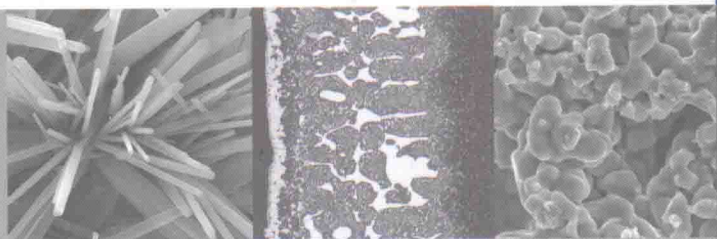




“十二五”国家重点图书出版规划项目  
材料科学技术著作丛书

# 陶瓷与金属的连接技术(下册)

冯吉才 张丽霞 曹健 著



科学出版社

## 《材料科学技术著作丛书》编委会

顾 问 师昌绪 严东生 李恒德 柯 俊

颜鸣皋 肖纪美

名誉主编 师昌绪

主 编 黄伯云

编 委 (按姓氏笔画排序)

千 勇 才鸿年 王占国 卢 柯

白春礼 朱道本 江 亮 李元元

李光宪 张 泽 陈立泉 欧阳世翥

范守善 罗宏杰 周 玉 周 廉

施尔畏 徐 坚 高瑞平 屠海令

韩雅芳 黎懋明 戴国强 魏炳波

## 前 言

结构陶瓷具有质量轻、强度高、耐高温及耐腐蚀等优点,在航空航天、能源、机械工程等领域得到广泛应用,为了克服其难加工、脆性大等缺点,实际应用中常采用陶瓷和金属的连接结构。由于陶瓷和金属物理性能、化学性能以及力学性能存在很大差异,常规的熔化焊接方法不能实现它们之间的连接,目前常用的方法是钎焊及扩散连接。

要实现陶瓷和金属的可靠连接,必须解决钎料合金对陶瓷母材的润湿铺展、界面脆性化合物控制及接头应力缓和等问题。多年来,作者所在的科研团队致力于结构陶瓷和常用金属材料的钎焊及扩散连接的应用基础研究、特种连接技术的开发及连接设备的研制,探讨了钎料成分、表面状态、连接工艺等因素对润湿的影响,阐明了陶瓷和金属接头的界面反应过程、反应相的形成条件和成长规律、残余应力的缓解措施,研制出了耐高温钎料、复合中间层及表面改性-真空连接一体化设备。

本书第1章主要介绍润湿、界面反应及应力缓解等共性基础问题;第2章至第4章主要介绍碳化硅陶瓷和钛及钛合金、铬及镍铬合金、难熔金属铌及钽的扩散连接;第5章和第6章分别介绍TiC金属陶瓷与钢、TiAl合金的连接;第7章和第8章分别介绍 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷、 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ 陶瓷与TiAl合金的连接;第9章至第11章主要介绍 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与钛合金、铝合金、Kovar合金的钎焊;第12章和第13章分别介绍 $\text{SiO}_2$ 陶瓷与钛合金、不锈钢的钎焊;第14章主要介绍 $\text{ZrO}_2$ 陶瓷与TiAl合金、纯镍和Kovar合金的连接。本书研究工作得到国家杰出青年科学基金(编号:50325517)、教育部新世纪优秀人才支持计划(编号:NCET-12-0155)、国家自然科学基金面上项目(编号:50175021、51174066、51275133)及青年基金(编号:50705022、50805038)的资助,先后有15名博士研究生、28名硕士研究生参与了本团队的研究工作,发表论文100余篇(SCI收录75篇、EI收录106篇),申报国家发明专利30余项(已授权19项),并和其他研究成果合获国家技术发明二等奖1项。

本书第1~4章、第10.2节由冯吉才完成,第5章、第10.1节、第11~13章由张丽霞完成,第6~9章、第14章由曹健完成。

作者衷心感谢国家自然科学基金委、教育部、总装备部预研局等单位在研究经费方面的资助;感谢为此研究工作付出辛勤汗水的团队成员、毕业以及在读的博士、硕士研究生;感谢为本研究提供实验帮助的分析测试、设备操作及维护的有关

