



国际制造业先进技术译丛

ELSEVIER

先进钎焊技术与应用

Advances in Brazing:
Science, Technology
and Applications

[美]杜森 P. 萨古利奇 (Dušan P. Sekulić) 主编
李红 叶雷 译

由来自世界**19**家钎焊领域最负盛名的国家实验室、
学术组织、工业企业研发中心的专家编写

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





国际制造业先进技术译丛

先进钎焊技术与应用

[美] 杜森 P. 萨古利奇 (Dušan P. Sekulić) 主编
李红叶雷译



机械工业出版社

写给中国读者的话

我很高兴看到我的书《Advances in Brazing: Science, Technology and Applications》翻译成中文出版。我们的祖先非常富有创造力，在五千年前就发明了钎焊工艺。几千年来，钎焊作为一种连接同种或异种材料材料加工技术被应用于诸多行业中。经过长久的发展，钎焊技术取得了巨大的进步。

通过回顾已发表的研究成果，就可以发现钎焊研究的进展情况。在过去百余年间，工程数据库的核心期刊记录了超过 13000 份涉及钎焊的出版物，其中，在 19 世纪 90 年代，只登记了 4 份，而与之相比，在 21 世纪的前 10 余年里，相关出版物的数量增加了一千倍以上。人们对钎焊技术的兴趣在稳步提高，据统计，在过去的 50 年中，这种兴趣的提升率达到了 600%。

更详尽的调查表明了一个有趣的事实，即越来越多进行钎焊研究工作的团队都是来自中国的相关专业人员。因此，我坚定地相信，将这本英文著作翻译成中文并出版，将有助于中国的相关研究人员加深对钎焊这门重要技术的理解，并推动该技术的发展。

针对目前和未来先进材料在诸多领域中的应用，通过深入理解钎焊过程中材料冶金和力学等行为，将有助于促进复杂工艺制造技术的运用。因此，以先进科学技术指导钎焊研究与应用，与依靠科技创新，驱动制造业升级的目标不谋而合。

Dušan P. Sekulić

美国肯塔基大学 教授

哈尔滨工业大学“千人计划专家”

于哈尔滨

译者序

钎焊是制造业中的关键技术之一。由于新材料发展的日新月异，可用于钎焊的材料种类不断扩大，对异种材料连接的需求也在逐步增加。随着焊接制造技术向高效化、自动化和高质量方向发展，对钎焊材料的品质和可靠性、钎料组成与母材、工艺方法之间的匹配性，以及降低生产成本和能源消耗等提出了较高的要求。在欧美等发达国家，钎焊材料向绿色环保、低成本和高品质、高可靠性等方向发展，钎焊技术也正朝着低温、无钎剂、高效和自动化的趋势发展，并在汽车、航空航天、机械、电子、民用等领域得到了广泛的应用，代表着先进制造技术的发展方向。目前我国钎焊行业在钎焊基础理论、新型材料的钎焊技术、钎焊技术高端产品的工业应用与世界发达国家还存在着较大的差距。

本书由美国、德国、法国、日本、中国、乌克兰等国国际钎焊领域知名大学和研究所的专家学者编著而成，书中凝聚了他们多年研究和实践工作的经验与精粹，汇集了世界钎焊领域近 10 年来的最新成就和前瞻性研究成果。全书共分为 3 个部分，第一部分包括 1~3 章，介绍了钎焊基础，涵盖了对钎焊润湿和基体界面活性、钎焊结构强度和可靠性的评价标准，以及钎焊过程宏观—微观多尺度系统模拟等最新理论研究成果，具有很强的科学性。第二部分包括 4-13 章，涵盖了应用广泛的工程材料、新型材料及金属-非金属异种材料的先进连接技术，涉及镍基高温合金和不锈钢、新型抗蠕变高温合金、金刚石和立方氮化硼（CBN）工具、新型 Ni-Al、Fe-Al 和 Ti-Al 金属间化合物的钎焊等新型钎焊技术。第三部分包括 14~16 章，是钎焊技术的工程应用，介绍了切削工具钎焊、钎涂技术、金属-非金属的电子封装技术、铝合金无钎剂钎焊新技术等，具有很强的工程应用价值。美国焊接学会钎焊专业委员会委员 Shapiro 博士评论该书“开创了钎焊技术的新领域，不仅丰富了钎焊科学研究的基础理论，并且介绍了钎焊关键工艺和技术发展趋势，更加具有实践上的指导意义”。

