

# Investigation on the Properties of Fe-36Ni Alloy and Its Microwave Devices by Powder Metallurgy and Cold-Heading Process

Limin Fang<sup>1,2</sup>, Liejun Li<sup>2</sup>, Kelun Zhao<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics and Information Engineering, Guangdong University of Education, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong

<sup>3</sup>Zhuhai ROSSINI Watch Industry LTD., Zhuhai Guangdong

Email: \*msklzhao@scut.edu.cn, \*klzhao1975@163.com

Received: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2018; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2018; published: Feb. 24<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

In this study, the microwave devices were prepared by the cold heading process of Fe-36Ni alloy obtained from the pressing molding of the pre-alloying powder after sintering and annealing. The micromorphology and components of the pre-alloying powder, phases and microstructure, thermodynamic properties of Fe-36Ni alloy and temperature drift index of its microwave devices were analyzed. The results indicated that the composition of Fe-36Ni alloy powder is homogeneous by pre-alloying. It is revealed that both the Fe-36Ni alloy and its cold heading samples are single austenite phase. The thermal expansion coefficients of the cold heading Fe-36Ni alloy are less than  $3.0 \times 10^{-6}/K$  at  $50^{\circ}C \sim 150^{\circ}C$ . The temperature drift index of the microwave resonator manufactured by cold heading process of Fe-36Ni alloy, and the assembled cavity filter are consistent with the technical requirements of microwave resonant components and cavity filters for communication base station.

## Keywords

Invar Alloy, Microwave Device, Pre-Alloying, Powder Metallurgy, Cold-Heading, Temperature Drift

# 粉末冶金与冷镦加工Fe-36Ni合金及其微波器件的性能研究

房丽敏<sup>1,2</sup>, 李烈军<sup>2</sup>, 赵可沦<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>广东第二师范学院物理与信息工程系, 广东 广州

\*通讯作者。

<sup>2</sup>华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州

<sup>3</sup>珠海罗西尼表业有限公司, 广东 珠海

Email: \*msklzhao@scut.edu.cn, \*klzhao1975@163.com

收稿日期: 2018年1月23日; 录用日期: 2018年2月17日; 发布日期: 2018年2月24日

## 摘要

本文采用预合金化粉体压制成型后烧结-退火制得Fe-36Ni合金, 再经冷镦加工处理制得低膨胀合金微波器件, 并分析了Fe-36Ni合金粉体形貌与成分、合金物相与微观结构和合金热力学性能及其微波器件的温漂指标。研究发现, 预合金化工艺制得Fe-36Ni合金粉体的成分均匀, 粉体压制成型后烧结-退火的Fe-36Ni合金棒材及其冷镦加工后样品均为单一奥氏体相。冷镦加工Fe-36Ni合金在50℃~150℃的热膨胀系数小于 $3.0 \times 10^{-6}/K$ 。冷镦加工处理Fe-36Ni合金棒材制得微波谐振器及其组装的腔体滤波器的“温漂”指标均满足通讯基站用微波谐振元件和腔体滤波器的技术要求。

## 关键词

因瓦合金, 微波器件, 预合金化, 粉体冶金, 冷镦, 温漂

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微波谐振器(谐振管或谐振杆)及腔体滤波器是通讯基站的关键器件之一。因瓦合金(俗称殷钢)属于低膨胀铁镍(Fe-Ni)合金, 主要有4J32、4J36和4J42三种牌号, 已经广泛应用于家用电器、办公机器、计算机、电信设备、航空航天等领域的精密元器件, 例如钟表的摆杆及摆轮、谐振腔零件、微波通讯的波导管、无线电频率元件以及标准频率发生器等。其中, 4J36即Fe-36Ni合金具有极低的热膨胀系数( $\sim 1.0 \times 10^{-6}/K$ ), 但强度和硬度不高[1][2], 因此既具有低膨胀系数又具备高强度的高性能Fe-36Ni基合金成为当前的研究热点[3]-[10]。Fe-36Ni合金通常采用熔铸造制造[6][7][8][9][10], 但存在着合金成分偏聚, 铸造组织粗大和不均匀的问题。粉末冶金技术既可最大限度地减少合金成分偏聚并可消除粗大、不均匀的显微组织[11][12][13][14]。但是, 因瓦合金为高镍含量合金、属于“难加工材料”, 传统的机械加工方法不仅材料利用率低、成本高, 并且工艺复杂、材料性能呈各向异性, 从而影响精密元器件的工作稳定性及精确性, 因而迫切需要发展因瓦合金及其微波器件的低成本、高效率制备技术。目前, 金属冷加工工艺, 如拉拔、冷镦成型具有生产效率高、无需加热, 并且生产成本低等优势[15][16][17][18]。因此, 本文采用预合金化粉体压制成型后烧结-退火制得Fe-36Ni合金, 再经冷镦加工处理制得低膨胀合金微波器件, 并分析了Fe-36Ni合金粉体形貌与成分、Fe-36Ni合金物相与微观结构和合金热力学性能及其微波器件的通带频率稳定性。

