



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

本科生毕业设计

某航天发动机温度传感器制造工艺开发
Development of Manufacturing Process of Temperature
Sensor for Aerospace Engine

姓 名 张志鹏
学 院 航空航天学院
专 业 飞行器制造工程
指导教师 王军
职 称 教授
完成时间 2020年5月30日

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

我国正在研发的某型航天发动机的温度传感器要求耐高温 800℃, 耐压 17MPa、30 分钟以上。发动机燃烧室中燃气温度高达 3000~4700K, 燃气压力可达几兆帕到 20 兆帕。进入大气层期间会经历剧烈的高温、高压、高振动环境, 在该环境下为了保证温度数据实时采集的准确性, 需要在狭小的空间内对热电偶进行保护。

本文采用高温真空钎焊的方法焊接 GH3039 金属套管与铠, 利用真空钎焊炉进行多组探究并选择最佳的工艺参数。分为两个部分进行试验: 1. 预实验。2. 主试验。预实验中采用相同材料的 GH3039 合金探究不同的粗糙度、保温时间、加热温度对填充率的影响, 并锁定参数范围。得到初步试验结果后根据试验结果进行主试验的方案设定。主试验中探究不同间隙、保温时间、固定方向、加热温度对填充率的影响。做出试验结果的金相拍照拼接图进行分析比对, 计算填充率并结合预实验结果选出最佳试验参数。

主试验中, 试验结果和预试验的结果基本吻合, 分析比对后选择最佳温度为 1030℃, 保温时间为 20min。确定了最佳间隙 0.14mm~0.15mm 之间, 经过 2000 目砂纸打磨后的粗糙度为最佳粗糙度参数, 在加热温度 1030℃, 保温时间 20min, 采用 2000 目砂纸打磨, 间隙在 0.14mm~0.15mm 之间的条件下, 经过计算填充率, 钎料几乎全部填入填缝之中, 填充率达到 97.2%。

关键词: GH3039; 真空钎焊; 粗糙度; 保温时间; 钎焊温度; 钎料

Abstract

The temperature sensor of a certain aerospace engine under development in my country requires a high temperature resistance of 800°C and a pressure resistance of 17 MPa for more than 30 minutes. The gas temperature in the engine combustion chamber is as high as 3000~4700K, and the gas pressure can reach several megapascals to 20 megapascals. During entering the atmosphere, it will experience severe high temperature, high pressure, and high vibration environment. In this environment, in order to ensure the accuracy of real-time temperature data collection, the thermocouple needs to be protected in a small space.

In this paper, high-temperature vacuum brazing is used to weld GH3039 metal sleeve and armor, and the vacuum brazing furnace is used to conduct multiple groups of exploration and select the best process parameters. The experiment is divided into two parts: 1. Pre-experiment. 2. The main test. In the preliminary experiment, the same material GH3039 alloy was used to explore the effect of different roughness, holding time and heating temperature on the filling rate, and to lock the parameter range. After the preliminary test results are obtained, the main test plan is set according to the test results. In the main experiment, the effects of different gaps, holding time, fixed direction, and heating temperature on the filling rate were explored. The metallographic photo stitching maps of the test results were analyzed and compared, the filling rate was calculated and the best test parameters were selected in combination with the results of the pre-test.

In the main test, the test results are basically consistent with the results of the pre-test. After analysis and comparison, the optimal temperature is selected as 1030 °C, and the holding time is 20 minutes. The optimal gap is determined between 0.14mm ~ 0.15mm. The roughness after sanding with 2000 mesh sandpaper is the best roughness parameter. At a heating temperature of 1030°C and a holding time of 20min, sanding with 2000 mesh sandpaper is adopted, and the clearance is 0.14mm. Under the condition of 0.15mm, after calculating the filling rate, the brazing filler metal is almost completely filled in the filling gap, and the filling rate reaches 97.2%.

Key words: GH3039; Vacuum brazing; Roughness; Holding time; Brazing temperature; solder

目 录

第一章 绪 论.....	1
1.1 课题研究背景及目的	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 温度传感器原理及现状	1
1.2.2 铠装热电偶制造方法及工艺问题	4
1.2.3 真空钎焊工艺及优化方法	4
第二章 理论分析.....	6
2.1 高温热电偶金属套管材料及连接方式的分析	6
2.2 真空钎焊的分析	8
2.2.1 真空钎焊的特点及原理	8
2.2.2 真空钎焊工艺	8
2.3 镍基高温合金的钎焊连接及特性分析	9
2.4 钎料及影响钎料铺展性因素的分析	9
2.4.1 钎料的分析.....	9
2.4.2 影响钎料铺展性因素的分析	10
2.5 小结	10
3.1 试验材料	11
3.1.1 GH3039 板材的特性	11

3.1.2 钎料的选择.....	11
3.2 不同粗糙度的钎料润湿性试验.....	12
3.2.1 试验过程.....	12
3.3 板材对接钎焊的填充率试验.....	13
3.3.1 板材粗糙度对填充率的影响.....	13
3.3.2 保温时间对填充率的影响.....	16
3.3.3 温度对填充率的影响.....	16
3.4 主试验前准备.....	16
3.5 球状探针与钎偶的间隙对填充率的影响.....	17
3.6 球状探针与钎偶的钎焊工艺参数对填充率的影响.....	17
3.6.1 保温时间对填充率的影响.....	17
3.6.2 温度对填充率的影响.....	17
3.7 小结.....	18
第四章 试验结果及总结.....	19
4.1 填充率的计算.....	19
4.2 粗糙度的试验结果分析及确定.....	20
4.3 间隙的试验结果分析及确定.....	21
4.4 保温时间的试验结果分析及确定.....	24
4.5 温度的试验结果分析及确定.....	29

4.6 小结.....	31
结 论.....	32
参考文献.....	33
致 谢.....	35

第一章 绪 论

1.1 课题研究背景及目的

航天传感器作为军用特种传感器的一个重要分支，从上个世纪 60 年代开始，各国研究部门对其进行了大量的研发工作^[1]。但是我国的传感器制造业跟国外相比仍存在较大的差距，我国正在努力推动传感器技术的发展。针对航天发动机，航天发动机是航天器的核心部位，相当于人类的心脏，航天发动机属于喷气式发动机的一种，不需要利用外界空气产生的推力进行推进，其原理是将推进剂储进箱中或者让推进剂形成高速射流产生推力。现代航天器的推进、导弹在大气层内的运动都可以利用航天发动机实现。航空发动机的检测和控制都需要以温度参数为基础，尤其是在现代全数字控制系统中，温度信号的准确采集直接影响对发动机的控制^[2]。

其燃烧室中的燃气压力一般是几十大气压，最高达到 200 大气压。燃气温度可以达到 3100~4600K。而且涡轮喷气式发动机的燃烧室火焰温度非常高，可以达到 2300k，并且涡轮入口气体温度也可以达到 1600k，所以必须通过高温热电偶采集温度进行实时监控。目前我国正在研发的某型航天发动机的温度传感器要求耐高温 800℃，耐压 17MPa、30 分钟以上。并且，传感器在进入大气层期间会出现剧烈的高温、高压、高振动环境，空间十分狭小，所以在设计和制造上有一定的难度。

为了保证高温热电偶在这种特殊环境的结构强度、耐腐蚀性、抗氧化性的波动不会很大，高温温度传感器需要得到很好的保护。我们需要对铠装热电偶的封装工艺进行优化，本课题目的就是探究出 GH039 镍基高温合金金属保护套管与钎偶钎焊时的粗糙度、保温时间及钎焊温度与钎料润湿性的关系。找到合适的参数，获得最好的钎缝填充效果。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 温度传感器原理及现状

(1) 热电阻传感器

热电阻温度传感器是由两种不同材料的导体或半导体的闭环，在导体的两端存在温差时，可以产生抵抗力差，从而产生一定的电动势，这样闭合回路就会有电流的产生。温度与电动势之间会有一定的函数关系，之后通过这一函数关系，实际温度就可以被计算出来。热电阻温度传感器有铜热电阻、pt100、pt1000 等。对于铂热电阻早已经作为热气体温度传感器应用在 SSME 航天主发动机上，其安装在预燃烧室到主燃烧室的排气管道上，2 个装在液氧管道，另 2 个装在液氢管道上^[3]，

如图 1-1 所示。高广华，王雅云^[1]两人设计了热电阻传感器温度采集电路，并且已经成功的用在某型号发动机数控系统。

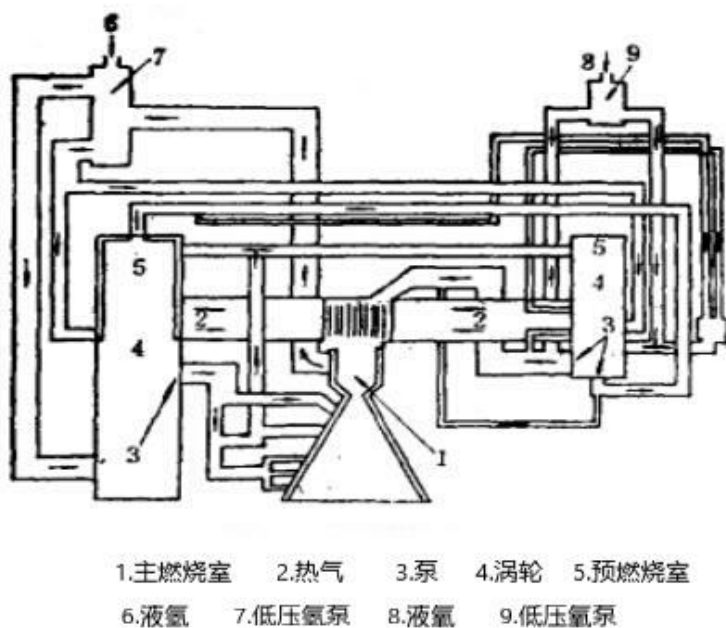


图 1-1 SSME 示意图^[1]

(2) 热电偶传感器

两端采用不同的金属并焊接成一个回路，一端为热端，一端作为冷端，当这两端的温度发生变化时，该回路中的热电动势就会波动，从而实现测温功能。例如，铠装热电偶，肖琳^[4]研究出了一种 K 型铠装热电偶能够满足特定情况下的测温要求，而且性能不低于国外同类产品。如图 1-2 所示。

