



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(专业学位)

GF6 自动变速器粉末冶金组合支架  
制造工艺研究

姓 名： 张志勇

学 号： 0921180103

所在院系： 汽车学院

职业类型： 工程硕士

专业领域： 车辆工程

指导教师： 倪计民 教授

副指导教师： 于伯忠 高级工程师

二〇一五年三月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Engineering

## **Research of Manufacturing Technology of GF-6 Automatic Transmission P/M Carriers**

Candidate: Zhang Zhiyong  
Student Number: 0921180103  
School/Department: School of Automotive Studies  
Discipline: Engineering Master  
Major: Vehicle Engineering  
Supervisor: Prof. Ph.D. Ni Jimin  
Vice Supervisor: Senior Engineer Yu Baizhong

Mar, 2015

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

---

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，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，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本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。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 摘要

与传统的钢件机械加工工艺相比，粉末冶金具有材料轻量化、少（或无）切削、生产效率高等独特优势，因而在汽车等诸多领域得到了广泛的应用。

组合支架是汽车自动变速器中一个重要的零部件，由于结构复杂，采用传统钢件机械加工的方法，效率低、成本高。而采用粉末冶金分体成形、烧结钎焊、烧结渗铜技术，可以大大地提高生产效率、降低制造成本。

GF6 自动变速器是通用汽车公司开发的一款自动变速器，仅中国市场年需求量就达百万台以上。因此，开展 GF6 自动变速器粉末冶金组合支架制造工艺研究，具有重要的理论意义和实用价值。

本文主要工作和成果如下：

1) 根据组合支架的支撑架和法兰的材料需满足美国粉末冶金标准 MPIF 35 FC-0208-50 和 FX-1008-50 的要求，在充分研究原料铁粉的规格、添加合金元素的种类和含量对材料物理机械性能影响的基础上，确定了基体材料配比为：96.1%铁粉+0.8%石墨粉+2.0%铜粉+0.5%硫化锰粉+0.6%润滑剂。

2) 根据粉末冶金零件烧结钎焊、渗铜的机理，研究粉末冶金零件烧结钎焊、渗铜工艺技术，并应用于粉末冶金自动变速器组合支架的研制和生产中，满足了性能要求和市场需求。本论文研究的烧结钎焊技术具有创新性，并填补了国内该领域的空白。

3) 通过本论文研究，形成了粉末冶金组合支架制造的先进技术和方法，关键性能指标：结合力达到 40kN 以上，远远超过了常规的 10kN 的设计要求，达到甚至超过国外同类产品水平。

**关键词：**粉末冶金，组合支架，分体成形，烧结钎焊，烧结渗铜

## ABSTRACT

Compared with traditional mechanical processing technology, Powder Metallurgy is advantageous in terms of light-weighting and high production efficiency. Also, as a net-forming process, less or no machining is normally needed. Thus, it has been widely used in automobile industry.

The manufacturing of Carrier, one components of significance in automobile automatic transmission, normally suffers from low efficiency and high cost due to the complex structure when traditional processing technology was used. By brazing the powder metallurgy green body and sintering/infiltrating as integrity, the production efficiency can be greatly improved, whereas the manufacturing cost became lower.

GF6 automatic transmission was developed by General Motors with an automatic transmission, only in the Chinese market demand of more than one million units. Therefore, to carry out the GF6 automatic transmission of powder metallurgy combination stent manufacturing technology research has important theoretical significance and high practical value.

In this paper, the main work and achievements are as follows:

1) According to the combination of racks and flange material must meet the standard powder metallurgy MPIF 35 FC - 0208-50 and FX - 1008-50, in the research of the specifications of the raw material iron powder, the kinds of adding alloying elements and content on the material are determined on the basis of physical and mechanical properties affect the ratio of matrix material is: 96.1% iron + 0.8% graphite + 2.0% copper + 0.5% manganese sulfide + 0.6% lubricant.

2) In this project, a process used for manufacturing GF6 P/M Carriers via powder metallurgy route is developed based on very detailed research on the mechanism during sintering, brazing and infiltrating. The technology is innovative, and it filled the blank of domestic field.

3) Through this thesis, the advanced technologies and methods of powder metallurgy Carriers formed, key performance indicators: binding force reaches 40kN, far more than the conventional design requirements 10kN achieve even more than similar foreign products.

**Key Words:** Powder Metallurgy, Carriers, Separately-molding, Sinter-brazing, Copper-infiltration Sintering

## 目 录

第 1 章 引言.....	1
1.1 概述.....	1
1.2 国内外研究状态和发展趋势.....	2
1.3 粉末冶金基本原理.....	4
1.4 课题研究内容与目标.....	8
第 2 章 粉末冶金基体材料研究.....	10
2.1 本论文研究产品性能要求分析.....	12
2.2 基体材料.....	12
2.2.1 铁粉的选择.....	13
2.2.2 石墨粉的添加量确定.....	13
2.2.3 铜含量的确定.....	14
2.2.4 助切削添加剂的确定.....	15
2.2.5 润滑剂的选择.....	16
2.2.6 材料配比与混合方式.....	17
2.3 本章小结.....	18
第 3 章 渗铜工艺研究.....	19
3.1 渗铜机理与作用.....	19
3.1.1 熔渗原理.....	19
3.1.2 熔渗条件.....	20
3.1.3 渗铜的作用.....	20
3.2 渗铜剂材料的选择.....	21
3.2.1 渗铜剂的成分与作用.....	21
3.2.2 渗铜剂的选择.....	22
3.3 渗铜工艺试验研究.....	22
3.4 本章小结.....	24
第 4 章 烧结钎焊研究.....	25
4.1 烧结钎焊机理.....	25
4.2 钎焊料的选择.....	26
4.2.1 钎焊料的组分与作用.....	26
4.2.2 钎焊料的选择.....	27
4.3 烧结钎焊工艺影响因素.....	27
4.3.1 基体材料与密度.....	27

4.3.2 钎焊温度与保护气氛.....	28
4.3.3 钎焊间隙与钎焊料用量.....	28
4.4 本章小结.....	30
第5章 试验方案设计与验证.....	31
5.1 试验方案设计.....	31
5.2 试验坯件制备.....	33
5.3 试验结果和分析.....	34
5.3.1 方案1（烧渗——焊两步法）.....	35
5.3.2 方案2（烧焊——渗两步法）.....	36
5.3.3 方案3（烧结、钎焊及渗铜一步法）.....	37
5.4 本章小结.....	38
第6章 模具设计与产品研制.....	39
6.1 模具设计.....	39
6.1.1 支撑架模具设计.....	40
6.1.2 法兰模具设计.....	43
6.2 产品研制.....	46
6.2.1 坯件制作.....	46
6.2.2 烧结、钎焊和渗铜.....	46
6.2.3 试验结果及分析.....	48
6.3 本章小结.....	49
第7章 结论与展望.....	50
7.1 结论.....	50
7.2 展望.....	51
致谢.....	52
参考文献.....	53
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	55

## 第1章 引言

### 1.1 概述

近年来,随着我国经济的快速发展和轿车进入家庭,我国的汽车工业得到了迅猛发展。据工信部2015年01月23日发布的《2014年1~12月汽车工业经济运行情况》,2014年全年我国累计生产汽车2372.29万辆,同比增长7.3%,销售汽车2349.19万辆,同比增长6.9%,汽车总体产销量均保持世界第一。而与此同时,汽车工业越来越重视节能减排、注重汽车的轻量化。而与传统钢件机加工相比,粉末冶金具有材料轻量化,少(或无)切削、节能节材、生产效率高、成本低等独特优势,因此在汽车领域的应用也日趋广泛。据资料介绍,粉末冶金总量的70%以上应用于汽车工业<sup>[1]</sup>。

装有自动变速器的汽车能根据路面状况自动改变速度和扭矩,与传统的手动变速器相比,具有操作容易、驾乘舒适、能减少驾驶者疲劳的优点。因此,自动变速器已成为现代轿车配置的一种发展方向。

GF6自动变速器即全球前驱六速自动变速器,是由上海通用、北美通用和韩国通用共同研发的一款自动变速器,具有结构紧凑(输出齿轮通过链条连接主减速器、没有单独的输出轴)、性能优良、节省燃油,低速巡航能力强,适用于4缸和6缸发动机等优点,如图1.1所示。产品主要包括6T30E、6T40E和6T45E三种型号,根据市场信息估算仅通用汽车中国市场年需求量将达100万台以上。另外,类似变速器福特汽车中国市场的年需求量据估算也将达50万台以上,因此市场前景十分看好。



图 1.1 GF6 自动变速器

行星齿轮支架是 GF6 自动变速器中一个重要的零部件，其中输入支架和反作用支架均由粉末冶金方法制造而成，如按年需求量 150 万台套计算，市场销售额将达 1.5 亿元以上。目前，该支架均从国外进口，每年需外汇支出约 2500 万美元。因此，开展 GF6 变速器粉末冶金组合支架制造工艺研究，掌握其制造技术并产业化，替代进口实现重要零部件的国产化，具有较高的经济价值和政治意义。

X23F 输入支架是 GF6 变速器粉末冶金组合支架中的一种规格，结构简图如图 1.2 所示，由支撑架和法兰两部分组成。由于其结构复杂，如整体采用钢件机械加工，则难以实现；如采用钢件分体加工，则效率低（每小时难以加工完成 1 件）、材料利用率低（约 60%左右），制造成本高，同时，加工后将 2 个零件可靠组合在一起也是一个难题，难以满足大批量生产的要求。如采用分体铸造工艺则坯件精度较低，后续需要进行大量机加工，同样效率较低，成本较高。而采用粉末冶金分体成型、烧结钎焊技术，则生产效率高（成形每分钟可达 6 件以上）、材料利用率高（可达 90%以上），制造成本可显著降低，且适合批量生产。

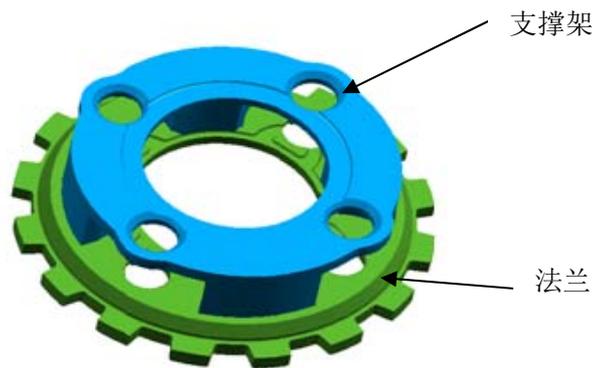


图 1.2 X23F 输入支架

## 1.2 国内外研究状态和发展趋势

粉末冶金具有材料轻量化，少（或无）切削、节能节材、生产效率高、成本低等独特优势，因此在汽车等领域得到了广泛的应用，如：汽车发动机曲轴轴承盖、正时齿形曲轴带轮、凸轮轴带轮、水泵带轮，手动变速器同步器齿毂、拨叉脚、保持环，机油泵转子、齿轮，真空泵转子、连接器，以及空调压缩机、转向管柱类零件等等。目前粉末冶金研发制造水平北美、欧洲和日本处于领先，分别制定的 MPIF35、DIN ISO5755 和 JIS2550 粉末冶金材料标准已成为国际通行标准，其研发生产的原材料的质量和关键设备的制造能力也处于国际领先。我国粉末冶金产业化虽起步较晚（于上世纪 60 年代初），但发展较快，尤其是近年来

在原材料品质、设备制造能力和产品研发生产水平等方面也取得了长足的进步，越来越多原为进口的粉末冶金汽车零部件已被国产化的零部件所替代，如汽车发动机凸轮轴正时齿形皮带轮（如图 1.3）和变速器同步器齿毂（如图 1.4）等等。



图 1.3 汽车发动机凸轮轴正时齿形皮带轮



图 1.4 汽车变速器同步器齿毂

关于自动变速器组合支架，目前，北美 Stackpole 公司已成功研制出了 GF6 自动变速器粉末冶金组合支架，并投入批量生产，但其具体制造工艺技术则是秘而不宣，但从零件实样可以看出，Stackpole 公司是采用了粉末冶金分体成形、烧结钎焊和渗铜的技术，经对实样进行检测，法兰与支撑架的结合力为 40.5kN（通用的设计要求为 10kN 以上）。

美国 Hoeganaes 公司的 Sckolowski Peter K 博士研究指出<sup>[2]</sup>：烧结钎焊是一种已确立的粉末冶金零件连接工艺，经常用于生产汽车零部件，如变速器行星齿轮架和减速器毂盘等。成功的钎焊连接主要取决于钎焊合金、母体材料连接表面与烧结条件间的相互作用。较为广泛使用的钎焊合金材料是 Ancorbraz 72。该材料能与焊接的母体材料形成合金和能局部密封粉末冶金零件的表面孔隙。该研究提出，钎焊粉料中添加少量铁粉可以影响熔渗程度，防止因熔渗造成钎焊材料的大量损失，导致母材表面间的钎焊料量不足，影响钎焊效果。研究指出：通过钎焊母材表面间的金属结合强度足以达到高性能粉末冶金零件的要求。

另据国际著名的原材料供应商瑞典赫格纳斯公司的研究，钎焊母材接头间隙

一般为 0.05~0.15mm，钎焊剂用量通常为 0.2~0.5g/cm<sup>2</sup>。

国内也有开展组合支架烧结钎焊研究，2007 年扬州保来得科技实业有限公司申请了一项《汽车自动变速箱齿轮支架的一种加工方法》专利（专利号为：200710019828.1）。该专利所采用的方法主要有：1）分别挤压制成一个平板型底架（即法兰）和一个带有支撑腿的上支架（即支撑架），将底架和上支架分别预烧结、精整，然后再将底架和上支架的支撑腿烧结焊成一体，最后在 150~650℃ 的温度下将焊接为一体的产品进行热处理。2）底架和上支架采用的粉末冶金材料为 Fe 90~99%、C 0~1%、Ni 1~5%、Mo 0.5~2.0%（质量百分比）。该方法，工艺较为复杂、材料中含有镍、钼等贵金属元素，因此成本较高，经济性欠佳。

综上分析，为发挥粉末冶金工艺技术优势和降低制造成本，自动变速器粉末冶金组合支架的研究发展方向将是：法兰与支撑架分别压制成形；烧结、钎焊、渗铜（渗铜目的是提高法兰密度与强度）应该是性能可靠、操作简便，最好是一道工序中完成，并采用成本相对较低的原材料，如：铁碳铜系材料。

### 1.3 粉末冶金基本原理

粉末冶金是一门制造金属粉末和以金属粉末（包括混入有非金属粉末者）为原料，用成形和烧结的方法制造材料或制品的技术学科。

粉末冶金既是一项新型材料加工技术，又是一项古老的技术。早在五千年前就出现了粉末冶金技术雏形，古埃及人用此法制造铁器件；1700 年前，印度人采用类似方法制造了重达 6.5 吨的“DELI 柱”（是一种含硅铁的合金，耐蚀性好）。19 世纪初，由于化学实验用铂（如坩埚）的需要，俄罗斯人、英国人采用粉末压制、烧结和热锻的方法制造致密铂，成为现代粉末冶金技术的基础。20 世纪初，现代粉末冶金的发展起因于爱迪生的长寿命白炽灯丝的需要。钨灯丝的生产标志着粉末冶金技术的迅速发展。1923 年粉末冶金方法生产的硬质合金的出现导致机加工的革命。20 世纪 30 年代粉末冶金铜基含油轴承的制造成功，并在汽车、纺织、航空、食品等工业部门的广泛应用。随后，铁基粉末冶金零部件的生产，发挥了粉末冶金以低的制造成本生产高性能零部件的技术优点。20 世纪 40 年代，二战期间，促使人们开发研制高级的耐温高强度材料，如金属陶瓷、弥散强化合金材料，以制造飞机发动机的关键零部件。战后，粉末冶金行业开始研发更高性能的新材料，如粉末高速钢、粉末超合金、高强度铁基粉末冶金零部件（如粉末热锻零件等），大大扩大了粉末冶金零部件及其材料的应用领域。粉末冶金在新材料的研制开发过程中发挥了其独特的技术优势。

粉末冶金具有如下技术特点：

1) 材料轻量化，粉末冶金零件大多为非致密零件，同种材料其密度可根据其使用性能要求灵活选择。对于铁基粉末冶金零件，通常将密度低于  $6.4\text{g/cm}^3$  称为低密度， $6.4\sim 6.8\text{g/cm}^3$  称为中密度，高于  $6.8\text{g/cm}^3$  称为高密度。

