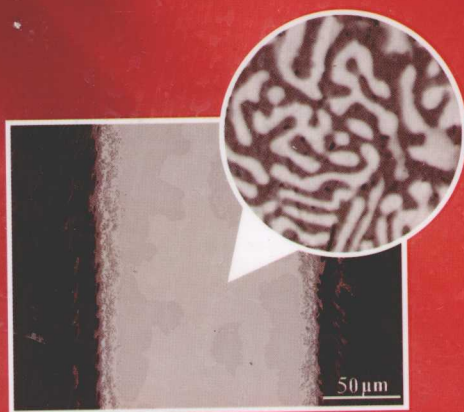




国防科技图书出版基金

■ 熊华平 陈波 著



陶瓷用 高温活性钎焊 材料及界面冶金

*High-temperature Brazing filler Metals
for Ceramic Joining and Interfacial Metallurgy*



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014039281

TG454
14



国防科技图书出版基金

陶瓷用高温活性钎焊材料 及界面冶金

High-temperature Brazing Filler Metals
for Ceramic Joining and Interfacial Metallurgy

熊华平 陈波 著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1726719

TG 454
14

138030110



国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

陶瓷用高温活性钎焊材料及界面冶金 / 熊华平, 陈波著. —北京: 国防工业出版社, 2014. 2

ISBN 978 - 7 - 118 - 09318 - 6

I. ①陶... II. ①熊... ②陈... III. ①陶瓷 - 钎焊 - 研究 IV. ①TG454

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 030016 号

High-temperature Brazing Filler Metals
for Ceramic Joining and Interfacial Metallurgy

熊华平 著



※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17 3/4 字数 358 千字

2014 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需

要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

陶瓷、陶瓷基复合材料由于具有一系列性能优点,作为高温结构材料具有很好的应用前景。但是由于制造形状复杂零件或者大尺寸零部件的需要,或者陶瓷材料与金属材料组成复合结构应用的需求,使得解决陶瓷/陶瓷、陶瓷/金属的连接成为将高温结构陶瓷推向应用必须解决的关键技术之一。

陶瓷属于难焊接材料,目前世界公认钎焊是最适合陶瓷与金属连接且容易实现的工艺方法。钎焊就是置于被焊材料之间的钎焊材料在加热连接过程中熔化,而被连接的母材不熔化,加热保温再冷却后形成冶金连接接头的方法。早期的具有工业规模的陶瓷与金属连接技术开端于 20 世纪 30 年代(德国),是在陶瓷表面金属化处理后进行间接钎焊,用于制造陶瓷电子管,后来又逐渐发展出直接钎焊的方法。

在陶瓷与陶瓷、陶瓷与金属的连接中,要解决的重要问题概括起来有三个:①需要通过连接材料(如钎料或扩散焊用中间层)与陶瓷之间发生适度的界面反应而形成牢固的冶金结合;②要尽可能缓解因陶瓷与被焊金属热物理性能不匹配而在陶瓷/金属接头产生的焊后残余热应力;③为充分发挥结构陶瓷的高温性能优势,应尽可能提高连接接头的耐热性。应该说,当前国内外研究已经解决了陶瓷基本的可焊性问题,而且,为了实现有效的连接,大多使用了 $\text{AgCu}-\text{Ti}$ 活性钎料,但是其工作温度一般只有 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$,这显然限制了陶瓷焊接接头的高温应用。为促进陶瓷与金属连接接头的实用化,以及为更好地发挥陶瓷材料的高温性能优势,必须解决陶瓷与金属接头的高温钎焊技术问题。因此,从 20 世纪 90 年代开始,高温钎焊材料的研究一直是国内外陶瓷钎焊领域的发展方向。陶瓷用高温钎料研制的难点在于,普通高温钎料对某些陶瓷如 Si_3N_4 、 AlN 等根本不润湿,而对于 SiC 陶瓷则在高温焊接过程中极易发生过度的化学反应,既极大地损伤被焊陶瓷基体,又极易在焊接界面引发开裂,而对于组分复杂的陶瓷基复合材料,其连接技术变得更加复杂。