## 2. 实验

### 2.1. 制备方法

本文采用预合金化粉体压制成型后烧结-退火制得Fe-36Ni合金棒材, 再经冷镦加工处理制得低膨

胀合金微波谐振器及其组装的腔体滤波器,其具体的制备工艺路线如图1所示。其中,预合金化 Fe-36Ni 合金粉体及其成型、烧结、退火的具体制备工艺参数为:将按 36%Ni-64%Fe 配比的原料在中频感应熔炼炉中熔化与雾化。雾化开始前,雾化室先抽真空,当真空炉内背底气压达到  $10^{-1}$  Pa 时,预热炉料,然后再次抽真空到  $10^{-2}$  Pa 以上后,开始熔化 36%Ni-64%Fe 合金;充入  $10^5$  Pa 高纯氩气到炉内作为保护气,大功率送电使炉料完全熔化并保温 5 分钟,熔炼 2 次以保证铸锭成分的均匀;用于制备雾化粉的锭料必须去除铸锭表面氧化层后才可使用;待原料充分熔化并达到约  $1650^{\circ}\text{C}$  时(熔体温度用钨-铼热电偶进行测量),将得到的合金液浇入中间包开始水雾化。其中,预合金化 Fe-36Ni 粉末水雾化的水压力为 25 MPa;熔融的 36%Ni-64%Fe 合金液在雾化器内经历切断、分散、裂化而成为微小液滴,再经脱水、烘干、筛分、生粉高温还原、粉饼破碎、筛分、合批等工序获得 36%Ni-64%Fe 的殷钢合金粉。此外,水雾化制备合金粉末完成后的其它工艺参数包括:1) 烘干过程在普通的干燥箱中完成,温度为在  $60^{\circ}\text{C}$  下保温 6 小时。2) 精细筛分粉料的具体指标为:颗粒尺寸在 100~300 目之间。3) 在普通管式炉中于氢气气氛保护下,  $1000^{\circ}\text{C}$  ~  $1100^{\circ}\text{C}$  下保温 2 小时以充分还原水雾化制备的 Fe-Ni 合金粉,并充分去除 C、O 等严重影响 Fe-Ni 合金热膨胀系数的杂质元素。4) 粉饼破碎在普通的滚筒式球磨机中进行,直径 5 毫米不锈钢为磨球,与 1~2 wt% 的硬脂酸混合 8 小时,球料比为 10:1。5) 过筛水雾化粉末,获得粒径为 100~300 目左右的粉体,加入 2 wt% 的硬脂酸,球磨 8 小时以获得颗粒大小均匀的粉末。6) 球磨后的粉末装入模具中,在 1000 MPa 压力保压 30 秒下,压制成型,压制机的吨位为 100 吨;压制后的坯体密度在 92%~93% 之间。7) 合金棒材烧结与退火的工艺参数为:烧结温度为  $1400^{\circ}\text{C}$ ,升温速率为  $5^{\circ}\text{C}/\text{分钟}$ ,烧结时间为 2 小时;采用氢气为还原气氛,退火温度范围为  $1050^{\circ}\text{C}$ ~ $1250^{\circ}\text{C}$ ,退火时间为 5 小时。8) 根据谐振器(谐振管/谐振杆)最终产品的尺寸和规格制定配套冷镦冲模模具,并结合产品的模具设定冷镦机的设备参数,然后投入上述合金棒材,按照谐振管/谐振杆的规格对所述合金棒材进行切料、镦头、聚积、成形、倒角、搓丝、缩径、切边,然后冷镦(图1所示),实现无切削或少切削的精加工,即可实现“近净成型”制造微波谐振器,再根据结构设计方案组装成相应的腔体滤波器。