2) 材料利用率高，采用粉末冶金技术生产的零件，大多数可以直接满足其精度要求，不需要后续机械加工，如发动机正时齿形带轮等。部分零件即使需要加工，也仅需少量加工，如攻螺纹孔等，因此节能节材。

3) 生产效率高、成本低，适合大批量生产，且批量越大成本越低。

4) 材料灵活性强，可根据产品性能要求，较易配制所需材料。

5) 产品尺寸精度高、粗糙度低，批量生产质量一致性好。

6) 通过复合成形或组合烧结可制造复合材料制品。

7) 可制造其它工艺难以实现的特殊材料与制品。如：含油轴承等。粉末冶金含油轴承的优点：轴承孔隙中含有润滑油，当机器工作时，轴与轴承摩擦产生热量，润滑油受热膨胀渗出，在轴与轴承间形成润滑油膜起润滑作用。当机器停止工作时，随着温度降低油膜被毛细管力重新吸入轴承的孔隙中。避免致密金属轴承加油不足时润滑不充分导致磨损，加油过量时流出导致对周边的污染。因此在食品机械和纺织机械等领域得到了广泛的应用。

粉末冶金可根据其主要材料类型不同分为：铁基粉末冶金、铜基粉末冶金、铝基粉末冶金等等。铁基粉末冶金主要原材料为铁粉或铁合金粉末。目前汽车领域应用的零件 90%以上为铁基粉末冶金零件。本论文组合支架也是属于该类材料。

铁基粉末冶金基本工艺流程如图 1.3 所示。

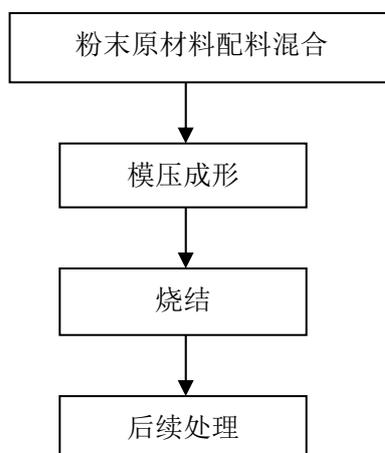


图 1.3 铁基粉末冶金基本工艺流程

### 1) 配料混合

配料混合的目的是获得化学成分和物理性能均匀一致的混合粉末,也是粉末冶金材料和制品生产的首道工序。根据材料和制品的性能要求选择基础原料粉末和添加剂,并确定其各种组分的配比,在专用的混料器中混合均匀。

混合状态的粉末作为粉末冶金制品生产的原材料。

### 2) 模压成形

成形是将混合粉末加入到成形压机的模具模腔中,在常温高压下被压缩得到所需密度和几何形状的过程。成形坯件因粉末颗粒间的机械和原子结合力作用而具有一定强度。通常压强越大、压坯密度将越高、随之压坯强度越高。

成形可根据其方式不同分为:普通钢模压制成形(简称模压成形)和特殊成形两大类。特殊成形又分为:冷等静压成形、热等静压成形、无压成形(包括松装烧结、粉浆浇注、喷射成形等)、粉末挤压成形、粉末轧制、温压成形和注射成形等。由于模压成形具有精度高、生产效力高、成本低等优点,在粉末冶金结构件批量化生产中基本上均采用模压成形的方式。

模压成形工序可分为粉末充填、压缩成形和脱模三个阶段。

粉末压制过程:粉末在压制的开始阶段,外力克服粉末间的摩擦阻力,粉末颗粒发生重新排布,粉末的体积和粉末间的孔隙明显减小,压坯密度显著提高。同时,粉末颗粒间的表面接触面积增大。在压制过程中,随着压力增加,由于粉末颗粒的继续重新排布和产生塑性变形,孔隙度进一步减少。在压制后阶段,粉末继续位移困难,粉末加工硬化,颗粒发生断裂和破碎,填充到压坯中较小的孔隙中去。

### 3) 烧结

烧结是指压坯在低于主要组分熔点的温度下借助于原子迁移扩散实现颗粒间形成冶金结合的过程。烧结是粉末冶金生产过程中最基本的工序之一,对最终产品的性能起着决定性的作用。不同成分的材料和制品皆需通过烧结才能达到其相应的物理力学性能。

烧结的基本过程见图 1.4 所示。

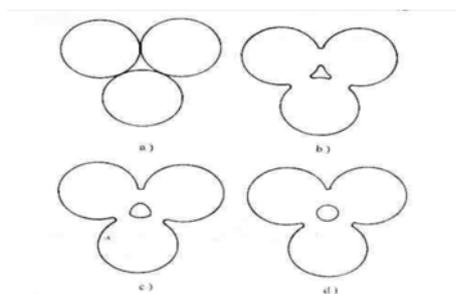


图 1.4 三个球形颗粒烧结模型

(1) 粘结面的形成：在粉末颗粒的原始接触面，通过颗粒表面附近的原子扩散，由原来的机械啮合转变为原子间的冶金结合，形成晶界。坯体的强度增加，导电性能提高，表面积减小，如图 1.4 a)。

(2) 烧结颈的形成与长大：随着烧结过程的进行（原子扩散），粘结面发展成颗粒间的烧结颈。由于原子的扩散，颗粒间的距离缩短，形成连续的孔隙网络，这些是该阶段前期的特征。孔隙进一步缩小，网络坍塌并且晶界发生迁移。这是该阶段后期的特征，如图 1.4 b)。

(3) 闭孔隙的形成和球化：孔隙管道被分隔成一系列的小孔隙，最后发展成孤立孔隙并球化。处于晶界上的闭孔则有可能消失，有的则因发生晶界与孔隙间的分离现象而成为晶内孔隙，并充分球化，如图 1.4 c) 和 d)。

烧结工序可分为：预热、烧结和冷却三个阶段。

预热阶段，温度通常为 500~750℃之间，主要目的是给压制坯件预热的同时，去除压坯中为改善成形性能而添加的润滑剂，避免该润滑剂到后续高温煅烧阶段因迅速升温产生急剧膨胀，导致坯件出现气泡等缺陷。

高温烧结阶段，对于铁基粉末冶金零件烧结温度通常为 1120℃，通过原子迁移扩散实现颗粒间形成冶金结合和合金化的过程，并达到其相应的物理力学性能。

冷却阶段，经高温烧结的坯件需经过冷却循环水套进行空冷，通过空冷材料发生金相组织转变，得到所需要的珠光体与铁素体组织。通常零件的出炉温度低于 100℃，避免温度过高出炉后零件在室内环境下氧化。

在整个预热、烧结和冷却过程中，均需在保护气氛中进行，以防止坯件被氧化，工业应用的保护气氛通常为氮气和氢气所组成的混合气体。氮气是一种较为廉价的情性气体可通过工业液氮汽化获得。氢气具有一定的还原性可避免零件在烧结过程中氧化，粉末冶金烧结所用的氢气来源，一是使用压缩氢气，二是通过氨分解获得。

烧结炉可根据其结构、生产方式不同分为：连续式网带烧结炉、间歇式推舟烧结炉、间歇式真空烧结炉等。由于网带烧结炉具有操作简便、效率高、运转平稳等优点，目前铁基粉末冶金企业绝大多数均采用连续式网带烧结炉。

#### 4) 后续处理

对于铁基粉末冶金来说，材料配料混合、模压成形、烧结是必不可少的基本工序。根据制品的要求不同，往往还需要采取一些相应的后续处理，如高精度的齿形皮带轮烧结后需要进行精整和去毛刺处理；对于带螺纹孔的曲轴齿形带轮烧结后需要进行精整、机加工攻螺纹，并且往往还需要进行水蒸气处理，在零件表面生成一层致密的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  保护膜，以提高表面硬度和耐磨性，等等。

近年来粉末冶金在新技术方面也取得较好的发展，如表面致密化、烧结硬化和烧结钎焊技术等。

#### 1) 表面致密化技术

表面致密化是对烧结后的零件通过轧辊模的反复滚压或挤压模的挤压在零件表面形成一层近乎无孔隙的致密层（一般深度可达 0.3mm 以上）的一种技术。

表面致密化的优点：对齿轮类零件来说，通过表面致密化可以大幅提高齿轮表面接触和弯曲疲劳强度，同时也使齿轮的齿形精度有所提高，表面粗糙度和噪音降低，耐磨性和耐蚀性提高等。因此，该项技术已逐步应用于高性能粉末冶金齿轮等零件的制造中。

#### 2) 烧结硬化技术

烧结硬化是粉末冶金零件在烧结的冷却阶段通过快速冷却，使之显微组织部分或全部转变为马氏体，从而达到常规工艺难以达到的硬度。烧结硬化是将传统的烧结与热处理二道工序合二为一的一种先进工艺，节约能源、减少了工序与物流，具有很好的经济性；同时采用烧结硬化零件的变形量比传统的烧结再热处理明显减小，有利于保证零件的尺寸精度，现已得到越来越广泛的应用。

#### 3) 烧结钎焊技术

烧结钎焊是通过特种材料在烧结过程中的钎焊作用，将两个以上粉末冶金零件牢固地焊合在一起，组成一个常规工艺难以成形的复杂结构零件。自动变速器粉末冶金组合支架研制与生产就是采用该项技术。

## 1.4 本论文研究内容

通过文献查阅和对国内外研究现状的分析研究，通过钎焊的方法将两个粉末冶金坯件牢固地组合在一起是可行的，并已有研制粉末冶金组合支架成功的案例，因此认为开展本论文研究具有较高的可行性。

本论文以 GF6 自动变速器中的 X23F 输入支架为研究对象，根据粉末冶金成形技术特点将输入支架分解为支撑架和法兰两个部分，采用粉末冶金分体成形、烧结钎焊技术和烧结渗铜将两个零件组合成一体，并满足其使用性能要求，以达到提高生产效率、降低制造成本的目的。

本论文根据粉末冶金零件成形、烧结钎焊、渗铜机理，研究掌握粉末冶金零件烧结钎焊、渗铜工艺技术，并应用于粉末冶金自动变速器组合支架的研制与生产，满足市场需求。通过本论文研究，形成粉末冶金组合支架制造先进技术，关键性能指标结合力达到或接近国外同类产品水平，打破国外的技术“封锁”，提升我国粉末冶金制品制造工艺技术水平。

研究工作流程如图 1.5 所示。

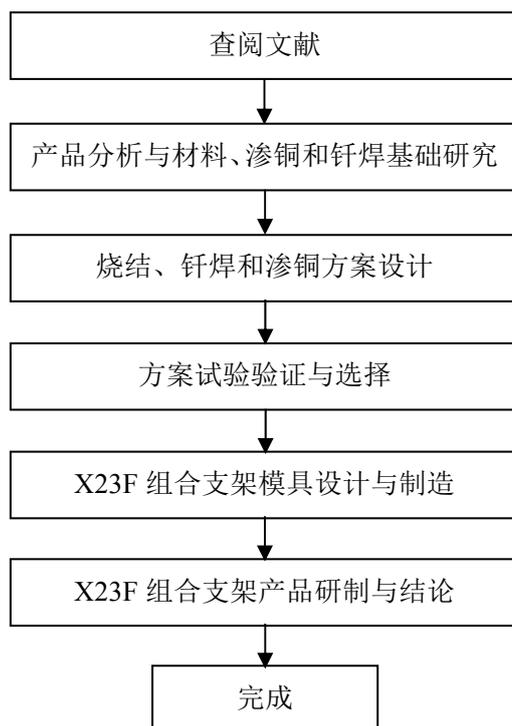


图 1.5 研究工作流程

## 第 2 章 粉末冶金基体材料研究

粉末冶金具有材料轻量化，少（或无）切削、节能节材、生产效率高、成本低等独特优势，因此，其应用领域十分广泛，如：汽车、摩托车、电动工具、家用电器、通讯、刀具、航空航天等。根据使用工况条件不同，其材料种类繁多，主要材料类别如图 2.1 所示。

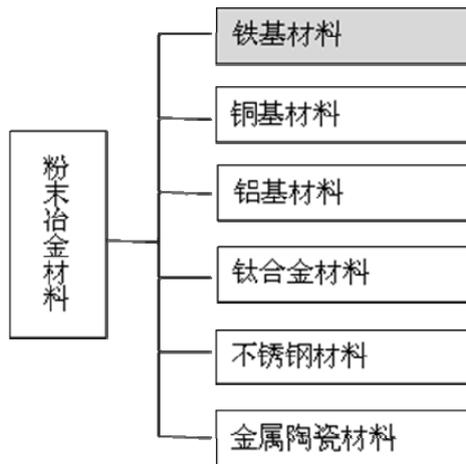


图 2.1 粉末冶金主要材料类别

铜基材料主要用于生产含油轴承。铝基材料轻质在汽车等领域有所应用，但铝的活性较强易氧化，制造成本较高。钛合金材料主要应用于航空航天领域。不锈钢材料应用较为广泛，如手机、电脑、钟表、医疗等，因材料成本较高，多以小型零件为主。金属陶瓷材料，如硬质合金具有高硬度、高耐磨性和红硬性，主要应用于刀具、模具和量具等领域。

在粉末冶金材料中，由于铁基粉末冶金材料具有材料来源广泛、价格较为低廉，同时具有较好的物理机械性能，因此广泛应用于结构零件的生产。铁基材料的用量约占整个粉末冶金材料用量的 90% 以上。故本课题研究产品的材料也是选用铁基粉末冶金材料。

铁基粉末冶金根据其使用性能要求不同，通常分为五种材料系，如图 2.2 所示。对于同一材料系，也可根据零件使用工况条件、性能要求和制造成本等具体情况，研究确定其各材料组份的配比。

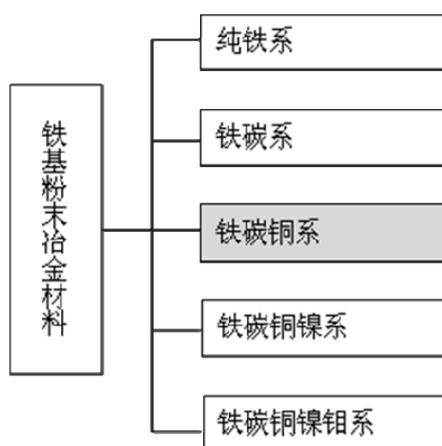


图 2.2 铁基粉末冶金材料系

纯铁系主要用于生产软磁材料制品，如汽车制动防抱死系统中的传感器齿圈等。

铁碳系主要用于生产中低强度结构件，如轴套类零件、含油轴承等。

铁碳铜镍系主要用于生产中高强度结构件，铁碳铜镍钼系主要用于生产高强度、高硬度结构件。如汽车用高强度齿轮、手动变速器同步器齿毂等。金属镍可提高材料强度与韧性，钼可溶于铁中起固溶强化作用，但主要作用是细化晶粒，提高材料的淬透性和防止回火脆性。由于我国镍与钼资源较少，因此材料成本较高。

在铁基粉末冶金材料系中，铁碳铜系主要用于生产中高强度结构件，由于材料成本低，因而在汽车等领域应用最为广泛，如发动机正时齿形带轮、曲轴轴承盖等等，故本课题研究产品的材料也是选用该材料系。

对于铁碳铜系材料，其主要原辅材料组份如图 2.3 所示。

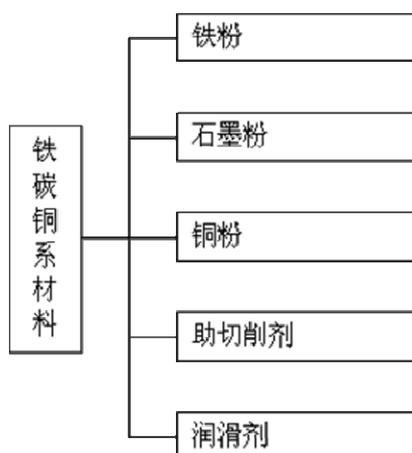


图 2.3 铁碳铜系主要材料组份

铁粉是铁基粉末冶金的主要原材料。石墨粉是形成碳钢的元素，适量添加可提高材料强度和硬度。铜粉，铜在 1083℃时熔化，产生液相，促进烧结过程，并且铜对铁起固溶强化和沉淀强化作用，因而可以提高材料强度。助切削剂，适量添加可改善材料的切削加工性能，提高加工表面质量，延长刀具使用寿命。润滑剂，在粉末冶金零件的压制和脱模过程中，粉末与粉末、粉末与模壁之间的摩擦力较大，在粉末中加入适量的润滑剂以降低摩擦力、改善成形密度均匀性、延长模具使用寿命。