作者从博士生阶段开始(1994 年),在导师周振丰教授和万传庚教授(吉林工业大学,已合并为“吉林大学”)的指导下进入到陶瓷钎焊这个研究领域。在北京航空材料研究院,作者所在课题组最近十几年来持续地开展了陶瓷高温钎焊的基础研究,先后承担了国家自然科学基金项目《陶瓷用高温钎料的成分设计及 Si_3N_4 /镍基高温合金的连接》(青年基金,项目编号:59905022,起止时间:2000.01—

2002.12),国家自然科学基金项目《高温新钎料与 Si_3N_4 和 SiC 陶瓷的界面反应调控及连接机理》(面上基金,项目编号:50475160,起止时间:2005.01—2007.12),预研基金项目《结构陶瓷用新型高温钎料的成分设计及陶瓷与高温合金钎焊连接》(项目编号:9140A1805019HK5105,起止时间:2004.07—2006.06),航空自然科学基金重点项目《高温结构陶瓷与金属的高温活性钎焊连接基础研究》(项目编号:2008ZE21005,起止时间:2009.03—2011.02),北京航空材料研究院创新基金项目《 SiC 陶瓷、 C/C 及 C_f/SiC 复合材料高温钎焊机理及扩散焊新方法探索》(项目编号:KF53092317,起止时间:2009.11—2012.07),高超声速冲压发动机技术重点实验室开放基金项目《面向 C/SiC 复合材料主动冷却结构的焊接技术研究》(项目编号:2011GFSYS—KFKT—02,起止时间:2012.01—2012.12);国家自然科学基金项目《陶瓷表层结构梯度化缓解 $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合陶瓷/金属钎焊接头残余热应力的方法研究》(面上基金,项目编号:51275497,起止时间:2013.01—2016.12)。

我们系统研究了 $\text{CuNi}-\text{Ti}$ 、 $\text{CoFeNi}-\text{Cr}-\text{Ti}$ 、 $\text{Co}-\text{Ti}$ 、 $\text{Co}-\text{Nb}$ 、 $\text{Ni}-\text{Cr}-\text{Pd}$ 、 $\text{Au}-\text{Ni}-\text{Cr}$ 、 $\text{PdNi}-\text{Cr}-\text{V}$ 、 $\text{PdCo}-\text{V}$ 、 $\text{AuPdCoNi}-\text{V}$ 、 $\text{CuAuPd}-\text{V}$ 、 $\text{CuPd}-\text{V}$ 等多个不同体系的高温合金钎料分别对陶瓷、陶瓷基复合材料的润湿性及界面反应机理,研究了陶瓷/陶瓷、陶瓷/金属连接工艺和连接机制,有些研究内容还与采用常规的 $\text{AgCu}-\text{Ti}$ 钎料、 $\text{Ti}-\text{Zr}-\text{Ni}-\text{Cu}$ 钎料的连接结果进行了对比。此外,在陶瓷与金属的连接中,我们除了采取常规的中间缓释层方法以外,还积极探索了能有效缓解陶瓷/金属接头焊后残余热应力的新方法。