## 2.2. 表征方法

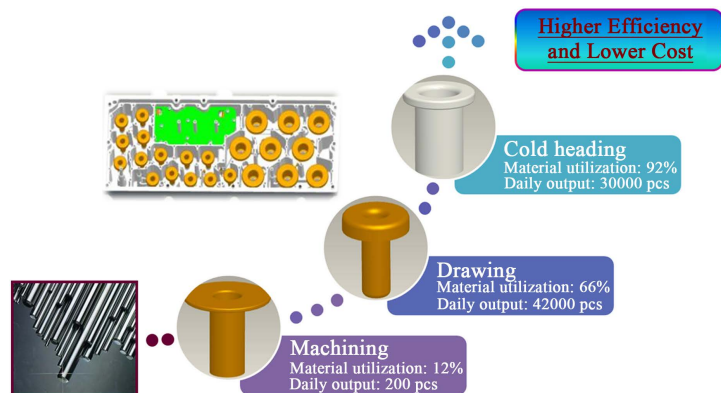
采用 ULTRA 55 型热场发射扫描电镜(SEM, 德国 Zeiss)分析样品的微观形貌(合金粉体和烧结及冷加工合金微观结构)和 EDS 成分。采用 D/Max-2500PC 型 X 射线衍射分析表征合金试样的物相和晶体结构。采用 HXD-1000TM/LCD 型数字式显微硬度计测试样品的表面硬度,并在测量时选取的载荷为 1.96 N,载荷保持时间为 15 s,测算 HV0.2 显微硬度值(选取 6 个测点再计算其平均值)。采用 Leica-J11 型万能膨胀仪测定合金试样的热膨胀性能。腔体滤波器的“温漂”指标采用安捷伦网络分析仪进行测量。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 合金组成及其微观结构

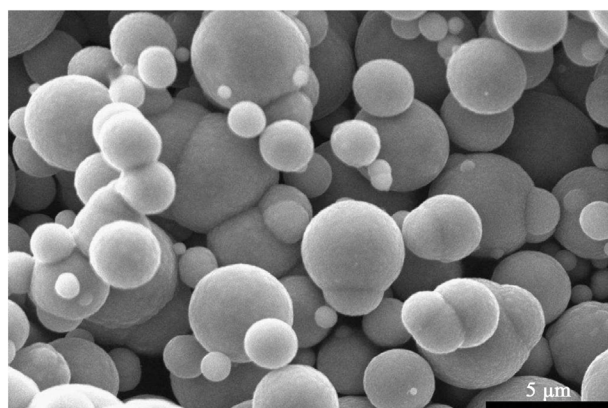
图2为 Fe-36Ni 合金粉体的微观形貌 SEM 照片和 EDS 成分分析。从图2(a)可见, Fe-36Ni 合金粉体的形状为近球形,但出现了较为明显的联体颗粒,其粉体粒径最大可达  $5.0\ \mu\text{m}$ 。从图2(b)可知合金粉体中 Fe 和 Ni 的含量分别为 64.29 wt% 和 35.71 wt%,且合金中不含 C、S 和 O 等杂质成分,说明预合金化 Fe-36Ni 合金粉体的成分均匀。

图3给出了粉体压制成型后烧结-退火制得 Fe-36Ni 合金棒材及其冷镦加工后样品的 XRD 图谱。由图3可见, Fe-36Ni 合金试样的 XRD 衍射图谱中主要有五个衍射峰,这五个衍射峰和 XRD 标准 PDF 卡片 No.47-1405 中的三个衍射峰完全吻合,说明粉体压制成型后烧结-退火 Fe-36Ni 合金棒材及其冷镦加工后样品均为单一的奥氏体相[7] [8] [9]。

