



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

H1CuNi30-2-0.2 真空钎焊铂金工艺与组织性能研究
Research on H1CuNi30-2-0.2 Vacuum Brazing Platinum
Process and Microstructure and Properties

姓 名 刘柳
学 院 机械工程学院
专 业 金属材料工程
指导教师 田春英
职 称 正高级实验师
完成时间 2023 年 5 月

天津中德应用技术大学
本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：

年 月 日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：

年 月 日

摘 要

铂金属属于难熔金属一种，化学性质十分稳定，铂金属的抗腐蚀和抗氧化性极强，电性能亦很稳定，是用于航空发动机高温传感器探头的重要材料，因此需要对铂金进行连接，真空钎焊是实现其连接可行方法，研究其真空钎焊的工艺与组织性能具有重要意义。

本文采用 H1CuNi30-2-0.2 钎料钎焊铂金，通过改变钎焊温度、钎焊时间与钎焊预制量，使用金相显微镜、扫描电子显微镜、能谱仪与 X 射线衍射仪等对钎焊接头进行组织、成分、物相分析，研究钎焊工艺参数对铂金钎焊接头组织与性能的影响规律。

研究表明：钎焊过程中钎料与母材会互相扩散，形成成分与组织形貌不同的四个区域：母材区、扩散区、界面区与焊缝中心区。扩散区中有着呈点状和颗粒状弥散分布的 Ni_3Si 化合物；焊缝中心区由大量临近两侧界面区附近的 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 、 Cu_3Pt 组成的 Cu 基固溶体和中间少量的 Ni_3Si 与 Ni 基固溶体组成的共晶组织构成； Ni_3Si 与 Ni 基固溶体组成的共晶组织硬度为 300.8HV 而 Cu 基固溶体的硬度 210.2HV。

钎焊的工艺参数对于钎焊接头的组织与性能紧密相关，钎焊温度由 1180°C 升高至 1200°C ，元素的扩散速率增大，焊缝变窄，扩散区范围增加，焊缝中心区 Ni_3Si 与 Ni 基固溶体构成的共晶组织与扩散区的 Ni_3Si 化合物减少。钎焊时间由 20min 延长至 60min，元素的扩散更充分，焊缝变窄，共晶组织与 Ni_3Si 化合物减少。另外，减少钎料的预制量可以使液态钎料向焊缝的填充减少，导致焊缝变窄，从而使元素完全扩散，达到消除共晶组织与 Ni_3Si 化合物的目的。焊缝中心区到母材区的硬度值先降低后升高，在界面区附近硬度值达到最高值，再随着扩散距离的增加而降低。

关键词：高温真空钎焊；铂金；H1CuNi30-2-0.2 钎料；钎焊工艺参数

ABSTRACT

Platinum belongs to a type of refractory metal with very stable chemical properties. Platinum has strong corrosion and oxidation resistance, and stable electrical properties. It is an important material used for high-temperature sensor probes in aviation engines. Therefore, it is necessary to connect platinum. Vacuum brazing is a feasible method to achieve its connection, and studying its vacuum brazing process and structural properties is of great significance.

This article uses H1CuNi30-2-0.2 brazing material to braze platinum. By changing the brazing temperature, brazing time, and brazing amount, the microstructure, composition, and phase of the brazed joint were analyzed using metallographic microscopy, scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, and X-ray diffraction. The influence of brazing process parameters on the microstructure and properties of the platinum brazed joint was studied.

The research results indicate that during the brazing process, the brazing material and base metal will diffuse with each other, forming four regions with different compositions and microstructure: base metal zone, diffusion zone, interface zone, and weld center zone. In the diffusion zone, there are Ni_3Si compounds with dispersed distribution in the form of dots and particles; The weld center area is composed of a large number of Cu based solid solution consisting of $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ and Cu_3Pt near the interface area on both sides, and a small amount of eutectic structure consisting of Ni_3Si and Ni based solid solution in the middle; The hardness of eutectic structure composed of Ni_3Si and Ni based solid solution is 300.8HV, while that of Cu based solid solution is 210.2HV.

The brazing process parameters are closely related to the microstructure and properties of the brazed joint. When the brazing temperature rises from 1180 °C to 1200 °C, the diffusion rate of elements increases, the weld narrows, and the scope of the diffusion zone increases. The eutectic structure composed of Ni_3Si and Ni based solid solution in the weld center area and Ni_3Si compounds in the diffusion zone decrease. The brazing time was extended from 20 minutes to 60 minutes, and the diffusion of elements was more thorough. The weld seam became narrower, and the eutectic structure and Ni_3Si compound decreased. In addition,

reducing the pre fabrication amount of solder can reduce the filling of liquid solder towards the weld seam, leading to the narrowing of the weld seam and complete diffusion of elements, achieving the goal of eliminating eutectic structure and Ni_3Si compounds. The hardness value from the center zone of the weld seam to the base metal zone first decreases and then increases, reaching the highest value near the interface zone, and then decreases with the increase of diffusion distance.

Key words : High temperature vacuum brazing; Platinum; H1CuNi30-2-0.2solder; Brazing process parameters

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题的目的与意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 钎焊研究现状	1
1.2.2 钎料研究现状	2
1.2.3 铂金研究现状	4
1.3 课题主要研究内容	5
第二章 理论分析	6
2.1 钎焊原理	6
2.2 钎料	7
2.3 钎焊方法	8
第三章 实验材料与方法	9
3.1 实验材料	9
3.2 实验流程图	9
3.3 钎焊工艺设计与实施	10
3.3.1 钎焊接头设计	10
3.3.2 钎焊工艺设计	10
3.3.3 工艺实施与设备	11
3.4 实验分析方法	12
3.4.1 金相组织分析	12
3.4.2 SEM 组织形貌与 EDS 成分分析	13
3.4.3 XRD 物相分析	13
3.4.4 显微硬度分析	13
第四章 钎焊接头微观组织形貌及相组成分析	15

4.1 微观组织形貌分析	15
4.2 组织组成物分析	18
4.3 本章小结	19
第五章 钎焊工艺参数对组织与性能的影响	20
5.1 钎焊温度对焊缝组织的影响	20
5.2 钎焊时间对焊缝组织的影响	22
5.3 钎料预制量对组织的影响	22
5.4 焊接接头显微硬度分析	23
5.5 本章小结	25
第六章 结论与展望	26
6.1 结论	26
6.2 展望	26
参考文献	27
致 谢	29

第一章 绪论

1.1 课题的目的与意义

本课题来源于横向课题“高温精密传感器探头真空钎焊工艺研究”项目。近年来，随着航空科学技术的快速发展，在航空装备中越来越多地采用新材料、新结构，对其焊接技术也提出了更高的要求，为提高发动机的效率，热端部件的工作温度越来越高，对连接技术的要求变得更高。钎焊作为重要的焊接技术，对于新材料的连接和复杂精细结构件的制造，具有独特的优越性和灵活性，甚至对于某些新材料与复杂构件，钎焊是其唯一可行的连接技术。铂金属的抗腐蚀和抗氧化性极强，在高温下非常稳定，电性能亦很稳定，用于航空发动机高温传感器探头。因此，对铂金进行真空钎焊的工艺与组织性能研究具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 钎焊研究现状

钎焊与熔焊和压焊是现代三大焊接技术，钎焊是采用比母材熔点低的填充材料作钎料，将焊件和钎料加热到高于钎料熔点、低于母材熔点的温度，借钎料熔化填满母材间的间隙并与母材相互扩散实现连接的焊接方法^[1]。作为人类最早使用的材料连接方法，钎焊在很长的时期内没有得到重视。在近代其发展速度也远落后与熔焊。随着冶金工业的发展，钎焊技术得到了较快的发展，成为了一种重要的材料连接技术。在轻工业中甚至于高精尖产业中，钎焊都有着重要应用。例如，美国普惠公司的 JT9D 发动机蜂窝封严环，由环件和蜂窝夹芯用真空钎焊制成^[2]。钎焊虽然在异种金属、非金属与金属材料的连接有着更高的可靠性，但与熔焊与压焊技术相比，钎焊接头的强度较低、耐热性差，并不能取代熔焊与压焊。

随着航空航天领域的快速发展，对于航空发动机的要求不断提高，焊接技术得以快速发展。钎焊、扩散焊、搅拌摩擦焊、线性摩擦焊、高能束流焊等先进焊接技术在航空发动机焊接构件中得到发展和应用^[3]。其中，钎焊和扩散焊技术对于新型材料的连接和复杂构件的制造有着更高的灵活性与优越性，在许多材料采用传统熔焊难以连接时，为了得到性能更加优质的接头，采用钎焊和扩散焊技术是最为有效的。

扩散钎焊不同于其它钎焊方法，是在钎焊加热的过程中，焊缝间隙内的液态合金是在高于钎料固相线温度的条件下长时间保温，使其等温凝固形成焊缝的。而一般钎焊方法是让焊缝内液态合金因温度下降凝固形成焊缝的。

真空钎焊中软钎焊的钎焊接头强度一般较低，而硬钎焊的接头强度更高，并且耐热性更好，对于难熔金属的焊接更为适合，同时真空钎焊技术作为一种较新的钎焊方法，与其它钎焊方法相比其优势便是在于真空钎焊的钎焊质量高、无需钎剂，也更适合其它方法不易钎焊的金属或合金，因此真空钎焊连接在实际应用中的效果较为优异。国内对于真空钎焊技术的研究和应用较晚，但发展十分迅速，齐立君、蔡洪涛^[4]采用 B-Ni5 钎料高温真空钎焊 1Cr18Ni9Ti 进行工艺试验，得到了在 1170~1190℃ 的钎焊温度下，保温 2~10 分钟可以得到力学性能良好的钎焊接头。于治水^[5]等人比较了镍基合金在 1080℃、1110℃、1140℃ 钎焊温度下真空钎焊的钎焊接头，如图 1-1 所示，研究表明钎焊温度提高，钎料向母材的扩散速度越快，在 1140℃ 时焊缝中组织最为均匀，从而增强了钎焊接头的强度。

高温真空钎焊技术的发展必须基于设备的研发，中国电子科技集团公司白丽凝^[6]通过反复设计与改进，提高了设备的整体性能和真空钎焊炉的最高钎焊温度。高温真空钎焊工艺的发展与钎料的研究是相辅相成的，只有合适的钎料才能满足新工艺的需要。

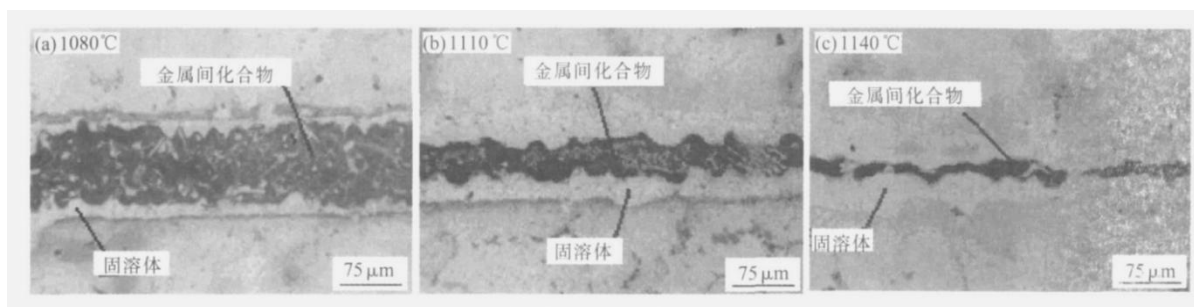


图 1-1 不同钎焊温度下焊缝组织^[5]