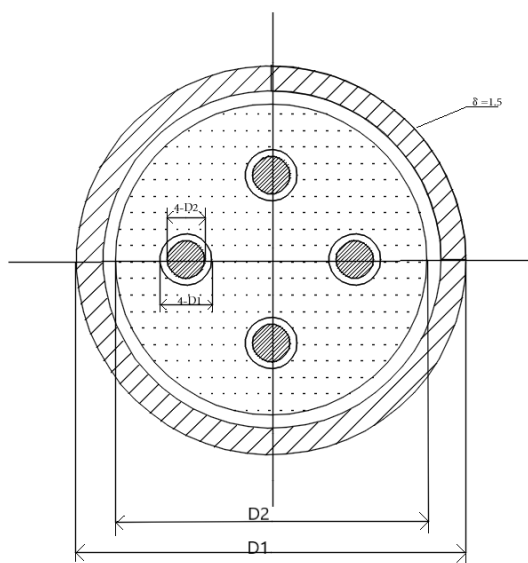
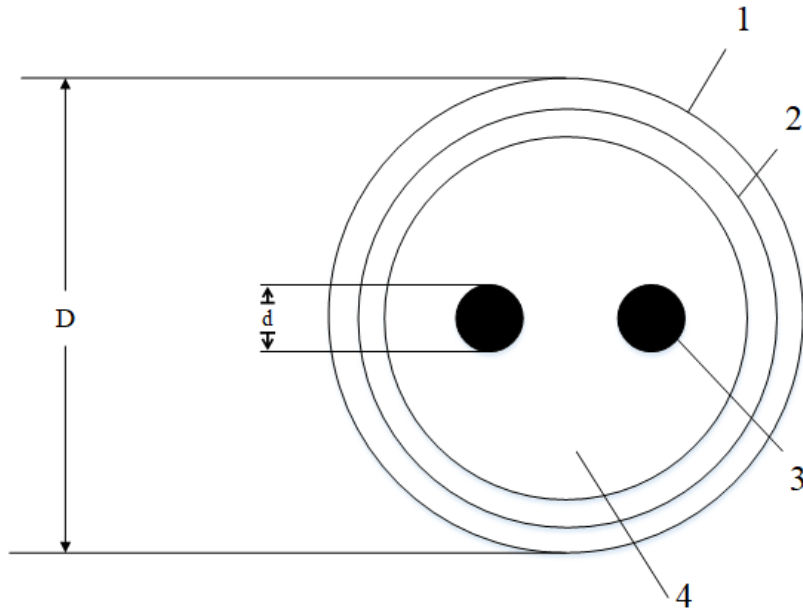


图 1-2 产品结构示意图^[4]

美国 HosiknS 公司采用特殊工艺制出一种复合管型铠装热电偶能在 1260℃ 环境下工作，保护套管采用特种镍基耐高温合金如图 1-3 所示。



1.外层铠装 2.内层铠装 3.热电偶 4.绝缘物 (MgO)

图 1-3 复合型铠装热电偶结构示意图^[5]

(3) 包覆热电偶

氟塑、玻璃纤维、石英纤维包覆热电偶，最高工作温度能达到 800℃^[6]，钨/铼薄膜热电偶在需要保护层才能在高温下使用^[7-9]，能在 1370K 的温度下工作^[8]。目前张志学^[10]等人研究出的高温包覆热电偶绝缘耐温可达 1500 度。其结构如图 1-4 所示。

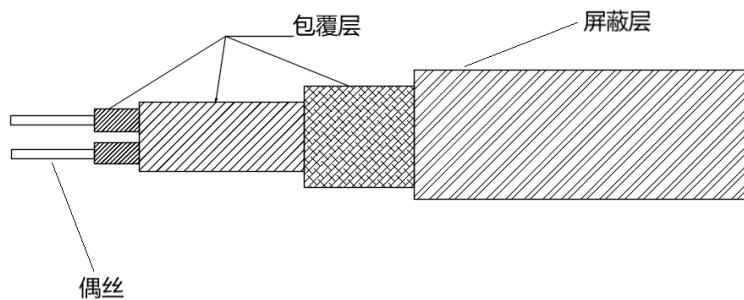


图 1-4 包覆热电偶结构^[10]

目前国内热电偶领域发展的越来越快，彭泳卿^[1]等人研究出薄膜式热电偶越来越得到广泛应用，北京遥测技术研究所研制的薄膜热电堆热流传感器也已经经过多次飞行验证^[11]。

1.2.2 铠装热电偶制造方法及工艺问题

(1) 制造方法

热电偶基本构成是由热电偶丝、绝缘材料、金属保护管组成。通过热端进行焊接，自由端连接补偿导线组成。肖琳^[4]等人采用的方法经过外套管和绝缘材料的选材将热电偶合金丝、外套管和绝缘材料进行组装，采用一系列工艺制造出专用 K 型热电偶成品，如图 1-5 所示。将氧化镁粉等绝缘物质填充进外套管和热电偶合金丝之间，自由端采用环氧树脂密封。

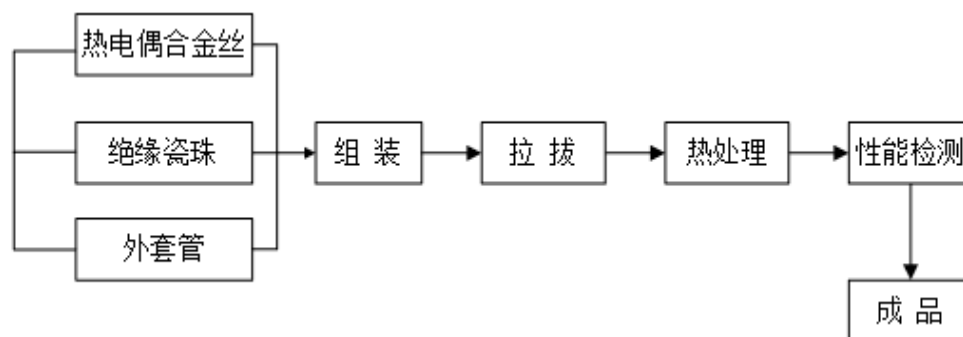


图 1-5 铠装热电偶材料加工工艺流程^[4]

(2) 提出工艺问题

保护套管可以起到保护铠偶的作用，延长使用寿命，保证结构强度。金属保护套管的选材与铠偶的连接工艺直接影响热电偶工作性能，目前普遍采用法兰式与焊接式连接，但是法兰式连接长期使用抗震动性能变差，无法承受在航天环境下的高频振动，采用电弧焊接法热电偶套管连接处会出现应力集中，组织元素分布不均匀等情况且耐腐蚀性差，普通钎焊的方式容易出现润湿性差和接头易裂的问题。而且钻孔式套管与铠偶之间有间隙，高频振动会使焊接处疲劳。一般由于选材不对、制造缺陷、静载荷、共振几个原因^[12]造成的。袁伟，杨智荣^[13]两人也归纳了套管断裂失效的原因并提出了预防措施。

1.2.3 真空钎焊工艺及优化方法

目前普遍钎焊工艺流程：首先去除表面氧化膜，浸泡在草酸溶液中，超声波洗，然后将钎料固定，放入炉中，设定参数，得到成品。国内在镍基合金真空钎焊的研究中于治水^[14]等人总结出了钎接头的好坏与钎缝大小有关，钎缝越小，钎料和母材之间的反应就越完全。石昆^[15]等人总结出随着保温时间的增加钎料与母材之

间的作用就会越完全。研究表明^[16-17]，保温时间、焊接温度、中间层厚度和压力都会影响焊接接头的性能。

高温真空钎焊多用于传感器的部件连接，在真空炉中高温焊接，不需要钎剂，钎料润湿性很好，而且对母材组织和性能影响非常小，焊接接头变形很小，钎缝金相显微图像如图 1-6 所示。很好的解决了不耐腐蚀问题和抗震性差的问题，所以，本试验采用高温真空钎焊的方法焊接进行优化，利用毛细流动原理将钎料填入钎缝，使用高温真空钎焊炉进行多组试验，找出影响钎料填充率的因素，经过结果对比选出最佳参数来解决钎料润湿性差、接头易裂的问题。而且 GH3039 高温合金具有很好的强度和抗氧化性，经常作为发动机燃烧室和加力燃烧室的零部件使用，可以满足铠装热电偶在该工作环境下正常工作。

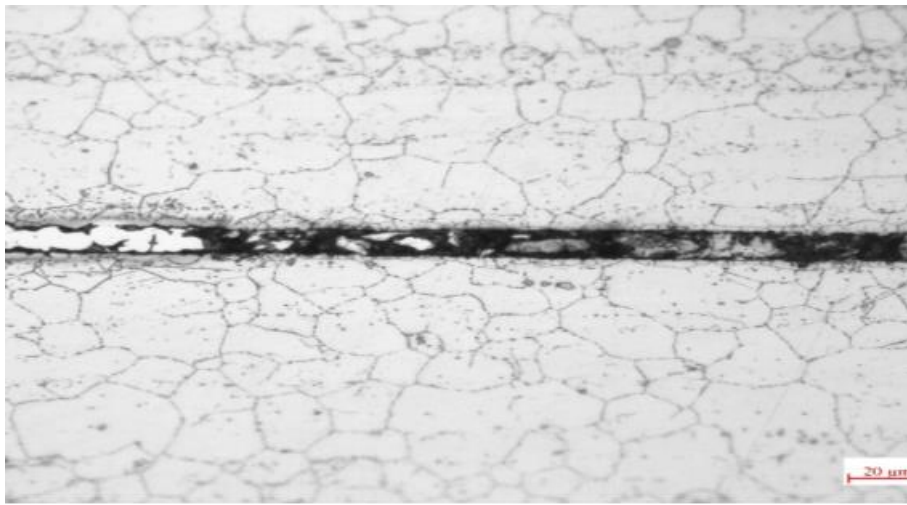


图 1-6 金相显微图像

第二章 理论分析

2.1 高温热电偶金属套管材料及连接方式的分析

热电偶保护套管在高温条件下工作时，除了要求一般满足热电偶金属套管材料的导热性、稳定性、足够的强度以外还要满足：（1）耐高温：在使用过程中不能变形，而且抗氧化；（2）抗震性；（3）耐腐蚀；（4）热强性：在工作温度下不软化。

高温热电偶金属保护套管一般分为金属、复合材料类、非金属类，对于金属类保护套管机械强度虽然很高但是在实际工作中的耐高温性能与耐腐蚀性能差无法用在航天发动机。非金属热电偶保护套管脆性比较大，但是抗氧化性能和耐高温性能好。复合材料类包括金属陶瓷保护套管，有抗氧化、耐高温，强度高的特点。但高温热电偶金属保护套管材料的选择要考虑热电偶材料和它的工作环境。近些年来，高温热电偶金属套管材料也在不断的更新换代，但是能满足所有条件的高性能材料目前还没有研究出来。现在普遍耐高温保护套管材料有 GH3030 工作温度区间为 0~1100℃，GH3039 工作温度区间为 0~1300℃，刚玉管工作温度区间为 0~1600℃，二硅化钼工作温度区间为 0~1600℃，这些材料都有耐高温性、抗氧化性、耐腐蚀性能优异的特点。现在某型航天发动机的温度传感器要求耐高温 800℃，耐压 17MPa，30 分钟以上，综合上述理论分析我们选择 GH3039 高温合金保护套管材料。

目前，国内外大多采用法兰式、螺纹式、焊接式三种连接方法，采用氩弧焊、电弧焊连接金属套管，虽然这些工艺有一定的优势，但是用在航天上这种方式有限制，螺纹连接的耐高压、耐腐蚀和耐高温能力远远不能满足航天需求，腐蚀时间过长会导致无法拆卸。螺纹式保护套管如图 2-1 所示。



图 2-1 螺纹式保护套管^[18]

法兰式安装跟螺纹连接比有一定优势，并且现在大部分热电偶都采用这种方法连接，但是用在航天发动机这种特殊条件下它的应用便受到了限制，在法兰盘连接处焊接可能会有残余应力的出现，并且长期使用会出现松动导致密封性变差，法兰式连接套管如图 2-2 所示。