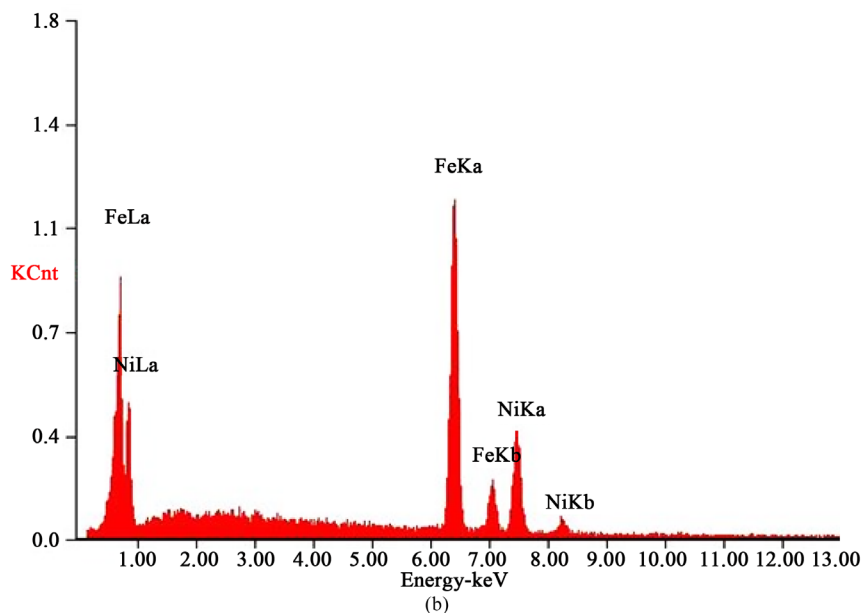


**Figure 1.** Schematics of microwave devices obtained from Fe-36Ni alloy bars by sintering, annealing and cold heading

**图 1.** 烧结 - 退火 Fe-36Ni 合金棒材冷镦加工制备微波器件的示意图



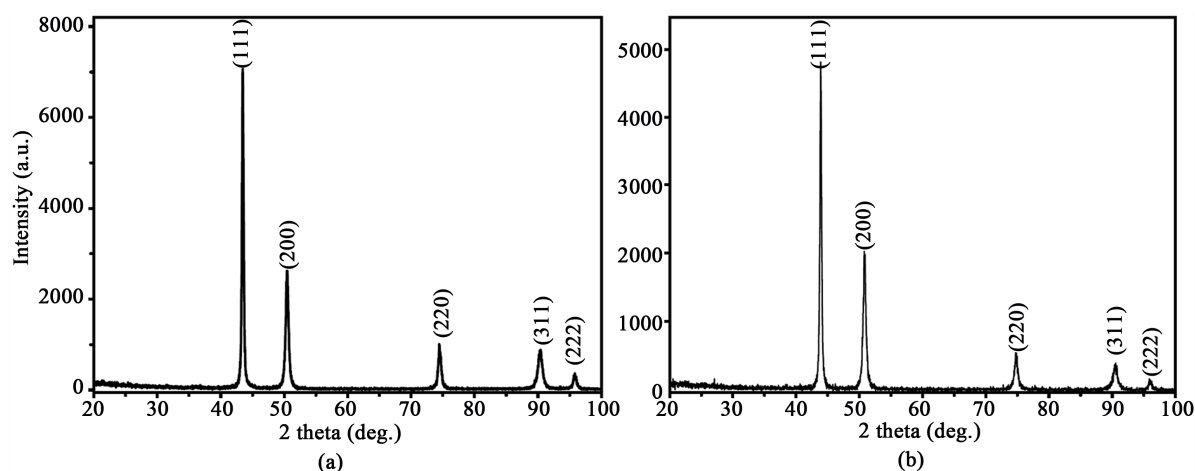
(a)



(b)

**Figure 2.** The micromorphology and EDS component analysis of Fe-36Ni alloy powders. (a) SEM picture; (b) EDS results

**图 2.** Fe-36Ni 合金粉体微观形貌和 EDS 成分分析。(a) SEM 照片；(b) EDS 结果



**Figure 3.** The XRD spectrum of Fe-36Ni alloys. (a) Alloy bars by sintering and annealing after powder pressing molding; (b) The samples from above alloy bars after cold heading

**图 3.** Fe-36Ni 合金的 XRD 图谱。(a) 粉体压制成型后烧结 - 退火制得合金棒材；(b) 合金棒材冷镦加工后的样品

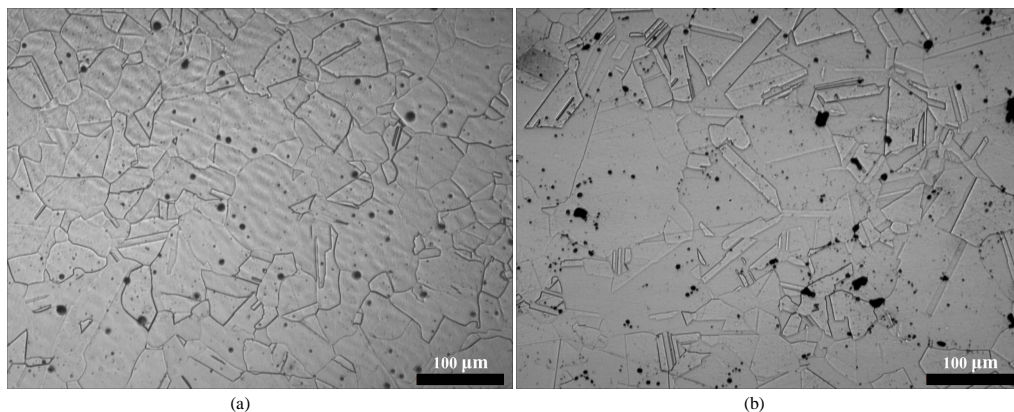
图 4 给出了粉体压制成型后烧结 - 退火制得 Fe-36Ni 合金棒材及其经冷镦加工后样品的金相组织照片。从图 4(a)可知, 粉体压制成型后烧结 - 退火制得 Fe-36Ni 合金的组织基本为大小不均匀、形状也不规则且较为粗大的等轴晶, 并伴有少量的退火孪晶。上述退火孪晶的出现是因为奥氏体相的层错能较低, 并且烧结过程中由于热应力等原因导致新晶粒界面出现堆垛层错所造成的, 即在一个晶粒内形成横跨晶粒的许多带[19] [20]。如图 4(b)所示, 经过冷镦加工处理后, Fe-36Ni 合金的奥氏体晶粒尺寸显著减小, 并且伴有大量的条状孪晶。Fe-Ni 二元合金发生冷变形后容易诱发奥氏体 $\leftrightarrow$ 马氏体相变[21] [22] [23] [24]。然而, 如图 3(b)所示, 冷镦加工后样品的金相仍为单相奥氏体组织。因此, 尽管冷镦加工使烧结 - 退火 Fe-36Ni 合金中出现大量孪晶, 但并没有发生奥氏体 $\rightarrow$ 马氏体相变。