本书可作为材料科学与工程和机械工程等相关学科本科生和研究生的教材和参考书，也可供钎焊及相关领域科技工作者和工程师参考。

本书的翻译由北京工业大学李红副教授和北京航空材料研究院叶雷高级工程师完成。衷心感谢本书编者杜森 P. 萨古利奇（Dušan P. Sekulić）教授的信任，将这本书的翻译交给了译者。在翻译过程中也得到了编者诸多有益的建议和帮助。

译者承载着职业责任感，抱着学习的态度，不揣冒昧，以臻焊接业界同仁。翻译中难免有错误及不足之处，望读者不吝赐教与批评指正。

译者

前 言

硬钎焊是一种通过使用 450℃ 以上的温度来影响钎料或镀层金属的相变过程以实现同种或异种材料之间的连接的焊接技术，该技术能够较好地保持被焊母材的完整性。按照这种命名方式，软钎焊则被定义为使用 450℃ 以下的温度来实现相似连接的工艺。事实上，这两种连接方式所涉及的物理和化学过程是极为相似的。两者最主要的区别是钎料的选择，选择不同的钎料会在加热、焊接、冷却过程中导致不同的现象。

钎焊在开始并不是作为一门科学，而是作为一门技术，也就是说，钎焊是通过实践和经验总结出来的学问和技艺。因此，钎焊技术是人类最古老的技术之一，其源头可追溯到人类文明的开端。正如苏美尔文明的大量遗址中所记录的那样，在公元前 3000 多年前，人类已经了解了一些金属的钎焊技术。相关的技术随后传播到埃及，之后到达中国和其他国家。随着现代实验技术的出现，相关的工艺过程已经达到非常高的水平。这可能在很大程度上得益于精密的实验仪器，如扫描电子显微镜、原子力显微镜、X 射线衍射分析仪等的使用。这些实验技术也得到了数值模拟工具开发的辅助，例如，超级计算机实现了相-场方法模拟。但是，钎焊科学是在不断发展的，所以钎焊科学与钎焊技术之间适当的联系仍然有待于探索。

本书旨在帮助渴望了解钎焊科学的钎焊领域的专业学者，使其不仅能够更加充分地理解钎焊过程的现象，而且能够熟悉该科学技术的发展和工业应用的实施。

在钎焊领域的技术文献中，虽然已有一些备受推崇和传播广泛的专题著作和手册（主要侧重于技术而对前沿方向的基本问题不够重视），但这些著作和手册都未能从钎焊母材和钎料体系的冶金行为、钎焊工艺优化，以及钎焊结构力学、热学和腐蚀行为等方面深入阐述各种技术问题。本书旨在通过提供对大量前沿钎焊主题进行深度研究的文献资料来填补这一空白。由多个或一个作者组成的十九个团队接受了主编的邀请，在选定的领域编写相关章节，作者可以按照自己的意愿编写相关主题。

除了提到的主要目的——编写钎焊领域的一本技术资料书籍，另一个动机是规范其内容。受邀作者来自不同国家，代表了钎焊领域最负盛名的世界级组织机构，包括国家实验室、机构、学术组织，以及工业企业的研发中心，同时也邀请了焊接领域的其他专家学者。就研究/技术的重点而言，研发的力度和兴趣、产业的需求、技术的进步，以及产业与研究机构的相互交流等情况都显著不同。例如，来自亚洲、欧洲或美洲的作者团队可能为未来进一步的研究提供更加多样化的资源，从而提供给其他研究中心的专业人士特有的机会，可以用更宽广和更深入的视角了解相