图 2-2 法兰式连接套管^[19]

对于焊接式普通热电偶采用氩弧焊和电弧焊的方法进行连接，这种情况焊缝合金元素容易含量不均匀，会产生较大的残余应力和热应力。现在应用在航天领域测温主要采用钎焊的方法，但是普通的钎焊方式对温度与其他因素的精准控制要求很高。所以本试验采用高温真空钎焊，严格控制工艺参数，解决易被氧化和合金元素分布不均的问题。

2.2 真空钎焊的分析

2.2.1 真空钎焊的特点及原理

真空钎焊作为炉中钎焊的一种，在真空条件下进行，防止已经去除氧化膜的待焊件再氧化，在焊接过程中，随着真空度的提高金属氧化膜也会发生分解和被母材元素还原的反应。达到钎料液相线温度后升温，利用毛细流动的原理液态钎料内的元素与母材相关元素发生反应形成固溶体或其它金属化合物，最后得到一个良好的接头。图 2-3 所示。

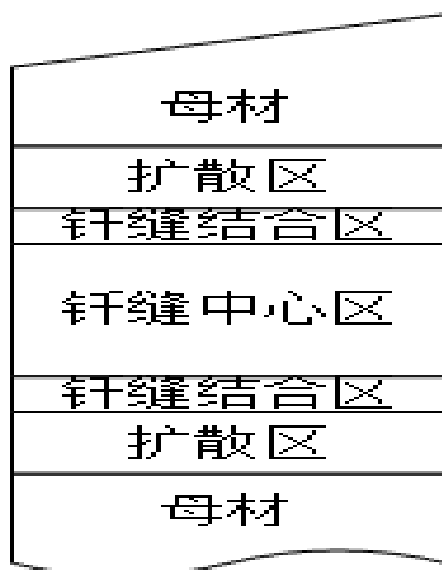


图 2-3 钎缝结构

相比其他钎焊方式有很好的优点，焊接对母材的组织性能影响不大，焊接接头的变形量很小，而且不需要钎剂，钎料的润湿性也会很好，在真空条件下进行，其焊接时焊件表面不会受到氧化的影响，并且焊接后的接头光洁美观，焊接精度高，可实现批量生产，所以本试验采用真空钎焊的方法连接金属套管与铠偶。

2.2.2 真空钎焊工艺

一般真空钎焊工艺主要有以下流程：焊接前去除氧化膜-钎料的制备-待焊件的定位-钎料的添加-入炉及参数的设定-开炉及钎焊件的检验等。而且此过程需要控制很多参数来保证焊接的质量，如待焊件去除氧化膜的方法、炉内温度、升温速率、保温时间、表面粗糙度、真空度、钎料的注入量等等。

去除氧化膜有三种方式，一种是表面经过砂纸打磨，另一种是化学腐蚀，酸或碱洗，还有一种就是用超声波洗。由于我们焊接接头性能要求很高，所以采用砂纸打磨与超声波洗组合的方法将氧化膜去除的更彻底。

待焊件的定位与装配是为了保证焊接位置的准确，防止钎焊过程中出现位置偏移，导致焊接接头强度降低。

钎料的添加可以利用注射器进行精准填料，而且可以精准的控制钎料的用量，以免出现钎料过多流出导致污染焊件，过少使钎缝填充不满的现象。

焊接接头的检验是一项十分重要的步骤，可以抽样进行检查，通过力学拉伸试验机进行检测抗拉强度，屈服强度。也可以将焊件接头切割封装，放在金相显微镜下观察钎缝的填充率以及接头组织元素之间的反应情况。

2.3 镍基高温合金的钎焊连接及特性分析

镍基高温合金具有（1）很好的蠕变性和热稳定性；（2）抗氧化、抗腐蚀、抗疲劳性能好；（3）比强度高和弹性模量高，热膨胀系数小，导热性好。

镍基高温合金作为高温合金种类中最重要的一种，几十年的时间里，其工作温度由 700℃提升到了 1100℃，并且有很好的焊接性和塑性，其接头的高温强度和耐腐蚀性优于其他高温合金，并且有很好的组织稳定性，在其中添加少量稀土元素可以改善其抗氧化性和热加工性能，而且经常用在航空航天领域，如航空发动机涡轮盘，燃烧室采用合金 GH3039 和 GH3044 镍基合金。本试验的固溶处理的温度与钎焊温度最好相符合，因为只有这样才能将合金中的元素及其金属化合物完全固溶于机体内，在高温条件下工作时才能发挥最佳的工作性能，如果温度太低，合金元素不能全部被溶解，温度太高，会造成晶粒变大，无法恢复其组织性能。

综上所述理论分析，本试验选择镍基合金作为试验板材。

2.4 钎料及影响钎料铺展性因素的分析

2.4.1 钎料的分析

钎料是焊接过程中通过自身熔化填入钎缝的一种金属或合金。钎料的特性和与液态钎料与母材元素的相互反应情况会直接影响焊接接头的好坏，所以钎料本身的性能也会对钎焊接头的质量有很大的影响。钎料一般可以分为三种：软钎料（低于 450℃）、硬钎料（高于 450℃）、高温钎料（高于 950℃）

1.软钎料，例如，锡基钎料、锌基钎料，银基料，接头工作温度小于 100℃，熔化温度低，导电性好，成本低，主要涉及在电子工业领域。铅基钎料，由于纯铅润湿性差所以不适合做钎料，需要向其中加入银、锌等合金元素。

2.硬钎料，例如，铜基、镍基和锰基钎料。用途各不相同，银基钎料有非常好的耐腐蚀性和导电性，铝基钎料用于钎焊铝。主要是 Cu、Sn、Cr、Zn 合金元素组成，添加不同的元素可以提高焊接性能，例如 Cu 元素可以降低熔点，Zn 元素可以改善润湿性，Mn 元素可以提高高温性能。但是银基钎料中的银元素比较多所以造

价比较高，银基钎料中含有的 Cd 元素有毒、不环保，现在致力于开发新的环保型银基钎料。

在高温真空钎焊中十分常见的一种是镍基钎料，具有良好的耐腐蚀和耐高温，抗氧化性能。镍基钎焊合金通常添加元素硅、铬、铁、硼、磷、锰、钨、碳或其他可以降低熔点的元素，比如锆等。主要用作强度比较高、耐热比较好的合金的钎焊。所以我们采用镍基合金钎料进行试验。

2.4.2 影响钎料铺展性因素的分析

钎料的铺展能力受很多因素的影响，主要分析以下几种情况：

(1) 钎料中所含元素与母材中所含元素的相互作用程度。如果钎料中元素与母材中元素相互作用形成共晶体或固溶体，钎料的铺展性就会很好，反之，就会阻碍钎料在钎缝中的铺展。如果钎料和母材中元素作用很强，比如 Sn 与 Cu，当母材中元素向液态钎料中的溶解量很大时，钎料的粘合度与熔点就会提高，使液态钎料流动缓慢，如果液态钎料向母材渗透的过多，就像一碗水倒入沙漠之中迅速渗入，没有办法在进行铺展。

(2) 温度对钎料铺展性的影响。温度升高会一定程度上改善液态钎料的润湿性，因为温度提升液态钎料表面张力会降低。但是如果温度增加的过多就会使液态钎料的润湿性过好，可能造成大面积的钎料流出钎缝，并且可能会出现溶蚀，晶粒变大，组织性能改变不可逆的后果，所以通常钎焊温度比钎料液相线温度高几十度就可以。

(3) 表面粗糙度的影响。表面粗糙度越低，液态钎料的铺展性就越好，但是超过一定数值后液态钎料的流动速度就会过快，导致钎料的流失。

此外，保温时间的长短与母材表面氧化膜去除的是否干净都会影响液态钎料的铺展能力。

所以本试验以粗糙度、温度、保温时间三种因素作为变量，进行多组试验确定最佳试验参数。

2.5 小结

本章进行了与试验相关的理论分析，分析了金属保护套管的材料及特性，再结合镍基合金的钎焊连接理论分析，选取了 GH3039 镍基合金金属保护套管。由真空钎焊的特点及工艺为试验方案提供了有力的依据。分析了影响钎料润湿性的各种因素，为试验方案的进行提供有效的理论依据。

第三章 预实验及钨偶的钎焊试验

3.1 试验材料

3.1.1 GH3039 板材的特性

本试验选的母材为 GH3039 镍基合金, GH3039 属于单相奥氏体固溶强化合金, 在 1000 度以下有很好的抗氧化性, 长期使用组织稳定, 有良好的冷成性和焊接性能。焊接试件尺寸为 20mm×20mm×5mm 和 10mm×16mm×5mm。GH3039 镍基合金化学成分如表 3-1。

表 3-1 GH3039 化学成分^[20]

成分	C	Cr	Ni	Al	Ti	Mo
含量	≤0.08	19.0~22.0	余量	0.35~0.75	0.35~0.75	1.80~2.30
成分	Fe	Si	S	Mn	P	Nb
含量	≤3.00	≤0.80	≤0.012	≤0.40	≤0.02	0.90~1.30

3.1.2 钎料的选择

为了获得好的接头组织需要保证以下几点: (1) 所选择的钎料熔点必须比母材的熔点低几十度。(2) 降低成本, 要考虑试验的成本。(3) 钎料中所含成分要比较均匀能过提高焊接性, 降低熔点。并且要环保。(4) 所选钎料在试验温度下必须要保证有较好的润湿性。BNi2 作为一种应用最广泛高温镍基合金钎料, 常用于焊接航空发动机部件。BNi2 钎料的化学成分及性能要求如表 3-2。

表 3-2 BNi2 钎料的化学成分及性能要求^[21]

成分	Cr	B	Si	Fe	C	O
含量	6~8	3.75~3.5	4~5	2.5~3.5	<0.06	<0.05
成分	S	P	Al	Ti	Zr	Ni
含量	<0.02	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	余
固相线（参考值）	液相线（参考值）		钎焊温度（参考值）		粉末形状	
970□	1000□		1010~1117□		球形	

3.2 不同粗糙度的钎料润湿性试验

3.2.1 试验过程

利用型号为 DK7720 的电火花切割机切出两块 20mm×20mm×5mm 的板材，分别将 1000 目、2000 目的水砂纸安装在打磨机上打磨。需要保证表面光滑度，高目数的需要从低向高依次进行打磨，不可跳步。然后将其中一块 2000 目砂纸打磨的板材放到金相抛光机上抛光，不可有划痕。下一步放入丙酮溶液中浸泡五分钟，再进行超声波洗十五分钟除去表面氧化膜和污染物，确保钎焊过程干净的进行，拿出放一旁备用。开始准备钎料，准备一块洁净的玻璃板，将纤维素倒在上面与钎料混合如图 3-1。