我们的研究结果中,有如下四个方面特别值得关注:①系统研究了 Cr 、 Ti 、 V 等元素对钎料在 Si_3N_4 、 SiC 陶瓷、 C/C 复合材料、 C_f/SiC 陶瓷复合材料上的润湿性和连接性能的影响,总结了连接行为的规律,而且对于不同组合的陶瓷/陶瓷、陶瓷/金属连接组合,积累了大量有用的接头性能数据;②通过调整 $\text{CoFeNi}-\text{Cr}-\text{Ti}$ 钎料合金中 Ti 元素的活性从而控制钎料与 SiC 陶瓷之间的界面反应,可以形成以高温合金相为基体、有 TiC 陶瓷相弥散分布的陶瓷钎焊接头组织, TiC 陶瓷相可以对焊接接头起到高温强化作用;③ V 元素在 Au 基、 Cu 基钎料中表现出高的活性,可以实现对 Si_3N_4 陶瓷的有效连接,并且钎料中加入合金元素 Pd 对于维持接头的高温性能有显著作用,新研制的这类钎料至少还适用于对 C/C 复合材料、 AlN 陶瓷、 C_f/SiC 陶瓷基复合材料等的连接,根据目前的接头性能看,钎焊的陶瓷/陶瓷连接接头的耐热温度比起传统的 $\text{AgCu}-\text{Ti}$ 活性钎料应能提高大约 300°C ;④ $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合陶瓷与普通金属的热膨胀系数相差十几倍甚至几十倍,它们之间的高温钎焊连接是十分困难的,作者所在课题组在国内率先提出了在被焊的复合陶瓷表层构造梯度过渡结构的新方法以缓解异种材料连接接头的残余热应力,实际效果明显。

通过系统性的研究,我们在陶瓷用高温钎料的成分设计,在新型高温钎料对陶瓷和陶瓷基复合材料的表面润湿性和界面反应机理,在陶瓷/陶瓷、陶瓷/金属连接工艺和连接界面的物理、化学、力学冶金控制方面取得了一系列创新性研究成果,

初步形成了新型高温钎料对陶瓷焊接的新理论。英国和加拿大的焊接专家们在综述论文“Joining of engineering ceramics”(International Materials Reviews 2009, 54(5):p283-331)里以大段的篇幅高度评价了我们关于陶瓷连接研究的系列进展;我们近期发表于国际期刊的有关陶瓷用 V 活性高温钎料的研究亦获得评阅专家们的高度评价:“A very nice piece of work...”“The authors developed an interesting new brazing filler metal. Results are encouraging”“The paper is interesting and includes important results”……在陶瓷高温钎焊这个研究领域,我们还申报了多项专利技术,并开展了有针对性的应用研究,相关技术已经开始尝试应用。

本书系统总结了在上述领域的研究成果。熊华平独立完成了书稿第 1 章~第 3 章的内容;熊华平、陈波共同完成了第 4 章、第 6 章~第 10 章的内容;熊华平、叶雷、陈波合作完成了第 5 章的内容。我们希望该书的出版对国防科技领域耐高温结构的制造技术能起到一定的推动作用。

在书稿的文字修改和图片整理过程中,叶雷、吴雪莲和吴世彪付出了辛勤的劳动。特此致谢!

作者衷心感谢国家自然科学基金委、预研基金委、航空基金委、国防科技大学高超声速冲压发动机技术重点实验室、北京航空材料研究院科技发展部对我们研究工作的资助,衷心感谢各级项目评阅专家们对我们工作的支持!

感谢航空、航天相关设计研究所和工厂以及有关高校给予我们的合作与鼎力协助!

特别感谢我的导师周振丰教授和万传庚教授,感谢他们当初对我的精心指导与谆谆教诲,感谢他们把我引入到陶瓷焊接这个富有挑战性的研究领域,并培养了我严谨求实的学风和追求创新的科研习惯!

关于陶瓷钎焊的研究工作,得到中国航空研究院分党组书记、副院长李晓红研究员的一贯支持、关心和鼓励,在此致以诚挚的谢意!与此同时,衷心感谢北京航空材料研究院第二十三研究室张学军副主任的支持,衷心感谢作者课题组的同事们对本研究工作的热情协作,他们是:毛唯研究员、谢永慧博士、程耀永研究员、郭万林高工、赵海生硕士、袁鸿高工、潘晖高工、吴欣高工、马文利高工。还要感谢李能硕士、张寒硕士、董奇、姜维、陈云峰、李天文、淮军锋等的帮助。

感谢在 2002 年 9 月~2004 年 3 月期间给予我热情支持与爱护的渡边龙三教授、川崎亮教授(日本东北大学),并感谢日本学术振兴会(JSPS)对我博士后工作的资助和支持!