关的信息。此外，来自不同研究中心的研究人员必将沿着侧重点不同但却相同或相似的当今热点主题方向开展研究。显而易见，不同主题的研究方法很难在某一位作者的论文或手册中概括和体现出来，因为通常需要提出权威的观点，并提供标准的研究方法。

本书分成三个部分：①钎焊基础（第1~3章）；②钎焊工艺（第4~13章）；③钎焊和钎焊材料应用（第14~19章）。显然，每个章节都包含这三个方面，因为在死板的框架中构建内容是没有任何意义的，因此，本书结构和内容的阐释将会是丰富多样的。

第一部分中的第1章由法国格勒诺布尔理工学院材料工艺科学与工程实验室的Eustathopoulos博士、Hodaj教授和Kozlova博士编写，其中的润湿与黏附的基本概念中包含了对不同类型的固体润湿的解释，这些固体包括金属、非共价陶瓷和碳基陶瓷等，讨论了钎焊过程中非反应性和反应性体系润湿和铺展过程的热力学问题。在第2章中，美国航空航天局戈达德太空飞行中心的Flom博士提出了一种对钎焊结构的失效分析方法，这种有限元分析的工程方法基于Tresca和Von Mises提出的最大切应力屈服准则。随后，介绍了用于评估钎焊接头安全性的相互作用方程和Coulomb-Mohr失效准则。在第3章中，由来自美国肯塔基州列克星敦市肯塔基大学的Sekulić教授讨论了钎焊过程建模。该章对钎焊过程中的热循环建模、钎焊结构中热应力行为的建模，以及微观尺度下的现象（包括固态扩散、覆层/钎料熔化和毛细作用驱动的铺展，以及钎焊过程中的凝固过程等）的建模方法都进行了总结。

第二部分的首章，即第4章是由来自乌克兰基辅巴顿焊接研究所的Khorunov院士和Maksymova博士领导的团队编写的，内容包括钎焊高温合金用无硼钎料和 γ -TiAl基金属间化合物钎焊用无铜钎料。其中，高镍基和Ti-Al基金属间化合物是耐热材料很好的例子。该章还讨论了发生在Ni-Cr-Zr系合金中的结构转变，而且列出了Ti-Zr-Fe、Ti-Zr-Mn系合金的熔点范围、浓度范围、结构特征和力学性能。论述了用于钎焊陶瓷切削材料的活性钎料合金的应用。在第5章中，美国Metglas公司的Rabinkin博士对高温钎焊提出了全面、系统的论述，并着重强调了钎料和钎焊工艺。对现有的钎料种类以及含磷的Ni/Fe/Cr基新型共晶合金钎料进行了概述。对添加Ge或Zr/Hf/Cr的镍基合金钎料也进行了论述。该章详细地讨论了钢和合金钎焊的显微组织、性能和最佳钎焊工艺。Rabinkin博士带领的另一支团队，包括美国俄亥俄州钛钎焊公司的Shapiro博士和来自于列支敦士登Listemann AG公司的Boretius博士，编写了第6章。首先，重点解释了金刚石与立方氮化硼界面反应的本质，其次是金刚石在钎焊和退火过程中的石墨化问题，以及金属在金刚石和立方氮化硼上的润湿问题，最后探讨了钎焊工艺过程。中国哈尔滨工业大学的何鹏教授编写了本书的第7章和第8章，每章讲述一个主题：第7章为氧化物、碳化物、氮化物陶瓷及陶瓷基复合材料的钎焊；第8章为镍-铝、铁-铝和钛-铝金属间化合物的钎焊。第7章属于讲述陶瓷钎焊这一重要领域的一系列章节的一部分。陶瓷难以连