图 3-1 钎料的制备

然后分别将钎料滴在板材上，放入钎焊炉中设定参数 1020□，保温 20min，如图 3-2 所示。

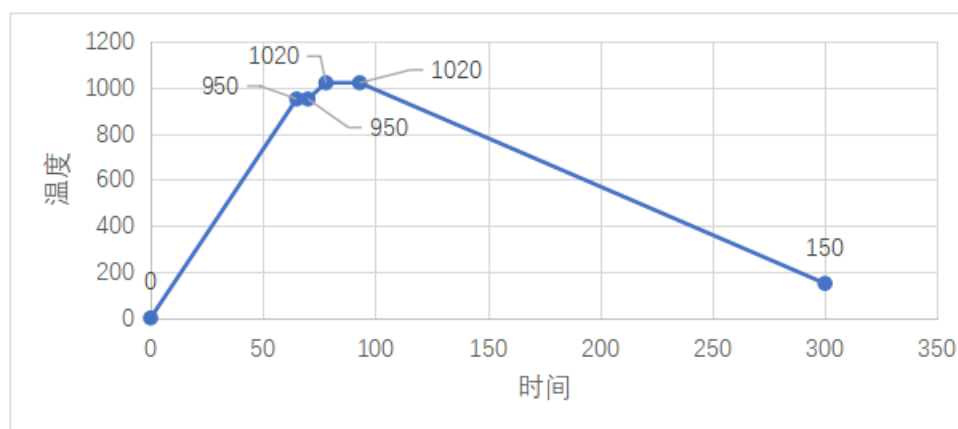


图 3-2 温度曲线

次日开炉取件观察，探究对接钎焊时粗糙度对板材钎缝效果的影响，进一步准备对接钎焊试验进行验证。

3.3 板材对接钎焊的填充率试验

3.3.1 板材粗糙度对填充率的影响

利用电火花切割机、打磨机、金相抛光机，制作 4 组待焊工件尺寸为 $20\text{mm}\times 20\text{mm}\times 5\text{mm}$ 和 $10\text{mm}\times 16\text{mm}\times 5\text{mm}$ ，分别用 400 目、600 目、1000 目、2000 目的砂纸打磨，放入丙酮中浸泡并进行擦拭，如图 3-3 所示，然后超声波洗，制备钎料。

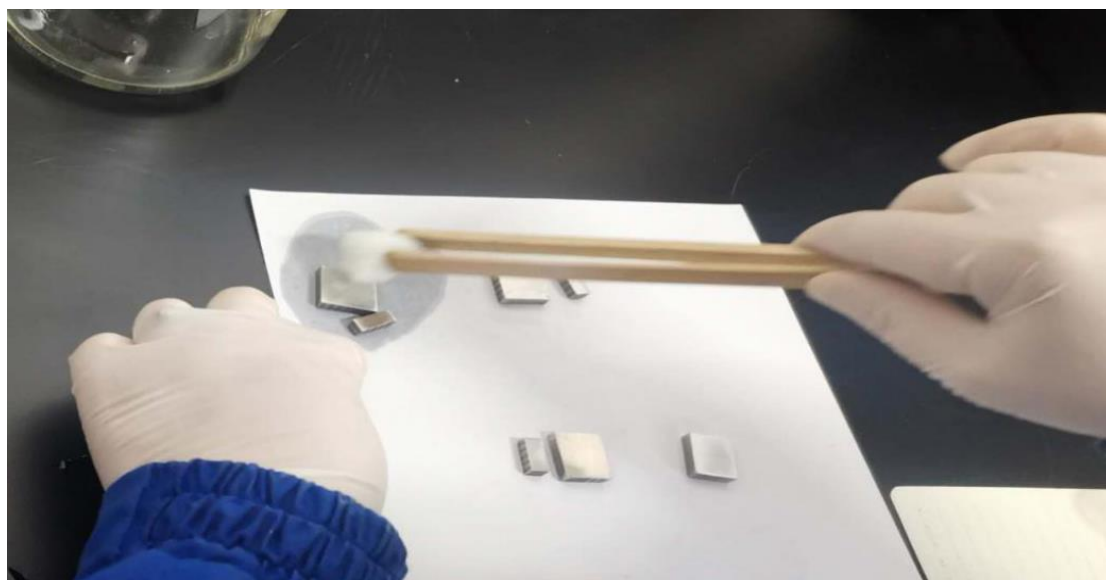


图 3-3 清洁试件

然后将待焊件组合并将钎料注入，如图 3-4 所示。



。图 3-4 钎料注入完成图

首先将石墨台整理干净，在表面与沟槽处涂抹阻焊剂，防止试件与石墨台粘连，将放置好钎料的组合试件放在石墨台上，如图 3-5 所示。



图 3-5 石墨台

随后立即将真空炉打开放入炉中如图 3-6 所示，设定参数如图 3-7 所示， 1030°C ，保温 10 分钟。



图 3-6 钎焊炉

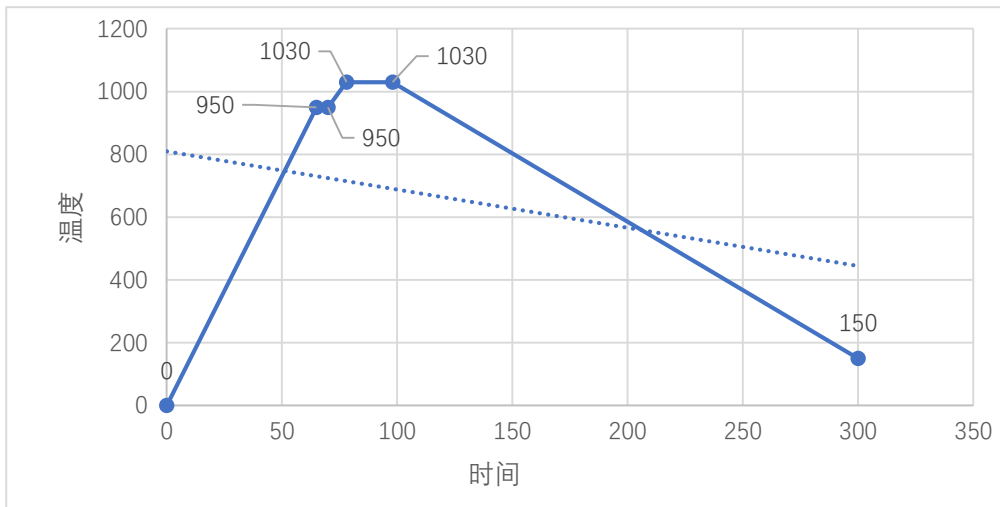


图 3-7 温度曲线

次日开炉观察结果。然后利用电火花切割机分别切开一半，用 400 目、600 目、800 目、1000 目、1500 目和 2000 目砂纸由低目数到高目数依次打磨。最终全部用 2000 目砂纸打磨一遍，要求不能有明显划痕。然后用金相抛光机和研磨膏配合使用全部进行抛光。之后，要得到清晰的接头图像，使用电化学腐蚀机进行腐蚀，电压 1.7V 并腐蚀 70 秒，拿出洗净吹干，拿到金相显微镜下观察低倍镜下钎料填充的效果，随后进行拍照拼接。

3.3.2 保温时间对填充率的影响

本组试验粗糙度选取 2000 目砂纸打磨后的参数，温度为 1030℃。按照原来的准备过程准备两组 20mm×20mm×5mm 和 10mm×16mm×5mm 试验板材工艺保温时间分别为 10min、20min，开炉后进行电火花切割、打磨、金相抛光、电化学腐蚀，金相显微镜拍照，最后进行图像拼接，观察实验比对结果。

3.3.3 温度对填充率的影响

本组试验前准备与上组试验步骤相同，粗糙度选取 2000 目砂纸打磨后的参数，保温时间 20 分钟。按照原来的准备过程准备两组 20mm×20mm×5mm 和 10mm×16mm×5mm 试验板材工艺温度分别为 1020℃，1030℃，开炉后进行电火花切割、打磨、金相抛光、电化学腐蚀等焊后处理并利用金相显微镜拍照拼接，观察结果。

3.4 主试验前准备

准备钎偶，由低目数砂纸向高目数砂纸依次进行打磨，最终使用 2000 目打磨。用酒精擦拭干净，放入丙酮溶液中浸泡五分钟，然后使用超声波洗 15min 去除污染物，擦拭干净放在白纸上待用。第二步开始制备钎料，其步骤与预试验中步骤相同，将制备好的钎料放置在金属套管与钎偶上下接头处如图 3-8。

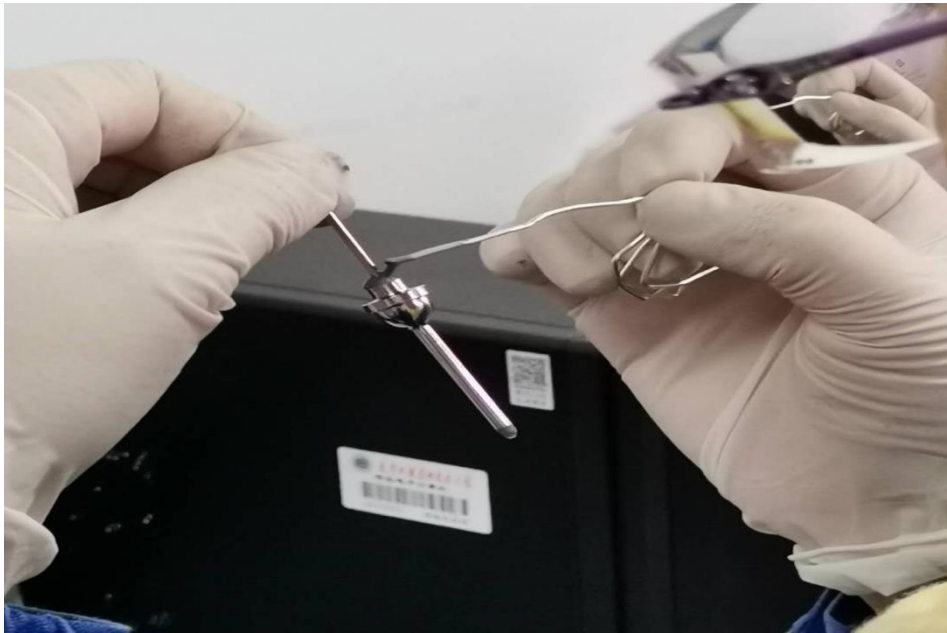


图 3-8 加注填料

然后放置在石墨台上如图 3-9，放入真空钎焊炉中，设定参数。



图 3-9 放置待焊件

3.5 球状探针与钨偶的间隙对填充率的影响

本组实验钨偶表面粗糙度选择 2000 目砂纸进行最后打磨，温度 1030℃保温 8 分钟，进行两组试验，间隙分别为 0.02mm~0.03mm 与 0.14mm~0.15mm 次日开炉取件，然后利用电火花切割机纵向切割，使用打磨机将封装好的半刨件进行打磨，由低目数向高目数依次进行，然后进行封装，放到金相显微镜下观察填充效果，拍照拼接。

3.6 球状探针与钨偶的钎焊工艺参数对填充率的影响

3.6.1 保温时间对填充率的影响

本组试验温度定为 1030℃，用 2000 目砂纸打磨，保温时间分别为 8min、15min、20min，间隙控制在 0.14mm 左右，为探究待焊件放在石墨台上的方向是否会影响钎焊接头效果，所以做了两组保温时间 15min 的试验，分别为小端向下与小端向上的情况，次日开炉取件，用型号为 DK7720 的电火花切割机进行纵向切割，然后进行封装，利用打磨机由 180 目砂纸打磨至 2000 目砂纸，放到金相显微镜下观察结果并拍照，最后进行拼接。然后综合板材对接钎焊的相关试验结果进行比较总结。