1.2.2 钎料研究现状

钎料按其合金体系中的基体元素或重要元素来划分，钎料包括银基钎料、铜基钎料、铝基钎料、镍基钎料、锰基钎料、锡铅钎料、无铅钎料及贵金属钎料等^[7]。

银基钎料是最为广泛应用的一种硬钎料，熔点为 600~1000℃，有着良好的导电性、润湿性、导热性、耐腐蚀性等优点。为了满足钎焊的工艺要求，含镉银钎料往往成为首选，尤其是制冷配件行业，几乎全部都需要使用含镉钎料^[8]。由于镉对人体有着较大危害，欧盟规定含镉的材料将不允许在家电产品中使用，而我国于 2006 年也禁止了家电行业中的镉的使用，需要寻找含镉银基钎料的替代钎料。美国人于 20 世纪 80 年代便研制出了 BAg-7（美国 0D7 标准牌号）钎料，成分为 Ag₅₆Cu₂₂Zn₁₇Sn₅d 的有着优秀钎料钎焊工艺性和钎焊接头力学性能的钎料，而我国制造业中使用的多为 BAg₃₄CuZnSn 钎料。银基钎料的价

格较高，选用价格低廉的元素来降低银的用量是未来银基钎料的重要研究方向。

铜基钎料有着较高的熔点、良好的润湿性、较高的接头强度、钎料流动性强等优点而被广泛应用，铜基钎料也易被氧化，所以多在保护气氛下或真空条件下钎焊，但由于铜基钎料的熔点一般较低，对于高温真空钎焊来说并不理想，通常通过在铜基钎料现有成分下添加合金元素镍来提高钎料的熔点，金属镍的熔点为 1455°C ，同时镍具有良好的抗腐蚀性和抗氧化性。故国内外针对铜基高温钎料研究方向主要在铜镍高温钎料上面，敖敬培^[9]根据 MGH956 合金钎焊接头的性能要求，制备出 Cu-Mn-NiCo 新型高温铜基钎料。虽然铜基钎料润湿性好成本低，但铜在高温时会被酸腐蚀，使接头失效，而为了得到耐腐蚀性能较好的焊接接头，多采用镍基钎料作为填充金属^[10,11]。李毅军、王洪礼^[12]研究了以铜磷钎料为基础，使用快速凝固技术制备出了 $\text{Cu}_{68.5}\text{Ni}_{15.7}\text{Sn}_{9.3}\text{P}_{6.5}$ (质量分数，%) 的非晶态钎料，并对其钎焊扩散机理开展了深入研究，研究表明所制钎料成分均匀，钎焊连接界面良好，而且合金元素的扩散有向母材深度方向呈沿晶界扩散的趋势。铜与镍为无限固溶体，可以形成连续固溶体。铜镍钎料可以在保持良好的流动性和润湿性的同时可以有着较高的熔点，以满足高温精密传感器探头的恶劣的工作环境。熊平华^[13]等人通过真空熔炼合金制备不同成分的 Cu-Ni-Ti 系合金钎料，改进了钎料的制备工艺并与 Si_3N_4 陶瓷进行了系统的润湿性实验，得到了较为理想的 $\text{Si}_3\text{N}_4 / 1.25\text{Cr}-0.5\text{Mo}$ 钢接头。

铝基钎料是一种广泛应用于钎焊铝和铝合金的钎料，但是铝易与其它金属生成脆性化合物，降低接头力学性能。M.Pouranvari^[14]等人采用 Al-Si 钎料使用钨极氩弧焊 (GTAW) 焊接 Al6061 和低碳钢，当热输入为 $540\text{J}/\text{mm}$ 时，接头强度最佳，可以达到 200MPa 以上。

镍基钎料是一种常用的高温钎料，钎焊温度通常在 $1050\sim 1250^{\circ}\text{C}$ 。镍有着良好的耐高温、抗氧化与耐腐蚀能力，但由于镍的熔点过高，为 1452°C ，热强度也较低，因此需要以镍为基体添加适量 B、Si、P、W、Mn 等合金元素降低其熔点并提高其热强度。镍基钎料的价格也较为便宜，是一种良好的高温钎料。刘文慧等人采用 $\text{BNi}_{68}\text{CrWB}$ 钎料钎焊 GH783 合金，接头室温最高抗拉强度可以达到 701MPa ， 650°C 最高抗拉强度可以达到 696MPa ^[15]。

锰基钎料是一种硬钎料，通常可以承受 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ 的工作温度。锰基钎料的塑性好，可以制成各种钎料形状。对于不锈钢与高温合金的润湿性较好，但由于锰易被氧化，多用于保护气体钎焊，不适用于真空钎焊与火焰钎焊。

锡铅钎料作为软钎焊中应用最广，其工作温度一般不超过 100°C ，并且在低温下，锡

铅钎料具有冷脆性。

目前国际上公认的无铅钎料定义是：以 Sn 为基体，添加了 Ag、Cu、Sb、In 其它合金元素而 Pb 的质量分数在 0.2% 以下的主要用于电子组装的软钎料合金^[16]。由于铅是具有毒性的一种金属元素。与含铅物质长期接触会危害人体身体健康。美国在 80 年代初便开始推行无铅钎料的使用，国际上对无铅钎料的研发主要集中于 SnCu、SnAg、SnAgCu、SnAgCuSb 和 SnAgBi 的合金系列。

贵金属钎料按照组元进行划分，主要分为金基钎料、银基钎料与钼基钎料，钎料的熔化温度为 250~1600℃，其钎焊接头有着性能高、稳定性高以及寿命长等优点。近年来，国内外针对贵金属钎料进行了大量研究，卢方焱等^[17]通过添加适量的 Ga、Sn、In、Ni 及稀土等元素来研究 Ag-Cu-Zn 为主的钎料合金体系，未来可能成为国际研究重点。

1.2.3 铂金研究现状

铂金属属于难熔金属一种，铂的化学性质十分稳定，铂不溶于盐酸、硫酸、硝酸和碱溶液，但可溶于王水和熔融的碱。在工业中凭借其熔点高、耐蚀性强、高抗氧化性、化学、物理性质稳定等优良的物理和化学性能，这些特性使其成为现代工业和国防建设的重要材料。

耐高温材料具有良好的高温强度和高温抗氧化性等综合性能，使得它能够作为极端环境下使用的候选材料。目前使用的耐高温材料有高温合金、钛合金、金属间化合物、难熔金属、金属陶瓷材料和复合材料等金属材料处于不同的温度环境时，其性能将发生一系列的变化^[18]。闫瑞超等人以 AgCu₂₀Ni₂ 合金为基础，采用添加 Pt 元素作为第四组元和改变组元成分的方法，通过真空感应熔炼制备了 AgCu_{7.5}Pt₁₀Ni_{0.5} 合金^[19]。

铂金因其稳定性高，精度高，近年来国外研究高度关注铂热电阻，据不完全统计，薄膜铂热电阻元件的生产大国—德国，年产薄膜铂热电阻元件的数量已突破 6000 万支^[20]。随着铂热电阻元件的应用不断扩大，其研究出现蓬勃发展之势，尤其在航天领域有着广阔的应用前景。如美国 NASA 面向航空发动机测试应用开展了一系列基础研究和应用验证，但离工程实际应用还有一段距离，仍有许多技术问题尚待解决^[21]。

传感器作为信息技术的高端产物，根据其感知功能可分为热敏、光敏、气敏、力敏、磁敏、声敏等十大类元件。其中温度传感器是热敏原件的一种，可以实现温度的监测和控制，在航空航天、精密仪表、国防等领域都有着广泛的应用。在航天航空领域，为了确保飞机发动机的稳定运行，需要有可靠的温度传感器进行准确测量，并反馈给控制系统，来

对发动机进行调整。因而，在航空发动机中温度传感器是关系着飞行安全的重要元器件，必须具有高稳定性和高精度。目前国内针对高温传感器探头用铂金属的研究主要在铂电阻温度传感器方面，因其具有精度高、稳定性强、测温范围广、电阻与温度的变化高度的线性相关等优点得到了广泛应用。候晓伟^[22]等人对不同退火工艺下铂电阻薄膜温度传感器基础性能的变化进行研究。与国外相比国内研究重点主要集中在传统产业中，对于铂金属器件的连接一直没有进行深入研究，而对于精密元器件的连接，钎焊是较为可行的办法。丁敏等人^[23]以探测器中的铂族金属钯和镍进行真空钎焊为例，研究了钎焊工艺对接头性能的影响。结果表明使用纯 Ag 做为钎料，在真空度略小于 $5.0 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 条件下可以使接头达到预期要求。

综上所述，铂金具有高稳定性、耐热性高、测温范围广等优点，所以在传感器中应用广泛。近年来国际针对铂金热电阻的应用逐步向航天领域发展。因此，铂金在传感器中的应用是目前研究的热点。

1.3 课题主要研究内容

针对高温精密传感器探头在航空发动机中的高温工作环境，结合铂金的特点和连接研究现状，以实现铜镍钎料对铂金的连接，在一定范围内控制高温真空钎焊的加热温度和钎焊时间，旨在得到具有较高工作温度和良好力学性能的钎焊接头。主要研究内容如下：

(1) 采用 H1CuNi30-2-0.2 铜镍钎料连接铂金，研究钎焊温度、钎焊时间和钎焊预制量的钎焊工艺参数对接头微观组织与性能的影响。

(2) 采用 SEM、EDS、XRD 对钎焊接头进行组织形貌分析、成分分析及相结构组成分析，结合钎焊接头各区域组织的显微硬度，分析钎焊接头的力学性能。

第二章 理论分析

钎焊作为现代重要的焊接方法之一，钎焊是采用低于母材熔点的钎料，使钎料在低于母材的熔点、高于自身熔点的温度下使钎料液化，将母材间的空隙填满，从而冷凝实现焊接的方法。钎焊前，首先要去除母材表面存在氧化物、油脂、尘埃等，否则会影响液态钎料在母材上的润湿性与流动性。钎焊过程中只有钎料熔化，应力与变形小，基本不会影响母材的性能与尺寸，可以对难熔金属进行焊接。

2.1 钎焊原理

钎焊是区别于熔焊和压焊的焊接技术，钎焊是使用熔融的液态钎料作为填充材料，通过润湿和毛细作用吸入并保留在母材间隙内，使液态钎料与母材相互作用，再随着温度降低冷凝形成钎焊接头，实现母材的连接，其原理如下：