北京航空航天大学庄鸿寿教授给予了作者研究工作的指点,并通读了全书的初稿、修改稿,提出了中肯的意见和建议,使作者受益匪浅并得以完善书稿。在此致以诚挚的谢意!

感谢在研究过程中给予我热情帮助和讨论的陈大明教授、李敬锋教授、孙大千教授、胡建东教授、沈平教授、逢淑杰教授、董伟博士、周洋博士、仝建峰博士、马青

松博士、潘余博士。感谢阮中慈研究员对于出版此书的热情支持！

国防工业出版社胡翠敏编辑一直鼓励我完成这部著作，并提供了热心帮助，借此表达我的谢意。同时，衷心感谢国防工业出版社的厚爱与支持，衷心感谢国防科技图书出版基金的资助！

本人撰写此书的时间，也正处于孩子紧张的高考复习阶段，所以这里要特别感谢我的妻子黄朝晖博士对于本人撰写此书的高度理解和大力支持，她在承担自己繁重的科研工作之余，主动承担了家务；还要感谢她长期以来对本人所从事的陶瓷焊接这个研究方向的浓厚兴趣！

由于作者整理的毕竟是阶段性成果，有关陶瓷高温钎焊的新理论和技术体系仍处在发展完善的过程当中，而且成书仓促，书中的瑕疵在所难免，因此诚挚地希望得到读者的批评和指正。

熊华平

2013 年 11 月于北京海淀区环山村

目 录

第1章 陶瓷、陶瓷基复合材料的连接技术概述及主要发展趋势	1
1.1 陶瓷的焊接方法概述	1
1.2 陶瓷/陶瓷连接技术的主要研究进展	2
1.2.1 采用玻璃或陶瓷作为中间层的陶瓷连接	2
1.2.2 陶瓷/陶瓷的扩散焊连接研究	3
1.2.3 陶瓷、陶瓷基复合材料的钎焊研究	4
1.3 陶瓷、陶瓷基复合材料与金属的连接技术进展	7
1.3.1 陶瓷与金属的连接简史	7
1.3.2 陶瓷、陶瓷基复合材料与金属连接技术的发展要点	8
1.3.3 陶瓷/金属接头缓解应力方法研究进展	9
1.4 陶瓷、陶瓷基复合材料高温钎焊技术的意义与主要发展趋势	14
参考文献	15
第2章 Cu-Ni-Ti 系钎料对 Si_3N_4 陶瓷的润湿性、陶瓷自身及其 与 1.25Cr-0.5Mo 钢的连接	23
2.1 Cu-Ni-Ti 系钎料对 Si_3N_4 陶瓷的润湿性及界面反应	23
2.2 Cu-Ni-Ti 系钎料对 Si_3N_4 陶瓷自身的连接	27
2.2.1 三种 Cu-Ni-Ti 片状钎料对 Si_3N_4 陶瓷的连接	27
2.2.2 四种膏状钎料对 Si_3N_4 陶瓷的连接及界面反应	29
2.2.3 Cu-Ni-Ti 急冷态钎料对 Si_3N_4 陶瓷的连接	35
2.3 Cu-Ni-Ti 系钎料对 Si_3N_4 陶瓷与 1.25Cr-0.5Mo 钢的连接	39
2.4 陶瓷表面激光打孔法缓解陶瓷与金属连接接头焊后残余热应力 的研究	46
参考文献	49