## 2.1 本论文研究产品性能要求分析

X23F 组合输入支架客户图纸要求采用粉末冶金技术制造，组合支架的支撑架与法兰的材料标准需满足美国粉末冶金标准 MPIF 35 的要求，具体如下：

X23F 组合支架的支撑架材料牌号为 FC-0208-50，属于一种高密度铁基粉末冶金，铁碳铜系材料，其化学成分：C 含量 0.6%~0.9%，Cu 含量 1.5%~3.9%，其它≤2.0%，Fe 余量；密度≥6.8g/cm<sup>3</sup>；屈服强度≥400MPa。

X23F 组合支架的法兰材料牌号为 FX-1008-50，属于一种高密度铁基粉末冶金，铁碳铜系渗铜材料，其化学成分：C 含量 0.6%~0.9%，Cu 含量 8.0%~14.9%，其它≤2.0%，Fe 余量；密度≥7.2g/cm<sup>3</sup>；屈服强度≥500MPa。

X23F 组合支架的结合力：不得低于 10kN。

本论文所涉及的材料分为：粉末冶金基体材料、渗铜剂材料和钎焊材料三大类。其中粉末冶金基体材料又涉及铁粉、石墨粉、铜粉、助切削剂、润滑剂等原辅材料。

## 2.2 基体材料

基体材料研究流程如图 2.4 所示。

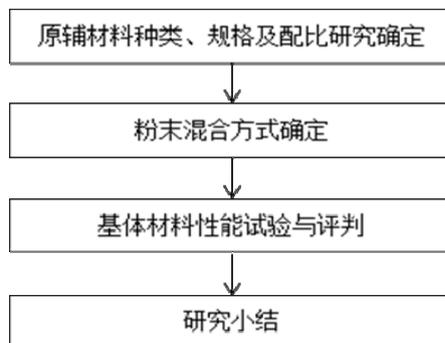


图 2.4 基体材料研究流程图

对于铁基粉末冶金零件来说,主要原料铁粉的规格、添加的合金元素的种类与添加量等因素对零件的强度、韧性、硬度等物理机械性能都将产生直接的影响。本论文支撑架与法兰零件所涉及的原辅材料有:铁粉、石墨粉、铜粉、助切剂、润滑剂等。

### 2.2.1 铁粉的选择

原材料铁粉主要有两种生产工艺,即还原法和雾化法。还原法生产的铁粉颗粒形状较为复杂、成形性较好,但压缩性较差,较适合成形中低密度制品。而雾化粉是通过钢水雾化还原,其颗粒形状近似球形,流动性好,松装密度和压缩性较高,适合成形高密度的制品,因此本论文零件考虑选用雾化铁粉。

目前生产雾化铁粉的厂商较多,国际著名的有瑞典赫格纳斯、美国海格纳士、加拿大魁北克金属粉末等公司;国内雾化铁粉生产企业主要有鞍钢、莱钢、建德等公司。尽管近几年来国产铁粉的质量有了较大提高,但与进口铁粉相比,在质量稳定性等方面尚存在一定的差距。考虑到本论文产品工艺和结构的复杂性,因此选用质量好、性能稳定的瑞典赫格纳斯公司牌号为 AHC100.29 的雾化铁粉作为原料粉末,其主要性能指标见表 2.1。

表 2.1 雾化铁粉 AHC100.29 主要性能指标

主要性能		单位	指标
松装密度		g/cm <sup>3</sup>	2.9~3.0
流动性 (50g)		sec	≤25
压缩性 (600MPa)		g/cm <sup>3</sup>	≥7.14
粒度组成 (质量百分比)	+212μm	%	0
	+150μm		≤8
	-45μm		≤25
化学成分 (质量百分比)	碳	%	≤0.01
	氧		≤0.12

### 2.2.2 石墨粉的添加量确定

碳是铁基粉末冶金材料和制品最为常见的合金元素,碳的存在可控制铁基烧结材料的显微组织,从而控制材料的强度以及硬度。对材料的选择和烧结、热处理等工艺的制订与应用具有指导意义。在粉末冶金制品生产中,碳是以石墨粉形

式添加。根据图 2.5 的铁碳相图<sup>[3]</sup>可见，当碳含量为 0.8%时，金相组织为珠光体；当碳含量低于 0.8%时，金相组织为珠光体+铁素体，含碳量越低铁素体量越多，零件硬度越低；当碳含量超过 0.8%时，金相组织为珠光体+晶界渗碳体，而晶界渗碳体硬而脆，严重影响材料的性能，对高强度、高硬度的粉末冶金零件来说，其含碳量通常控制在 0.7~0.8%范围内。考虑添加的石墨粉在烧结过程中将有少量损失，因此将石墨粉的添加量控制在 0.8%比较合适。

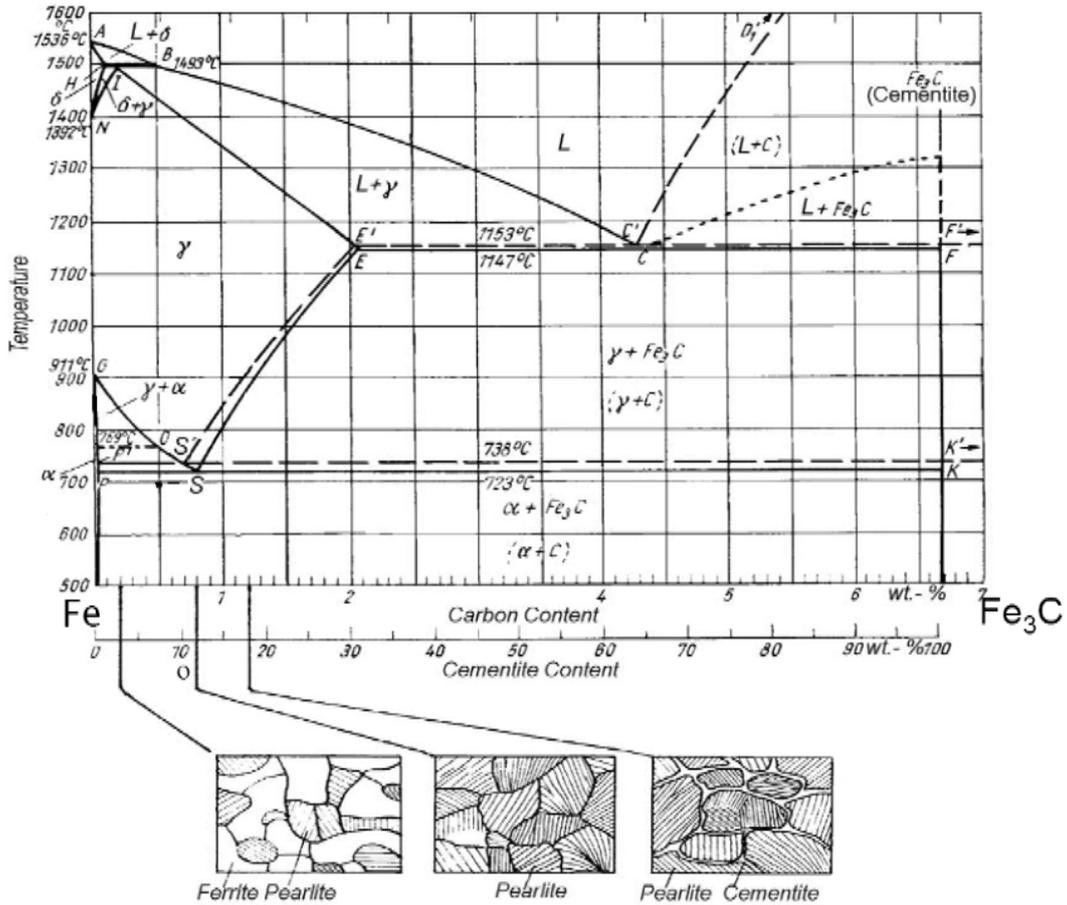


图 2.5 Fe-C 相图

### 2.2.3 铜含量的确定

铜也是铁基粉末冶金材料和制品常见的合金元素，铜在 1083℃时熔化，产生液相，促进烧结过程，并且铜对铁起固溶强化和沉淀强化作用，用以提高材料强度。

试验时分别向材料中添加 1.5%、2.0%、2.5%和 3.0%的铜粉，试验材料其它粉末组份含量为：石墨粉 0.8%、润滑剂 (Lube-E) 0.6%、铁粉 (AHC100.29) 余量。压制坯密度为 6.95g/cm<sup>3</sup>。

试验验证结果如表 2.2，可以看出，随着铜含量的增加，合金的强度和硬度

也相应提高，而其延伸率和冲击韧性却呈逐步下降趋势。当铜含量为 1.5%时，其屈服强度未能满足标准要求；当铜含量增加到 3.0%时，其延伸率和冲击韧性已接近标准要求下极限；而铜含量为 2.0%和 2.5%时，材料各项性能均能较好地满足支撑架材料标准 FC-0208-50 (MPIF 35) 的要求，由于铜的价格相对较高，在综合考虑性能与生产成本等因素的基础上，确定铜的添加量为 2.0%比较合适。

表 2.2 铜含量对材料性能的影响

检测项目	铜含量(%)				FC-0208-50(MPIF35) 要求值
	1.5	2.0	2.5	3.0	
极限拉伸强度 (MPa)	524	527	539	521	$\geq 410$
屈服拉伸强度 (MPa)	394	428	435	448	$\geq 400$
延伸率 (%)	1.65	1.4	1.17	1.05	$\geq 1.0$
冲击韧性 (J/cm <sup>2</sup> )	11.3	9.2	8.4	7.3	$\geq 7$
硬度 (HRB)	72	80	85	89	$\geq 73$

#### 2.2.4 助切削添加剂的确定

本论文组合支架产品装配面精度要求高，需后续机加工。相对于钢件，粉末冶金材料的机加工性较差，这主要是由于粉末冶金材料的多孔性结构引起的：

1) 多孔性导致刃口断续切削，重复的小冲击导致切削刃上产生疲劳裂纹，直至切削刃微崩。这种微崩通常很细小，通常表现为正常的磨料磨损。

2) 多孔性还降低了粉末冶金零件的热导性，其结果是切削刃上的温度过高并会引起月牙洼磨损和变形。

为了改善粉末冶金零件的切削加工性能，往往需在原材料粉末中添加适量的助切削剂。粉末冶金所见的助切削剂有 S、MnS 和 MoS<sub>2</sub> 等，由于 S 是以单质硫磺粉形式添加，烧结过程中散发的气味对周边环境有较大的影响，因此已逐步被淘汰。而 MoS<sub>2</sub> 由于含有贵重金属钼，材料价格较高，一般较少使用。因此，MnS 是粉末冶金最为常用的助切削剂。综合考虑改善切削加工性和经济性等粉末冶金材料中通常 MnS 的添加量为 0.5%。

### 2.2.5 润滑剂的选择

在粉末冶金零件的压制和脱模过程中，粉末与粉末、粉末与模壁之间的摩擦力较大，通常需要在粉末中加入适量的润滑剂以降低摩擦力、改善成形密度均匀性、延长模具使用寿命。

目前，粉末冶金制品常用的润滑剂主要有硬脂酸锌、微粉蜡、Kenolube、Metallube 和 Blue-E 等，其中后三种是由瑞典赫格纳斯公司研发制造。根据赫格纳斯公司的试验研究，不同润滑剂润滑性能如图 2.6 所示。由图可见，当压制密度较低时，五种润滑剂润滑性能相差不大，但随着压制密度的提高，润滑性能差异逐步明显，其中 Blue-E 的润滑性能最优。

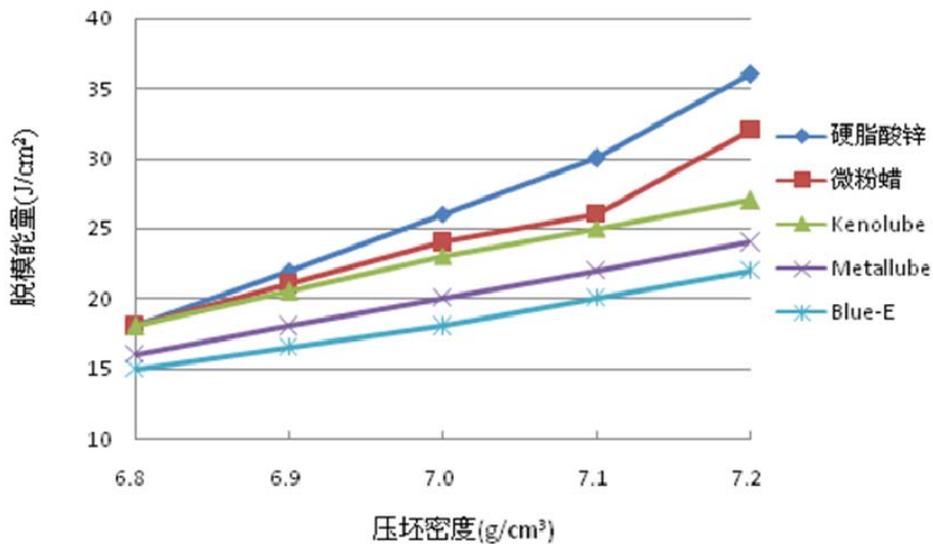


图 2.6 润滑剂性能比较 (添加量: 0.6%)

从烧结零件外观质量来看，不同润滑剂的坯件经烧结后，其外观质量也有所不同：

1) 硬脂酸锌

由于金属锌的原因，烧结件的外观较差，尤其与 MnS 一起使用时更为明显，易在烧结零件表面形成斑点；

2) 微粉蜡

是一种清洁的润滑剂，脱蜡彻底，烧结零件表面清洁；

3) Kenolube 和 Metallube

属于复合蜡，含有一定量的锌盐，烧结后在烧结零件表面会形成少量斑点，外观质量介于硬脂酸锌和微粉蜡之间。

## 4) Lube-E)

也是一种清洁的润滑剂，其零件烧结外观质量与微粉蜡相当。

据赫格纳斯公司研究混合粉末中添加 Lube-E 0.6%时其润滑与压缩综合性能最佳，因此本论文产品选用的润滑剂为 Lube-E，添加量为 0.6%。

## 2.2.6 材料配比与混合方式

材料配比确定：综上所述，组合支架的支撑架和法兰的基体材料配比为：96.1%铁粉+0.8%石墨粉+2.0%铜粉+0.5%硫化锰粉+0.6%Lube-E 润滑剂。

铁基粉末冶金材料的混合主要有两种方式，即机械混合和粘结混合方式：

1) 机械混合属于一种常规的混合方式，即是将基础原料粉末、各种合金元素粉末、助切剂、润滑剂等按一定配比放入混料器中密封后进行机械搅拌混合。该种混合方法简单，但较易产生偏析现象，导致各区域成分存在一定差异，影响材料性能一致性。

2) 粘结混合属于一种先进的混合方式，是通过添加一种特殊的粘结剂，在混合过程中将石墨、润滑剂等轻质的材料均匀地粘结在铁粉表面，从而避免产生成分偏析现象，同时具有改善混合粉末的物理性能和成形性能的优点。

因此，本论文的粉末选择采用粘结混合方式。

按上述配比和混合方法所生产的支撑架和法兰的基体材料的物理—力学性能见表 2.3。从表 2.3 可以看出，研究确定的材料（即支撑架的材料）的各项性能均满足了美国 MPlF 35 标准中 FC-0208-50 材料的要求。

表 2.3 基体材料物理—力学性能

性能名称	单位	FC-0208-50(MPIF35) 要求值	材料实际值
极限拉伸强度	MPa	≥410	518
屈服拉伸强度	MPa	≥400	423
延伸率	%	≥1.0	1.4
冲击韧性	J/cm <sup>2</sup>	≥7	9.1
硬度	HRB	≥73	81
密度	g/cm <sup>3</sup>	6.8~7.2	6.9

## 2.3 本章小结

本章介绍了粉末冶金的类别、铁基粉末冶金主要材料系、铁碳铜系材料主要原材料组份。分析了 X23F 组合支架的相关技术要求，在分析各粉末原辅材料性能特点基础上确定了所选规格，通过试验研究进一步确定了各材料组份的配比和混合方式。即组合支架的支撑架和法兰的主要原材料铁粉采用赫格纳斯公司的 AHC100.29 雾化铁粉；基体材料的配比为：96.1%铁粉+0.8%石墨粉+2.0%铜粉+0.5%硫化锰粉+0.6%Lube-E 润滑剂；采用粘结混合方式。试验证明，研究确定的材料（即支撑架的材料）的各项性能均满足了美国 MPIF 35 标准中 FC-0208-50 材料的要求。