3.6.2 温度对填充率的影响

本组试验温度分别选取 1020℃、1030℃保温 20min，用 2000 目砂纸打磨，间隙控制在 0.14mm 左右，次日开炉取件，用型号为 DK7720 的电火花切割机纵向切割，然后进行封装，利用打磨机由 180 目砂纸打磨至 2000 目砂纸，放到金相显微镜下观察结果并拍照，最后进行拼接。然后综合板材对接钎焊的相关试验结果进行比较总结。

3.7 小结

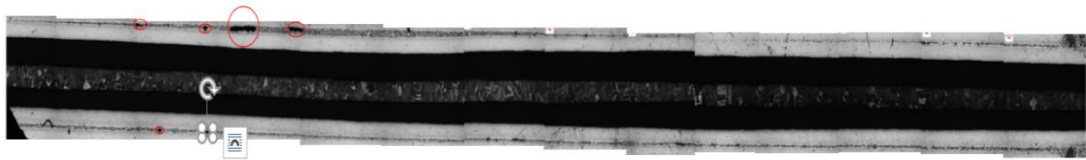
本章为试验方案的实施。总体分为两部分，预试验与主试验，预试验部分做了四部分试验，分别是钎料在不同粗糙度板材上铺展性的试验、不同粗糙度的板材对接钎焊试验、不同保温时间下钎缝填充率多少的试验、不同加热温度下钎缝填充率多少的试验。主试验部分根据预试验结果与上一组的试验结果设置对比组，分别是：铠偶与金属保护套管的间隙大小对填充率的影响的试验、不同保温时间下钎缝填充率多少的试验、不同加热温度下钎缝填充率多少的试验。然后进行试验后处理并进行金相拍照拼接。

第四章 试验结果及总结

4.1 填充率的计算

现在以参数为加热温度 1030℃、保温时间 20min 的试验结果进行填充率的计算。

已知试件总长为 37mm，首先新建一个文档，利用画图工具做出一条长度为 37mm 的水平直线，然后将金相拍照拼接图对应直线长度放在直线上方，如图 4-1 所示。



图

图 4-1 长度比对

然后精确的标出未填满钎缝的所在位置，如图 4-2 所示。

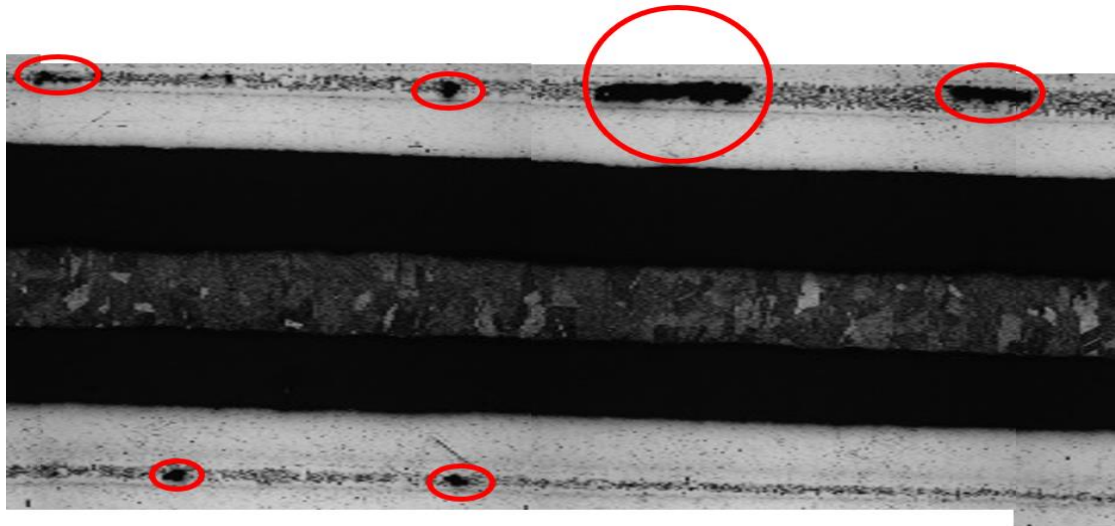


图 4-2 空缺标记

在标记位置处利用画图画出水平直线量出钎料未填满的位置，如图 4-3 所示。

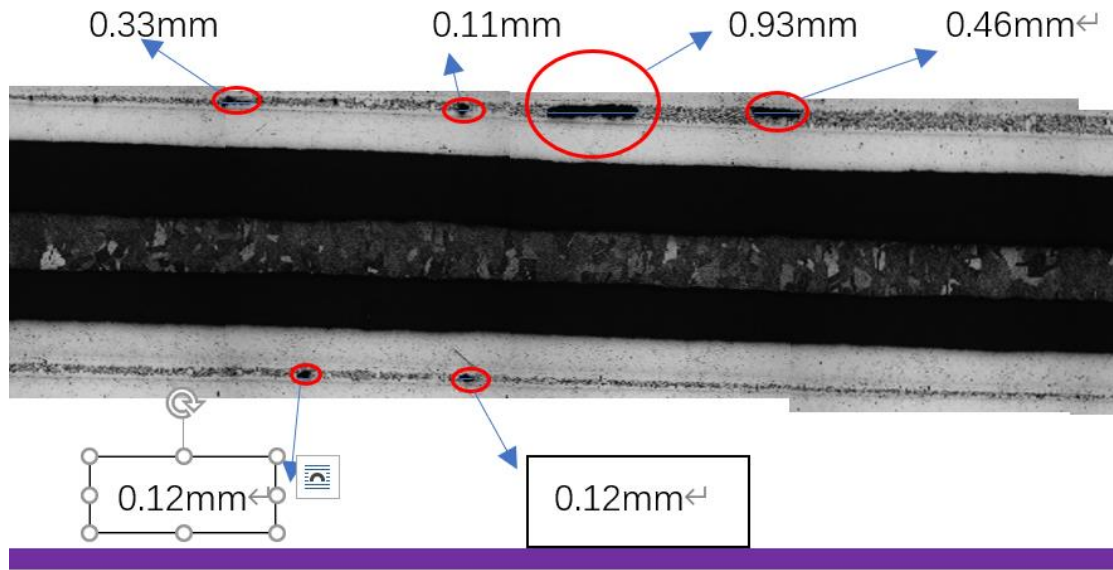


图 4-3 长度计算

由图像观察可知，所有未填满区域总长计算为

$$0.33+0.11+0.93+0.46+0.12+0.12=2.07\text{mm}$$

所以该参数下试验结果的填充率为

$$(2*37\text{mm}-2.07\text{mm}) \div 74\text{mm} \times 100\% = 97.2\%$$

其他参数下试验结果的填充率计算方法同上。

4.2 粗糙度的试验结果分析及确定

由图 4-4 单块板材不同粗糙度的钎料铺展情况可以看出经过 2000 目砂纸打磨的试件好于 1000 目砂纸打磨的试件，右侧为 2000 目砂纸打磨后的板材，它的铺展面积和中心点向四周的铺展程度明显好于左侧的铺展效果。



图 4-4 不同粗糙度下铺展效果对比

通过观察不同粗糙度板材对接钎焊的试验结果的金相拍照拼接图,如图 4-5 所示。

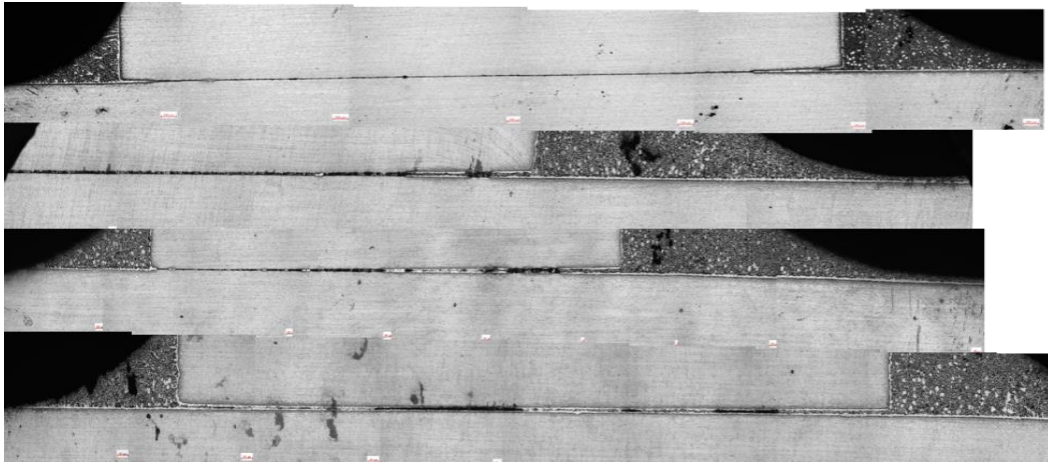


图 4-5 1030℃ 保温 10 分钟

上图中由上及下分别为 400 目、600 目、1000 目、2000 目打磨后的效果,由对比图观察可知,钎料的填充效果随着粗糙度的变小填充效果越来越好,经过 2000 目砂纸打磨的板材钎料填充率最高,所以正好验证了理论分析部分粗糙度影响钎料的润湿性,对于本实验而言,经过 2000 目砂纸打磨的试件填充效果最佳,所以接下来的试验都采用 2000 目砂纸进行打磨。

4.3 间隙的试验结果分析及确定

试件经过电火花切割后进行封装,如图 4-6 所示。



图 4-6 封装试件

本组试验参数为加热 1030℃保温时间 8min，由试验结果拼接图图 4-7 与图 4-8 对比可以看出间隙为 0.02mm~0.03mm 的试件钎料无法很好的扩散进去，填充率也很低。明显可以通过观察小端的切面图看出，间隙较小的试件填入的钎料少于间隙较大的。间隙为 0.14mm~0.15mm 的试件钎料填充率最好基本可以达到 71%，所以对于本组试验，保护套管与热电偶之间的最佳间隙在 0.14mm~0.15mm 之间。所以接下来的试验都采用这个参数。