接，钎焊被认为是少数可以有效连接陶瓷的技术。该章对陶瓷钎焊的每一个难点都提出了深入的思考。第8章研究了金属间化合物材料，如Ni-Al、Fe-Al和Ti-Al等的连接存在的问题，同时对每个体系的金属间化合物的物理性能进行了描述，其次是钎焊方法的介绍。之后的第9章和第10章涵盖了铝钎焊的研究，分别由乌克兰基辅巴顿焊接研究所的Khorunov院士、Sabadash博士，以及美国厄巴纳Creative Thermal Solutions公司的赵博士和美国普莱森顿的Woods博士撰写。第9章是关于主要依靠活性钎剂的铝及铝合金和钢的钎焊。在第10章中，赵博士和Woods博士详细论述了大量使用氟铝酸钾钎剂在可控气氛环境下钎焊铝的研究。美国俄亥俄州威斯康星大学斯陶特分校的Asthana教授和美国克利夫兰的美国航空航天局格伦研究中心俄亥俄州航空航天研究所的Singh博士撰写的第11章中提到了使用活性金属钎料钎焊陶瓷基复合材料和金属。面对苛刻的使用要求，先进的陶瓷基复合材料表现出了巨大的潜力，但其组件的连接非常具有挑战性。该章对润湿和熔融金属渗透的问题进行了讨论。随后对SiC-SiC、C-SiC、C-C和ZrB₂基超高温陶瓷、氧化物、氮化物和硅基复合材料的钎焊进行了综述，并对界面的微观结构、力学和物理性能进行了详细的讨论。金属与陶瓷钎焊主题的最后一章（第12章）由Hausner博士和德国开姆尼茨工业大学材料科学与工程学院的Wielage教授编写。作者着重介绍了金属-陶瓷钎焊技术的现状。对于选择的材料系统的组合，提供了更详细的微观结构和力学性能。该章提供了陶瓷性能、标准钎焊工艺、金属化陶瓷钎焊、活性钎焊以及金属-陶瓷钎焊接头的力学性能信息，讨论了若干钎焊实例。本部分的最后一章即第13章专门介绍了金属和C/C复合材料的钎焊。日本东京工业大学的Ikeshoji博士首先介绍了C/C复合材料的性能，其次讨论了钎料的规格和推荐的钎料，最后探讨了钎焊工艺过程。

第三部分是钎焊和钎焊材料应用。第14章由德国多特蒙德工业大学材料工程学院Tillmann教授领衔的团队编写，团队成员还有Elrefaey博士和Wojarski博士。作者讨论了硬质合金（碳化钨和金属黏结剂）和高性能陶瓷与结构钢等基体的钎焊，用于制作切削工具；深入讨论了用于钎焊这种体系材料制作的切削工具的钎料。在第15章中，来自于德国埃斯林根Innobraze公司的Krappitz博士，对钎涂这种有趣的钎焊应用过程进行了讨论。通过这种技术可以在恶劣环境中工作的组件上制备功能涂层，钎涂的应用包括表面修复、磨损保护，以及防止腐蚀和氧化。在第16章中，美国新墨西哥州阿尔伯克基桑迪亚国家实验室的C. A Walker论述了金属-非金属钎焊在电子包装和电子元件结构上的应用。他强调，金属-非金属钎焊技术经受住了时间的考验，而且已证明该连接方法可用于制造高压、大电流设备和电力行业的绝缘子，为今天的材料工程师或设计师提供了利用最新工程材料特殊性能的机会。该章开篇列举了诸多功能性需求，并进一步讨论了如何选择钎焊工艺（包括钎料和基体）和进行夹具的设计。紧接着又论述了材料表面金属化的方法。结尾部分总结了钎焊方法和性能测试方法。在第17章中，意大利都灵理工大学材料科学