## 第3章 渗铜工艺研究

X23F 输入支架的法兰材料牌号为 FX-1008-50，其密度要求 $\geq 7.2\text{g/cm}^3$ ，根据美国粉末冶金标准 MPIF 35，其属于一种高密度铁基粉末冶金渗铜材料。

渗铜工艺研究流程如图 3.1 所示。

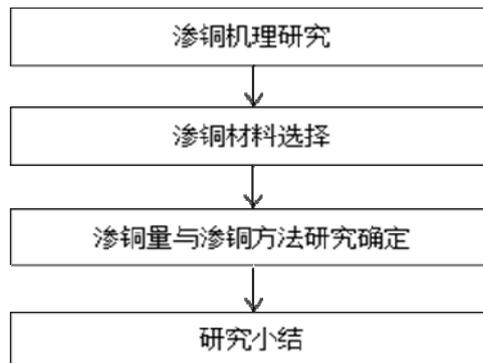


图 3.1 渗铜工艺研究流程图

### 3.1 渗铜机理与作用

#### 3.1.1 熔渗原理

熔渗<sup>[4-9]</sup>是采用熔点比粉末冶金基体压坯或烧结坯组分低的金属或合金作熔渗剂，在溶渗剂熔点或共晶点以上的温度，让坯体内孔隙被金属液填充，冷却下来得到高密度材料或零件的烧结工艺。与普通液相烧结相比较，熔渗靠液相从外部直接填充孔隙而实现致密化，而不依靠本身的体积收缩。烧结初期为固相烧结，中后期为液相烧结。

由于液态铜与固态铁间的热力学亲和力大，铜和铜合金（熔铜剂）熔点低于铁基体，在高于渗铜剂熔点温度下渗铜剂熔为液体，在毛细管力的作用下可迅速熔渗填充于材料基体内部连通孔隙中，实现致密化。

毛细管压力由拉普拉斯方程推导得出，见式（3.1）。对于一给定液体的  $\theta$ （接触角）与  $d$ （孔径），毛细管压力可在很大范围内改变，毛细管压力( $\Delta P$ )与孔径( $d$ )成反比。

$$\Delta P = 2\gamma \cos\theta / d \quad (3.1)$$

式中， $\gamma$  为表面张力； $\theta$  为熔液液体与固态基体间的接触角。

把  $\Delta P = \rho gh$  代入式（3.1）可得到熔体渗入深度：

$$h = 2\gamma \cos\theta / d\rho g \quad (3.2)$$

式中， $\rho$  为液体密度； $g$  为重力加速度。

铜熔渗铁是常见的熔渗体系之一，渗铜剂成为液相熔体后可分两个阶段，即液体通过孔隙系统渗入阶段和液体充满孔隙后与骨架反应的阶段。

### 3.1.2 熔渗条件

用熔渗法<sup>[6]</sup>制备粉末冶金材料时，要使熔渗过程顺利进行，必须满足下列条件：

① 熔渗金属（渗铜剂）与被熔渗金属（或基体金属）的熔点差应足够大，这可使基体材料保持固态，以便在比渗铜剂熔点高的温度下进行加热使其熔化。

② 熔渗金属与基体金属在宽大温度范围内不应生成固熔体，防止基体结构和渗铜剂性能受到影响。

③ 熔渗金属与基体金属之间不应形成金属间化合物，因为它们会阻碍熔融的渗铜剂流入孔隙中。

④ 在熔渗过程中，保持基体表面清洁，以防影响渗铜剂的润湿性。

⑤ 为减小熔渗金属熔液的黏度，熔渗温度应略高于熔渗金属的熔点。

图 3.2 是一般渗铜过程示意图，从该图可大致了解熔融渗铜剂填充孔隙的过程，即将压制好的渗铜剂坯块放置到被渗基体的顶部或底部，在熔渗温度下，渗铜剂会熔化成液体，从而渗入到基体孔隙中去，达到填充的目的。

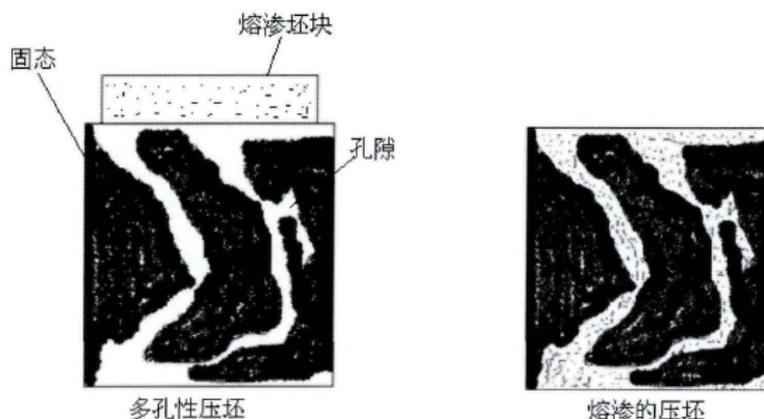


图 3.2 渗铜过程示意图<sup>[10]</sup>

### 3.1.3 渗铜的作用

#### ① 致密化作用

铜熔渗后均匀填充于基体材料孔隙中，使烧结钢密度和宏观力学性能大幅提高<sup>[11-15]</sup>，同时可提高热传导性能，增加材料淬透性，能避免淬火热处理产生的微裂纹。

### ② 物质迁移作用

渗铜剂在熔渗温度下成为液相，在毛细管力作用下进入基体材料内部，并在铁及其它合金颗粒表面上形成所谓的“载体相”，该相成为物质迁移的载体，并通过溶解-析出机制，使合金元素均匀分布于基体上<sup>[16]</sup>。

### ③ 强化作用

适量的铜可增加珠光体量，细化珠光体片间距。铜在铁中的溶解度随温度变化较大，1094℃时 Cu 在  $\gamma$ -Fe 中的溶解度为 7.5~8.5%，835℃时约为 3.5%，在室温下仅为 0.2%。由此可见，铜对铁有一定的固溶强化作用<sup>[6,17]</sup>，渗铜后的非平衡冷却使部分固溶的  $\epsilon$ -铜呈弥散状析出，对基体产生弥散强化作用<sup>[6,8,16]</sup>。

## 3.2 渗铜剂材料的选择

### 3.2.1 渗铜剂的成分与作用

渗铜剂中常用合金元素添加剂的作用<sup>[18-28]</sup>见表 3.1。

目前，渗铜剂主要由铜粉、少量铁粉以及其他合金元素添加剂组成。铁的添加使铜液在熔渗之前被铁饱和，使铜液对邻接基体铁的溶解减少到最低限度以免侵蚀基体，铁可以预合金化或混合状加入熔渗剂中。添加其他合金元素一般起改善强度、硬度、摩擦性能、润湿性，增加流动性等作用。

也有少数企业采用纯铜粉做渗铜粉，其结果是零件渗铜表面产生明显的侵蚀现象，需通过后续机加工补救，成本高。

表 3.1 渗铜剂中常用合金元素添加剂的作用

合金元素	作用
Fe	减小 Fe 基体在 Cu 熔融渗铜剂中的溶解度，防止渗铜剂浸入基体
C	使 C 扩散和铁合金化形成钢基体，增加材料硬度，易于去除残渣
Zn	降低渗铜剂熔点和粘度、增加活性
Mn	易于去除渗铜后的残渣，提高渗铜烧结钢的力学性能
P	提高铜在铁中的润湿性，改善熔渗时的尺寸胀大和流动性，有助熔作用
Si	渗铜时，Si 与 Co、Cr、Mo 形成强化颗粒，提高材料硬度
Al	减少难去除残留物的形成和对基体的粘附力

### 3.2.2 渗铜剂的选择

作为粉末冶金渗铜材料有片状、丝状和粉状等形式。由于粉状渗铜剂可根据零件的几何形状来灵活设计渗铜坯，使渗铜坯能较大面积地与基体接触，防止点侵蚀。另外，熔渗时这种粉末压坯还有助于形成海绵状残渣，利于熔渗后处理。因此，目前粉末冶金零件渗铜一般均采用粉状渗铜剂。

粉状渗铜剂通常分有残渣和无残渣两种形式。有残渣渗铜剂熔渗后在零件表面留有残渣需要后续处理加以去除，实际生产较为不便；而无残渣渗铜剂熔渗后表面美观，无残留物，生产成本较低。国际知名的无残渣无侵蚀的渗铜剂为美国的 EF-98 渗铜剂。近年来，国内也有一些企业在开展无残渣渗铜剂的研究，如北京有色金属研究总院开发的一种高性能渗铜剂<sup>[29]</sup>，主要成分为 Cu-2Zn-2Fe，具有低残留、无侵蚀等特点。但目前国产的渗铜剂在质量的稳定性方面与国外尚有一定差距。因此，本论文法兰零件的渗铜选用无残渣无侵蚀的 EF-98 渗铜剂。

### 3.3 渗铜工艺试验研究

渗铜方法，按零件通过炉子的次数可以分为一步法和二步法两种。

一步法——基体烧结与渗铜一次完成。

二步法——第一次先进行基体烧结，第二次再进行渗铜。

显而易见一步法操作简便、成本较低。

按渗铜块在零件上的放置方式可以分为顶部渗铜、底部渗铜和从顶部和底部同时进行渗铜。一般顶部渗铜时渗铜坯件的摆放比底部渗铜来得容易。因此，根据组合支架法兰的结构，试验采用顶部渗铜方式，即将渗铜坯放置于试样的上方进行烧结渗铜。

烧结渗铜设备：网带连续式烧结炉，如图 3.3 所示，该设备具有温度、速度和保护气氛可设定、调节功能，具有监控报警功能。



图 3.3 网带式连续烧结炉

烧结渗铜工艺参数：烧结温度 1120℃，网带速度 6m/h，保护气氛为 95%氮气+5%氢气的混合气体。

渗铜量对材料性能影响如表 3.2（烧结渗铜采用一步法）所示。从表 3.2 可出，随着渗铜量的增加，材料的密度、抗拉强度、屈服强度、延伸率和冲击韧性均相应提高。当渗铜量为 8%时，其屈服强度略低于美国 MPIF 35 标准中 FX-1008-50 材料的要求。当渗铜量为 10%和 12%时，其各项均满足了美国 MPIF 35 标准中 FX-1008-50 材料的要求。综合考虑性能与成本等因素，渗铜量确定为 10%。

表 3.2 渗铜量对材料性能的影响（烧结渗铜采用一步法）

项目名称	渗铜后铜含量 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	延伸率 (%)	冲击韧性 (J/cm <sup>2</sup> )
标准要求值	8~14.9	≥7.2	≥600	≥500	≥3	≥14
实验值 1	8	7.25	608	493	3.04	15.6
实验值 2	10	7.42	746	542	3.21	19
实验值 3	12	7.56	778	585	3.5	20.8

注：

- 1) 基体材料配方为：96.1%铁粉(AHC100.29)+0.8%石墨+2.0%铜粉+0.5%MnS +0.6%Lube E;
- 2) 基体材料密度为：6.9g/cm<sup>3</sup>。

渗铜方法对材料性能影响如表 3.3 所示（渗铜后铜含量为 10%）。从表 3.3 可见，采用两步法渗铜，材料的密度、抗拉强度和屈服强度比一步法渗铜高，但其延伸率和冲击韧性却相对较低，且延伸率为 2.72%尚未达到材料标准 3.0%的要求。而一步法渗铜所有性能指标均满足了 MPIF 35 标准中 FX-1008-50 的材料要求。因此，选择一步法渗铜。

表 3.3 一步法和两步法渗铜对材料性能的影响

项目名称	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	延伸率 (%)	冲击韧性 (J/cm <sup>2</sup> )
材料标准值	≥7.2	≥600	≥500	≥3	≥14
实验值（一步法）	7.42	746	542	3.21	19
实验值（两步法）	7.51	777	598	2.72	17

注：

- 1) 基体材料配方为：96.1%铁粉(AHC100.29)+0.8%石墨+2.0%铜粉+0.5%MnS +0.6%Lube E;
- 2) 基体材料密度为：6.9g/cm<sup>3</sup>。

### 3.4 本章小结

本章介绍了渗铜机理、作用和渗铜剂的规格，并确定采用无残渣无侵蚀的 EF-98 渗铜剂。通过渗铜量和渗铜方法对材料性能影响的研究，确定了渗铜量为 10% 和选择一步渗铜法。试验结果证明，此方法制得的材料（即法兰的材料）的各项性能指标均满足了美国 MPIF 35 标准中 FX-1008-50 材料的要求。

## 第4章 烧结钎焊研究

烧结钎焊研究工作流程如图4.1所示：

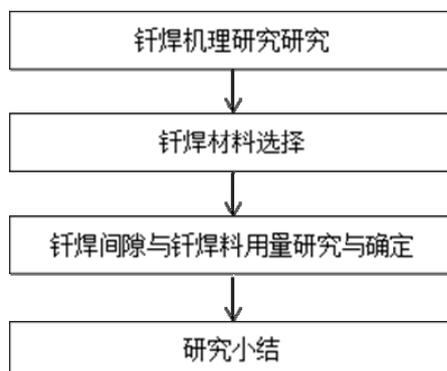


图4.1 烧结钎焊研究工作流程图

### 4.1 烧结钎焊机理

烧结钎焊是一种通过钎焊料的熔化流动和凝固实现对焊接面牢固结合的方法。钎焊仅是钎料熔化，而母材不熔化，在钎焊过程中，将钎焊组件的温度提高到钎料熔点以上，熔化的钎料和母材的相互作用导致在钎料凝固时生成冶金结合。

在钎焊形成中，液滴在固体表面的湿润现象和流动性是最基本的模型，母材被钎料湿润对于保证他们紧密接触并形成良好的接触是必须的，这些现象的驱动因素是表面能的热力学概念。如图4.2所示，当一滴液体在固体表面润湿时，如果液滴和固体间仅以色散力相互作用，即不存在互溶、渗透及任何化学反应时，润湿角 $\theta$ 与固体表面张力 $\gamma_s$ ，液体表面张力 $\gamma_l$ 以及液固界面张力 $\gamma_{sl}$ 存在一定的平衡关系，即Young's平衡式<sup>[30]</sup>：

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos\theta \quad (4.1)$$

$$\cos\theta = (\gamma_s - \gamma_{sl}) / \gamma_l \quad (4.2)$$

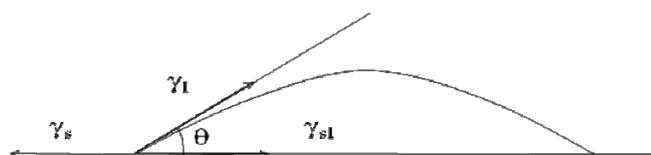


图 4.2 液滴在固体表面的润湿

可见， $\theta$ 角度越小，湿润效果越好。

## 4.2 钎焊料的选择

### 4.2.1 钎焊料的组分与作用

通常，钎焊料是由铜、镍、锰、硼、硅和铁等元素组成。

#### 1) 铜

铜的熔点为 $1083^{\circ}\text{C}$ ，铁的熔点为 $1538^{\circ}\text{C}$ ，铁基粉末冶金基体材料的烧结温度为 $1120^{\circ}\text{C}$ ，铜对铁起到固溶强化作用，因此确定铜为钎焊料重要组分。

#### 2) 镍

镍的熔点 $1455^{\circ}\text{C}$ ，有好的耐腐蚀性，在空气中不被氧化，镍与铁可互溶产生固溶强化作用，铜与镍能够无限互溶，同时镍扩大奥氏体相区，有利于烧结钎焊，铜与镍的相图如图4.3所示。

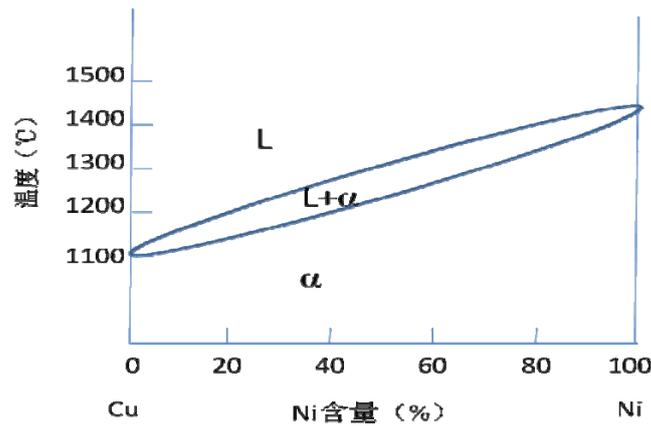


图 4.3 Cu-Ni 相图

#### 3) 锰

锰的熔点为 $1244^{\circ}\text{C}$ ，锰随着钎料的熔化而溶解到液态钎料中，可使钎料的熔点降低，从而改善其流动性。另外，因锰与铁能形成无限固溶体，故溶入钎料的锰可改善其对基体表面的润湿性能，从而使其在基体表面的铺展面积增大。