人员;感谢科学出版社的编辑、印刷等工作人员为出版本书做出的奉献。

由于作者的水平有限,再加上分析测试手段及试验条件限制,部分内容还有待进一步完善和提高。对于书中的不足之处,敬请广大读者予以批评指正。

作 者

2015年6月

# 目 录

## 前言

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 第 9 章 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与 Ti6Al4V 钛合金的连接 .....               | 327 |
| 9.1 Ag-Cu 钎料钎焊 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与 Ti6Al4V 钛合金 .....         | 327 |
| 9.1.1 接头界面组织分析 .....                                                 | 328 |
| 9.1.2 工艺参数对接头界面组织的影响 .....                                           | 329 |
| 9.1.3 工艺参数对接头力学性能的影响 .....                                           | 331 |
| 9.1.4 中间层对接头组织与性能的影响 .....                                           | 332 |
| 9.2 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷表面原位生长晶须 .....                         | 337 |
| 9.2.1 以 $\text{B}_2\text{O}_3$ 为原料生长晶须 .....                         | 337 |
| 9.2.2 以 $\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{B}_2\text{O}_3$ 为原料生长晶须 ..... | 339 |
| 9.2.3 以 $\text{MnO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$ 为原料生成晶须 .....          | 342 |
| 9.2.4 晶须生长机理 .....                                                   | 344 |
| 9.3 原位生长晶须 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与 Ti6Al4V 钛合金的钎焊 .....          | 345 |
| 9.3.1 钎料的优选 .....                                                    | 346 |
| 9.3.2 界面组织分析 .....                                                   | 347 |
| 9.3.3 工艺参数对界面组织的影响 .....                                             | 351 |
| 9.3.4 工艺参数对接头抗剪强度的影响 .....                                           | 358 |
| 参考文献 .....                                                           | 362 |
| 第 10 章 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与 5A05 铝合金的钎焊 .....                 | 364 |
| 10.1 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与 5A05 铝合金的间接钎焊 .....                 | 365 |
| 10.1.1 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷表面金属化工艺研究 .....                     | 365 |
| 10.1.2 Al-Si-Mg 钎料钎焊接头界面及力学性能分析 .....                                | 375 |
| 10.2 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与 5A05 铝合金的扩散钎焊 .....                 | 390 |
| 10.2.1 活性金属化 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与 5A05 铝合金扩散钎焊方法的提出 .....     | 390 |
| 10.2.2 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与 5A05 铝合金接头界面结构的设计 .....           | 391 |
| 10.2.3 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷活性金属化的参数优化及结合机理 .....               | 393 |
| 10.2.4 5A05 铝合金扩散钎焊溶解量的数学模型 .....                                    | 418 |
| 10.2.5 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与 5A05 铝合金的高致密封接 .....              | 429 |
| 参考文献 .....                                                           | 438 |