图 5 给出了粉体压制成型后烧结 - 退火制得 Fe-36Ni 合金棒材及其经冷镦加工后样品的局部显微结构 SEM 照片。从图 5(a)可见, 粉体压制成型后烧结 - 退火得到的 Fe-36Ni 合金组织基本为奥氏体等轴晶以及微量退火孪晶。如图 5(b)所示, 冷镦加工处理的 Fe-36Ni 合金的奥氏体晶粒出现了明显的细化现象, 并伴随着条状孪晶颗粒显著增多且密集排列。同时, 分别测得 Fe-36Ni 合金的显微硬度值为 128HV0.2 和 151HV0.2, 这说明冷镦加工后 Fe-36Ni 合金表现为加工强化。这是因为冷镦加工产生的孪晶使晶界数量增加、细化晶粒, 从而阻碍了位错运动、提高了合金的整体强度。

### 3.2. 合金及其微波器件性能

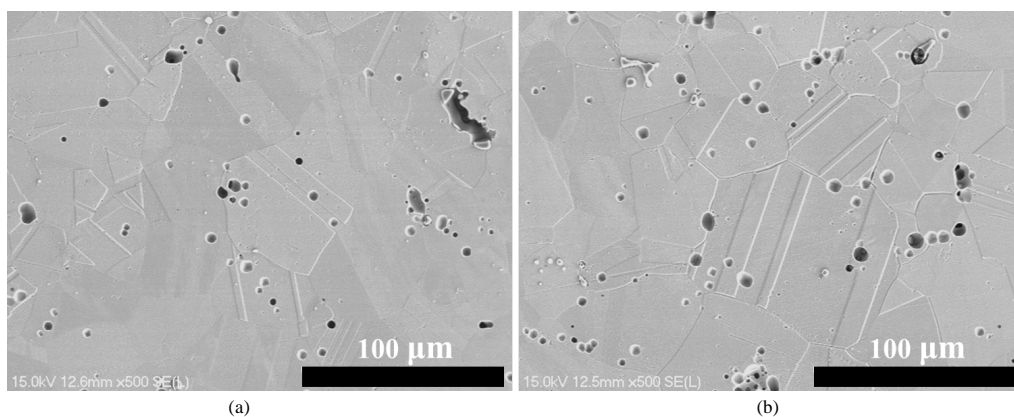
图 6 给出了粉体压制成型后烧结 - 退火制得 Fe-36Ni 合金经冷镦加工后样品的热膨胀曲线及其热膨胀系数变化情况。从图 6 可见, 在 50 $^{\circ}$ C~150 $^{\circ}$ C 温度区间, 粉体冶金法制备的因瓦合金样品已达到射频器件中微波谐振器(谐振管)用因瓦合金的样品性能要求(线膨胀系数小于  $3 \times 10^{-6}$ /K)。此外, 在图 6 中 40 $^{\circ}$ C~50 $^{\circ}$ C 区间出现了热膨胀系数的突变(对应图中的陡峭蓝色曲线), 这是由于起始测量阶段的加热炉温度波动引起。同时, 对采用冷镦加工 Fe-36Ni 合金制备的微波谐振器进行单腔滤波器“温漂”测试, 结果发现其相对中心频率的“温漂”指标为 0.22~0.28 MHz, 基本满足设计微波谐振器的技术要求(中心频率为 2800~3500 MHz, “温漂”指标为 0.20~0.30 MHz)。

图 7 给出了常用 Fe 基合金微波谐振器及滤波器和粉体压制成型后烧结 - 退火制得 Fe-36Ni 合金经冷镦加工的微波谐振器及其组装的滤波器的实物照片(其中的金属微波谐振器表面都经过镀银处理)。从图 6 可见, 由于 Fe-36Ni 合金微波谐振器尺寸远小于常用 Fe 基合金微波谐振器, 因此相对于常用 Fe 基合金