#### 4) 硼和硅

硼和硅都可以降低焊料的熔点，改善钎焊料的润湿性能。

#### 5) 铁

研究表明，在钎焊料中添加细铁粉，钎焊料熔化后能快速溶解铁粉，钎焊液渗透到联接物缝隙并能很快再次凝固，而不致于被联接物基体的连通孔隙所大量吸收，有利于提高烧结钎焊的稳定性。

### 4.2.2 钎焊料的选择

目前粉末冶金用钎焊材料主要有：Ancorbraze 72和Sinter Braze 90两种牌号。

Ancorbraze 72钎焊料是Hoeganaes公司于上世纪70年代中期开发出的，其标称组成（质量分数）为：41% Ni、40% Cu、15% Mn、1.8%Si和1.5% B。这种焊料虽然缝隙渗透能力较强，但由于其较易被联接物基体的连通孔隙所吸收，钎焊过程较难控制，质量不够稳定。

Sinter Braze 90钎焊料是Hoeganaes公司近年研究开发出的一种新型钎焊材料，该材料是在Ancorbraze 72基础上添加了一定量的细铁粉。

表4.1列出了两种钎焊材料的性能比较，可见Sinter Braze 90具有更好的性能。因此，本组合支架的研制选用Sinter Braze 90作为钎焊材料。

表 4.1 两种钎焊材料的性能比较

钎焊材料	Ancor Braze 72	Sinter Braze 90
生坯强度	较低	高
焊接时焊料流动性	较好	好
连接力	较高	高
缝隙渗透能力	较强	强
被基体连通孔隙吸收	较易	不易
钎焊过程质量稳定性	较低	较高

### 4.3 烧结钎焊工艺影响因素

粉末冶金烧结钎焊效果除了受钎焊料性能影响外，还受其它一些因素的影响，主要有：基体材料与密度、钎焊温度与保护气氛、钎焊间隙与钎焊料用量等。

#### 4.3.1 基体材料与密度

钎焊料必须与粉末冶金零件的基材相互作用，具有冶金兼容性，钎焊料在温度高于其熔点温度时，熔化湿润并溶渗于粉末冶金基体表面，同时需避免被基体的连通孔隙吸收，通过钎焊钎料与基体表面形成固溶体，从而实现强力结合。

粉末冶金零件中的连通孔隙可产生相当大的毛细管力，密度较低时尤为明显，尽管钎料的湿润性和渗透性可以使钎料流入到焊接间隙中，但由于粉末冶金

联通孔隙的毛细管力作用，很快就会将钎料从连接界面吸走，这可能导致连接处钎料不足，影响钎焊效果。Beiss P.博士的研究指出<sup>[36]</sup>，在钎焊之前进行渗铜或压制件密度高于 $7.2\text{g}/\text{cm}^3$ 时可防止熔渗。可是，向粉末冶金基体内进行短距离熔渗对提高钎焊结合强度是有利的，在过高密度下，表面孔隙的封闭可能会完全阻止这种情况发生，从而降低了结合强度。另有研究表明<sup>[33,37]</sup>，在钎料预混合粉中添加适量的细铁粉，能较好地解决这一矛盾。

#### 4.3.2 钎焊温度与保护气氛

烧结就实质而言，是将粉末冶金压坯在低于材料主要组分熔点以下进行高温处理，通过扩散和合金化，将粉末冶金压坯中粉末颗粒由机械啮合的聚集体变为原子结合的聚集体，最终获得材料必要的物理和力学性能。

钎焊温度必须超过钎焊料的固-液相间温度。同时，需要注意的是，烧结温度分布，如零件的温度不均匀可能会导致钎焊合金不规则的流动，这可能会形成不均匀的钎焊链接。另外，加热速度慢也可能促使钎焊合金的低熔点成分从钎料中析出，在与铁合金化后很快再凝固，阻止剩余的钎料流入间隙<sup>[31]</sup>。

根据粉末冶金工艺特点，铁基粉末冶金正常烧结温度为 $1120^\circ\text{C}\sim 1150^\circ\text{C}$ ，可满足钎焊温度的要求。

液态钎料有效的润湿基体材料是成功进行钎焊的关键。研究表明<sup>[31-35]</sup>，影响烧结钎焊的一个关键因素是气氛组成。如零件在预热带润滑剂去除不够充分，进入高温段零件表面将被污染，会阻碍钎焊料流动。如果预热带的气氛过分氧化，钎焊料组成也可能被氧化，导致在高温加热区域钎焊料可能不会被充分还原，从而也将影响其润湿与流动性。

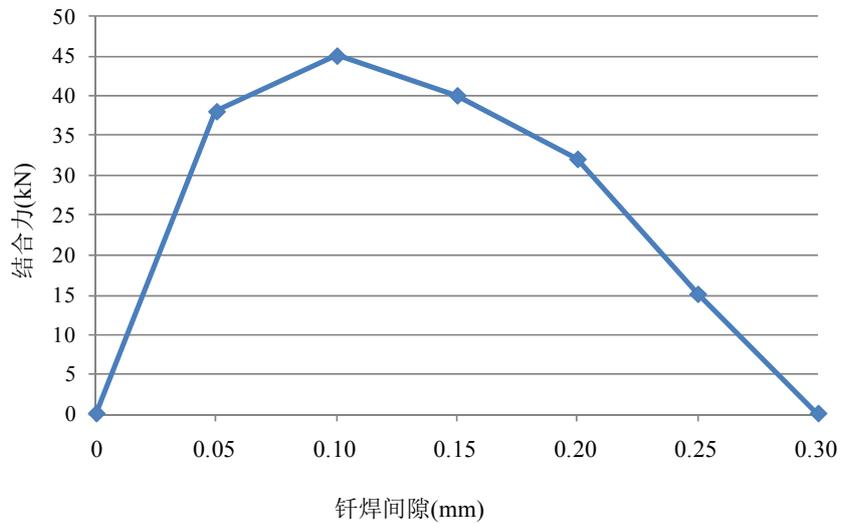
关于钎焊气氛，要求在该种气氛下钎焊料表面氧化物能被还原，从而使钎料具有良好的润湿性和流动性。粉末冶金烧结气氛通常为氮氢混合气氛，属于还原性气氛，可满足钎焊要求。

#### 4.3.3 钎焊间隙与钎焊料用量

钎焊缝隙的大小将直接关系到钎焊效果。图4.4为钎焊间隙对钎焊结合力影响的试验数据（钎焊料用量按 $0.3\text{g}/\text{cm}^2$ ），由图4.4可以看出：钎焊间隙为0时，结合力为0；钎焊间隙在0.1mm以内，随着间隙增加钎焊结合力相应提高；钎焊间隙大于0.1mm时，随着间隙增加钎焊结合力逐步降低。当间隙达到0.3mm以上时，无钎焊效果。由图4.4可以看出钎焊最佳间隙应为0.1mm。

试验现象说明：间隙过小熔化的焊料将难以渗透润湿结合面，导致结合面钎

料渗透不充分，导致钎焊区域连接不良；如果钎焊间隙过大，钎料缝隙渗透能力会减弱，即使焊料熔化也无法到达需要连接的表面。



4.4 钎焊间隙与钎焊结合力关系图

另外，钎焊料的用量也将直接影响到钎焊后零件的结合强度，一般钎焊料用量与结合面面积大小直接有关，钎焊料用量对钎焊结合力影响的试验数据见图4.5（钎焊缝隙为0.1mm），考虑经济性由图4.5可以看出，钎焊料用量在0.1~0.3g/cm<sup>2</sup>间时，随着钎焊料的增加钎焊结合力提高较为明显，钎焊料超过0.3g/cm<sup>2</sup>后结合力无明显提高，曲线呈现近水平形态。表明在间隙为0.1mm时，当钎焊料用量为0.3g/cm<sup>2</sup>时，钎焊结合面已达到充分渗透润湿；当小于0.3g/cm<sup>2</sup>时，钎焊结合面渗透润湿尚不够充分；当大于0.3g/cm<sup>2</sup>时，钎焊结合面已充分渗透润湿，并有钎焊料过剩。因此，钎焊料的最佳使用量应为0.3g/cm<sup>2</sup>。

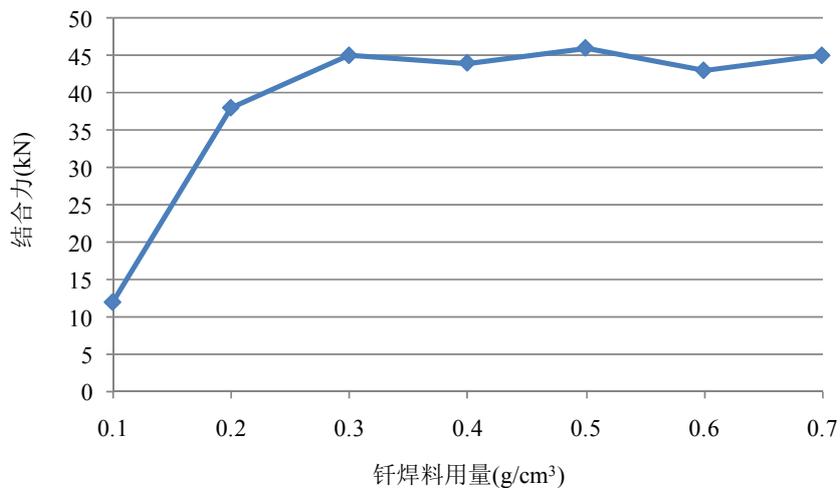


图4.5 钎焊料用量与钎焊结合力关系图

#### 4.4 本章小结

本章介绍了烧结钎焊机理、钎焊材料的发展与钎焊材料选择，探讨了影响烧结钎焊效果的相关因素。通过试验研究得出最佳钎焊间隙为0.1mm，最佳钎焊料用量为0.3g/cm<sup>2</sup>的结论。

## 第5章 试验方案设计与验证

本章研究工作流程如图 5.1 所示。

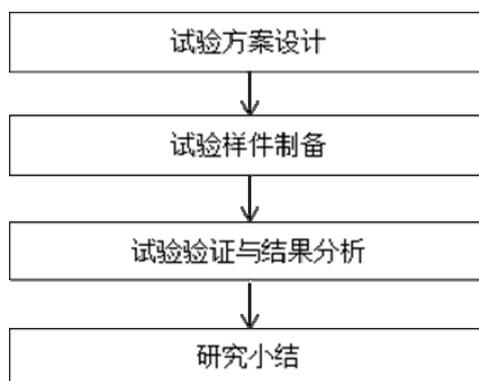


图 5.1 试验验证工作流程图

### 5.1 试验方案设计

本论文试验用组合支架是由支撑架和法兰钎焊结合而成，除涉及钎焊工艺外，法兰还需进行渗铜处理以满足高密度和强度要求。因此，烧结、钎焊和渗铜工艺方案不同将会给最终产品的性能和质量成本带来不同的影响，本论文试验具体方案如下：

1) 方案 1

法兰先进行烧结渗铜再与支撑架进行烧结钎焊，简称“烧渗——焊两步法”；

2) 方案 2

法兰与支撑架先进行烧结钎焊再对法兰进行渗铜，简称“烧焊——渗两步法”；

3) 方案 3

法兰与支撑架烧结、钎焊及渗铜一次完成，简称“烧焊渗一步法”。

主要试验设备：

- 1) 500 吨成形压机（用于法兰、支撑架和渗铜坯成形），如图 5.2 所示。
- 2) 10 吨成形压机（用于钎焊坯成形）如图 5.3 所示。



图 5.2 500 吨成形压机

图 5.3 10 吨成形压机

3) 网带式连续烧结炉（用于试验件的烧结、钎焊和渗铜），如图 3.3 所示，烧结钎焊渗铜的工艺参数为：烧结温度 1120℃，网带速度 6m/h，保护气氛为 95%

氮气+5%氢气的混合气体。

## 5.2 试验坯件制备

本论文试验坯件由支撑架、法兰、渗铜坯和钎焊坯组成。分别设计制造试验用模具，按上述材料要求购置、配制原料粉末，并分别成形试验坯件，如图 5.4 所示。

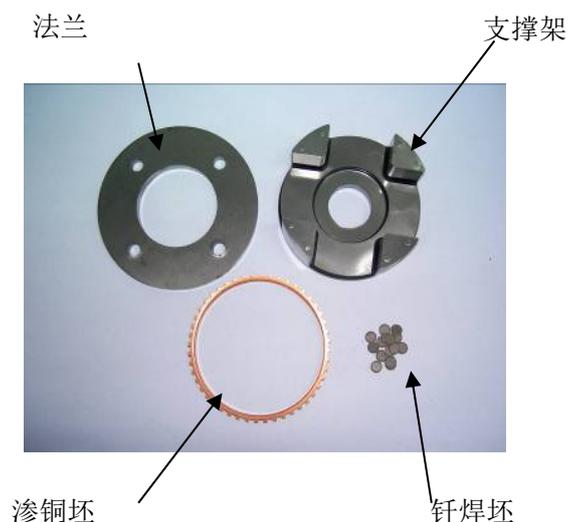


图 5.4 试验坯件组成

各种试验坯件相关参数如下：

法兰与支撑架基体：粉末材料配方为 96.1%雾化铁粉（AHC100.29）+0.8%石墨粉+2.0%铜粉+0.5%MnS 粉+0.6%Lube-E；压制密度： $6.95\text{g}/\text{cm}^3$ ；法兰坯件质量 350g；支撑架每个支撑脚上设计 2 个高度为 0.1mm 的小凸台，以控制法兰与支撑架接合面间隙为 0.1mm，如图 5.5 所示。

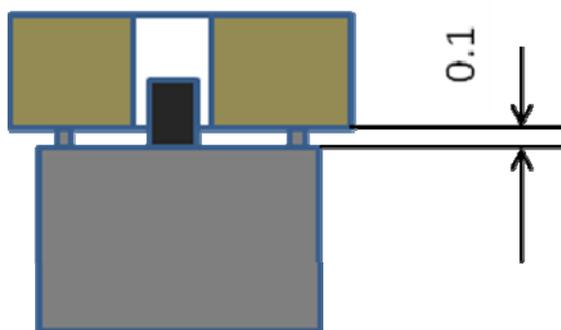


图 5.5 钎焊结合面间隙控制示意图

渗铜坯：粉料选用美国进口无残渣无侵蚀的 EF-98 渗铜粉；渗铜坯密度为  $6.8 \text{ g/cm}^3$ ；渗铜坯质量为 31g；因为基体材料已含 2.0%的铜，所以法兰渗铜后理论含铜量为  $(31+350 \times 2\%) / (350+31) \times 100\% = 10.0\%$ 。

钎焊坯：粉料选用 Sinter Braze 90；钎焊坯密度为  $6.5 \text{ g/cm}^3$ ；钎焊坯质量为 0.6g；其单位面积钎焊料用量为  $0.6 \text{ g} / 2.0 \text{ cm}^2 = 0.3 \text{ g/cm}^2$ （注：每个钎焊面的结合面积为  $2.0 \text{ cm}^2$ ）。

### 5.3 试验结果和分析

主要试验设备：

1) WA-300 型万能试验机，如图 5.6 所示。用于检测法兰与支撑架的结合力，并评价钎焊面的结合强度，其原理如图 5.7 所示。



图 5.6 WA-300 型万能试验机

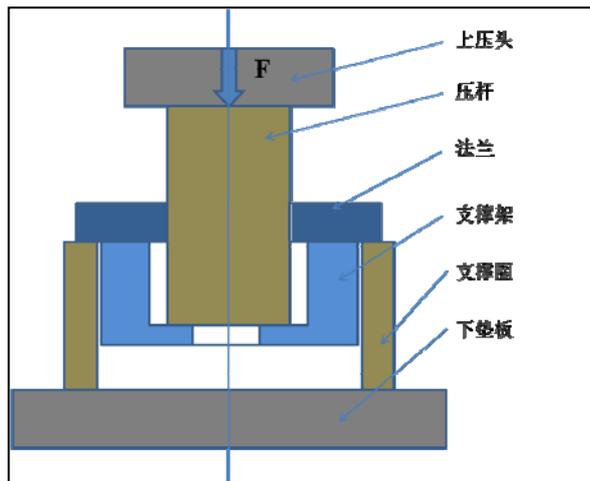


图 5.7 结合力试验原理示意图

试验方法：将支撑圈放于试验机下垫板上，组合支架如图 5.7 所示叠放于支撑圈上，压杆叠放于支撑架的内端面。试验机以 2mm/min 的速度加载，在支撑架和法兰的钎焊结合面处承受拉应力作用，试验中持续加载直至钎焊面断裂失效为止，并记录试验机所施加力的大小。