(1) 钎料与母材的润湿：钎料对母材填充效果取决于钎料对母材的润湿性，润湿是指熔融的钎料液滴放在固体表面上，如果液体与固体界面的变化能可以使液-固体系自由能降低，那么液体就能很好的润湿固体表面并铺展开来，从而填满整个母材间隙，在钎焊时，润湿角要尽量小于 20° 。

(2) 毛细作用：钎料在钎焊过程中会逐渐变为液态，液态钎料需要毛细力的作用下才能在母材间隙内流动，由于母材间的间隙很小，类似于毛细管，所以称为毛细流动。液体钎料与母材越润湿，母材间的间隙越小，毛细作用便越强，间隙的填缝效果就越好。

(3) 钎料与母材的相互作用：在钎焊时钎料与母材会发生溶解扩散的现象，一种是由母材向液态钎料的扩散，可以使钎料成分合金化，可以提高接头的强度，但母材如果过度溶解便会导致液态钎料的熔点和粘度提高，流动性变差；一种是钎料组分向母材的扩散^[24]。

由于钎料与母材的相互作用，焊缝的成分和组织与原钎料的成分与组织区别较大，且通常是不均匀的。如图 2-1 所示，钎焊接头通常由四部分构成：母材、母材上临近界面的扩散区、焊缝界面区和焊缝中心区。

扩散区的组织是钎料组分向母材扩散形成的；界面区组织是母材向钎料溶解、冷却后形成的，它可能为固溶体或金属间化合物；焊缝中心区组织由于母材的溶解和钎料组分的扩散以及结晶偏析，其组织也不同于钎料的原始组织，焊缝的间隙大时，该区域组织同钎料原始组织较为相近；间隙小时，二者差异可能极大^[24]。

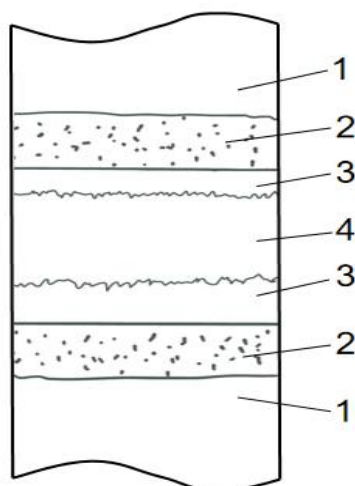


图 2-1 钎焊接头组织结构图

1—母材区；2—扩散区；3—界面区；4—焊缝中心区

2.2 钎料

钎焊过程中，母材是由熔化的液态钎料冷却凝固后实现连接的，决定着母材的熔点必须高于钎料。钎料的选择决定着钎焊接头的质量。为了满足工艺所需和得到理想的焊接接头，钎料的选择原则如下：

(1) 钎料的熔点应至少比母材的熔点低几十度，二者熔点过于接近则会使钎焊过程不易控制，甚至导致母材晶粒长大、过烧以及局部熔化；

(2) 钎料要有良好的润湿性、流动性，可以充分填满钎缝；

(3) 钎料与母材的扩散作用可以使两者形成牢固的接头；

(4) 钎料的成分应均匀、温度，尽量避免钎焊过程中的偏析现象和易挥发元素的损耗等；

(5) 获得的钎焊接头应满足产品的使用性能，如耐高温、强度、导电性、导热性、抗腐蚀性能等。

(6) 在保证钎焊接头性能的前提下，应尽量选用成本较低的钎料，少用或不用稀有金属和贵金属。

为了适应各种钎焊的条件，以及生产加工需求，钎料常加工成带状、丝状、铸棒状、非晶或普通箔状、粉末状、环形、糊状等^[25]。钎料按熔点高低可分为三大类：熔点低于 450℃的钎料称为软钎料，熔点高于 450℃的钎料则称为硬钎料，还有熔点高于 950℃的钎

料被称为高温钎料。而高温钎焊连接温度一般高于 900 °C，且所使用钎料的液相线与母材的液相线温度相差较小^[26]。

2.3 钎焊方法

钎焊的方法常根据热源或加热方式进行分类。常用钎焊方法有炉中钎焊、感应钎焊、浸沾钎焊、火焰钎焊和电阻钎焊^[24]。

炉中钎焊是利用电阻炉加热焊件，炉中钎焊按钎焊过程中钎焊区的气氛组成可分为四类，即空气炉中钎焊、中性气氛炉中钎焊、活性气氛炉中钎焊和真空炉中钎焊^[27]。

感应钎焊是将焊件处于一组感应线圈产生的交变磁场中，基体就会产生感应电动势，从而产生感应涡流，基体通过涡流的焦耳效应产生热量，随之钎料被基体加热融化达到焊接的目的^[27]。其加热速度快，可以保持原有尺寸精度。同时，引起的翘曲变形和整体变形量较小^[29]。

浸沾钎焊是把焊件局部或整体地浸入盐混合物熔液中或钎料熔液中，依靠这些介质的热量来实现钎焊过程^[24]。

火焰钎焊是利用可燃气体或液压燃料的气化产物与氧（空气）混合后燃烧产生的气体火焰作为热源进行钎焊的加热设备。火焰钎焊设备通常分为手工火焰钎焊装置和自动火焰钎焊机两类^[30]。

电阻钎焊是利用钎焊电极使焊接电流通过焊件，利用钎焊区电阻产生的电阻热使钎料熔化与母材形成接头的一种钎焊方法^[31]。其优点是生产率高、加热速度快、工艺简单可以实现自动化钎焊。但其只适用于小尺寸的简单接头。

本文所选用的真空钎焊无需钎剂，可以提高焊接件的抗腐蚀性能，焊件和钎料不会氧化，并且不需要复杂的清洗过程，降低了钎焊成本，在真空钎焊中钎料的润湿性与流动性良好，可以用于钛合金、铝合金、及难熔金属的钎焊。针对高温精密传感器探头的工作环境，需采用高温真空钎焊，与其他方法相比，高温真空钎焊技术有着无与伦比的优点，使其在工业领域快速发展与广泛应用，更适应于高温元器件、精密仪表、复杂零部件的焊接。

第三章 实验材料与amp;方法

3.1 实验材料

本课题采用的母材为铂板，厚度为 2mm，其化学成分为 Pt，其宏观照片如图 3-1 所示，将其压薄至 1mm，并切割成 $6\times 12\text{mm}^2$ 与 $3\times 6\text{mm}^2$ 的小块备用。真空钎焊的钎料选用 H1CuNi30-2-0.2 钎料，其化学成分如表 3-1 所示。

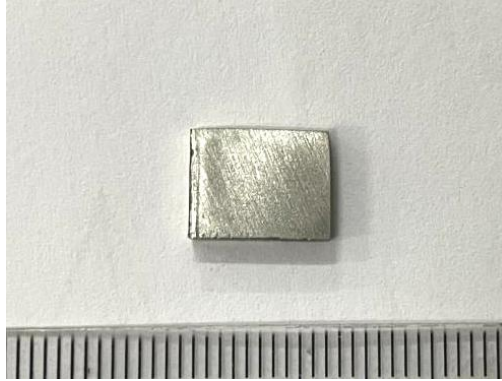


图 3-1 铂片照片

表 3-1 H1CuNi30-2-0.2 钎料化学成分(质量分数, %)

成分	Cu	Ni	Si	Fe	B
含量	66.3	30	2	1.5	0.2

3.2 实验流程图

实验流程图如图 3-2 所示，通过查阅文献，设计出合理的钎焊接头与钎焊工艺，实施既定钎焊工艺，得到钎焊接头，随后通过组织分析、XRD 物相分析与显微硬度分析，研究钎焊工艺对接头组织与性能的影响。

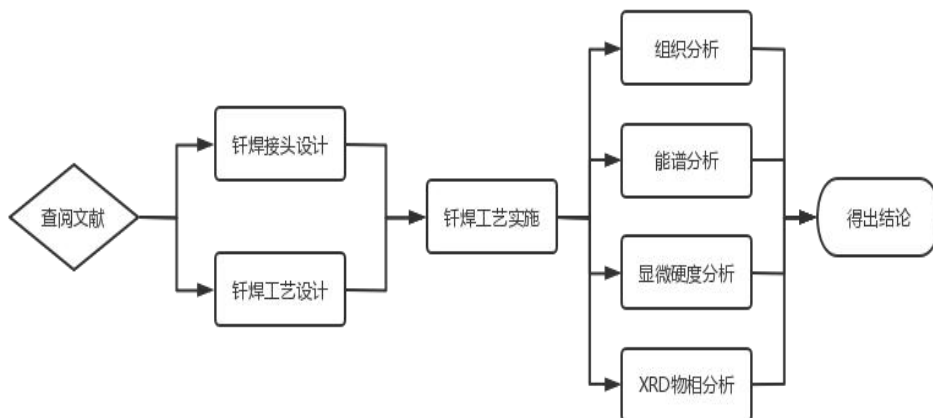


图 3-2 实验流程图

3.3 钎焊工艺设计与实施

3.3.1 钎焊接头设计

将试样和钎料按照图 3-3 采用搭接方式进行装配。

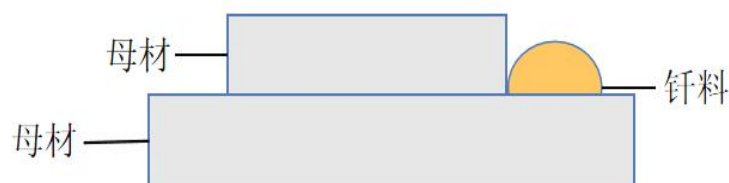


图 3-3 钎焊接头设计示意图

3.3.2 钎焊工艺设计

由于真空钎焊是炉中钎焊的一种，通常使用膏状钎料以便简化工艺，H1CuNi30-2-0.2 钎料的液相线为 1120~1166℃，在低于液相线 50~70℃的 T_A 温度保温 20min 可以防止加热速度过快，导致的焊件内外温度不一致，使焊件内外温度在后续钎焊中等温升高。钎焊温度 T_B 需要高于钎料的熔点，可以减少液态钎料的表面张力，提高润湿性和毛细作用，并且可以使母材与钎料的相互作用更加充分的进行，但钎焊温度 T_B 也不宜过高，容易产生溶蚀等问题，通常需要高于钎料液相线 25~60℃，故钎焊温度 T_B 选用 1180℃与 1200℃进行对比实验，钎焊时间选用 20min 与 60min 进行对比实验。真空钎焊工艺曲线如图 3-4 所示。