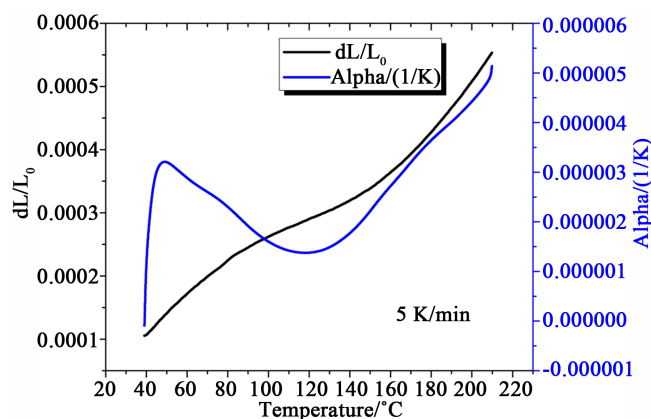
**Figure 4.** The metallographic structure of Fe-36Ni alloys. (a) Alloy bars by sintering and annealing after powder pressing molding; (b) The samples from above alloy bar after cold heading

**图 4.** Fe-36Ni 合金的金相组织。(a) 粉体压制成型后烧结 - 退火制得合金棒材；(b) 合金棒材冷镦加工后的样品



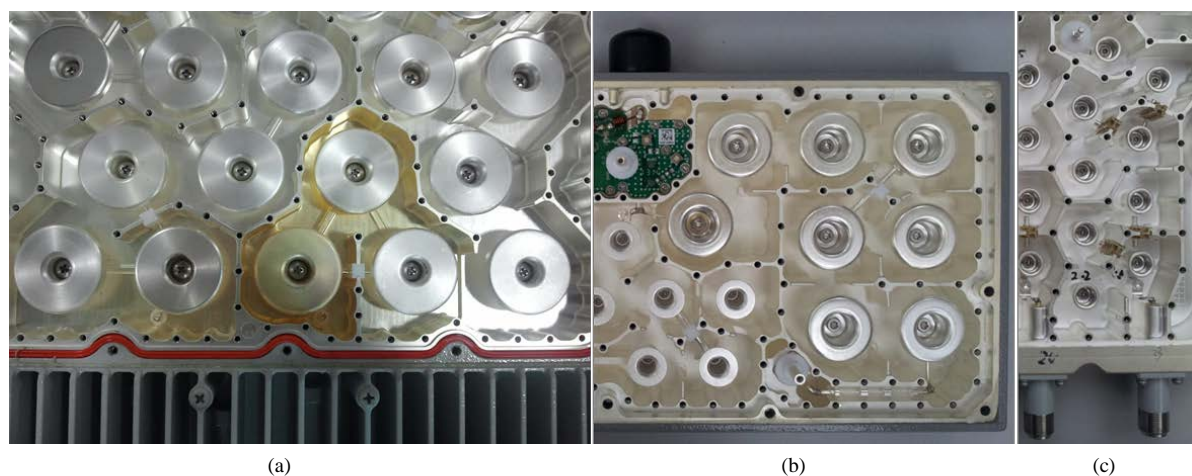
**Figure 5.** The SEM microstructure of Fe-36Ni alloys. (a) Alloy bars by sintering and annealing after powder pressing molding; (b) The samples from above alloy bar after cold heading

**图 5.** Fe-36Ni 合金的 SEM 显微结构。(a) 粉体压制成型后烧结 - 退火制得合金棒材；(b) 合金棒材冷镦加工后样品



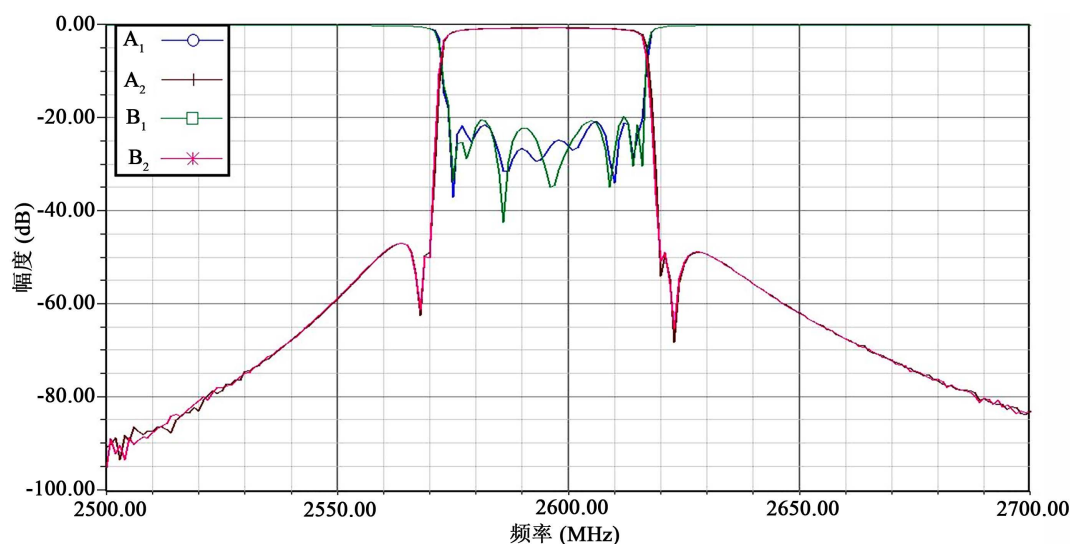
**Figure 6.** Thermal expansion curves and the change of thermal expansion coefficients for the cold heading samples of Fe-36Ni alloys by sintering and annealing after powder pressing molding