2) 尼康金相显微镜，用于评价法兰与支撑架结合面的金相组织和钎焊效果，如图 5.8 所示。

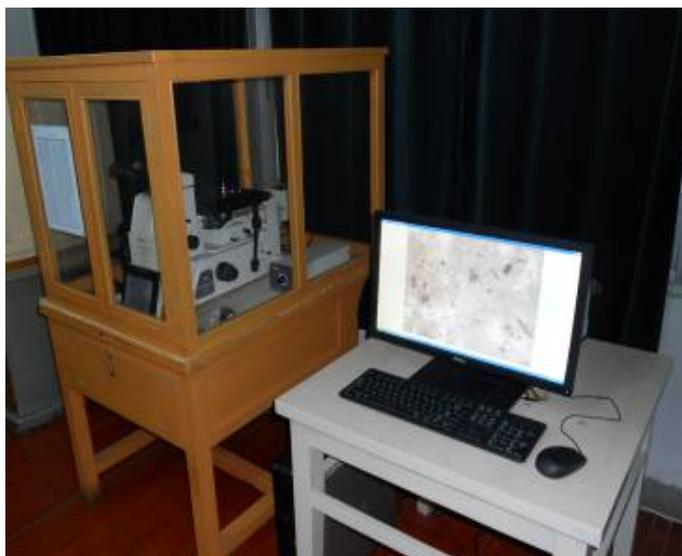


图 5.8 尼康金相显微镜

### 5.3.1 方案 1（烧渗——焊两步法）

钎焊效果见图 5.9，可以看出法兰和支撑架除局部有所联接外其它部位未能正常联接（如图中箭头所指位置）。这是因为法兰烧结渗铜发生一定变形致使焊接面间隙不均，间隙过大处无法正常钎焊。



图 5.9 烧渗——焊两步法钎焊效果

### 5.3.2 方案 2（烧焊——渗两步法）

钎焊效果见图 5.10，可以看出支撑架和法兰钎焊结合面较好，同等条件下制作的一组试验样件，随机抽取 10 件，其结合力分别为 32.2kN、32.9 kN、28.6kN、27.7kN、29.5kN、34.3kN、33.6kN、26.4kN、28.5kN、30.2kN，满足产品的结合力 $\geq 10$  kN 的要求。



图 5.10 烧焊——渗两步法钎焊效果

经金相分析，方案 2 样件焊接不够均匀。由图 5.11 可见，焊接区域存在大量孔隙，连接中心处铜含量较低，且连接处产生了共晶物和金属间化合物（微观硬度高于 1000MHV0.1），马氏体组织少且粗大，这是因为钎焊面经历两次烧结，因时间过长，导致晶粒和金相组织粗大。

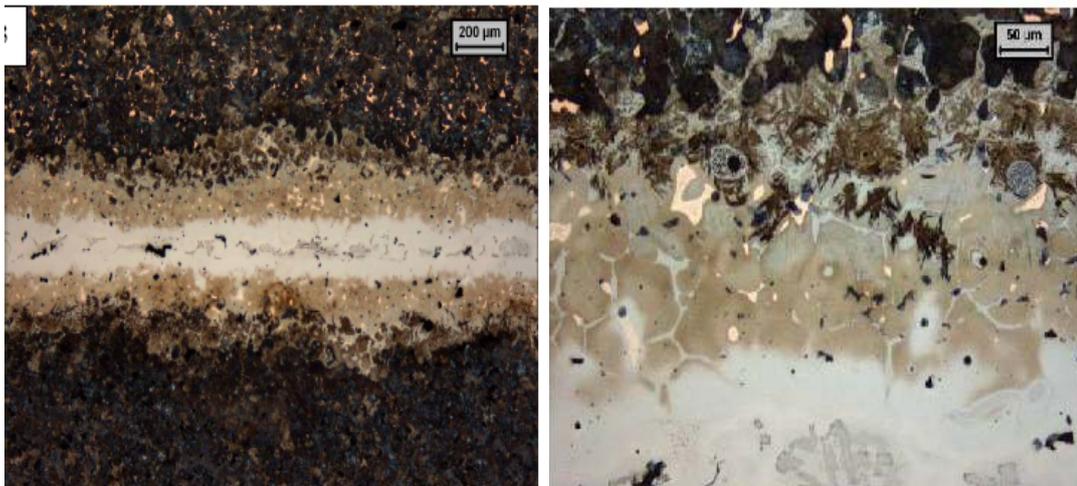


图 5.11 方案 2 钎焊接合面金相图片

### 5.3.3 方案3（烧结、钎焊及渗铜一步法）

钎焊效果见图 5.12，可以看出支撑架和法兰钎焊结合非常好，结合处被焊剂完全覆盖。同等条件下制作的一组试验样件，随机抽取 10 件，其结合力分别为 48kN、47.5kN、48.5kN、47kN、43.3kN、44.8kN、43.7kN、46.2kN、45.8kN、44.6kN，并明显高于方案 2 的结合力，二种方案结合力比较如图 5.13 所示。



图 5.12 烧焊渗一步法钎焊效果

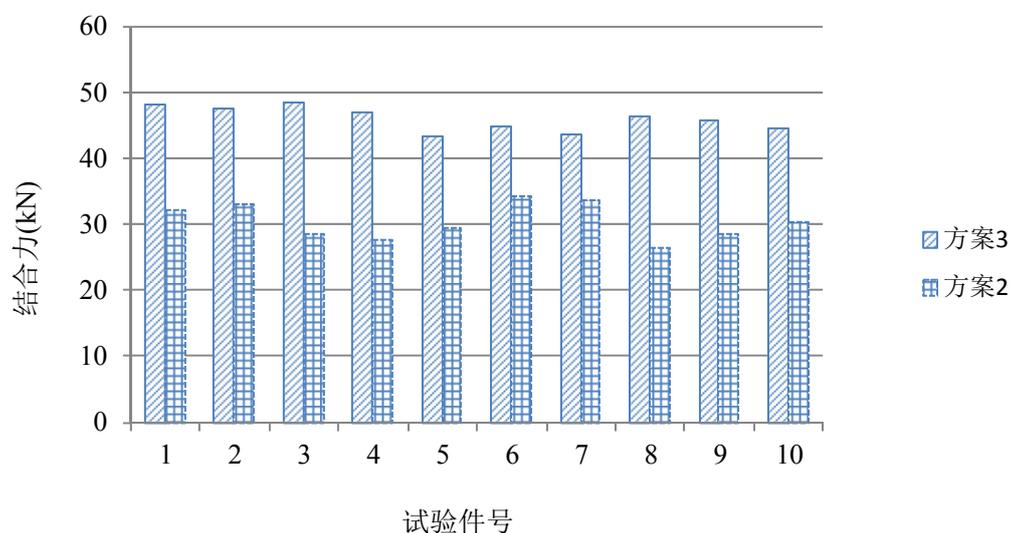


图 5.13 二种方案结合力比较

经金相分析，方案 3 样件焊接相对均匀，由图 5.14 可见，孔隙较少，连接中心处铜含量较高，很少发现共晶和金属间相，马氏体组织更细更致密。

三种方案综合效果比较如表 5.1 所示。

综上所述，方案 3，即烧结、钎焊及渗铜一步法，烧结钎焊渗铜质量最为可靠，同时其工艺物流简便、成本低，因此，该方案为最优工艺方案。

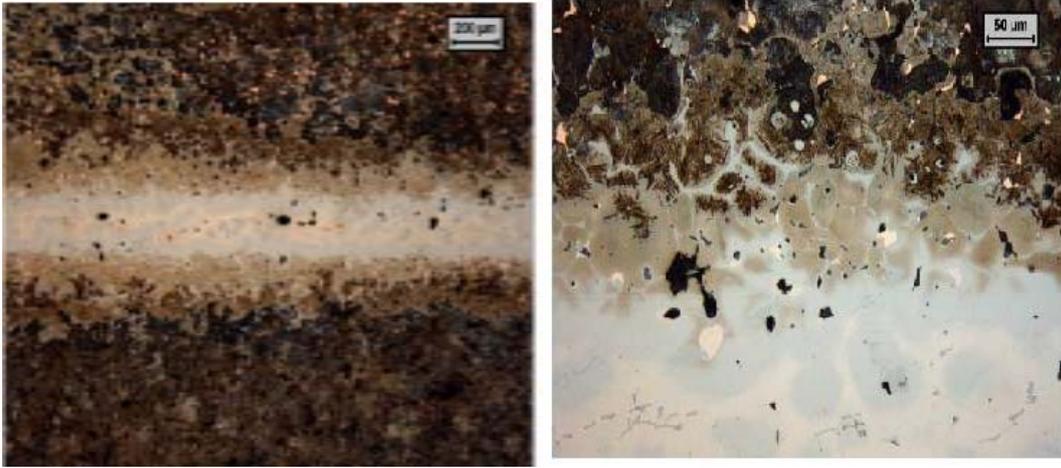


图 5.14 方案 3 钎焊接合面金相图片

表 5.1 三种方案综合效果比较

方案	钎焊渗铜效果	物流	成本
方案 1（烧渗——焊两步法）	差	二次进炉，较复杂	较高
方案 2（烧焊——渗两步法）	中	二次进炉，较复杂	较高
方案 3（烧焊渗一步法）	好	一次进炉，简便	低

## 5.4 本章小结

本章利用试验模具制作试验用法兰、支撑架、渗铜圈和钎焊坯件。对三种可能的方案分别进行了试验验证，试验结果经比较分析，得出：烧结、钎焊和渗铜一步法为最佳方案，该方案质量最为可靠，同时流程短、成本低，适合大批量生产。

## 第6章 模具设计与产品研制

本章主要工作流程如图 6.1 所示。

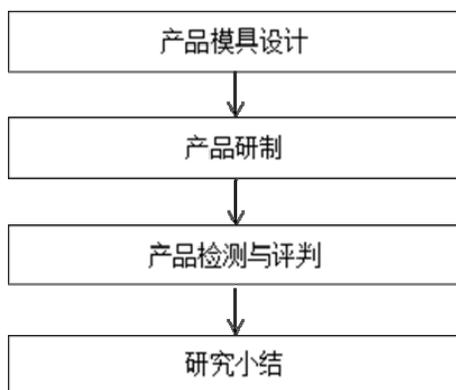


图 6.1 模具设计与产品研制工作流程图

### 6.1 模具设计

成形是粉末冶金零件生产主要工序之一，成形时模具起着至关重要的作用。粉末冶金模具设计关系到制品生产的质量、成本、安全、生产效率和自动化等问题，因此，模具设计是粉末冶金制品生产中十分重要的一环。

模具设计原则是：（1）需充分发挥粉末冶金少（或无）切削的特点，满足坯件几何形状、精度和表面粗糙度、坯件密度分布均匀的要求。（2）模具结构和选材合理，保证模具零件具有足够的强度、刚性、硬度、高耐磨性和使用寿命，同时需便于调节、安全可靠。（3）需考虑模具结构的可加工性与成本。

粉末冶金模具主要有：阴模、芯棒、上下模冲和垫块、压板等零件组成，其中：阴模、芯棒和上下模冲是粉末成形的关键零件。阴模要求具有高硬度和耐磨性，考虑批量生产，通常均选用硬质合金材料，芯棒使用工况与阴模相当，通常选用硬质合金或优质模具钢。上下模冲除需要较高的硬度、强度外，还需要具有较好的韧性，通常选用优质模具钢，如 Cr12MoV 等。

模具设计中需根据零件图纸尺寸和零件的结构特点，计算成形压力、确定压制成型方式和模具结构，选择成形压机吨位与功能。模具设计需满足粉末充填、成形及脱模过程的顺利实现，并在一定范围内具有可调节性，同时需满足成形坯件密度的均匀性<sup>[38]</sup>，模具尺寸的设计需根据零件在生产工艺过程中的尺寸变化率，采用从成品向前道工序倒推的方法进行模具设计计算。X23F 组合输入支架如图 6.2 所示。

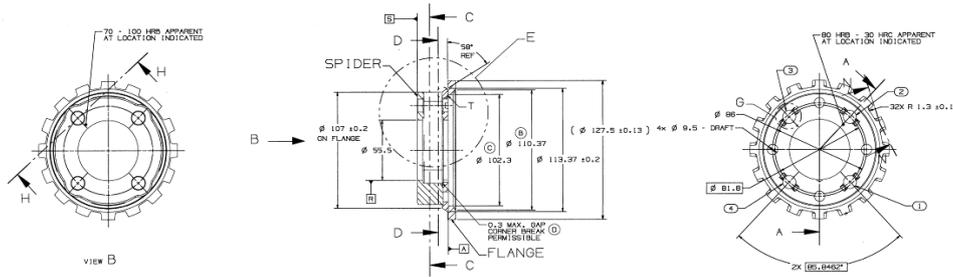


图 6.2 X23F 组合输入支架零件图

压制压力计算：

$$P_{\text{总压力}} = p_{\text{单位面积压制压力}} \cdot S_{\text{受压面积}} \quad (6.1)$$

压制模具装粉高度计算：

$$H_{\text{装粉高度}} = H_{\text{压坯高度}} \cdot d_{\text{压制密度}} / d_{\text{松装密度}} \quad (6.2)$$

压制模具径向尺寸计算：

$$D_{\text{压坯尺寸}} = D_{\text{烧结坯尺寸}} / (1 + s_{\text{烧结变化率}}) \quad (6.3)$$

$$D_{\text{模具尺寸}} = D_{\text{压坯尺寸}} / (1 + t_{\text{压制回弹率}}) \quad (6.4)$$

注：s 烧结变化率 > 0 时，表示烧结过程膨胀，s 烧结变化率 < 0 时，表示烧结过程收缩。

### 6.1.1 支撑架模具设计

支撑架属于带肩类零件，零件图如 6.3 所示，为了满足各部位的粉末充填量和相近的压缩比，满足成形坯件各区域密度均匀分布，同时需满足成形、脱模与调整要求，根据支撑架的结构特点，模具采用上一下二结构，模具结构示意图如图 6.4 所示，模具总装结构如图 6.5。

压制总压力估算：

$$P_{\text{总压力}} = p_{\text{单位面积压制压力}} \cdot S_{\text{受压面积}} \approx 6 \times 51.7 = 310.2 \text{ (吨)}$$

注：在成形 6.9~7.0g/cm<sup>3</sup> 的高密度制品时，通常 p 单位面积压制压力按 6 吨/cm<sup>2</sup> 估算。根据研制单位设备规格实际情况，选择 500 吨成形压机。