第3章 含 Ti、Cr、V 的高温活性钎料对 Si_3N_4 的润湿与连接	52
3.1 Ni - Fe - Cr - Ti 系及 Co - Ni - Fe - Cr - Ti 系高温钎料对 Si_3N_4 的润湿与界面连接	52
3.2 PdNi(Co) - Cr 合金在 Si_3N_4 上的润湿及 Si_3N_4 自身的连接	57
3.3 Ni(Co) - V 系合金对 Si_3N_4 陶瓷的润湿性及界面反应	66
3.4 PdCo(Ni, Si, B) - V 钎料对 Si_3N_4 陶瓷的连接	71
3.5 AuPd(Co, Ni) - V 钎料对 Si_3N_4 陶瓷的连接	77
3.6 CuPd - V 钎料对 Si_3N_4 陶瓷的连接	84
参考文献	90
第4章 含 Nb、Cr、Ti、V 的高温活性钎料对 SiC 陶瓷的润湿及界面结合	94
4.1 Co - Nb 合金对 SiC 陶瓷的润湿性	94
4.2 几种 CoFeNi - Cr - Ti 系合金对 SiC 陶瓷的润湿与界面结合	95
4.3 Co - V 和 PdNi - Cr - V 合金对 SiC 陶瓷的润湿及界面反应	100
4.4 Pd(Co)Ni(Cr) - V 钎料钎焊 SiC/SiC 的接头组织及性能	104
4.5 Co(Fe)Ni - Cr - Ti 系钎料对 SiC/SiC 的钎焊连接	110
4.6 CoFeNi - Cr - Ti 钎料对 SiC/GH3044 的连接及界面冶金行为	118
参考文献	120
第5章 C/C 复合材料的高温钎焊	123
5.1 C/C 复合材料的性能特点及其连接技术研究进展	123
5.2 以 Ti、Cr、V 为活性元素的高温钎料在 C/C 复合材料上的润湿性	124
5.3 V 活性高温钎料在 C/C 复合材料上的润湿性及接头强度	131
5.4 V 活性高温钎料钎焊 C/C 复合材料自身及与金属的接头组织	133
5.4.1 Cu - Pd - V 钎料(805 [#])钎焊 C/C 复合材料自身及与金属的接头组织	133
5.4.2 Au - Pd - Co - Ni - V 钎料(新 33 [#])钎焊 C/C 复合材料自身及与金属的接头组织	139
5.5 C/C 复合材料高温钎焊连接研究展望	143
参考文献	144

第 6 章 含 Ti 的活性钎料对 C_f/SiC 陶瓷基复合材料与铌合金、钛合金的钎焊	147
6.1 AgCu - Ti 钎料钎焊 C_f/SiC 陶瓷基复合材料	147
6.2 C_f/SiC 与 Nb 的真空钎焊	152
6.2.1 Ag - 27.4Cu - 4.4Ti 钎料对应的 C_f/SiC 与 Nb 接头	152
6.2.2 Ti - 13Zr - 21Cu - 9Ni 钎料对应的 C_f/SiC 与 Nb 接头	153
6.3 C_f/SiC 与钛合金的真空钎焊工艺及接头性能	155
6.3.1 以 Nb 作为中间层的 C_f/SiC 与 TC4 接头的钎焊	155
6.3.2 以 W 作为中间层的 C_f/SiC 与 TC4 接头的钎焊	157
6.3.3 以 Cu 作为中间层的 C_f/SiC 与 TC4 接头的钎焊	162
6.4 C_f/SiC 与 TC4 模拟件的钎焊	163
6.5 C_f/SiC 复合材料与金属钎焊研究的其他进展	164
参考文献	166
第 7 章 含 Cr、V 的高温活性钎料对 C_f/SiC 复合材料的润湿与连接	168
7.1 Ni - Cr 基钎料对 C_f/SiC 复合材料的润湿与连接	168
7.2 Au - Ni - Cr 系钎料对 C_f/SiC 复合材料的润湿与连接	173
7.3 几种含 V 的高温钎料对 C_f/SiC 复合材料的润湿性	179
7.4 几种含 V 的高温钎料对 C_f/SiC 复合材料的连接	183
7.4.1 Pd - Co - Au - Ni - V 钎料对 C_f/SiC 复合材料的连接	183
7.4.2 Cu - Pd - V 钎料对 C_f/SiC 复合材料的连接及接头高温强度	187
7.4.3 Cu - Au - Pd - V 系钎料对 C_f/SiC 复合材料的连接及接头高温强度	194
7.4.4 V 含量对钎料润湿性、接头组织和强度的影响	196
参考文献	202
第 8 章 含 V 的高温钎料对 C_f/SiC 陶瓷基复合材料与金属的连接	204
8.1 采用 Cu - Pd - V 系钎料真空钎焊 C_f/SiC 复合材料与金属	205
8.1.1 采用 006 [#] 钎料真空钎焊 C_f/SiC 与金属	205