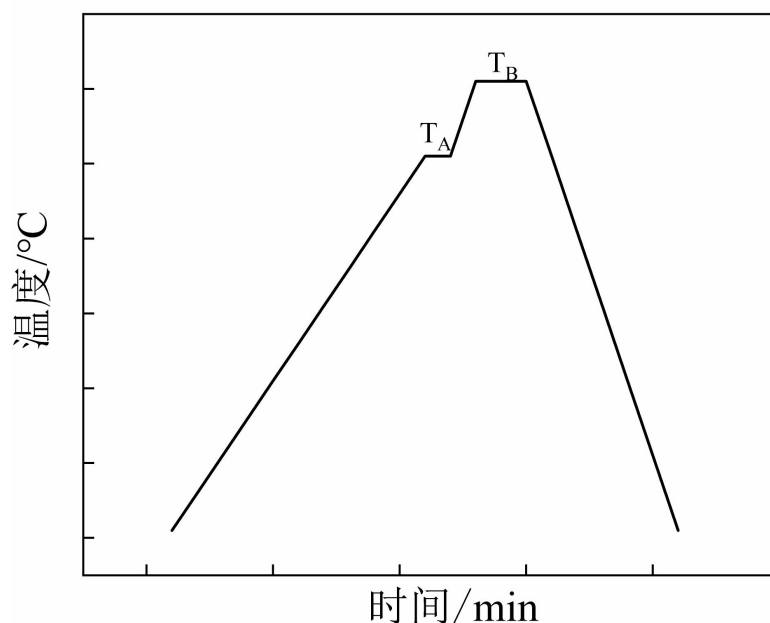


图 3-4 真空钎焊工艺曲线示意图

3.3.3 工艺实施与设备

在钎焊前选取 $6 \times 12\text{mm}^2$ 与 $3 \times 6\text{mm}^2$ 的两块铂片进行磨平，使用 2000 目砂纸将钎焊面磨制光滑并用清水清洗掉表面的杂质，使划痕方向朝向钎料方向，便于液态钎料进入焊缝，钎焊前需将铂板放入丙酮中使用超声波清洗 15min 去除铂板表面的油脂，清洗完成后放在干净的滤纸上晾干，然后与钎料进行装配搭接，钎焊装配的搭接接头如图 3-5 所示。



图 3-5 钎焊装配图

真空钎焊选用北京华海中谊节能科技股份有限公司的真空钎焊炉进行钎焊，如图 3-6 为真空钎焊炉。



图 3-6 真空钎焊炉

钎焊前首先要开启电源进行自检，将钎焊焊件置于干净的石墨工作台之上，将焊件至于靠近热电偶位置，以保证加热的准确性。再将石墨工作台放入如图 3-7 所示的真空炉炉膛中，关闭炉门后设置钎焊温度与钎焊时间，随后开启机械泵与旁路泵，J1 指示灯亮起

后开启主路阀与高真空阀，在真空度达到 2.0×10^{-3} MPa 以下时，开启加热开关，按照工艺运行。



图 3-7 真空炉炉膛

加热完成后，待真空炉内温度冷却到 80°C 以下时，便可关闭高真空阀和扩散泵，再等待 1h 后扩散泵冷却完毕，关闭主路阀和机械泵，打开炉门，取出钎焊焊件。

3.4 实验分析方法

3.4.1 金相组织分析

考虑到焊件较小，取出焊件后将焊件侧面较平整一端朝下使用导电镶嵌料进行热镶嵌，再使用 320 目、600 目、1000 目、1500 目、2000 目砂纸由粗到细进行磨制；将磨制后的焊件使用 W1.0 金刚石研磨膏进行抛光直至表面光亮无划痕；抛光后将焊件用清水冲洗干净，再用酒精脱水处理，最后吹干焊件。使用如图 3-8 Axio Observer 金相显微镜下观察各部位组织并拍照保存。



图 3-8 Axio Observer 显微镜

3.4.2 SEM 组织形貌与 EDS 成分分析

采用 SEM 对焊件的钎焊接头处的微观组织形貌进行观察并拍照保存；使用 EDS 对钎焊接头的各部分进行成分分析。如图 3-9 为扫描电子显微镜与能谱仪。



图 3-9 扫描电子显微镜与能谱仪

3.4.3 XRD 物相分析

使用如图 3-10 所示 Bruker 品牌的 D8 Advance 型号 X 射线衍射仪，利用 X 射线衍射对母材与焊缝进行物相分析，确定钎焊接头的物相组成。



图 3-10 Bruker D8 Focus X 射线衍射仪

3.4.4 显微硬度分析

对于钎焊接头的力学性能需采用 HXD-100 型显微硬度仪，如图 3-11 所示。选用载荷

50gf, 加载 10s 在对钎焊接头各区域测试硬度, 分析其焊缝位置的硬度情况。

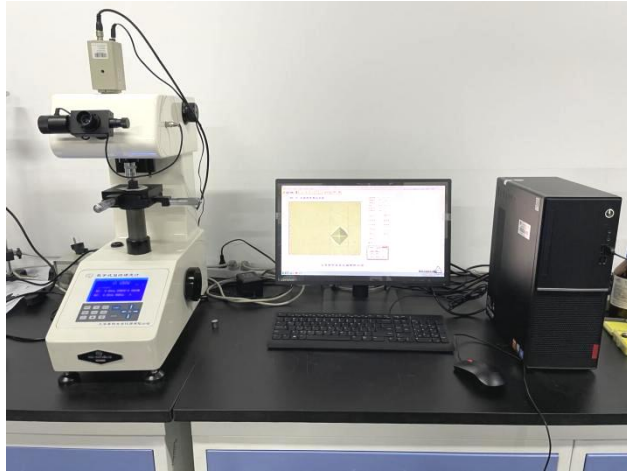


图 3-11 HXD-100 型显微硬度仪

第四章 钎焊接头微观组织形貌及相组成分析

4.1 微观组织形貌分析

图 4-1 为钎焊温度 1180℃ 钎焊时间 20min 采用 H1CuNi30-2-0.2 钎料钎焊铂金得到的钎焊接头组织的金相照片。钎焊接头明显的分为如图四个区域：母材区、扩散区、界面区、焊缝中心区。扩散区中存在着较多呈点状和颗粒状弥散分布的化合物；焊缝中心区是中间组织与临近两侧界面区的组织有明显差异，推测焊缝中心区是由中间的灰色共晶组织和临近两侧界面区的固溶体组织构成。

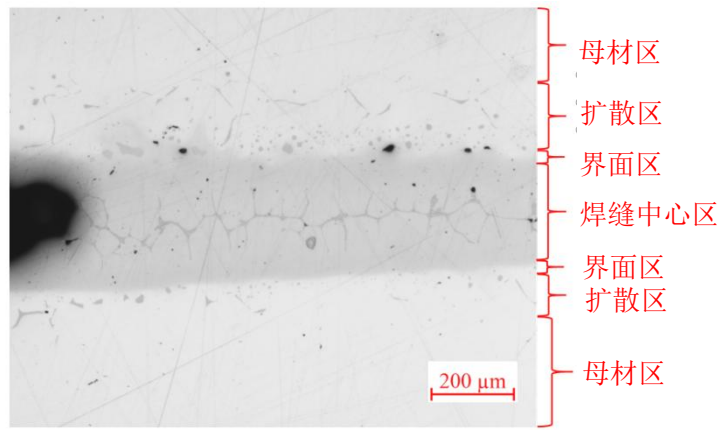


图 4-1 1180℃×20min 钎焊铂金接头组织图

如图 4-2 是 1180℃ 20min H1CuNi30-2-0.2 钎料钎焊铂金的钎焊接头焊缝中心区扫描电子显微照片，将 A 区域放大并在不同位置进行 EDS 点扫描，其中可以测量出在各个区域分布情况的元素有 C、Si、Ni、Pt、Cu 元素。

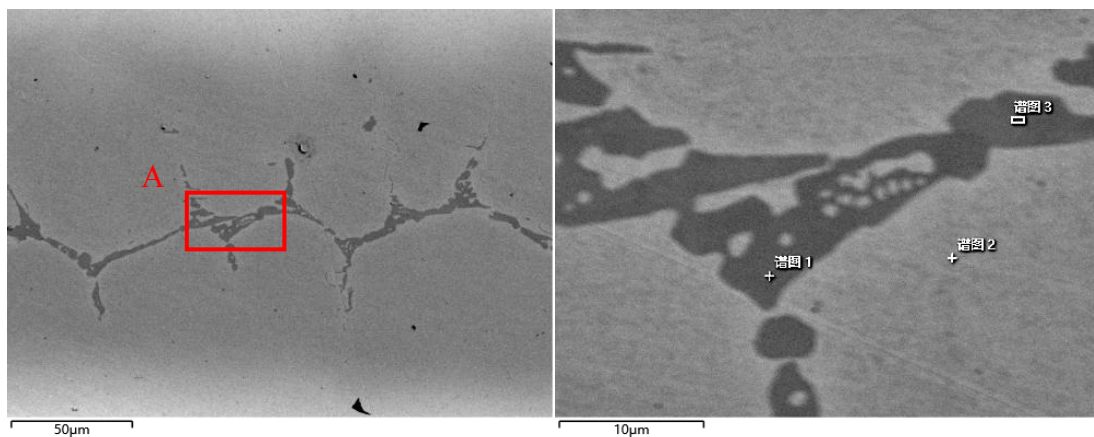


图 4-2 1180℃×20min 焊缝中心区扫描电子显微照片

如表 4-1 点扫描元素含量表所示，谱图 1 的位置为焊缝中心区共晶组织，Ni 元素含量最高，Si 元素含量其次，含有少量的 Pt 元素和 C 元素；谱图 2 的位置为焊缝中心区固

溶体组织，Cu、Ni 元素为主要元素，含有较多的 Pt 元素，以及较少的 C 和 Si 元素；谱图 3 位置也为焊缝中心区共晶组织，其中主要元素 Cu、Ni 元素，以及少量的 Si、C 元素。根据点扫描数据分析，焊缝中心区主要含有 Cu、Ni、Pt 元素，再结合 Cu-Ni、Cu-Pt、Ni-Pt 二元相图可推测，焊缝中心区主要由 Cu 基固溶体组成；Ni、Si 元素在焊缝中心区中间的共晶组织中富集，推测可能是由 Ni-Si 共晶组织构成。

表 4-1 点扫描元素含量表

元素 (Wt%) 谱图	C	Si	Ni	Pt	Cu
谱图 1	1.07	9.57	85.58	3.79	0
谱图 2	2.36	0.96	23.70	16.68	56.30
谱图 3	2.75	4.59	44.86	0	36.15

如图 4-3 为 Ni-Si 二元相图，钎焊温度为 1180℃，高于共晶温度 1143℃，随着钎焊温度下降，依附在母材表面的液态钎料最先开始凝固形成 Cu 基固溶体，随后向中间位置不断凝固，由于 Si 元素在固溶体中的溶解度较低，在焊缝中心区中间位置与 Ni 元素发生共晶反应，形成 Ni-Si 共晶组织。