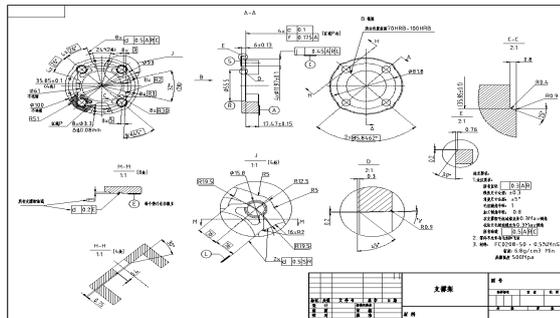


图 6.3 支撑架零件图

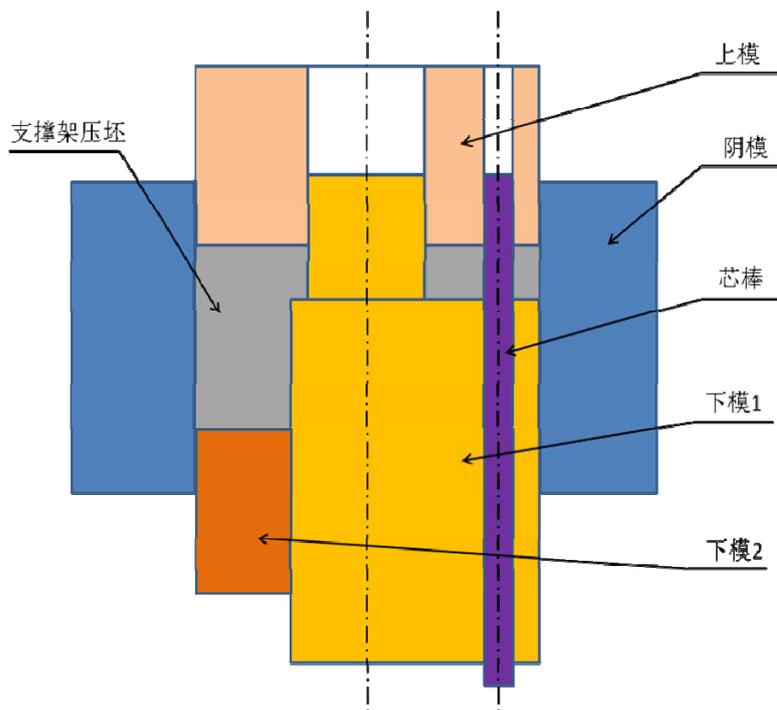


图 6.4 支撑架模具结构示意图

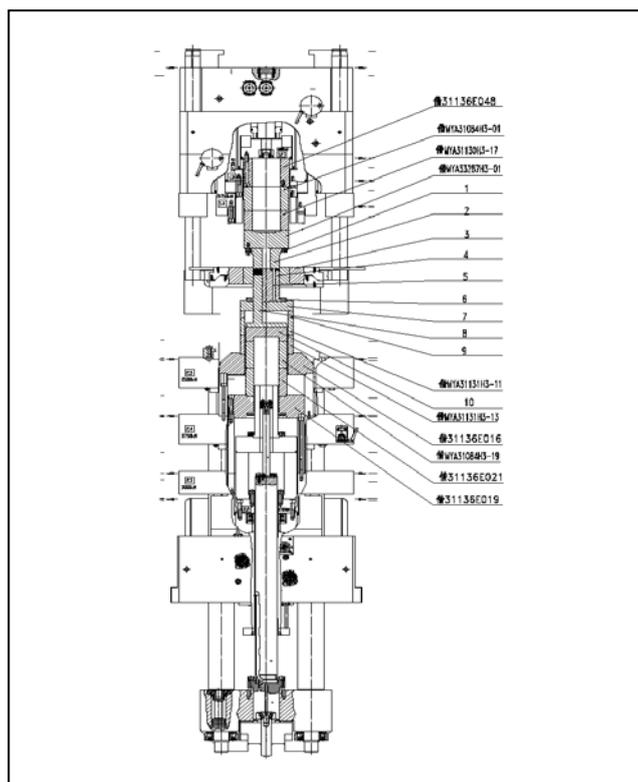


图 6.5 支撑架模具总装图

支撑架成形主要模具零件，上模、阴模、下模 1、下模 2 和芯棒的设计，分别如图 6.6~图 6.10 所示。

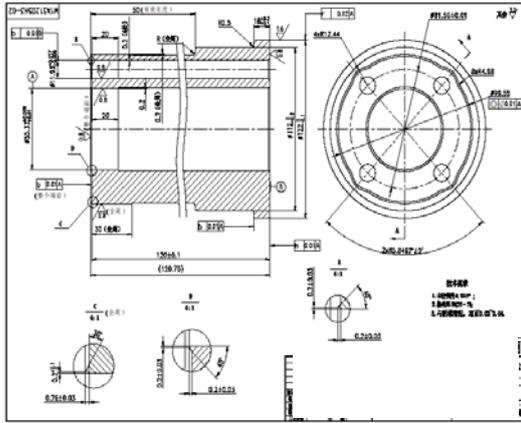


图 6.6 上模

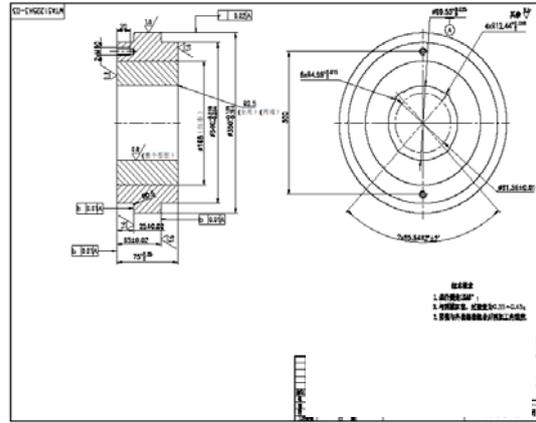


图 6.7 阴模

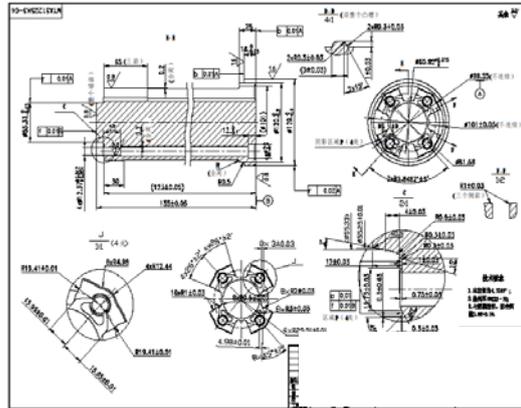


图 6.8 下模 1

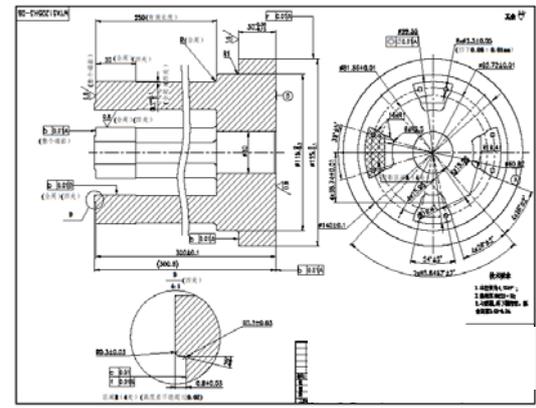


图 6.9 下模 2

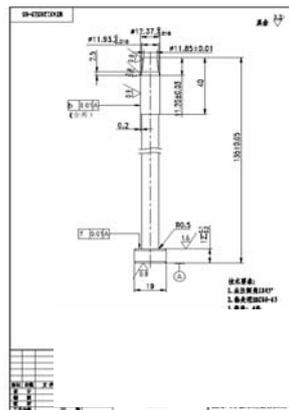


图 6.10 芯棒

### 6.1.2 法兰模具设计

法兰属于带肩类零件，零件图如 6.11 所示，为了满足各部位的粉末充填量和相近的压缩比，满足成形坯件各区域密度均匀分布，同时需满足成形、脱模与调整要求，根据法兰的结构特点，模具采用上二下二结构，模具结构示意图如图 6.12 所示，模具总装结构如图 6.13。

压制总压力估算：

$$P_{\text{总压力}} = p_{\text{单位面积压制压力}} \cdot S_{\text{受压面积}}$$

$$\approx 6 \times 89.2 = 535.2 \text{ (吨)}$$

在成形  $6.9 \sim 7.0 \text{g/cm}^3$  的高密度制品时，通常  $p_{\text{单位面积压制压力}}$  按  $6 \text{ 吨/cm}^2$  估算。根据研制单位设备规格实际情况，选择 1000 吨成形压机。

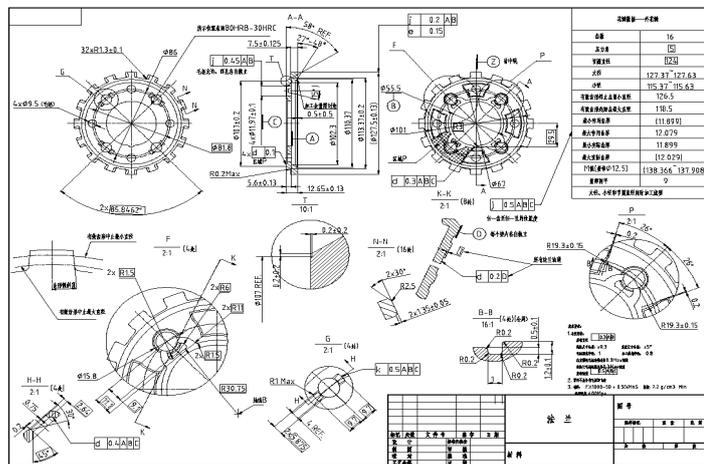


图 6.11 法兰零件图

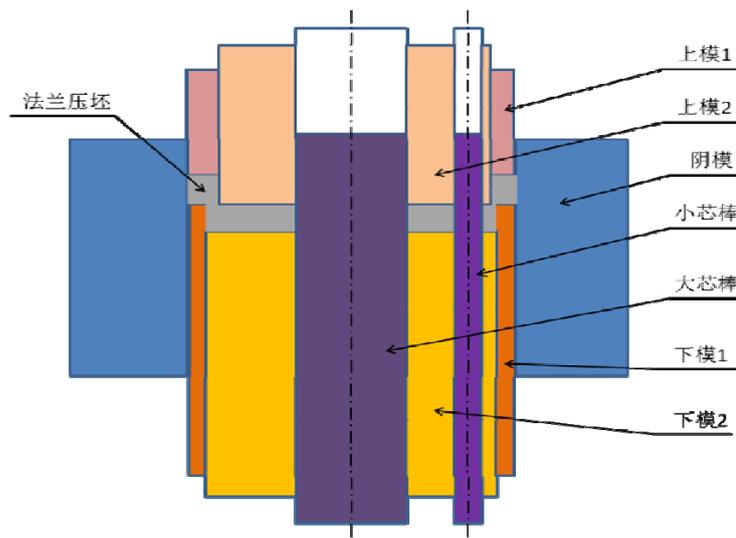


图 6.12 法兰模具结构示意图

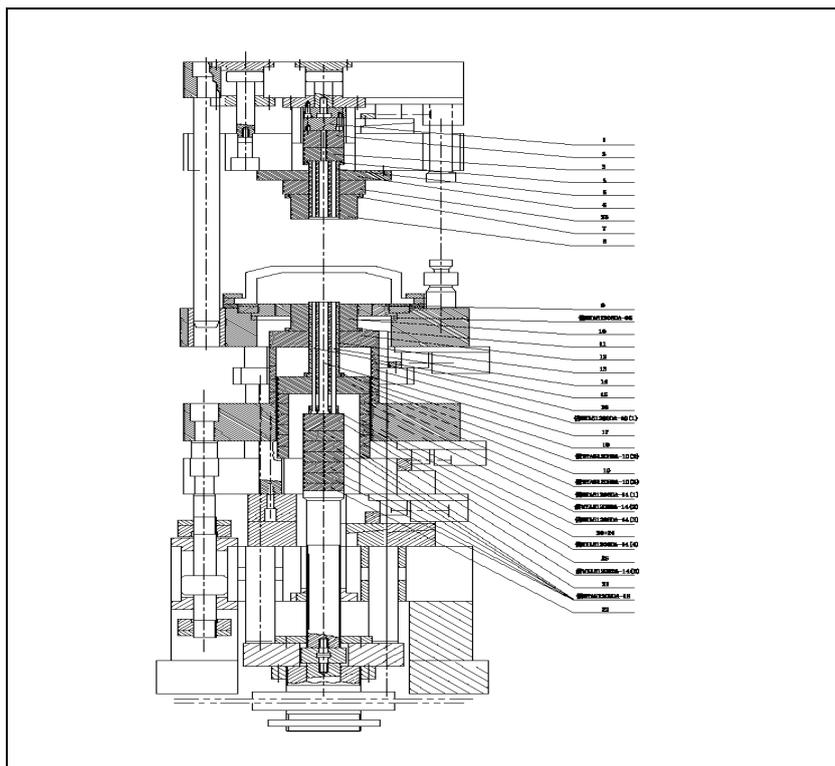


图 6.13 法兰模具总装图

法兰成形主要模具零件，上模 1、上模 2、阴模、下模 1、下模 2、大芯棒和小芯棒的设计，分别如图 6.14~图 6.20 所示。

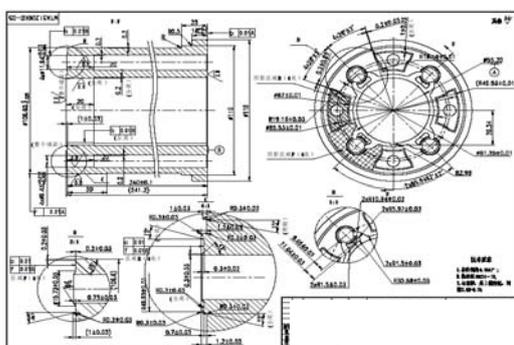


图 6.14 上模 1

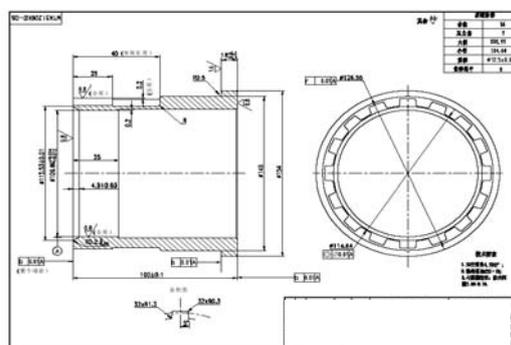


图 6.15 上模 2

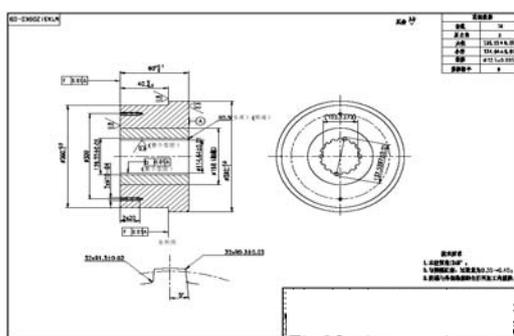


图 6.16 阴模

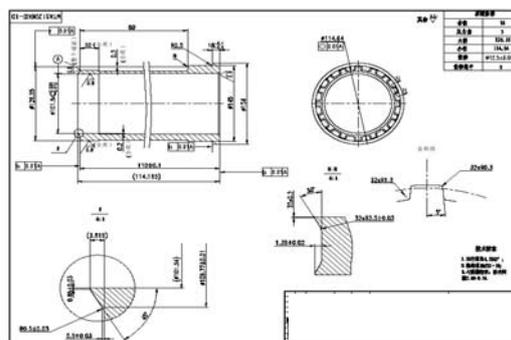


图 6.17 下模 1

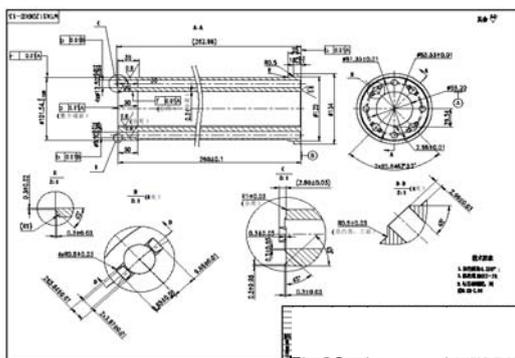


图 6.18 下模 2

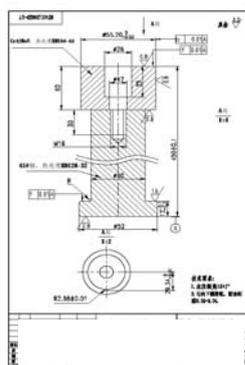


图 6.19 大芯棒

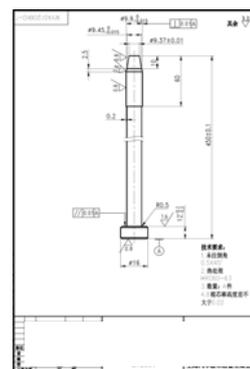


图 6.20 小芯棒

为保证后续钎焊的质量稳定可靠，在支撑架的下模冲端面上专门设计 2 个深度为 0.1mm 的凹坑，成形后在支撑架坯件的每个支撑腿上留有 2 个高度为 0.1mm 的凸点，以控制支撑架与法兰钎焊时的间隙；法兰模具在法兰与支撑架钎焊部位专门设计了定位凸台，成形后在法兰坯件上形成定位槽，以便支撑架与法兰烧结钎焊时能够精确可靠定位，如图 6.21，原理示意如图 6.22 所示。