与化学工程系的团队考虑将玻璃和玻璃-陶瓷钎料用于固体氧化物燃料电池的密封材料，以及用作碳化硅基材料的钎料。这个团队由 Salvo 教授领导，成员有 V. Casalegno 博士、S. Rizzo、Smeacetto 教授、A. Ventrella 和 Ferraris 教授。第一项应用是用作平面固体氧化物燃料电池的密封材料，这种材料要求在潮湿的环境中和在 800°C 环境使用时都保持热力学和热化学性能的稳定。第二项应用涉及核（核聚变和核裂变）设备中玻璃-陶瓷材料在碳化硅基材料钎焊中的应用和高温应用。钎焊的另外一个重要应用包括民用领域（如饮用水或食品工业）使用的金属材料钎焊的镍基钎料。在第 18 章中，德国开姆尼茨工业大学的 Wielage 教授和 Hoyer 博士对镍基材料列入无害材料名单的可能性做了详细研究，讨论了现行的相关规则 and 标准。铝薄板钎焊技术被大量应用于现代产品，如汽车、电力、化学和航空航天工业。在大多数情况下，大量产品需要使用传统钎剂钎焊。在第 19 章中，瑞典萨帕集团加拿大分公司的 Hawksworth 博士研究了一种新型的无钎剂铝薄板钎焊技术。该章讲述了需要使用钎剂和无钎剂钎焊材料/技术，并讨论了新材料的应用。同时分析了影响无钎剂钎焊的化学和冶金因素，随后讨论了新型自钎剂钎料。

如果没有各个领域审稿专家的参与和他们对不同内容技术完整性的审查，那么，整理本书不同主题、种类繁杂的章节的工作量将是难以想象的。所有的投稿都经过了审查。这里对审稿专家表示衷心的感谢，他们的一些观点将被纳入编辑文稿的最终版本。这些专家包括（按字母顺序列出，但不限于以下专家）：美国俄亥俄州威斯康星大学的 R. Asthana 教授，德国汉诺威 Solvay Fluor 公司的 P. Garcia 博士，美国列克星敦市肯塔基大学机械工程系的 H. Karaca 教授，德国汉诺威 Solvay Fluor 公司的 L. Orman 博士，美国列克星敦市肯塔基大学技术开发研究所的 A. Salazar 博士，美国俄亥俄州钎焊公司的 A. Shapiro 博士，德国汉诺威 Solvay Fluor 公司的 H. W. Swiderski 博士和美国列克星敦市肯塔基大学工程学院可持续制造研究所的 W. Liu。

感谢我在列克星敦市肯塔基大学工程学院实验室的学生，他（她）们在这项工作中给予了我巨大的支持，投入了巨大的热情。由于人员太多，不能一一列出他（她）们的名字，在此一并致谢。

Dušan P. Sekulić

杜森 P. 萨古利奇

目 录

写给中国读者的话

译者序

前言

第一部分 钎焊基础

第 1 章 钎焊中的润湿过程	1
1.1 引言	1
1.2 液态金属和氧化物对固体母材的润湿	2
1.2.1 非反应润湿	2
1.2.2 反应润湿	5
1.3 润湿与钎焊：总则	6
1.3.1 毛细钎焊	6
1.3.2 夹层钎焊	9
1.4 非反应性钎料及反应性钎料钎焊金属和陶瓷	12
1.4.1 CuAg 共晶钎料在不锈钢上的润湿	12
1.4.2 熔融金属和熔融硅化物在 SiC 上的润湿	14
1.4.3 反应性 CuAgTi 合金在氧化铝陶瓷上的润湿	16
1.5 结论	18
1.6 参考文献	19
第 2 章 钎焊接头强度和安全裕度	21
2.1 引言	21
2.2 钎焊接头分析常用失效准则的适用性	22
2.2.1 最大正应力准则	22
2.2.2 最大切应力和八面体应力准则	22
2.2.3 交互作用方程	24
2.2.4 Coulomb-Mohr 失效准则	27
2.2.5 适用性评估 (FFS) 方法	27
2.3 发展失效评定图 (FADs) 的另一种方法	28
2.4 总结	35
2.5 致谢	35