8.1.2 采用 805 [#] 钎料真空钎焊 C_r/SiC 复合材料与金属	210
8.2 采用 $Au-Pd-Co-Ni-V$ 系钎料真空钎焊 C_r/SiC 复合材料 与金属接头	212
8.3 采用 $Cu-Au-Pd-V$ 系钎料真空钎焊 C_r/SiC 复合材料与 金属接头	216
8.4 C_r/SiC 与金属模拟件的钎焊	220
参考文献	221
第 9 章 氮化铝陶瓷的高温钎焊	222
9.1 几种高温钎料对 AlN 陶瓷的润湿性研究	223
9.2 AlN 陶瓷自身的高温钎焊连接	226
9.2.1 $Cu-Pd-V$ 系高温钎料对 AlN 陶瓷自身的钎焊连接	226
9.2.2 $CuAu-Pd-V$ 系高温钎料对 AlN 陶瓷自身的钎焊连接	228
9.2.3 $Au-Pd-Co-Ni-V$ 系高温钎料对 AlN 陶瓷自身的钎焊 连接	231
9.3 AlN 陶瓷与 Mo 合金的高温钎焊探索研究	233
9.3.1 $Cu-Pd-V$ 系高温钎料对 AlN/TZM 的钎焊连接	233
9.3.2 $CuAu-Pd-V$ 系高温钎料对 AlN/TZM 的钎焊连接	234
9.3.3 $Au-Pd-Co-Ni-V$ 系高温钎料对 AlN/TZM 的钎焊连接	236
参考文献	238
第 10 章 SiO_{2f}/SiO_2 复合陶瓷材料与金属的钎焊研究	240
10.1 SiO_{2f}/SiO_2 复合陶瓷材料的性能特点及其连接技术研究进展	240
10.2 SiO_{2f}/SiO_2 材料表面开窄槽再填入钎焊料缓解残余应力的方法	241
10.3 SiO_{2f}/SiO_2 材料自身及其与金属的钎焊连接界面的冶金行为	243
10.3.1 SiO_{2f}/SiO_2 复合陶瓷自身的连接	244
10.3.2 SiO_{2f}/SiO_2 材料与纯铜、不锈钢、Invar 钢的钎焊连接	246
10.3.3 SiO_{2f}/SiO_2 材料与金属 Nb 、 Mo 合金的钎焊连接	252
10.3.4 SiO_{2f}/SiO_2 材料与钛合金、 Ti_3Al 、 $TiAl$ 的钎焊连接	256
10.4 SiO_{2f}/SiO_2 表层填入金属镶嵌块构造梯度结构缓解接头残余应力 的新方法	261
参考文献	263

Contents

Chapter 1	Reviews of the joining technologies of ceramics and ceramic matrix composites, and the main research tendency	1
1.1	The methods for ceramic joining	1
1.2	The main progress of ceramic/ceramic joining	2
1.2.1	Ceramic joining with glass or ceramic as the interlayer	2
1.2.2	Diffusion bonding of ceramic to ceramic	3
1.2.3	Brazing of ceramics and ceramic matrix composites	4
1.3	The main progress of ceramic/metal joining	7
1.3.1	The brief history of the joining of ceramic to metal	7
1.3.2	The main contents of the study on the joining of ceramic to metal in future	8
1.3.3	The main methods for decreasing the residual thermal stresses within the ceramic/metal joint	9
1.4	The significance of high – temperature joining technologies for ceramics and the main research tendency	14
	References	15
Chapter 2	Wettability of Cu – Ni – Ti system brazing fillers on Si_3N_4 ceramic, the joining of Si_3N_4 to itself and to 1.25Cr – 0.5Mo steel	23
2.1	Wettability of Cu – Ni – Ti system brazing fillers on Si_3N_4 ceramic, and the interfacial reactions	23
2.2	Joining of Si_3N_4 to Si_3N_4 with Cu – Ni – Ti brazing fillers	27
2.2.1	Joining of Si_3N_4 to Si_3N_4 with three kinds of Cu – Ni – Ti brazing foils	27