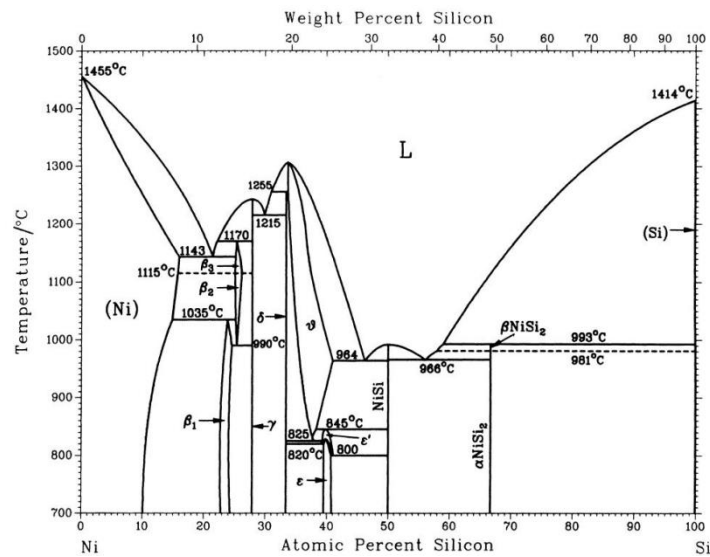


图 4-3 Ni-Si 二元相图

从图 4-4 钎焊温度 1180℃钎焊时间 20min 的钎焊接头焊缝中心区 EDS 分层图像中可以看出 Cu、Ni、Pt、Si、C 元素的分布情况。绿色区域为 Cu 元素的分布情况，Cu 在焊缝中心区域的比例要高于靠近母材的比例；从红色的 Ni 元素面扫描图谱中可以看出，Ni 元素在靠近母材区域的分布比例较少，Ni 元素在共晶组织的分布最多；从黄色的 Pt 元素面扫描图谱中可以看出，仅在靠近母材区域有着少量 Pt 的分布；从紫色的 Si 元素面扫描

图谱中可以看出，其在焊缝区域都有分布，并在灰色的共晶组织中富集，在中间区域分布比例较高，靠近母材区域分布较少。结合 EDS 点扫描图谱分析，在钎焊过程中，液态钎料中的元素向母材不断扩散。同时，母材中的 Pt 元素部分溶解并向液态钎料扩散；Ni 元素与 Si 元素分布在灰色的共晶组织中富集，生成了 Ni-Si 共晶组织与化合物。

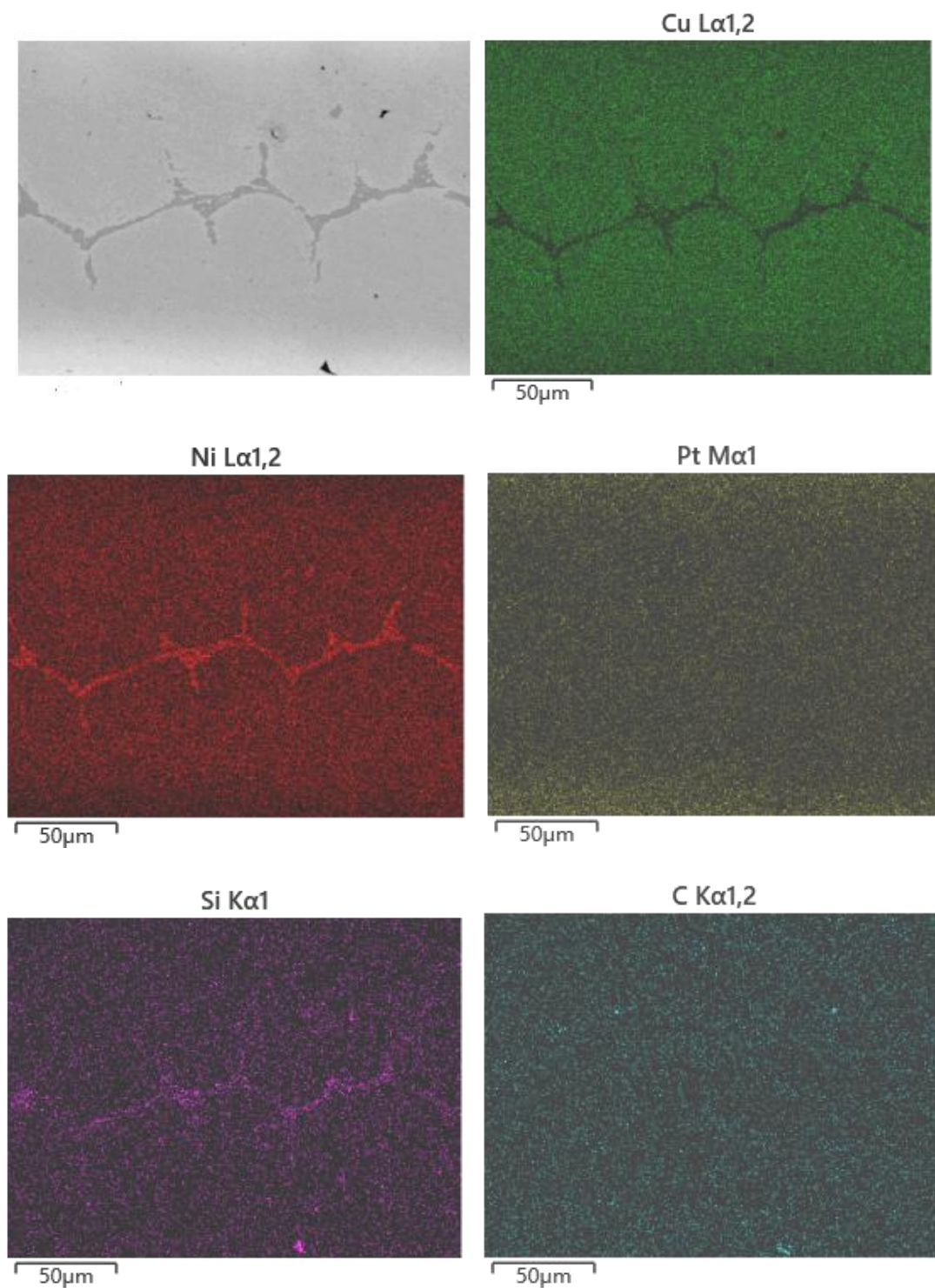


图 4-4 1180°C×20min 焊缝中心区 EDS 分层图像

如图 4-5 为钎焊温度 1180℃钎焊时间 20min 的钎焊接头的显微硬度检测照片，焊缝中心区固溶体组织的硬度为 210.2HV，而共晶组织的硬度为 300.8HV，其硬度远大于固溶体组织的硬度。

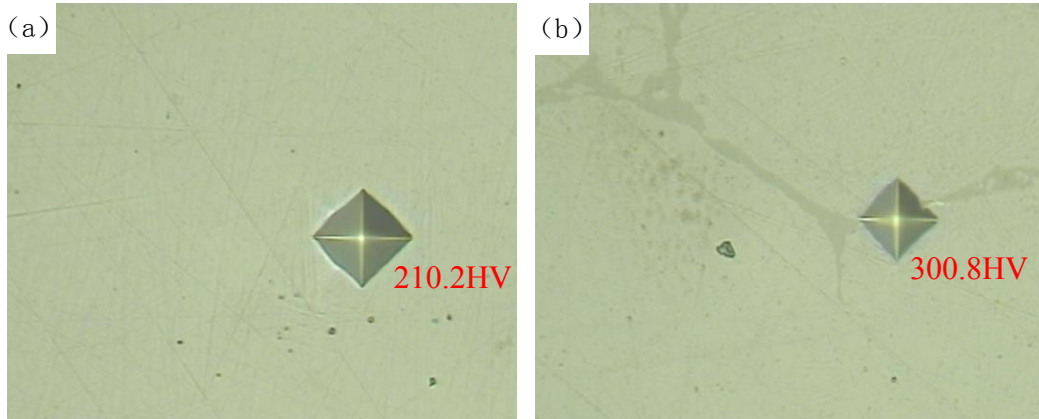


图 4-5 1180℃×20min 钎焊接头焊缝中心区组织显微硬度检测照片

(a)固溶体；(b)共晶组织

4.2 组织组成物分析

如图 4-6(a)所示为铂金母材的 XRD 衍射图，如图 4-6(b)所示为 H1CuNi30-2-0.2 钎料加热 1180℃钎焊时间 60min 的钎焊接头焊缝 XRD 衍射图。根据图 4-6(a)可以分析的到母材的相组成主要为 Pt，并还有少量的 Pt_3O_4 ，推测 Pt_3O_4 是在加工过程中 Pt 被氧化生成的；由 4-6(b)图可以分析得到焊缝的相组成主要为 $Cu_{3.8}Ni$ 、 Cu_3Pt 的铜基固溶体与构成共晶组织的 Ni_3Si 与 Ni 基固溶体。

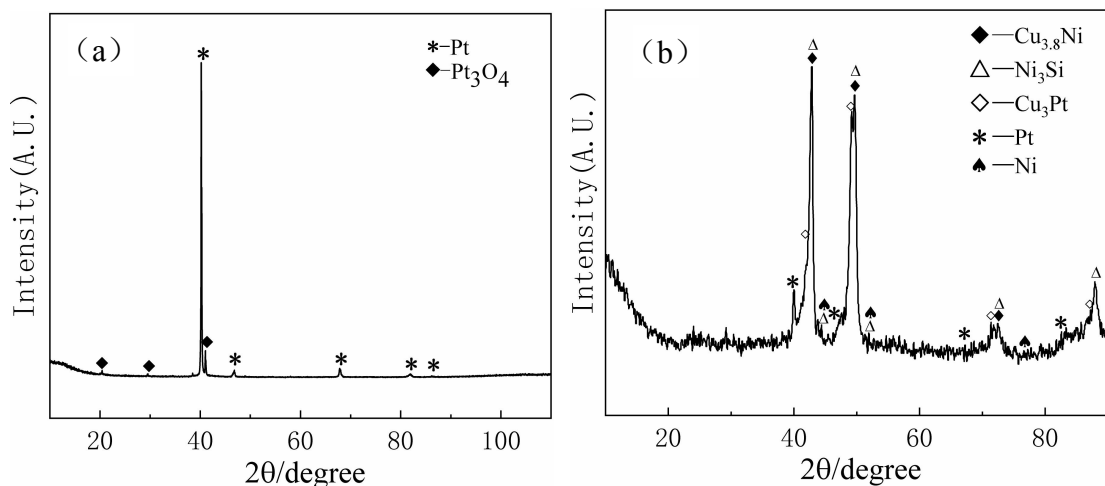


图 4-6 XRD 分析结果

(a)母材；(b)焊缝

结合对焊缝中心区组织的扫描电子照片与 EDS 点扫描和面扫描的结果可以推测出焊缝由大量 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 、 Cu_3Pt 组成的铜基固溶体与少量 Ni_3Si 、Ni 基固溶体组成的共晶组织构成。

4.3 本章小结

(1) 钎焊过程中钎料与母材互相扩散，钎焊接头组织形成了成分与组织形貌不同的四个区域：母材区、扩散区、界面区和焊缝中心区。液体钎料中的元素向母材扩散形成扩散区，在扩散区中有着呈点状和颗粒状弥散分布的 Ni-Si 化合物；由于钎料组分的扩散和母材铂板的溶解以及结晶时偏析形成了焊缝中心区，焊缝中心区中间的共晶组织与临近两侧界面区附近的固溶体组织有明显差异。