2.6 参考文献	35
第3章 钎焊过程中系列现象的模拟	38
3.1 引言	38
3.2 钎焊系统模拟	39
3.2.1 加热区模拟	41
3.2.2 连续钎焊炉模拟	42
3.3 钎焊结构残余应力的有限元分析	43
3.4 微观尺度的钎焊现象模拟	47
3.4.1 接头形成模拟	48
3.4.2 表面张力驱动流动的模拟	49
3.4.3 接头凝固的模拟	51
3.5 总结	53
3.6 参考文献	53

第二部分 钎焊材料

第4章 高温合金及金属间化合物合金 (γ-TiAl) 的钎焊	60
4.1 引言	60
4.2 镍基高温合金的钎焊	61
4.2.1 高温合金的焊接性	61
4.2.2 常规钎焊技术	61
4.2.3 高温合金钎焊技术的创新	62
4.3 钛铝金属间化合物的钎焊	69
4.3.1 钎料	70
4.3.2 钎焊温度和保温时间	74
4.4 结论	80
4.5 发展趋势	81
4.6 参考文献	82
第5章 高温钎焊：钎料及工艺	85
5.1 引言	85
5.2 高温钎焊中的母材特征	86
5.3 高温钎焊用钎料	86
5.3.1 共晶合金钎料	87
5.3.2 固溶体钎料	87
5.3.3 新钎料的发展	87

5.3.4	钎料形态和预置形式	92
5.3.5	有关硼元素的争论	93
5.4	耐高温材料的钎焊	94
5.4.1	AISI 400 系列 Fe-Cr 基铁素体型不锈钢	94
5.4.2	AISI 300 系列奥氏体型不锈钢	97
5.4.3	高温合金钎焊	101
5.4.4	瞬间液相 (TLP) 连接和钎焊过程中的接头加压	105
5.5	接头形成的冶金过程	107
5.6	工业应用	109
5.7	参考文献	112
第 6 章	金刚石和立方氮化硼的钎焊	116
6.1	引言	116
6.2	金刚石和立方氮化硼 (CBN) 的物理性质	117
6.2.1	金刚石	117
6.2.2	立方氮化硼	118
6.3	金刚石和金属的相互作用	119
6.3.1	相互作用的本质	119
6.3.2	金刚石和主要的金属及合金的相互作用	120
6.3.3	金刚石表面的碳化物形态	122
6.3.4	碳化物薄层与金刚石和金属基体的结合情况	125
6.4	热处理和钎焊过程中金刚石的石墨化	126
6.5	金属及其合金对金刚石的润湿	126
6.6	立方氮化硼 (CBN) 的润湿	127
6.7	金刚石钎焊用钎料和钎焊技术	129
6.8	金刚石接头的力学性能测试	133
6.9	立方氮化硼 (CBN) 的钎焊	134
6.10	钎焊立方氮化硼 (CBN) 产品	136
6.10.1	可转位刀具	136
6.10.2	由立方氮化硼或金刚石磨粒制作的磨具	136
6.11	结论	138
6.12	参考文献	139
第 7 章	氧化物、碳化物、氮化物陶瓷及陶瓷基复合材料的钎焊	142
7.1	引言	142
7.2	钎焊陶瓷的困难及其解决措施	142
7.3	氧化物陶瓷的钎焊	143