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>第 11 章 <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> 陶瓷与 Kovar 合金的钎焊</b> | 440 |
| 11.1 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷/Ag-Cu-Ti/Kovar 合金界面结构            | 441 |
| 11.1.1 润湿试验结果及分析                                                 | 441 |
| 11.1.2 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷/Ag-Cu-Ti/Kovar 合金接头界面分析        | 442 |
| 11.1.3 工艺参数对 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷/Ag-Cu-Ti/Kovar 接头界面的影响   | 445 |
| 11.1.4 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷/Ag-Cu-Ti/Kovar 合金接头界面形成机制      | 448 |
| 11.2 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷/Ag-Cu-Ti/Kovar 合金接头性能            | 449 |
| 11.2.1 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷/Ag-Cu-Ti/Kovar 合金接头力学性能        | 449 |
| 11.2.2 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷/Ag-Cu-Ti/Kovar 合金接头气密性         | 458 |
| 11.2.3 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷/金属实际结构的焊接                      | 458 |
| 11.3 活性粉末钎料的研究                                                   | 462 |
| 11.3.1 活性粉末钎料的配制及性能                                              | 462 |
| 11.3.2 活性粉末钎料钎焊 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷与 Kovar 合金             | 464 |
| 参考文献                                                             | 470 |
| <b>第 12 章 <math>\text{SiO}_2</math> 陶瓷与 TC4 钛合金的钎焊</b>           | 473 |
| 12.1 采用 TiZrNiCu 钎料钎焊 $\text{SiO}_2$ 陶瓷与 TC4 钛合金                 | 473 |
| 12.1.1 $\text{SiO}_2$ 陶瓷/TiZrNiCu/TC4 接头的界面结构                    | 474 |
| 12.1.2 $\text{SiO}_2$ 陶瓷/TiZrNiCu/TC4 接头的性能                      | 481 |
| 12.2 采用 AgCuTi 钎料钎焊 $\text{SiO}_2$ 陶瓷与 TC4 钛合金                   | 487 |
| 12.2.1 $\text{SiO}_2$ 陶瓷/AgCuTi/TC4 接头的界面结构                      | 487 |
| 12.2.2 $\text{SiO}_2$ 陶瓷/AgCuTi/TC4 接头的性能                        | 494 |
| 12.3 采用 AgCu/Ni 复合箔片钎焊 $\text{SiO}_2$ 陶瓷与 TC4 钛合金                | 502 |
| 12.3.1 钎焊接头界面组织                                                  | 503 |
| 12.3.2 钎焊工艺参数对界面结构的影响                                            | 508 |
| 12.3.3 工艺参数对接头抗剪强度的影响                                            | 512 |
| 12.3.4 $\text{SiO}_2$ 陶瓷与钛合金的钎焊连接机理                              | 517 |
| 12.3.5 液态钎料在钛合金基体表面的冶金反应模型                                       | 538 |
| 12.3.6 陶瓷侧铺展及反应层成长行为                                             | 551 |
| 参考文献                                                             | 556 |
| <b>第 13 章 <math>\text{SiO}_2</math> 陶瓷与 30Cr3 钢的钎焊</b>           | 559 |
| 13.1 润湿试验                                                        | 560 |
| 13.2 $\text{SiO}_2$ 陶瓷/AgCuTi/30Cr3 钢钎焊接头的界面结构                   | 561 |
| 13.2.1 接头界面分析                                                    | 561 |
| 13.2.2 工艺参数对接头界面结构的影响                                            | 565 |

---

|                                                    |            |
|----------------------------------------------------|------------|
| 13.2.3 接头界面的形成机理 .....                             | 566        |
| 13.3 SiO <sub>2</sub> 陶瓷/AgCuTi/30Cr3 钢接头的性能 ..... | 569        |
| 13.3.1 接头力学性能分析 .....                              | 569        |
| 13.3.2 接头的断裂路径分析 .....                             | 572        |
| 13.3.3 影响接头性能的本质因素 .....                           | 574        |
| 参考文献 .....                                         | 575        |
| <b>第 14 章 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷与金属的连接 .....</b>       | <b>576</b> |
| 14.1 ZrO <sub>2</sub> 陶瓷与 TiAl 合金的钎焊 .....         | 576        |
| 14.1.1 ZrO <sub>2</sub> /AgCu/TiAl 接头界面组织分析 .....  | 577        |
| 14.1.2 钎焊温度对接头组织与性能的影响 .....                       | 585        |
| 14.1.3 保温时间对接头组织与性能的影响 .....                       | 588        |
| 14.2 ZrO <sub>2</sub> 陶瓷与 Ni 的扩散连接 .....           | 590        |
| 14.2.1 Ni/ZrO <sub>2</sub> 梯度中间层的制备 .....          | 590        |
| 14.2.2 梯度中间层界面结构与性能分析 .....                        | 593        |
| 14.2.3 梯度中间层扩散连接 ZrO <sub>2</sub> 陶瓷与 Ni .....     | 597        |
| 14.3 ZrO <sub>2</sub> 陶瓷与 4J33 Kovar 合金的钎焊 .....   | 600        |
| 14.3.1 钎料润湿性分析 .....                               | 601        |
| 14.3.2 接头界面组织分析 .....                              | 602        |
| 14.3.3 工艺参数对接头界面组织的影响 .....                        | 604        |
| 14.3.4 接头力学性能分析 .....                              | 610        |
| 14.3.5 接头断裂路径分析 .....                              | 612        |
| 14.4 ZrO <sub>2</sub> 陶瓷/Kovar 合金样件的钎焊 .....       | 614        |
| 参考文献 .....                                         | 615        |

(TG-0223. 01)

# 陶瓷与金属的连接技术(下册)

---

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

ISBN 978-7-03-048290-7



定价: 110.00 元

科学出版社 工程技术分社  
联系电话: 010-64017506  
E-mail: niuyufeng@mail.sciencep.com  
销售分类建议: 材料