(2) 钎焊接头的焊缝相组成为 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 、 Ni_3Si 、 Cu_3Pt 、Pt、Ni。焊缝中心区组织主要为 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 、 Cu_3Pt 的 Cu 基固溶体， Ni_3Si 、Ni 基固溶体组成的共晶组织；扩散区呈点状和颗粒状弥散分布的化合物为 Ni_3Si 。焊缝中心区的共晶组织硬度为 300.8HV 而 Cu 基固溶体的硬度 210.2HV。

第五章 钎焊工艺参数对组织与性能的影响

5.1 钎焊温度对焊缝组织的影响

如图 5-1 是钎焊时间 20min 钎焊温度分别为 1180℃ 与 1200℃ 的 H1CuNi30-2-0.2 钎料钎焊铂金的钎焊接头组织处的金相照片。由图 5-1(a)可知, 在钎焊温度为 1180℃ 时, 在焊缝中心区位置有着连续的共晶组织; 由于在钎焊温度较低时, 元素扩散的不充分, Si 元素在固溶体中的溶解度较低, 会在冷却过程中与 Ni 元素发生共晶反应, 在扩散区生成与共晶组织颜色、形态相近的 Ni_3Si 化合物。如图 5-1(b)可知, 随着温度提升至 1200℃, 促进了液态钎料向母材的扩散, 焊缝宽度变窄; Si 元素向母材扩散更充分, 使焊缝中心区的共晶组织明显减少, 焊缝中心区趋向于形成均匀的组织; 扩散区大量弥散分布的 Ni_3Si 化合物也基本消失。

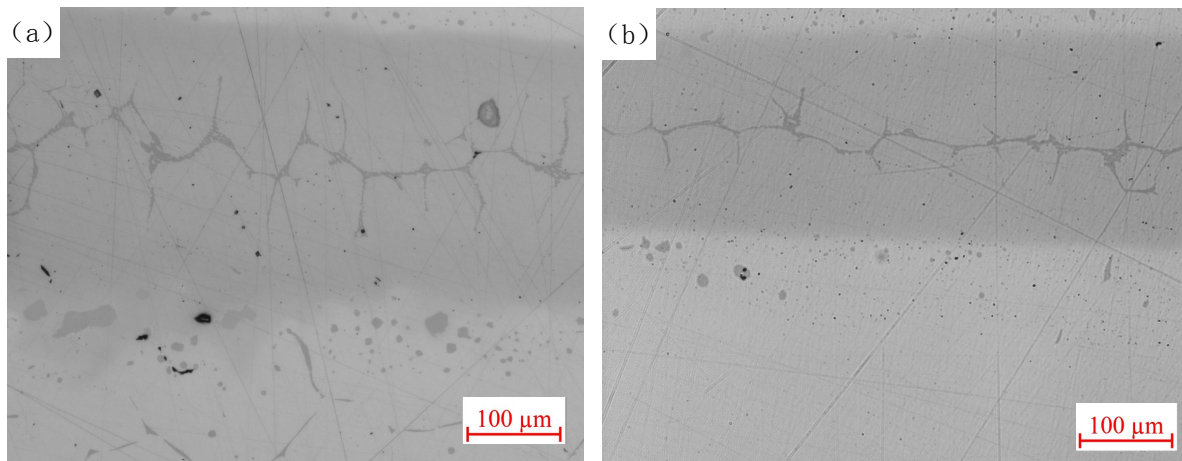


图 5-1 H1CuNi30-2-0.2 钎料钎焊铂金的钎焊接头组织
(a)1180℃×20min; (b)1200℃×20min

如图 5-2 与 5-3 分别是钎焊温度为 1180℃ 与 1200℃ 保温 20min 的 H1CuNi30-2-0.2 钎料钎焊铂金的钎焊接头组织处的线扫描图谱, 可以看出 B、Ni、Pt、Si、Cu 元素在各个区域分布情况。由钎焊温度 1180℃ 保温 20min 的线扫描的结果可以看出 Cu 元素的线扫描图谱两边高度较低, 中间高度较高, 呈梯度分布, 但在焊缝中心区域 Cu 元素的线扫描图谱有着较大的凹陷; Ni 元素分布情况与 Cu 元素基本相同, 都在线扫描图谱两边高度较低, 基本对称, 呈梯度分布, 在焊缝中心区域线扫描图谱有较大的峰值; Pt 元素的 EDS 线扫描图谱两边高度较高, 中间凹陷, 基本成对称分布; Si 元素的线扫描图谱相对较为平滑, 无大范围的波动, 但在左侧与中间位置有着 3 处小峰值, 高于图谱的平均高度; B 元素的原子序数较小, 扩散速率快, 所以线扫描图谱较为平滑, 无明显分布变化。由钎焊温度

1200℃保温 20min 的线扫描结果可知，Cu 元素线扫描图谱，其在两边高度较低，在靠近中间位置上升出现两个相对对称的峰值，中间位置高度迅速降低，出现凹陷。Ni 元素的线扫描图谱与 Cu 元素基本相同在两边的高度较低，在中间位置出现大的峰值，在扩散区附近位置出现两个大的峰值，在共晶组织处也存在一个峰值，整体呈凹陷状；Pt 元素的线扫描图谱两边高度较高，靠近中间界面区附近位置下滑随后又上升。Si 元素的线扫描图谱整体呈平滑，但在中间焊缝区域出现下降，并在共晶组织处富集出现峰值；B 元素的线扫描图谱无明显的变化。

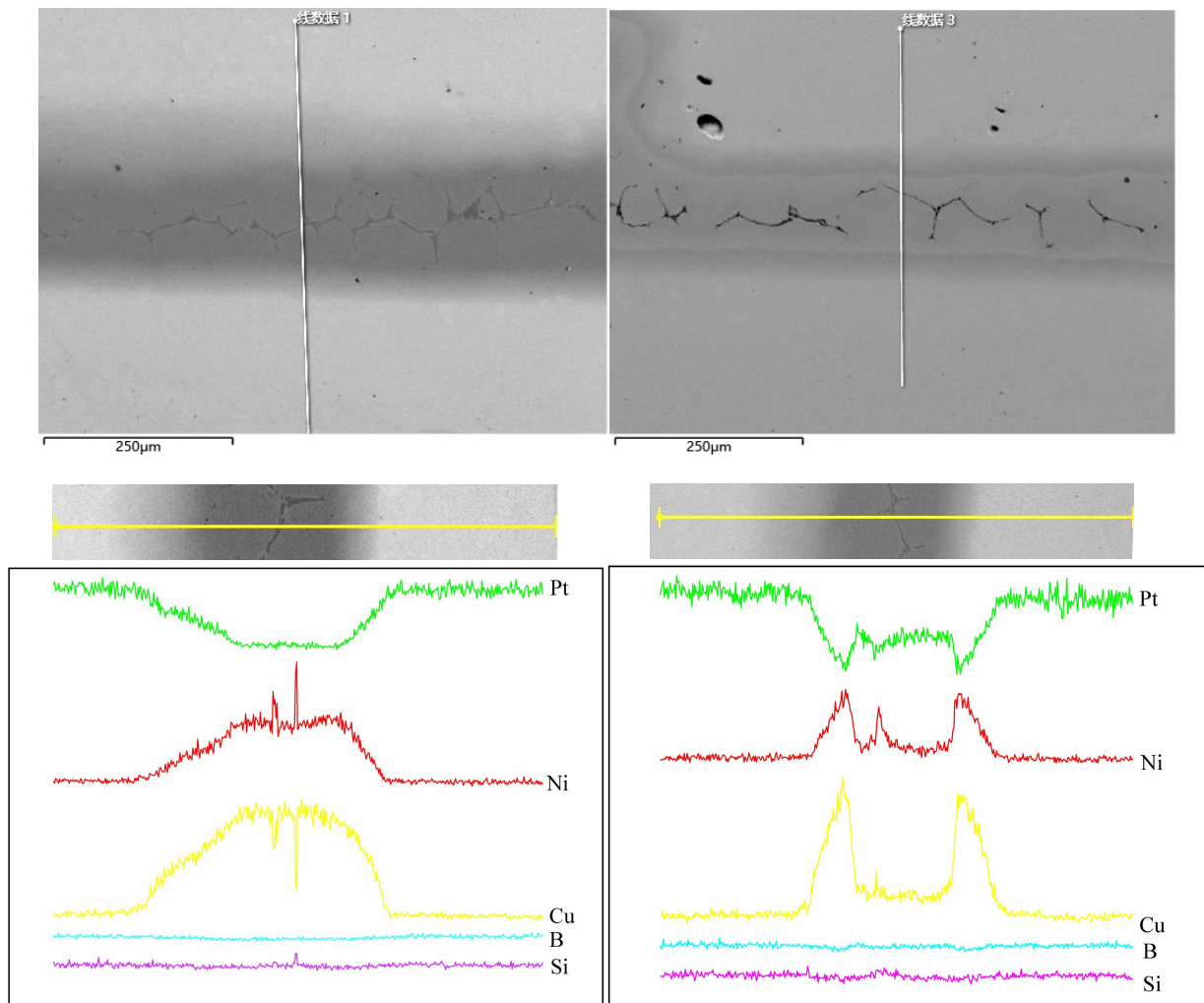


图 5-2 1180℃×20min 钎焊接头线扫描图谱

图 5-3 1200℃×20min 钎焊接头线扫描图谱

通过线扫描可以看出元素扩散距离与对应位置元素分布情况，结合钎料原成分分析可知，在钎焊时间为 20min 时，将钎焊温度由 1180℃升高至 1200℃，由于钎焊温度的不同，元素的扩散情况也有差异。钎焊接头元素扩散情况受温度影响最大的是 Cu、Ni、Pt 元素的扩散，Si、B 基本相同，无较大波动；Cu、Ni 元素随着钎焊温度的升高扩散距离反而

降低，在界面区出现了断崖式的降低，这是由于钎焊温度的升高，液态钎料中的元素扩散更加显著，但在固态母材的扩散速率要低于液态扩散，使得元素 Cu、Ni 元素的扩散受到阻碍从而富集在界面区；Pt 元素的扩散随着钎焊温度的升高，其在焊缝中心区的含量明显提高，可见随着温度的升高，元素的扩散速率越快。同时由 Cu、Pt、Ni 二元相图可知，Pt 与 Ni 均与 Cu 无限固溶，Pt 与 Cu 无限固溶可以形成 Cu_3Pt 或 CuPt 相。再通过结合 EDS 点扫描与面扫、线扫和 XRD 物相分析可确定焊缝接头组织主要由 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 、 Cu_3Pt 铜基固溶体为主，少量 Ni_3Si 、Ni 基固溶体构成的共晶组织组成。根据相关文献^[19]可知，Pt 元素作为高熔点成分，与 Cu 形成新相可以明显提高焊缝的熔点，改善焊缝的力学性能。