7.4	氮化物陶瓷的钎焊	147
7.5	碳化物陶瓷的钎焊	150
7.5.1	SiC 陶瓷的钎焊	150
7.5.2	C/SiC 复合材料的钎焊	152
7.6	碳/碳 (C/C) 复合材料的钎焊	154
7.7	结论	159
7.8	参考文献	160
第 8 章	镍-铝、铁-铝和钛-铝金属间化合物的钎焊	162
8.1	引言	162
8.2	Ni-Al 系金属间化合物的物理性能和钎焊性能	163
8.2.1	Ni-Al 系金属间化合物的物理性能	163
8.2.2	Ni-Al 系金属间化合物的钎焊	163
8.3	Fe-Al 金属间化合物的物理性能和钎焊性能	165
8.3.1	Fe-Al 金属间化合物的物理性能	165
8.3.2	Fe-Al 金属间化合物的钎焊	165
8.4	Ti-Al 金属间化合物的物理性能和钎焊性能	168
8.4.1	Ti-Al 金属间化合物的特点	168
8.4.2	Ti-Al 金属间化合物的焊接	168
8.5	Ti-Al 金属间化合物的钎焊	169
8.5.1	采用 Ag 基钎料钎焊 Ti-Al 金属间化合物	169
8.5.2	采用 Al 基钎料钎焊 Ti-Al 金属间化合物	170
8.5.3	采用 Ti 基钎料钎焊 Ti-Al 金属间化合物	170
8.5.4	Ti-Al 金属间化合物与钢的钎焊	172
8.5.5	Ti-Al 金属间化合物与陶瓷的钎焊	176
8.5.6	Ti-Al 金属间化合物与 C/SiC 复合材料的钎焊	177
8.5.7	Ti-Al 金属间化合物与 C/C 复合材料的钎焊	178
8.6	总结	180
8.7	参考文献	180
第 9 章	铝-铝及铝-钢的钎焊	183
9.1	引言	183
9.2	活性钎剂钎焊铝及铝合金	184
9.3	铝和不锈钢的钎焊	190
9.4	使用钎剂电弧钎焊铝与镀锌钢	194
9.5	铝的软钎焊	196
9.6	结论及发展趋势	201

9.7 参考文献	202
第 10 章 气体保护铝钎焊	206
10.1 引言	206
10.2 气体保护钎焊 (CAB) 铝的应用	206
10.3 气体保护铝钎焊涉及的材料	209
10.3.1 铝合金芯材	209
10.3.2 钎料	210
10.3.3 钎焊薄板材料	212
10.4 氧化物和钎剂	214
10.4.1 CAB 钎剂	215
10.4.2 钎剂用量和铝合金中的镁	217
10.4.3 CAB 钎剂的改性	218
10.5 气体保护钎焊 (CAB) 工艺	220
10.5.1 润湿和铺展	220
10.5.2 钎焊过程中母材和钎料的相互作用	222
10.5.3 CAB 过程中毛细流动的控制	224
10.5.4 CAB 过程中力学性能的改善	224
10.6 CAB 铝热交换器中的腐蚀	226
10.6.1 CAB 热交换器的腐蚀类型	226
10.6.2 CAB 热交换器的腐蚀控制	228
10.6.3 耐蚀性的测试方法	231
10.7 参考文献	232
第 11 章 先进陶瓷基复合材料与金属的活性钎焊	237
11.1 引言	237
11.2 异种材料的钎焊	238
11.2.1 润湿性	240
11.2.2 渗透	243
11.3 陶瓷基复合材料的钎焊	244
11.3.1 SiC-SiC 复合材料	245
11.3.2 C-C 复合材料	251
11.3.3 C-SiC 复合材料	255
11.3.4 超高温陶瓷复合材料	257
11.3.5 其他复合材料	260
11.4 小结	262
11.5 致谢	262
11.6 参考文献	263

第 12 章 金属与陶瓷的钎焊	268
12.1 引言	268
12.2 金属和陶瓷的钎焊	269
12.3 金属化陶瓷的钎焊	270
12.4 金属-陶瓷的活性钎焊	272
12.5 影响金属-陶瓷钎焊接头力学性能的因素	274
12.6 钎焊工艺的准备和操作	276
12.7 金属-陶瓷钎焊接头的检测方法	277
12.8 金属-陶瓷活性钎焊接头实例	278
12.9 金属-陶瓷接头的感应钎焊	278
12.10 结论	285
12.11 致谢	286
12.12 参考文献	287
第 13 章 金属和 C/C 复合材料的钎焊	289
13.1 引言	289
13.2 C/C 复合材料	289
13.3 C/C 复合材料与金属钎焊用钎料	293
13.3.1 C/C 复合材料的润湿性	293
13.3.2 C/C 复合材料钎焊用钎料	295
13.3.3 液态钎料的渗透	298
13.3.4 C/C 复合材料的钎焊参数	299
13.4 C/C 复合材料的各向异性及其与金属的钎焊	299
13.4.1 2D 叠层及纤维取向对钎焊性的影响	299
13.4.2 钎焊界面上纤维排列对钎焊接头强度的影响	301
13.5 C/C 复合材料和金属的间接钎焊方法	302
13.5.1 改善钎料对 C/C 复合材料润湿性的表面改性技术	302
13.5.2 添加中间层方法	303
13.6 结论	304
13.7 参考文献	305
第三部分 钎焊和钎焊材料应用	
第 14 章 切削材料的钎焊	308
14.1 引言	308
14.2 切削材料	309