**图 6.** 粉体压制成型后烧结 - 退火制得 Fe-36Ni 合金经冷镦加工后样品的热膨胀曲线及热膨胀系数变化情况



**Figure 7.** The pictures of microwave resonators and filters used in (a) common Fe based alloys, (b) and (c) cold heading of Fe-36Ni alloys by sintering and annealing after powder pressing molding

**图 7.** 常用 Fe 基合金微波谐振器及滤波器(a)和冷镦加工的 Fe-36Ni 合金微波谐振器及其组装的滤波器(b)、(c)照片



**Figure 8.** “Temperature drift” test curves of the cavity filter as shown in Figure 6(c) assembled by Fe-36Ni alloy microwave resonators in cold heading process

**图 8.** 冷镦加工 Fe-36Ni 合金微波谐振器组装腔体滤波器(图 6(c)所示)的“温漂”测试曲线

微波谐振器集成的 WiMAX2.6GHz 腔体滤波器(图 7(a)所示),由冷镦加工 Fe-36Ni 合金微波谐振器所组装的 WiMAX2.6GHz 腔体滤波器(图 7(b)和图 7(c)所示)其整体结构更为紧凑,满足微波器件小型化的设计要求。

图 8 为粉体压制成型后烧结 - 退火制得 Fe-36Ni 合金经冷镦加工微波谐振器组装滤波器(图 6(c)所示)的温漂测试曲线(对应 WiMAX2.6GHz 腔体滤波器在 25°C~85°C 的 S 参数曲线)。从图 8 可知,测试前后的两条曲线基本重合,并且该腔体滤波器的通带频率在不同的温度下相对中心频率的漂移量仅为 0.27~0.35 MHz,完全满足通讯基站用腔体滤波器的技术指标(中心频率为 2800~3500 MHz,“温漂”指标为 0.20~0.40 MHz)。

#### 4. 结论

采用预合金化粉体压制成型后烧结 - 退火的 Fe-36Ni 合金棒材再经冷镦加工处理制得低膨胀铁镍合

金及其微波器件，并分析了粉体形貌与成分、合金物相与微观结构和合金热力学性能及其微波器件的温漂指标，得出如下结论：

1) 预合金化工艺制得 Fe-36Ni 合金粉体的成分偏差很小，有利于粉体成分的均匀化。

2) 冷镦处理使烧结 - 退火 Fe-36Ni 合金晶粒细化，并且出现大量密集排列的条状孪晶颗粒，提高了合金的整体强度，但并没有引起奥氏体→马氏体相变。粉体压制成型后烧结 - 退火的 Fe-36Ni 合金棒材及其冷镦加工后的样品均为单一奥氏体相。

3) 冷镦加工处理的粉体压制成型后烧结 - 退火 Fe-36Ni 合金棒材在 50℃~150℃温度区间的热膨胀系数小于  $3.0 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。