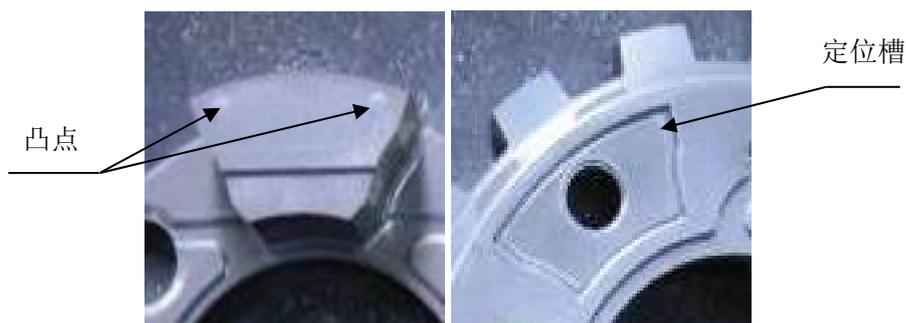


图 6.21 间隙与定位结构设计

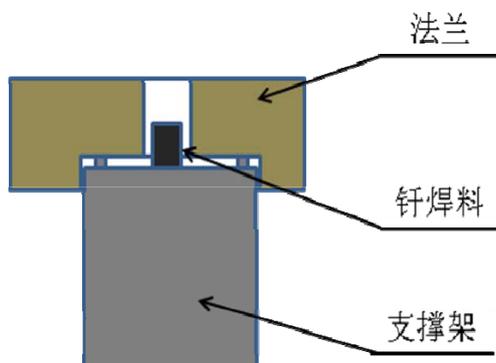


图 6.22 间隙控制与定位原理示意图

## 6.2 产品研制

### 6.2.1 坯件制作

采用经试验验证的材料和专门设计、制造的模具，选用 500 吨和 1000 吨成形压机分别对支撑架和法兰压制成形，压制采用双向压制和保压脱模方式，保证密度分布均匀性，避免分层或裂纹等缺陷产生。

成形坯件如图 6.23 和图 6.24 所示。压坯密度为  $6.95\text{g}/\text{cm}^3$ 。



图 6.23 支撑架压坯



图 6.24 法兰压坯

渗铜坯质量：由于法兰质量方案试验用的法兰质量相等，故渗铜坯件质量也为 31g。钎焊坯质量：由于 X23F 组合输入支架的支撑架与法兰的结合面积与方案试验件的接合面积相等，故钎焊坯的质量也为 0.6g。

### 6.2.2 烧结、钎焊和渗铜

采用烧结、钎焊及渗铜一步法的方案。

组件摆放方法：首先将支撑架放在烧结垫板上，法兰按定位关系叠放于支撑架的支撑腿上，然后在法兰的四个钎焊孔穴中分别放入一只钎焊坯，再将渗铜坯摆放在法兰的上端面，组件的摆放方式如图 6.25 所示。



图 6.25 组件摆放方式

将组件和垫板一起放在烧结炉的网带上，进行支撑架与法兰的烧结、钎焊与渗铜，进炉方式如图 6.26 所示。



图 6.26 进炉方式

烧结钎焊和渗铜采用网带式烧结炉，炉膛温度： $1120^{\circ}\text{C}$ ，保护气氛： $95\%\text{N}_2+5\%\text{H}_2$ ，网带速度： $6\text{m/h}$ 。

经烧结钎焊渗铜出炉的坯件，如图 6.27 所示；



图 6.27 出炉坯件

经烧结钎焊渗铜出炉的坯件，通过抛丸去毛刺和清洗、防锈处理后即为粉末冶金厂商的成品状态（后续的机械加工在行星齿轮支架总成制造商处进行），如图 6.28 所示。



图 6.28 成品

### 6.2.3 试验结果及分析

主要试验设备：

1) WA-300 型万能试验机，如图 5.6 所示。用于检测法兰与支撑架的结合力，并评价钎焊面的结合强度，其原理如图 5.7 所示。

2) 尼康金相显微镜，用于评价法兰与支撑架结合面的金相组织和钎焊效果，如图 5.8 所示。

如图 6.29 所示，采用与 5.3 节相同的试验方法，对试制出的产品进行焊接面分离试验。同等条件下制作的一组试验样件，随机抽取 10 件，其结合力分别为 45.3kN、46.7kN、45.6kN、48kN、44.8kN、45.2kN、47.6kN、45.8kN、46.5kN、45.7kN，超过产品结合力不低于 10 kN 的要求，达到甚至超过国外同类产品水平。

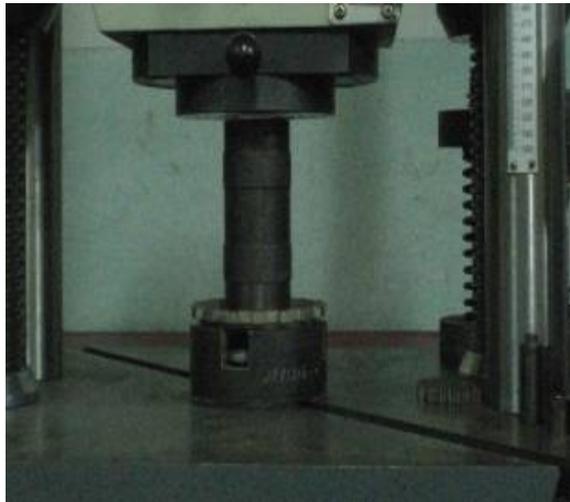


图 6.29 结合力试验

从断口形貌可以看出支撑架和法兰结合面钎焊效果很好，整个结合面均被焊剂完全覆盖，如图 6.30 所示。

从钎焊面金相也可看出支撑架和法兰结合面钎焊效果很好。焊接面结合均匀、孔隙较少，连接中心处铜含量较高，很少发现共晶和金属间相，马氏体细且致密，且上层法兰的铜已均匀渗入基体中，如图 6.31 所示。



图 6.30 断口形貌



图 6.31 钎焊面金相

### 6.3 本章小结

本章根据前文研究的结果，针对 X23F 组合输入支架进行了模具设计、制造和产品试制，并取得了成功。研制出的 X23F 组合输入支架，其关键性能指标结合力达到了 40kN 以上，超过客户不低于 10kN 的设计要求，达到甚至超过国外同类产品水平。

## 第 7 章 结论与展望

### 7.1 结论

本文根据粉末冶金零件烧结钎焊、渗铜的机理，通过研究掌握了粉末冶金零件烧结钎焊、渗铜工艺技术；通过分体成形、烧结钎焊渗铜的研究，掌握了自动变速器粉末冶金组合支架的制造工艺技术。本论文研究的烧结钎焊技术具有创新性，并填补了国内该领域的空白。

1) 研制的 X23F 组合输入支架，其关键性能指标结合力达到 40kN 以上，远远超过客户不低于 10kN 的设计要求，达到甚至超过国外同类产品水平。

2) 采用本文研究所选用的粉末原材料规格，基体材料配比按 96.1%铁粉+0.8%石墨粉+2.0%铜粉+0.5%硫化锰粉+0.6%润滑剂，以及渗铜量按 10%，所研制的支撑架和法兰的性能分别能够满足 MPIF35 FC-0208-50 和 FX-1008-50 标准的要求。同时，由于材料中不含镍、钼等贵金属元素，因此，材料成本相对较低。

3) 采用钎焊性能较佳的 Sinter Braze 90 钎焊剂，通过试验研究得出最佳钎焊间隙为 0.1mm，最佳钎焊料用量为 0.3g/cm<sup>2</sup> 的结论。采用该项研究所确定的参数进行烧结钎焊，钎焊结合面结合强度高、质量可靠，同时钎焊料用量经济。

4) 采用本论文所设计的模具结构，在进行 X23F 输入支架烧结钎焊时，钎焊间隙能够得到有效控制，且支撑架与法兰叠放定位可靠，从而有利于保证组合支架烧结钎焊的质量。

5) 通过对烧结、钎焊、渗铜多种可能的方案分别进行试验验证得出：烧结、钎焊和渗铜“一步法”的方案为最佳方案。该方案质量稳定可靠，且流程短、操作简便。

6) 采用本文方法（即采用分体成形、“一步法”烧结钎焊渗铜和成本较低的铁碳铜材料）生产的自动变速器粉末冶金组合支架，与传统钢件机加工相比，或与国内有关专利技术方法相比，具有工艺流程短、生产效率高、制造成本低和适合大批量生产等优点。因而，技术更为先进，符合该类产品研发、生产的技术发展方向。

本文的研究成果，即分体成形、烧结、钎焊和渗铜技术，既可应用于自动变速器组合支架类产品，也可应用于其它复杂结构产品的研发与生产，因而具有很好的应用价值。

## 7.2 展望

通过本文研究为研制、生产自动变速器粉末冶金组合支架提供了技术能力。但能否实现稳定量产还要取决其它一些重要因素，如：原材料质量的稳定性，成形压机功能和精度的可靠性，烧结电炉温度、保护气氛稳定性等，以及批量生产过程中的质量管理等等。由于自动变速器粉末冶金组合支架是一种技术含量较高的产品，因此，只有同时具备该项制造技术、具有先进可靠的硬件设备和管理能力，才能保证该类产品可靠量产。

## 致谢

2009年3月，我有幸考取了同济大学汽车学院工程硕士，就读车辆工程专业，很高兴时隔24年能再次进入高等学府学习深造。这对我来说，实在是难得的机会。在三年多的学习过程中，既得到了良师的教诲，又得到了同学和益友的启发，使我受益良多。

我要特别感谢我的导师倪计民教授。在这篇论文的写作过程中，我的导师倪计民教授给予了我很大的帮助，本论文能够顺利完成，离不开导师的悉心指导和严格要求，导师渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，严以律己、宽以待人的崇高风范，朴实无华、平易近人的人格魅力对我影响深远，不仅使我树立了自己的学术目标、掌握了基本的研究方法，还使我明白了许多待人接物与为人处世的道理。本论文从选题到完成，每一步都是在导师的指导下完成的，倾注了导师大量的心血。在此，谨向我的导师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

此外，我要感谢石秀勇老师，在本人论文写作过程中给予了诸多帮助、指导。

我要感谢同济大学董尧清、侯永平、彭为、谭丕强、陈辛波、沈勇、赵志国、周铨、陈荣章、袁希蓓、张伟君等各位授课老师，在各位老师的精心传授、指导下，自己在学业上有了很大的收获，开阔了视野，对车辆工程及相关专业知识有了较为全面的了解，分析解决问题的能力得到了提升。

我要感谢高申兰老师，为我们精心安排每次学习与活动，热情指导我们做好论文答辩等相关工作。

这里我还要特别感谢本人工作单位的领导邵健总经理，是他鼓励我参加工程硕士考试报名，并在攻读工程硕士学位期间，给予了大力支持。

我要向所有在攻读工程硕士学位期间曾经关心和帮助过本人的同学和益友表示最诚挚的谢意！

在本论文研究和论文撰写过程中，得到了本人工作单位丁霞、蒋叶琴等同事的大力协助，在此深表感谢！

## 参考文献

- [1] 韩凤麟. 粉末冶金零件使用手册. 兵器工业出版社, 1995. 1~16
- [2] Skolowski Peter K. 烧结钎焊粉末冶金零件研究. 粉末冶金工业, 2012, 22(1): 9~16
- [3] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理, 机械工业出版社. 2007
- [4] 黄培云. 粉末冶金原理 (第2版). 北京: 冶金工业出版社, 1997. 1~447
- [5] 周作平, 申小平. 粉末冶金机械零件实用技术. 北京: 化学工业出版社, 2006. 381~384
- [6] 韩凤麟, 马福康, 曹勇家. 中国材料工程大典 (第14卷粉末冶金材料工程). 北京: 化学工业出版社, 2006. 1~1058
- [7] Linkon T M. Infiltration of iron powder compacts. Metal Powder Report, 1992, 21(3): 25~29
- [8] 董颐, 齐心, 张雪梅. 热处理渗铜烧结钢的性能和组织. 粉末冶金技术, 1996, 14(2): 122~125
- [9] 刘芳, 周科朝, 李志友. 高合金铁基材料熔渗工艺研究. 金属热处理, 2007, 32(3): 40~44
- [10] 张华诚. 粉末冶金实用工艺学. 北京: 冶金工业出版社, 2004. 341~346
- [11] 成丽丽, 董颐. 高碳高合金铁基渗铜烧结阀座材料. 北京科技大学学报, 1999, 21(1): 44~47
- [12] 吴晓莉, 张河, 杨德统. 粉末冶金排气门座材料. 内燃机学报, 2002, 20(2): 161~164
- [13] Menapace C, Molinari A, Bortolotti F. Effect of copper infiltration on Fe-based PM Parts/Proceedings of the 3rd International Powder Metallurgy Conference. Ankara, Turkey Sponsor, September, 2002. 355~362
- [14] 郑朝旭, 林炎成, 黄立仁. 渗铜处理对烧结硬合金钢齿轮特性的影响. 粉末冶金材料科学与工程, 2008, 13(1): 50~57
- [15] 吴晓莉, 杨德统, 申小平. 熔渗铜对高合金烧结钢组织的影响. 粉末冶金技术, 2001, 19(4): 199~203
- [16] 吕海波. 烧结钢组织及耐磨性的研究. 南京: 南京理工大学, 2002
- [17] Kawasaki K, Akisue O. Effect of Copper Content on Mechanical Properties of Continuously Annealed Extra-low-carbon Titanium-added Steel Sheets. Tesu-to-Hangane, 1990. 759~765
- [18] 徐景杰, 汪礼敏, 王林山等. 渗铜烧结钢用高性能渗铜剂的研究及应用. 粉末冶金工业, 2011, 21(6): 43~47
- [19] 唐华生. 国外粉末冶金烧结钢添加合金元素的研究和发展. 宁夏机械, 1991, 1(1): 31~34
- [20] 廖元杭. 开发Fe-Mn-Sn新烧结钢体系的研究. 粉末冶金工业, 1996, 6(3): 24~28
- [21] 黄友庭, 郭剑伽, 汤德平等. 熔渗烧结法制备铜钨合金的性能研究. 材料及成形技术, 1998, 13 (2): 302~305
- [22] Pelletie S, Hanejko F G, Samai E, et al. Mechanical properties of hot isostatically pressed copper infiltrated low alloy steels[J], Powder Metallurgy, 1994, 30(3): 293~299
- [23] Scilar M. High impact strength powder metal part and method for making same: US Patent, 4731118[P], 15 April, 1988
- [24] Svilar M. Porosity-free electrical contact material. Metal Powder Report, 1987, 4(3): 278~282
- [25] 王铁军, 熊宁. 新型金属熔体浸渗复合材料的研究进展. 机械工程材料, 2006, 3(9): 1~4
- [26] Ashurst A N. Copper-based alloys and their use for infiltration of powder metal parts. Metal

- Powder Report, 1984, 25(2): 438~442
- [27] 张晓宇, 赵训茶. 添加纳米粉体对铁基粉末烧结件组织与性能的影响. 长春工业大学学报, 2008, 29(1): 41~43
- [28] 陈华, 李月英, 张弛等. 添加微细铬铁粉对烧结钢摩擦磨损性能的影响. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(5): 1162~1166
- [29] 徐景杰, 王林山, 汪礼敏等. 一种渗铜剂及其制备方法: 中国, CN101736285A, 2010
- [30] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册. 第2版, 北京: 机械工业出版社, 2008
- [31] Frank M. Advanced Sinter-braze P/M Subassemblies in Torque Transfer System Reduction Hubs and Carriers. SAE, 2002
- [32] Gabriellov I, Wilson C, and Hamill J. Sinter-Brazing Automotive Powertrain Components. International Journal of Powder Metallurgy, 2001, 37(7): 46~48
- [33] Knopp W. Brazing Alloy Composition, United States Patent 3 717 442 Feb. 20, 1973
- [34] Peaslee R. How to Identify Brazing Failures. Advanced Material & Process, December 2003, 35
- [35] AWS Committee, Brazing Manual, 1963, American Welding Society, New York, NY
- [36] Beiss P. Finishing Process in Powder Metallurgy. Powder Metallurgy, 1989, 32(4): 277~284
- [37] Stromggren M. and Andersson O. Brazing of P/M Parts by Sintering. Technical Report-PM, 1989, 6
- [38] 韩凤麟. 粉末冶金模具模架实用手册. 冶金工业出版社, 1998

## 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

张志勇, 男, 1963年5月生。

1985年8月毕业于合肥工业大学 粉末冶金材料专业 获学士学位。

1985年8月至今在上海汽车粉末冶金有限公司, 从事产品开发和技术管理等工作。

2009年3月入同济大学汽车学院, 攻读车辆工程专业工程硕士专业学位研究生。

### 已发表论文:

[1]张志勇. 粉末冶金汽车零部件开发流程探讨. 粉末冶金技术, 2015, Vol.33(1):

54-57