5.2 钎焊时间对焊缝组织的影响

图 5-4 是钎焊温度为 1200°C ，不同钎焊时间 20min、60min 不同钎焊时间 20min、60min，H1CuNi30-2-0.2 铂金钎焊焊接接头区域的微观组织金相照片。由图可见，不同钎焊温度下的焊缝中心区的组织形貌也有所不同。钎焊温度为 1200°C 时，随着钎焊的时间的延长，钎料中的元素向母材的扩散便越深入，焊缝的宽度也越窄，焊缝中心区的共晶组织大量减少，呈现断续状态分布；界面区宽度越窄；扩散区范围增大，弥散分布的点状、颗粒状 Ni_3Si 化合物由于更多的 Ni、Si 元素向母材扩散而增多。

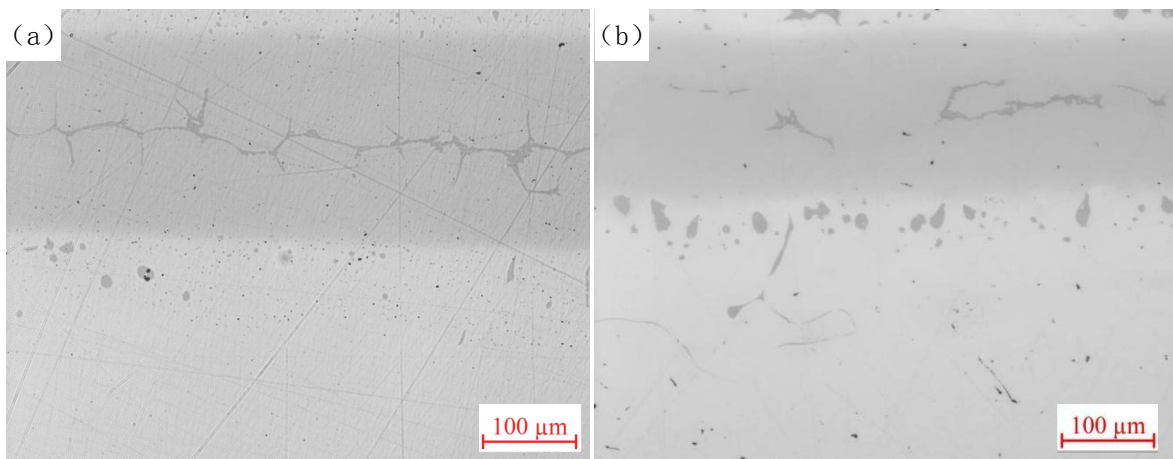


图 5-4 H1CuNi30-2-0.2 钎料钎焊铂金的钎焊接头组织
(a) $1200^\circ\text{C} \times 20\text{min}$; (b) $1200^\circ\text{C} \times 60\text{min}$

5.3 钎料预制量对组织的影响

从图 5-5 与 5-6 不同工艺 H1CuNi30-2-0.2 钎料钎焊铂金接头组织照片可以看出钎料的预制量对于焊缝的组织与宽度有着重要影响，预制量越少，液态钎料进入焊缝的量越少，冷却形成的焊缝便越窄。从图 5-8(b)与钎焊温度 1180°C 保温 60min 的钎焊接头组织可以

看出，由于焊缝中液态钎料的减少，窄元素扩散更加充分，其焊缝组织与基体组织形貌基本相同。同时，界面区厚度大幅减小；焊缝中心区与扩散区的共晶组织与化合物也因为元素的充分扩散而消失。表明减少钎料的预制量可使共晶组织与 Ni_3Si 化合物消失，进而提高钎焊接头的工作温度与力学性能。

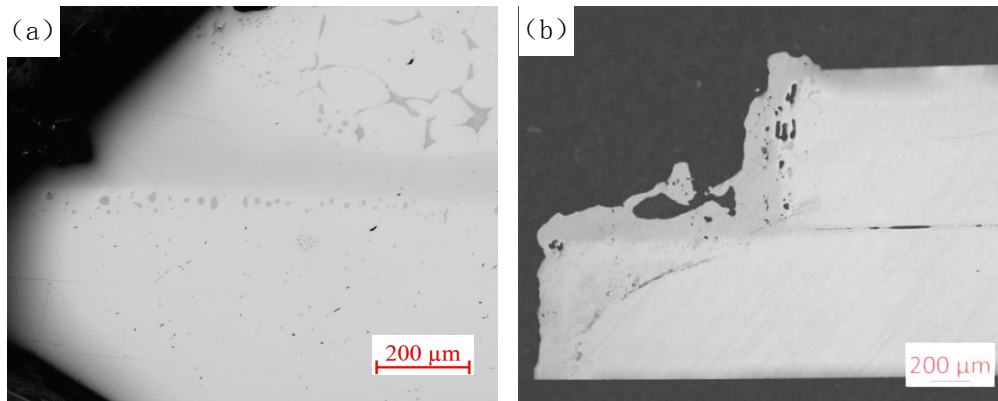


图 5-5 H1CuNi30-2-0.2 钎料钎焊铂金接头组织照片
(a)1200°C×60min; (b)1180°C×60min

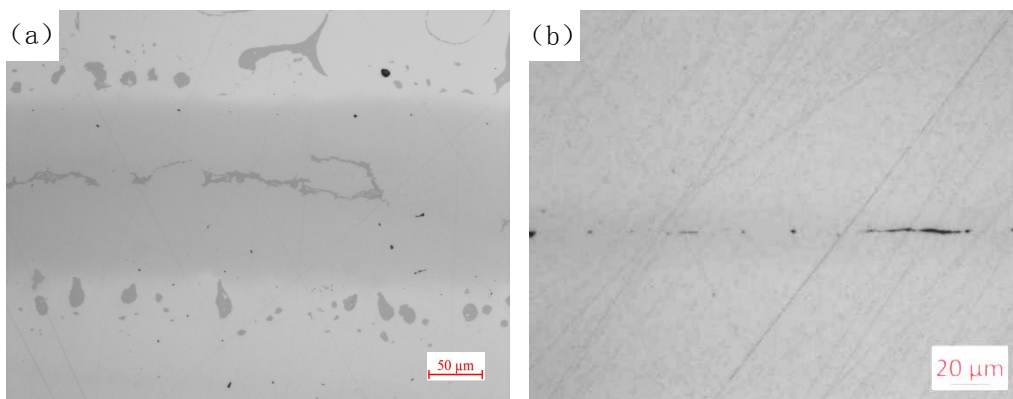


图 5-6 H1CuNi30-2-0.2 钎料钎焊铂金接头组织
(a)1200°C×60min; (b)1180°C×60min

5.4 焊接接头显微硬度分析

如图 5-7 与图 5-8 为钎焊温度 1180°C 保温 20min 与钎焊温度 1200°C 保温 60min 的钎焊接头组织的显微硬度分布曲线，载荷为 50gf，保荷时间为 5s。由图 5-5 可以直观的看出，钎焊接头组织的显微硬度从焊缝中心区的 300.8HV 降至 210.2HV，到界面区附近提高至 388.1HV，随后在扩散区降至 131.6HV，到母材区硬度降至 101.4HV。如图 5-6 钎焊接头组织的显微硬度从焊缝中心区的 240.0HV 到界面区附近升至 379.8HV，在扩散区中随着扩散距离的增加硬度值不断下降，最后至母材区硬度降至 100.3HV。

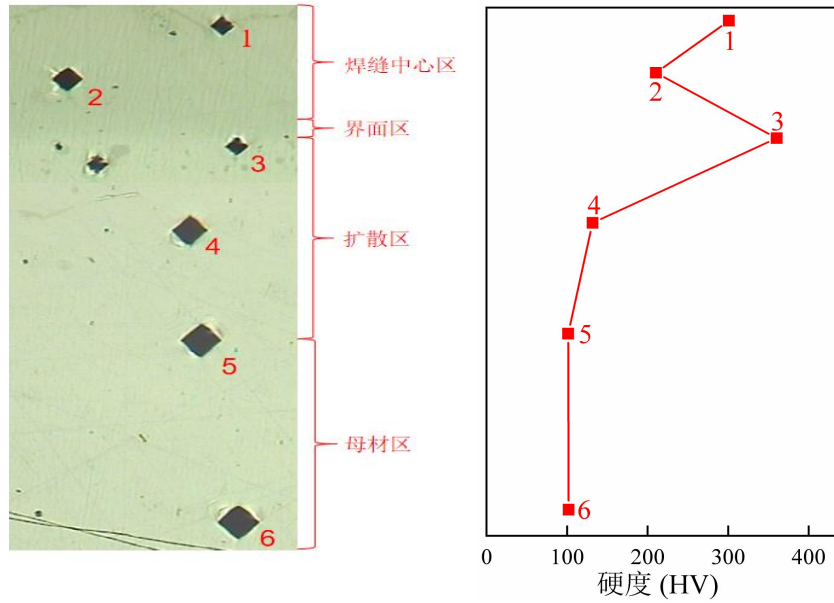


图 5-7 1180°C×20min 钎焊铂金接头组织与硬度曲线

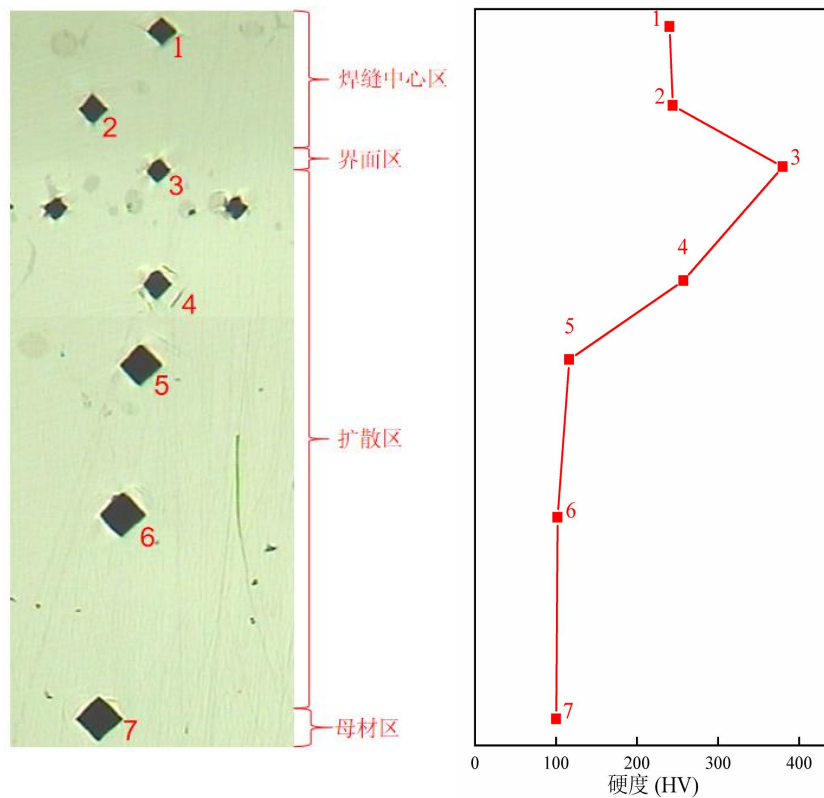


图 5-8 1200°C×60min 钎焊铂金接头组织与硬度曲线

通过以上两组数据可知：不同工艺参数下元素扩散程度不同，在 1180°C×20min 与 1200°C×60min 的钎焊工艺下，随着钎焊温度升高、钎焊时间延长元素扩散更加充分，扩散区范围明显增大。焊缝中心区的第二相共晶组织与界面区附近也存在着弥散分布的第二相化合物，大幅度提高了硬度，硬度由中心到两边呈现先下降后上升的趋势；随着扩散距