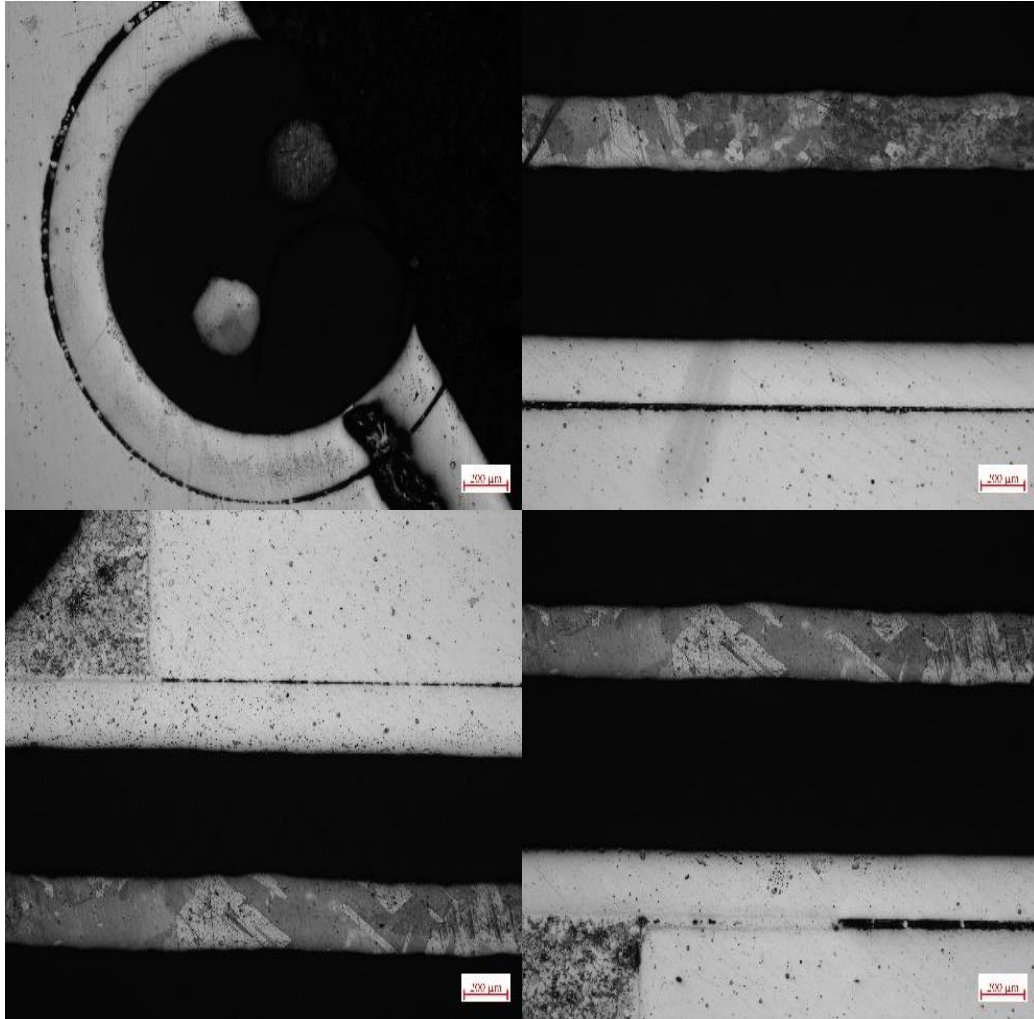


图 4-7 间隙为 0.02mm~0.03mm 试验结果

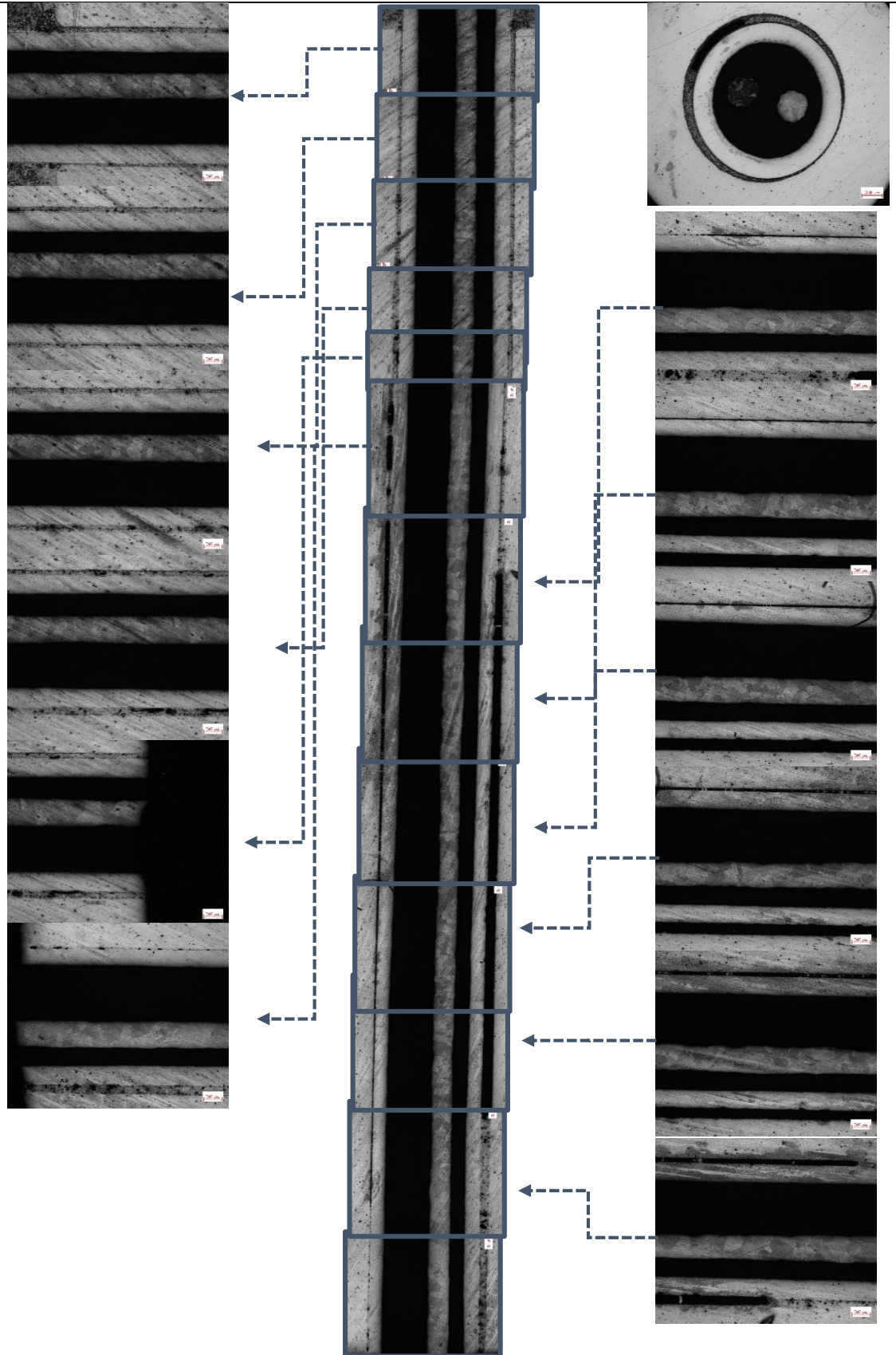


图 4-8 间隙为 0.14mm~0.15mm 试验结果

4.4 保温时间的试验结果分析及确定

下图中由上及下分别为保温 10min 与保温 20min 的试验结果。由预试验结果的金相拍照拼接图图 4-9 可以看出保温时间 20min 钎料的填充效果明显好于保温 10min 的填充效果，保温 20min 的填充效果可以达到 100%填充率。所以也验证了理论分析部分的随着保温时间的延长，液态钎料的铺展性也越来越好的结论。

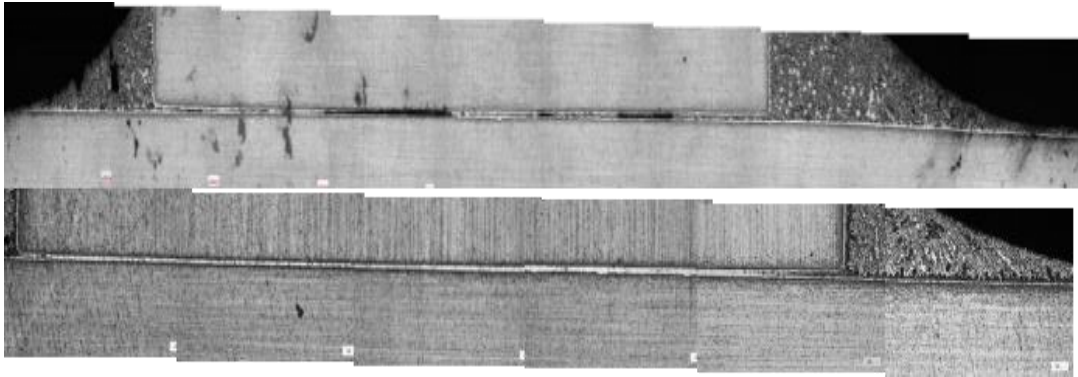
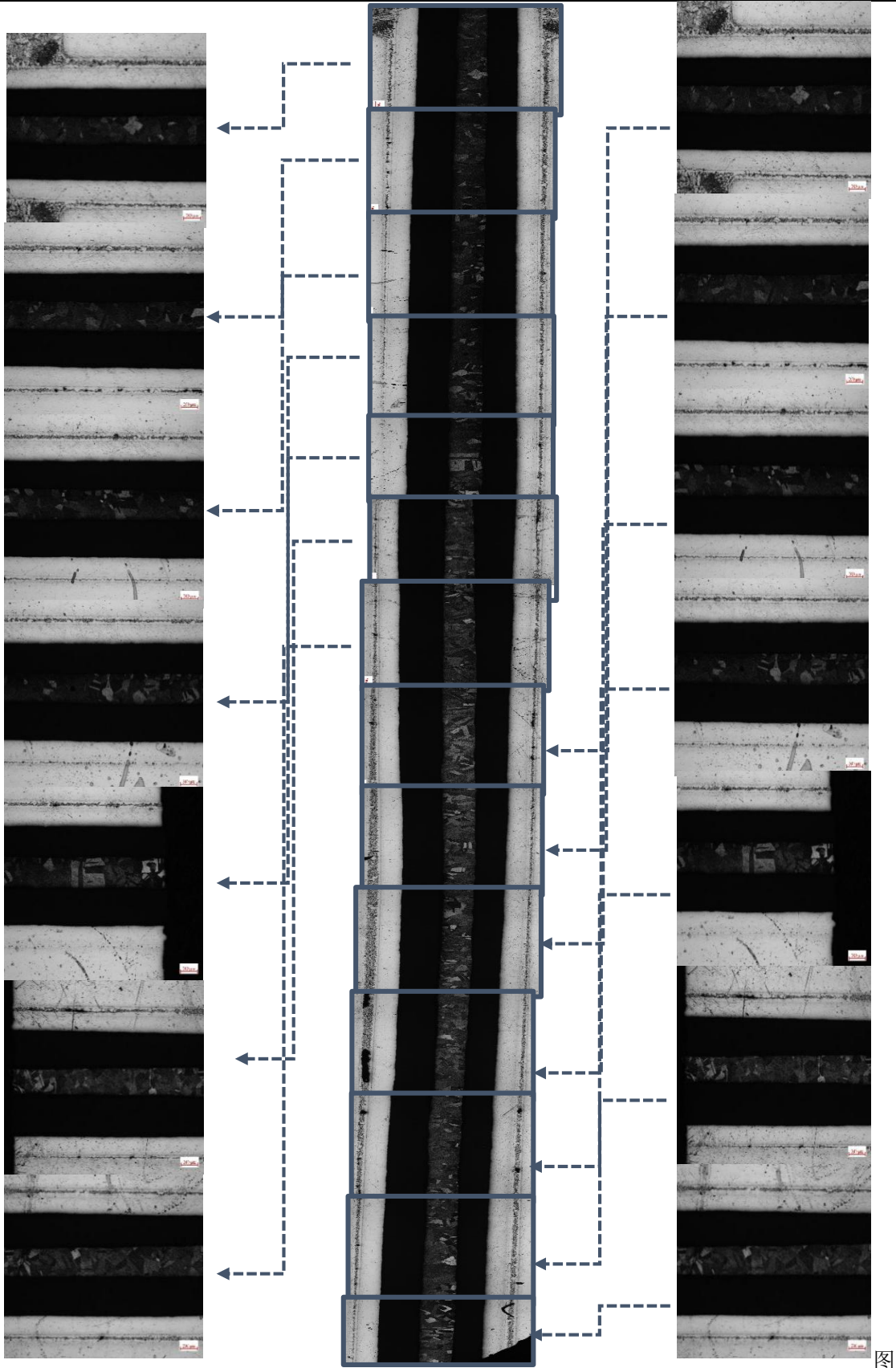