2.2.2	Joining of Si_3N_4 to Si_3N_4 with four kinds of Cu – Ni – Ti brazing pastes and the interfacial reactions	29
2.2.3	The joining of Si_3N_4 to Si_3N_4 with rapidly – solidified Cu – Ni – Ti brazing foils	35
2.3	The joining of Si_3N_4 to 1.25Cr – 0.5Mo steel with Cu – Ni – Ti brazing fillers.	39
2.4	Decreasing the residual thermal stresses within ceramic/metal joint by drilling holes at the surface of the joined ceramic with laser	46
	References	49

Chapter 3 Wettability of high – temperature Ti – or – Cr – or – V – active brazing alloys on Si_3N_4 ceramic and the interfacial bonding

3.1	Wettability of Ni – Fe – Cr – Ti and Co – Ni – Fe – Cr – Ti system brazing alloys on Si_3N_4 ceramic and the interfacial joining	52
3.2	Wettability of PdNi(Co) – Cr brazing alloys on Si_3N_4 ceramic and the joining of Si_3N_4 to Si_3N_4	57
3.3	Wettability of Ni(Co) – V brazing alloys on Si_3N_4 ceramic and the interfacial reactions	66
3.4	Joining of Si_3N_4 to Si_3N_4 with PdCo(Ni, Si, B) – V brazing filler	71
3.5	Joining of Si_3N_4 to Si_3N_4 with AuPd(Co, Ni) – V brazing filler	77
3.6	Joining of Si_3N_4 to Si_3N_4 with CuPd – V brazing filler	84
	References	90

Chapter 4 Wettability of high – temperature active brazing alloys containing Nb, Cr, Ti or V on SiC ceramic and the interfacial bonding

4.1	Wettability of Co – Nb alloy on SiC ceramic	94
4.2	Wettability of several CoFeNi – Cr – Ti brazing alloys on SiC ceramic and the interfacial bonding	95
4.3	Wettability of Co – V and PdNi – Cr – V alloys on SiC ceramic and the interfacial reactions	100

4.4	Microstructures and properties of SiC/SiC joints brazed with Pd(Co) Ni(Cr) – V brazing filler	104
4.5	Joining of SiC to SiC with Co(Fe) Ni – Cr – Ti brazing filler	110
4.6	Joining of SiC to GH3044 superalloy with Co(Fe) Ni – Cr – Ti brazing filler and interfacial metallurgical behavior	118
	References	120

Chapter 5 High – temperature brazing of C/C composite 123

5.1	Properties of C/C composite and the research progress of its joining technologies	123
5.2	Wettability of high – temperature Ti – or – Cr – or – V – active brazing alloys on C/C composite	124
5.3	Wettability of V – active brazing fillers on C/C composite and the joint strengths	131
5.4	Microstructures of C/C – C/C and C/C – metal joints brazed with V – active brazing fillers	133
5.4.1	Microstructures of C/C – C/C and C/C – metal joints brazed with CuPd – V brazing filler	133
5.4.2	Microstructures of C/C – C/C and C/C – metal joints brazed with AuPdCoNi – V brazing filler	139
5.5	The research direction of C/C joining in future	143
	References	144

Chapter 6 Joining of C_r/SiC to Nb and titanium alloy using Ti – active brazing fillers 147

6.1	Joining of C _r /SiC with AgCu – Ti brazing filler	147
6.2	Vacuum brazing of C _r /SiC to Nb	152
6.2.1	Joining of C _r /SiC to Nb with Ag – 27.4Cu – 4.4Ti filler	152
6.2.2	Joining of C _r /SiC to Nb with Ti – 13Zr – 21Cu – 9Ni filler	153
6.3	Joining of C _r /SiC to titanium alloy and the joint properties	155