离的增加 Ni 元素的含量便越来越少，扩散区硬度值呈现不断下降趋势，直至母材区稳定。

5.5 本章小结

(1) 钎焊温度升高由 1180℃ 至 1200℃，元素扩散系数增大，使焊缝中心区的 Ni_3Si 、Ni 基固溶体组成的共晶组织体积与扩散区的 Ni_3Si 化合物数量减少；扩散区范围增大。

(2) 随着钎焊时间由 20min 延长至 60min，会使元素扩散的更加充分，焊缝中心区的高硬度的共晶组织减少，呈现断续状态分布，扩散区弥散分布的 Ni_3Si 化合物增多，从而使焊缝中心区的组织趋于均匀。

(3) 通过减少钎料预制量，使钎料进入量减少，形成窄焊缝，可以达到消除焊缝中心区共晶组织与扩散区的 Ni_3Si 化合物的目的。

(4) 焊缝中心区中心位置到母材区的硬度值先降低后升高再降低，由于元素在界面区附近富集，在界面区附近的硬度值最高，再随着扩散距离的增大而降低。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文采用 H1CuNi30-2-0.2 钎料，采用高温真空钎焊的方法连接了铂金，钎焊温度分别为 1180℃ 和 1200℃，钎焊时间分别为 20min 和 60min，研究钎焊工艺参数对钎焊接头的微观组织与性能的影响，得出如下结论：

(1) 在钎焊过程中钎料与母材会互相扩散，形成成分与组织形貌不同的四个区域：母材区、扩散区、界面区与焊缝中心区。扩散区中有着弥散分布的点状和颗粒状 Ni_3Si 化合物；焊缝中心区由中间的 Ni_3Si 与 Ni 基固溶体组成的共晶组织和临近两侧界面区的 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 、 Cu_3Pt 组成的 Cu 基固溶体构成，共晶组织的硬度为 300.8HV，而 Cu 基固溶体的硬度 210.2HV。

(2) 随着钎焊温度由 1180℃ 提高至 1200℃，元素扩散速率提高，焊缝的宽度变窄，焊缝中心区 Ni_3Si 与 Ni 基固溶体组成的共晶组织的体积与扩散区的 Ni_3Si 化合物的数量减少。

(3) 随着钎焊时间由 20min 延长至 60min，元素扩散更加充分，从而使焊缝宽度变窄，焊缝中心区的 Ni_3Si 与 Ni 基固溶体组成的共晶组织减少，呈现断续分布；扩散区 Ni_3Si 化合物增多，焊缝中心区的组织趋于均匀。

(4) 钎料预制量的减少会使焊缝中心区变窄，液态钎料中的元素充分扩散，以达到消除焊缝中心区的共晶组织与扩散区的 Ni_3Si 化合物的目的。

(5) 焊缝中心区到母材区的硬度值先降低后升高随后降低，元素在界面区附近富集，生成了弥散分布的第二相化合物，在界面区附近的硬度值最高，在扩散区随着扩散距离的增加而降低。

6.2 展望

通过改变钎焊工艺参数可以实现消除焊缝中心区的共晶组织与扩散区的 Ni_3Si 化合物，调整不同工艺参数使焊缝组织均匀化，形成高熔点的相，探究最佳钎焊工艺参数，进而使焊件的工作温度达到预期的 1400℃，仍有待研究。

参考文献

- [1] 孙柏洲,张淮.小议真空钎焊技术的应用研究[J].今日科苑,2007(22):71.
- [2] 鄂东梅.真空技术在航空航天中的应用[J].真空,2021,58(03):77-81.
- [3] 孔庆吉,曲伸,邵天巍等.钎焊及扩散焊技术在航空发动机制造中的应用与发展[J].航空制造技术,2010, No.372(24):82-84.
- [4] 齐立君,蔡洪涛.Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 高温真空钎焊工艺研究[C].中国核学会核材料分,2007 年度学术交流论文集,2007:146-149.
- [5] 于治水,石昆,李瑞峰.钎焊温度对镍基合金真空钎焊接头组织及硬度的影响[J].热加工工艺,2009,38(17):116-119.
- [6] 白丽凝.高温真空钎焊炉的加热室设计[J].科技情报开发与经济,2009,19(31):186-188.
- [7] 吕晓春,孙晓梅,宋北.钎焊材料行业发展与标准化需求[J].机械制造文摘(焊接分册),2019(03):13-17.
- [8] 韩宪鹏,薛松柏,赖忠民,顾文华,顾立勇.无镉银钎料研究现状与发展趋势[J].焊接,2007(06):19-23+62.
- [9] 敖敬培.MGH956 高温合金钎焊用 Cu-Mn-Ni-Co 钎料制备及钎焊技术研究[D].华南理工大学,2014.
- [10] Philips N R, Levi C G, Evans A G. Mechanisms of Microstructure Evolution in an Austenitic Stainless Steel Bond Generated Using a Quaternary Braze Alloy[J].Metallurgical & Materials Transactions A, 2008, 39(1):142-149.
- [11] Khorram A, Fakhraei O, Torkamany M J. Laser brazing of Inconel 718 and Inconel 600 with B Ni-2 nickel-based filler metal[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5-8):2075-2084.
- [12] 李毅军,王洪礼.铜基非晶态钎料钎焊扩散机理研究[J].厦门科技,2014(03):36-39.
- [13] 熊华平,李晓红,毛唯,程耀永.Cu-Ni-Ti 系合金钎料对 Si_3N_4 陶瓷自身及其与金属的连接研究[J].材料科学与工艺,1999(S1):148-152.
- [14] Pouranvari M Abbasi M.Dissimilar gas tungsten arc weld-brazing of Al/steel using Al-Si filler metal: Microstructure and strengthening mechanisms[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2018:
- [15] 许欣星,董红刚,陈晶阳.镍基高温合金用钎料研究进展[J].机械制造文摘(焊接分册),2018(02):1-9.
- [16] 马鑫,董本霞.无铅钎料发展现状[J].电子工艺技术,2002(02):47-52.
- [17] 卢方焱,薛松柏,张亮,赖忠民.Ag-Cu-Zn 系钎料的研究现状及发展趋势[J].焊接,2008(10):13-19+69.
- [18] 张鹏,朱强,秦鹤勇,沈文涛.航空发动机用耐高温材料的研究进展[J].材料导报,2014,28(11):27-31+37.
- [19] 阎瑞超.银铜铂镍合金的制备及组织与性能研究[D].云南大学,2019.
- [20] 谭贵权,谭文佳.薄膜铂热电阻元件的应用及发展[C].第八届工业仪表与自动化学术会议论文集,2007:265-269.
- [21] 孙道恒,崔在甫,周颖锋,周排弟,易伟劲,林晓龙,王凌云.典型高温薄膜传感器的研究进展[J].电子机械工程,2018,34(01):1-7.
- [22] 侯晓伟,刘莉娜,吕阳,郑良广,张丛春.MEMS 铂薄膜温度传感器的电阻温度系数研究[J].传感技术学报,2020,33(06):825-829.

- [23] 丁敏,亢世江,卢屹东,陈学广,彭小玲. 钎合金与镍合金的真空钎焊工艺[J]. 焊接技术, 2005(05):35-36+80.
- [24] 邹僊. 钎焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [25] Long W M, Li S N, Du D, et al. Morphological Evolution and Development Trend of Brazing Materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(12):3781-3790.
- [26] 庄鸿寿, E·罗格夏特. 高温钎焊[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [27] 龙伟民, 孙华为, 秦建, 裴寅, 薛嘉琪. 钎焊技术在高速列车制造中的应用[J]. 电焊机, 2018, 48(03):25-31.
- [28] 朱华东. 非晶 Ni 基钎料感应钎焊金刚石微粉及其加工性能的研究[D]. 青岛科技大学, 2017.
- [29] Li Q L, Xu J H, Su H H, et al. Fabrication and performance of monolayer brazed CBN wheel for high-speed grinding of super alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5): 1173-1180.
- [30] 王光庆. 钎焊技术在制冷行业的应用[J]. 制冷与空调, 2019, 19(11):9-13.
- [31] 张鹏. 基于金属电极的电工触头电阻钎焊工艺的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2011.

致 谢

四年时光悄然过去，在大学的学习生活让我不断成长，从四年前的初秋到今年盛夏，感谢四年来学校的培养，虽有遗憾与不舍，但前路漫漫，也只能来日方长。

特别感谢我的指导老师—田春英老师对我的指导和帮助，在学习与生活中提供了诸多有益的意见和建议。田老师严谨认真的工作态度、深厚的学术造诣、和蔼可亲的风范深深地影响了我，从最初的科技小组、金相大赛再到毕业实习、应聘工作，田老师对我的谆谆教导仍记忆犹新，让我在学术和人生上都受益匪浅。山高水长有时尽，唯我师恩日月长。在此祝愿老师身体健康、万事平安，感恩之情，难以言表。

感谢全体金属材料工程的老师对我的教导与帮助，在此，我向老师们表达我的感激之情。老师们用心、专业的教学，让我受益匪浅，为我今后的学习和工作奠定了扎实的基础。

在此，我要对我最亲爱的家人说声谢谢。感谢你们一直以来给予我的鼓励和支持。即使在异乡求学，也一直能感受到你们的陪伴和支持。是你们让我在人生的道路上始终不感孤独，我一定会倍加珍惜你们的付出，更加努力前行。感谢我的女朋友李鹏艺一直以来对我的支持与鼓励，愿我们齐头并进、相濡以沫。

汉恩自浅胡恩深，人生乐在相知心。感谢王凯博、段念祖、杨子健以及科技小组的同学，让我感受到了家人般的温暖，在彼此互帮互助中成长，我很庆幸能够有你们为伴，因为有了你们，我的生活变得充满了色彩和乐趣。

感谢审阅者和评审专家对本文的认真阅读和精心评价，这对我来说是一份非常宝贵的财富。我将更加努力，不断提高自己的文字表达能力，为您呈现更优秀的作品。

最后，我想要对努力的自己说一声谢谢，未来尚不可期，工作不代表着学习的停止。在大学里一直都在努力变得更好，不论是在以后的学习、工作还是生活中，都要尽力地追求自己的目标，相信自己的能力，坚持自己的梦想。人生如逆旅,我亦是行人。