图 4-9 不同保温时间对比图

球状探针与钨偶之间的钎焊试验结果如图 4-10，图 4-11，图 4-8 所示，保温时间分别为 20min、15min、8min。为了观察方便，两侧附加每一部分的填充效果图。



4-10 加热 1030℃保温 20min

图

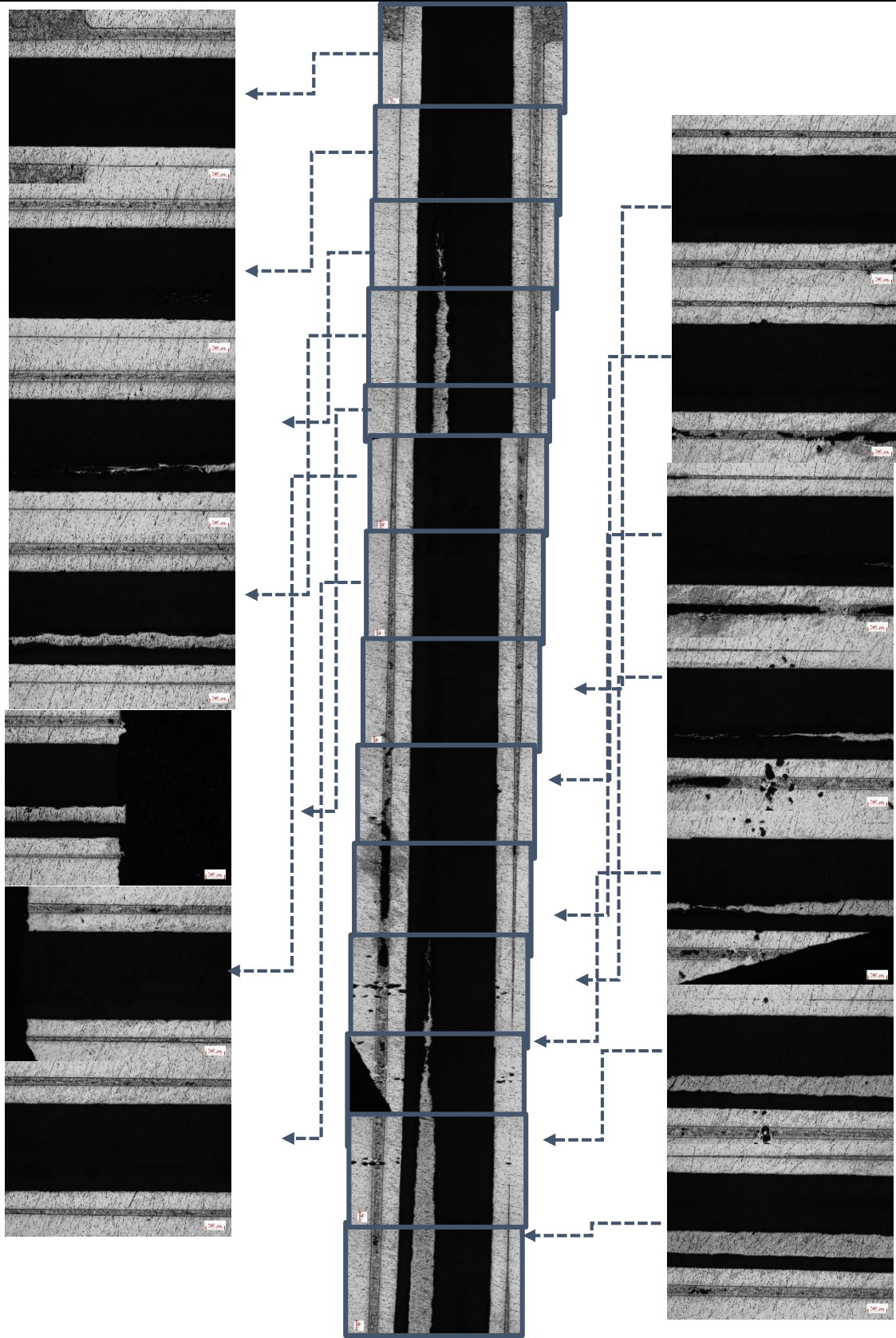


图 4-11 加热 1030℃保温 15min 小端向下

可以看出保温时间 20min 的填充效果好于保温 15min 好于保温 8min 的填充效果，并且保温 20min 的试验填充率经过计算为 97.2%，保温 15min 的填充率经过计算为 86%，保温时间 8min 的试验填充率经过计算为 71%，所以在这个参数下保温时间 20min 能够得到最佳的填充率。而且保温 20min 的填充率可以明显看出非常高，几乎已经全部填入钎缝之中。并且结合预实验中的试验结果保温 20min 填充率也是最高的，所以最佳保温时间参数选择 20min。

由图 4-11 加热 1030℃保温 15min 小端向下和图 4-12 加热 1030℃保温 15min 小端向上作对比可以看出小端向下的效果明显好于小端向上的结果。所以钎料的注入量也会影响钎缝的填充率。所以接下来的试验都采用小端向下的方式。

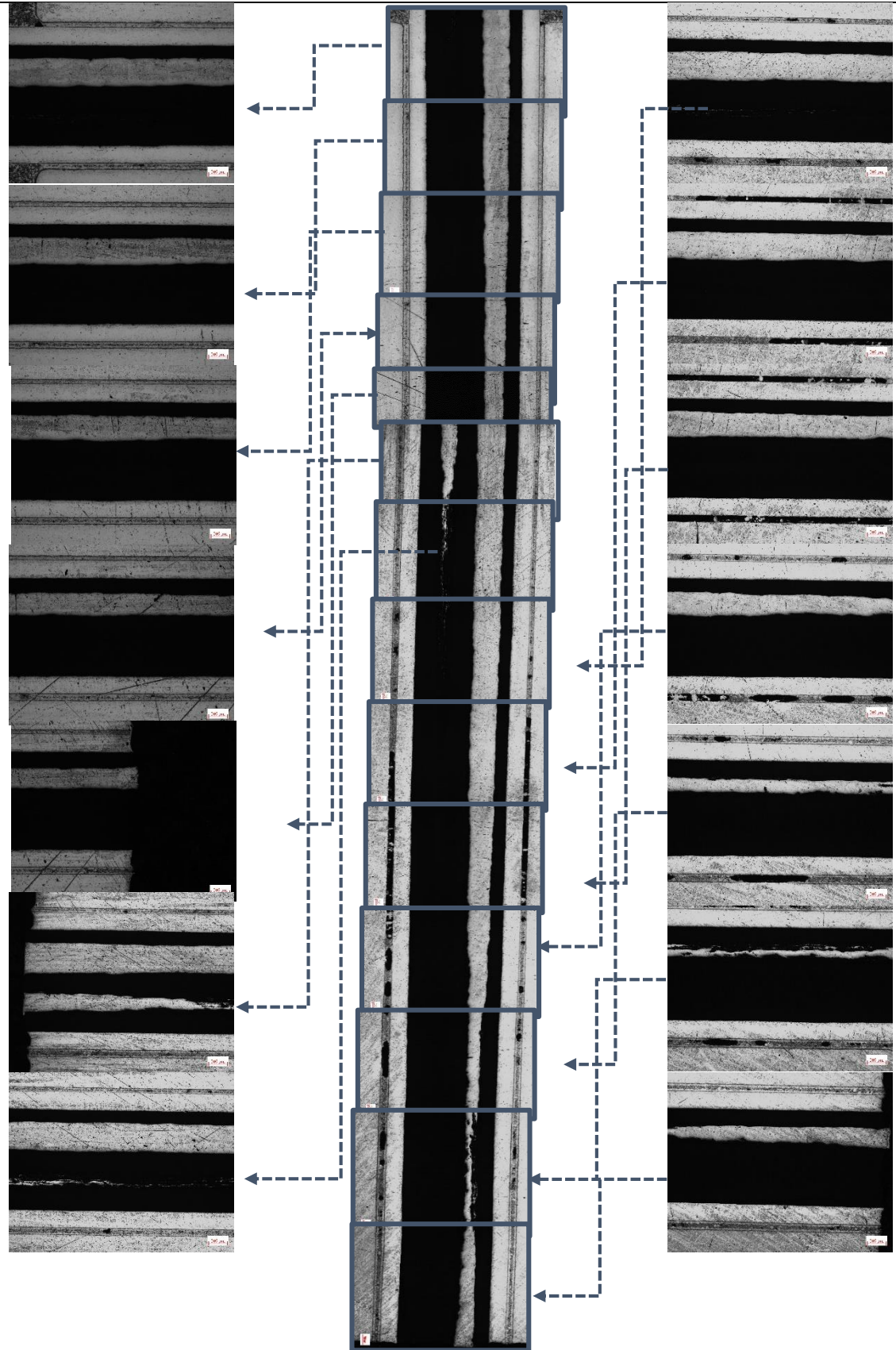


图 4-12 加热温度 1030℃保温时间 15min 小端向上

4.5 温度的试验结果分析及确定

下图中由上及下分别为加热温度 1020℃与加热温度 1030℃的试验结果。预实验中加热温度 1020℃保温时间 20min 和 1030℃保温时间 20min 对比结果图如图 4-13 所示。



图 4-13 不同温度参数对比

本组热电偶套管焊接试验中我们采用前几组的最佳参数，采用 2000 目砂纸打磨，保温时间 20min，间隙控制在 0.14mm 左右，因为上组确定保温时间实验中 20min 的保温时间已经达到非常高的填充率，试验温度超过液相线温度 30℃到 50℃之间，所以本组试验只增加一组温度为 1020℃的试验观察是否参数为 1030℃的加热温度是最佳的结果，由图 4-14 加热温度 1020℃，保温时间 20min 的工艺参数观察可以看出加热温度为 1020℃的填缝填充效果没有图 4-10 加热温度 1030℃的填缝效果好，并且结合预实验的试验结果，所以温度的最佳参数选择 1030℃。

