy butt joints by friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22(6)**: 1298.
- [29] MUHAMMAD N A, WU C S. Ultrasonic vibration assisted friction stir welding of aluminium alloy and pure copper. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, **39**: 114.
- [30] YOSHIDA H, HAYASAKA H, SOGA K, *et al.* Doping effect on the flash sintering of Y₂O₃: promotion of densification and optical translucency. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, **40(15)**: 6053.
- [31] YANG J X, FU M Y, TIAN Q, *et al.* Preparation of Gd₂Zr₂O₇ nanoceramics by flash sintering and two-step flash sintering. *Ceramics International*, 2023, **49(11)**: 16594.
- [32] JIA Y J, SU X H, WU Y J, *et al.* Flash sintering of 3YSZ/Al₂O₃-platelet composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, **103(4)**: 2351.
- [33] JHA S K, TERAUDS K, LEBRUN J M, *et al.* Beyond flash sintering in 3 mol% yttria stabilized zirconia. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2016, **124(4)**: 283.
- [34] BIESUZ M, PINTER L, SAUNDERS T, *et al.* Investigation of electrochemical, optical and thermal effects during flash sintering of 8YSZ. *Materials*, 2018, **11(7)**: 1214.
- [35] DASHTBOZORG B, SHI F Z, TAGLIAFERRO A, *et al.* Plasma defect-engineering of bulk oxygen-deficient zirconia. *Acta Materialia*, 2024, **262**: 119457.
- [36] SU X H, LI W J, CHEN D, *et al.* Rapid fabrication of oxygen-deficient zirconia by flash sintering treatment. *Journal of Advanced Ceramics*, 2024, **13(11)**: 1881.
- [37] ZHANG J J, GAO Y F, JIA X R, *et al.* Oxygen vacancy-rich mesoporous ZrO₂ with remarkably enhanced visible-light photocatalytic performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, **182**: 113.
- [38] LV H F, ZHOU Y J, ZHANG X M, *et al.* Infiltration of Ce_{0.8}Gd_{0.2}O_{1.9} nanoparticles on Sr₂Fe_{1.5}Mo_{0.5}O_{6-δ} cathode for CO₂ electroreduction in solid oxide electrolysis cell. *Journal of Energy Chemistry*, 2019, **35**: 71.
- [39] LIU P, HENSEN E J M. Highly efficient and robust Au/MgCuCr₂O₄ catalyst for gas-phase oxidation of ethanol to acetaldehyde. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, **135(38)**: 14032.
- [40] GAO B H, TAN B M, LIU Y L, *et al.* A study of FTIR and XPS analysis of alkaline-based cleaning agent for removing Cu-BTA residue on Cu wafer. *Surface and Interface Analysis*, 2019, **51(5)**: 566.
- [41] FINŠGAR M, KOVAČ J, MILOŠEV I. Surface analysis of 1-hydroxybenzotriazole and benzotriazole adsorbed on Cu by X-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of the Electrochemical Society*, 2010, **157(2)**: C52.
- [42] XIA J B, REN K, WANG Y G. Reversible joining of zirconia to titanium alloy. *Ceramics International*, 2019, **45(2)**: 2509.
- [43] JANEK J, KORTE C. Electrochemical blackening of yttria-stabilized zirconia-morphological instability of the moving reaction front. *Solid State Ionics*, 1999, **116(3/4)**: 181.
- [44] XIA J B, DING T, REN W, *et al.* Ceramics/metals joining under the influence of electric field: a review. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, **43(12)**: 5061.
- [45] ZHANG K Y, LI T Y, ZHAO Z Y, *et al.* Flash joining of Y₂O₃ transparent ceramic to titanium alloy. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, **44(1)**: 408.
- [46] XIA J B, REN W, ZHANG Y X, *et al.* Fast joining of 8YSZ to NiCrFe medium-entropy alloy by using an electric field. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, **43(10)**: 4431.