14.2.1	硬质合金	310
14.2.2	带涂层的硬质合金	310
14.2.3	陶瓷	311
14.2.4	金刚石	311
14.2.5	立方氮化硼	312
14.3	控制接头质量的主要因素	312
14.3.1	润湿	312
14.3.2	工艺和设备	315
14.4	钎料	320
14.4.1	用于硬质合金工具钎焊的钎料	320
14.4.2	用于陶瓷钎焊的钎料	321
14.4.3	用于金刚石钎焊的钎料	321
14.5	焊接接头中的诱导应力	322
14.6	研究实例	327
14.6.1	硬质合金工具的钎焊	327
14.6.2	陶瓷工具的钎焊	330
14.6.3	金刚石工具的钎焊	333
14.7	结论和未来发展趋势	334
14.8	参考文献	336
第 15 章	钎涂技术	341
15.1	引言	341
15.2	钎涂的基本知识	341
15.2.1	冶金方面的考虑	342
15.2.2	孔隙率和堆积密度	343
15.2.3	强度性能	344
15.3	钎涂的分类	345
15.3.1	分段包覆	345
15.3.2	研磨表面	347
15.3.3	钎焊在表面修复中的应用	348
15.3.4	聚合物黏结带在磨损防护中的应用	350
15.3.5	浆料浸透钎焊的应用	352
15.3.6	悬浮液喷涂	353
15.4	功能涂层	354
15.5	结论	355
15.6	参考文献	355
第 16 章	电子封装及其结构应用中的金属-非金属钎焊	357
16.1	引言	357

16.2 钎焊设计和详细说明	358
16.2.1 钎焊的功能要求	358
16.2.2 钎焊材料的选择	359
16.2.3 金属母材的选择	359
16.2.4 非金属母材的选择	360
16.2.5 钎料的选择	360
16.2.6 钎焊接头设计	360
16.2.7 钎焊装配和固定	361
16.2.8 钎焊设计的一条捷径	362
16.3 金属化方案	362
16.3.1 Mo-Mn 金属化	362
16.3.2 薄膜金属化	363
16.4 钎焊方法的选择	363
16.4.1 传统钎焊	363
16.4.2 活性钎焊	364
16.4.3 直接钎焊	364
16.4.4 钎焊方法的选择	365
16.5 完成钎焊操作	365
16.6 焊件测试	366
16.7 所选材料组合的测试结果及其分析	367
16.8 发展趋势	372
16.9 最新的信息资源和建议	373
16.10 参考文献	373
第 17 章 玻璃和玻璃-陶瓷钎料的高温应用	376
17.1 引言	376
17.2 固体氧化物燃料电池中的玻璃及玻璃-陶瓷钎料	376
17.2.1 陶瓷电解质/金属连接体接头特征	379
17.2.2 接头性能测试	381
17.2.3 固体氧化物燃料电池工作环境下的 Crofer22APU/封接玻璃-陶瓷/阳极支承体 接头测试	382
17.2.4 未来趋势	383
17.3 玻璃或玻璃-陶瓷做钎料钎焊 SiC 基材料	383
17.3.1 玻璃和玻璃-陶瓷焊接 SiC 基材料在核工业领域中的应用	384
17.3.2 接头的抗剪性能测试	385
17.3.3 未来趋势	386
17.4 参考文献	387