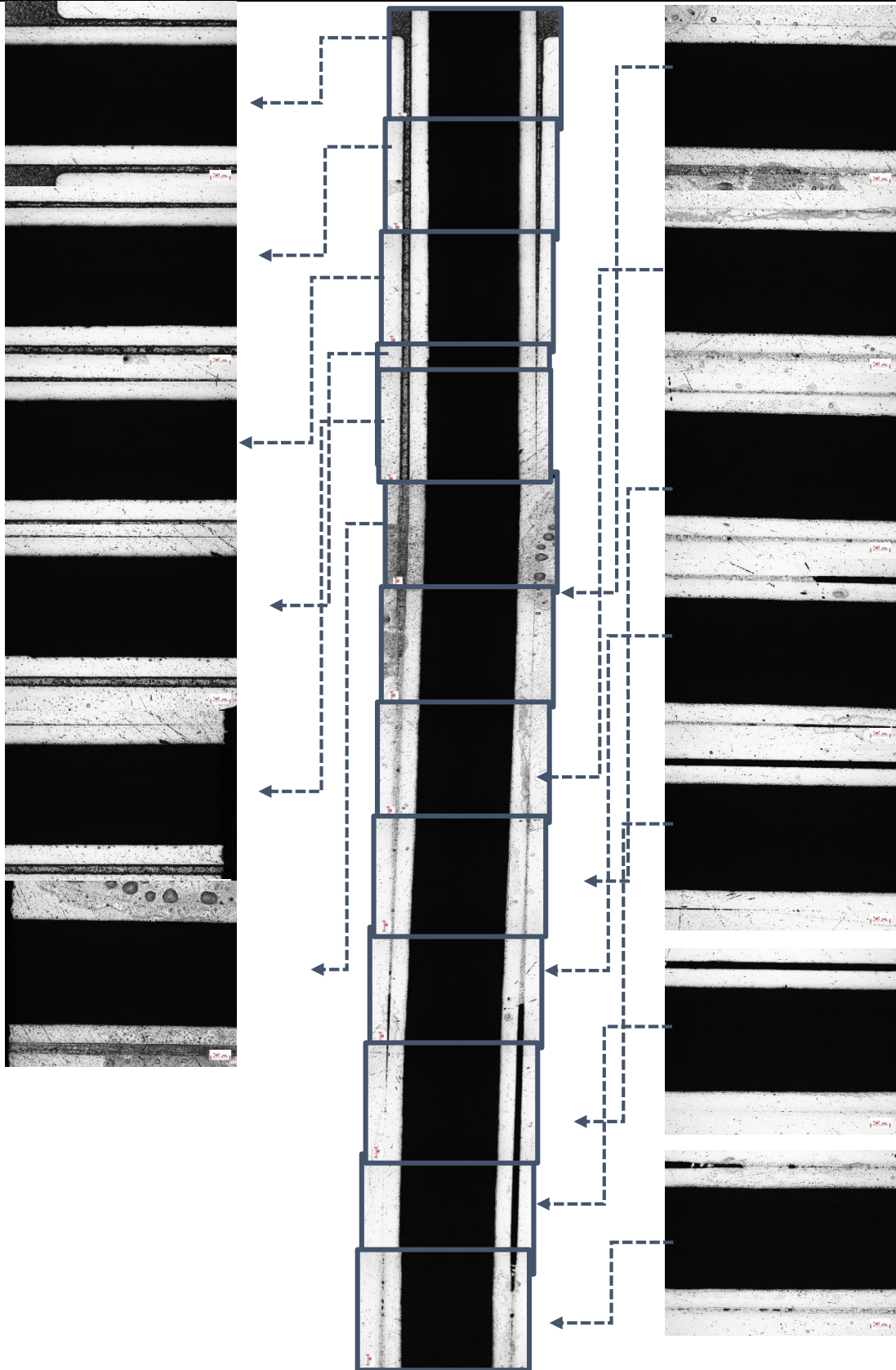


图 4-14 加热温度 1020℃保温时间 20min

4.6 小结

由单独板材钎料的润湿性试验和板材对接的预试验得出经过 2000 目砂纸打磨后的粗糙度为最佳粗糙度参数，然后铠偶与高温保护套管的试验中铠偶粗糙度始终采用 2000 目的砂纸打磨。保护套管与铠偶钎焊时不同间隙对钎料填充率的影响试验中得出当铠偶与套管之间的间隙在 0.14mm~0.15mm 时效果最好。

根据板材对接钎焊的预试验和 GH3039 保护套管与铠偶钎焊的主试验结果都可以观察到随着钎焊温度的升高钎缝的填充率更好，在确定粗糙度，间隙温度参数后，随着保温时间的增加，钎缝的填充效率变好，钎料的润湿性变好，经过试验结果比对发现保温时间 20min 的填充效果好于保温时间 10min 的填充效果，所以最佳保温时间选取 20min。同样可以观察到随着温度的提高，钎料的铺展性也随之提高，由图可以观察到加热温度 1030℃>1020℃的填充效果。

结 论

本文采用 GH3039 合金金属保护套管与 BNi2 钎料，利用高温真空钎焊的方法焊接金属套管与铠偶。确定最佳的粗糙度、保温时间、温度、间隙的参数得到最好的填充效果。

主要结论为：BNi2 钎料的铺展性与多种因素有关，通过已有的结论可知随着粗糙度、温度、保温时间三者中的某一个数值的变化，钎料的润湿性都会发生变化，如果一味地增加某个参数，钎料的润湿性会出现由好变差的效果。本文也正好证实了这个观点并在这个基础上不断试验，确定了这个润湿性由好到差的一个节点，这个节点参数就是使钎缝填充效果达到最好的工艺参数。所以本次试验确定了最佳保温时间选取 20min，最佳工艺温度选择为 1030℃，最佳间隙在 0.14mm~0.15mm 之间，全部采用 2000 目砂纸进行打磨。因此，在加热温度 1030℃，保温时间 20min，采用 2000 目砂纸打磨，间隙在 0.14mm~0.15mm 之间的条件下，经过计算填充率，钎料几乎全部填入填缝之中，填充率达到 97.2%。

本文对 GH3039 金属保护套管和铠偶进行焊接就是对该铠装热电偶的工艺优化，使其在工作中得到很好的保护，延长其使用寿命。并且符合航天标准后可能应用在火箭发动机上。

本课题的研究中还有些地方需要完善，液态钎料与母材的相互作用情况需进一步探究，在这个最佳参数条件下钎料中的元素和母材中的元素是否能够完全固溶或形成金属化合物达到最佳的力学性能，还需继续研究。而且可以更深层次的探究更精确的试验参数。

参考文献

- [1] 彭泳卿, 陈青松, 戴保平. 现代航天传感器技术发展趋势分析[J]. 计测技术, 2019, 39(04): 64-72.
- [2] 高广华. 热电阻传感器在航空发动机中的应用研究[C]. 航空工业测控技术发展中心、中国航空学会测试技术专业委员会、《测控技术》杂志社.2012 航空试验测试技术学术交流会议论文集. 航空工业测控技术发展中心、中国航空学会测试技术专业委员会、《测控技术》杂志社:《测控技术》杂志社, 2012:270-271+274.
- [3] 陆月芸. 航天飞机主发动机热气温度传感器[J]. 宇航计测技术, 1988(02):37-41.
- [4] 肖琳, 张立新, 徐丽艳, 张祖力. 专用 K 型铠装热电偶制作工艺的研究[J]. 功能材料, 2005(11):1725-1727.
- [5] 刘洋, 吴双, 赵永刚. 热电偶温度传感器的研究与发展现状[J]. 中国仪器仪表, 2003 (11) : 1-3.
- [6] 王魁汉. 温度测量实用技术[M]. 机械工业出版社, 2007.
- [7] TIAN B, ZHANG Z, SHI P, et al. Tungsten-rhenium thin film thermocouples for SiC-based ceramic matrix composites [J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(1): 015007.
- [8] ZHANG Z, TIAN B, YU Q, et al. A protected tungstenrhenium thin film thermocouples sensor[C]/IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2017: 796—799.
- [9] ZHANG Z, TIAN B, YU Q, et al. Range analysis of thermal stress and optimal design for tungstenrhenium thin film thermocouples based on ceramic substrates [J].Sensors, 2017, 17(4): 857.
- [10] 张志学, 张兴, 赵迎松, 王维. 航空发动机高温包覆热电偶研制[J]. 航空发动机, 2017,43(02):81-84.
- [11] 张雷博. 高速飞行器外表面气动热参数测量技术研究进展[C]/中国航天科技集团公司第九研究院科学技术委员会. 第三届航天电子战略研究论坛文集（遥测遥控专刊），2017: 4.
- [12] El-Batahgy A M, Fathy G. Fatigue Failure of Thermowells in Feed Downstream Pipeline at a Natural Gas Production Plant[J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2013.
- [13] 袁伟, 杨智荣. 热电偶套管断裂失效分析综述[J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46(06): 425-427+468.
- [14] 于治水, 石昆, 李瑞峰. 钎缝间隙对镍基合金真空钎焊接头组织和性能的影响[C]/全国钎焊及特种连接技术交流会. 2009.
- [15] 石昆, 于治水, 李军, 李瑞峰. 钎焊保温时间对 GH738 与 GH4169 镍基合金真空钎焊接头组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(01): 112-115.
- [16] Wolffenbittel R F. Wise K D. Low—temperature silicon wafer to wafer bonding using gold at eutectic temperature[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1994, 43(1-3): 223-229.
- [17] Jacobson D M, Humpston G. Diffusion soldering[J]. Soldering&Surface Mount Technology, 1992, 10(2): 27-32.

- [18] https://ss1.bdstatic.com/70cFvXSh_Q1YnxGkpoWK1HF6hhy/it/u=1174563177,92092708&fm=26&gp=0.jpg
- [19] <http://image10.71.net/image10/30/32/68/27/781974b4-0158-4737-af-44cf8f807a1d.jpg>
- [20] 刘丰刚. GH3039 激光焊接工艺及接头组织性能研究[D]. 西安理工大学, 2010.
- [21] 朱建勇. BNi2 钎料粉末研制[D]. 中南大学, 2005.

致 谢

本论文是在王军教授的悉心指导下完成的，无论是从选题、方案设定、整体构思到行文写作，以及最后的修改、定稿，导师都给予以耐心细致的指导和帮助。导师严谨、科学的治学态度、孜孜不倦的工作精神，为人谦虚宽厚的朴实风范，值得我学习并将使我受益终生。自毕业设计以来，导师无论在生活还是学业上，都给予了我无微不至的关怀和帮助，在此衷心的感谢！

还要特别感谢田春英老师在本次试验中的悉心指导，不厌其烦的解答我在试验中的每一个问题，并且在论文试验方案的设定及试验结果的整理中得到了田春英老师的大力支持，在此表示最诚挚的敬意和最衷心的感谢。

感谢我的父母四年间给了我无微不至的关爱，一直默默的支持我，鼓励我，您们辛苦了。

感谢天津中德应用技术大学多年来给我提供的良好的学习环境、完善的毕业设计环境和条件，使我得以顺利完成学业。

论文的写作参考了大量国内外文献，对这些文献的作者表示衷心的感谢。

在即将毕业之际，向所有在学习、生活和论文完成过程中曾给予帮助的各位老师、朋友、同学表示最诚挚的敬意和最衷心的感谢！