4) Fe-36Ni 合金棒材经冷镦加工处理制得微波谐振器及其组装的腔体滤波器的“温漂”指标均满足通讯基站用微波谐振元件和腔体滤波器的技术要求。

## 基金项目

本研究工作获得深圳市新材料发展专项第一批扶持计划项目资助：3G 天线所用介质材料的研发及产业化(No.s2012006630002)。

## 参考文献 (References)

- [1] Sehilfgaardev, M., Abrikosov, A. and Johansson, B. (1999) Origin of the Invar Effect in Iron-Nickel Alloys. *Nature*, **400**, 46-49. <https://doi.org/10.1038/21848>
- [2] 刘江. 低膨胀合金的应用和发展[J]. 金属功能材料, 2007, 14(5): 33-37.
- [3] Zhao, Y., Sato, Y.S., Kokawa, H., et al. (2011) Microstructure and Properties of Friction Stir Welded High Strength Fe-36 wt%Ni Alloy. *Materials Science & Engineering A*, **528**, 7768-7773. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.06.082>
- [4] 王超, 袁守谦, 姚成功, 冯振平. W 对 Fe-Ni 因瓦合金性能的影响[J]. 功能材料, 2012, 43(24): 3429-3431.
- [5] Wang, C., Yuan, S.Q., Yao, C.G. and Feng, Z.P. (2013) Study of the Effect of W and Mo Binary Alloying on Fe-Ni36 Invar Alloy Properties. *Advanced Materials Research*, **690-693**, 290-293. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.290>
- [6] 石照夏, 颜晓峰, 段春华, 赵明汉, 陈霞. 成分与热处理对 4J36 合金力学和物理性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(12): 31-36.
- [7] Ha, T.K. and Min, S.H. (2015) Effect of C Content on the Microstructure and Physical Properties of Fe-36Ni Invar Alloy. *Materials Science Forum*, **804**, 293-296. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.804.293>
- [8] Wang, C., Yuan, S.Q., Yao, C.G., Feng, Z.P., et al. (2016) Effect of Aging on Microstructures and Properties of Mo-Alloyed Fe-36Ni Invar Alloy. *Materials Science & Engineering A*, **654**, 107-112. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.018>
- [9] 路东柱, 吴敏藉. 原位 TiC 颗粒增强 Fe-36Ni 因瓦合金的组织与性能[J]. 金属功能材料, 2014, 21(4): 9-13.
- [10] 于越溪, 王福明, 姚元媛, 潘景新. Cr 合金化对 Fe-36Ni 因瓦合金性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(3): 1-5.
- [11] 刘奇正, 孟庆平, 戎咏华, 徐祖耀. 机械合金化工艺对 Fe-Ni 合金显微结构的影响[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(10): 1682-1685.
- [12] Wei, S., Duraj, R., Zach, R., et al. (2002) The Effect of Pressure on the Curie Temperature in Fe-Ni Invar Mechanical Alloys. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **14**, 11081-11084. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/44/429>
- [13] Elzbieta, J., Zurawicz, J.K. and Dariusz, O. (2002) X-Ray Diffraction, Magnetization and Mossbauer Studies of Nanocrystalline Fe-Ni Alloys Prepared by Low- and High Energy Ball Milling. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **208**, 221-230.
- [14] 吴事谱, 吴丹, 杨磊, 史常东, 汤文明. 机械合金化合成 Invar 合金纳米晶粉体[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(3): 45-50.
- [15] Li, Z., Wu, D. and Lu, W. (2012) Effects of Rolling and Cooling Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Cold Heading Steel. *International Journal of Iron and Steel Research*, **19**, 64-70. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60022-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60022-9)
- [16] Sabih, A. and Nemes, J.A. (2012) Experimental and Finite Element Simulation Study of the Adiabatic Shear Band



Phenomenon in Cold Heading Process. *Journal of Materials Processing Technology*, **21**, 1089-1105.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.12.024>

- [17] 张东民, 刘铭心, 盛育东, 周伟民, 陈剑, 李嘉伟. 薄壁六角螺母冷镦过程中模具磨损模拟分析及参数优化[J]. 润滑与密封, 2017, 42(10): 114-117.
- [18] 李康, 付雪松, 胡建军, 张久文, 周文龙. TC16 钛合金冷镦变形的特征[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(6): 1608-1611.
- [19] 蒋翔, 李莉娟, 翟启杰. 退火工艺对 Fe-36Ni 因瓦合金热轧板组织及性能的影响[J]. 上海金属, 2012, 34(2): 14-18.
- [20] 孙中华, 崔毅, 薛峰, 张云飞, 张倩. 再结晶温度对 Fe-36Ni 因瓦合金冷轧薄板组织和性能的影响[J]. 河北冶金, 2015, 6: 19-23.
- [21] Bitkulov, I.K., Burkhanov, A.M., Kazantsev, V.A., Mulyukov, R.R., Mulyukov, K.Y., *et al.* (2006) Effect of Severe Plastic Deformation on the Properties of the Fe-36% Ni Invar Alloy. *Physics of Metals & Metallography*, **102**, 91-96. <https://doi.org/10.1134/S0031918X06070131>
- [22] Nadutov, V.M., Vashchuk, D.L., Volosevich, P.Y., Spuskanyuk, V.Z. and Davidenko, A.A. (2015) Structure Changes in Invar Fe-Ni and Fe-Ni-C Alloys under the Deformation by Upsetting. *Physics of Metals & Metallography*, **116**, 917-924. <https://doi.org/10.1134/S0031918X15090124>
- [23] 李细锋, 陈楠楠, 李佼佼, 何雪婷, 刘红兵, 郑兴伟, 陈军. 温度与应变速率对 Invar36 合金变形行为的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(8): 968-974.
- [24] Shirazi, H., Miyamoto, G., Nedjad, S.H., Chiba, T., Ahmadabadi, M.N., *et al.* (2018) Microstructure Evolution during Austenite Reversion in Fe-Ni Martensitic Alloys. *Acta Materialia*, **144**, 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.10.068>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-6122, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [japc@hanspub.org](mailto:japc@hanspub.org)