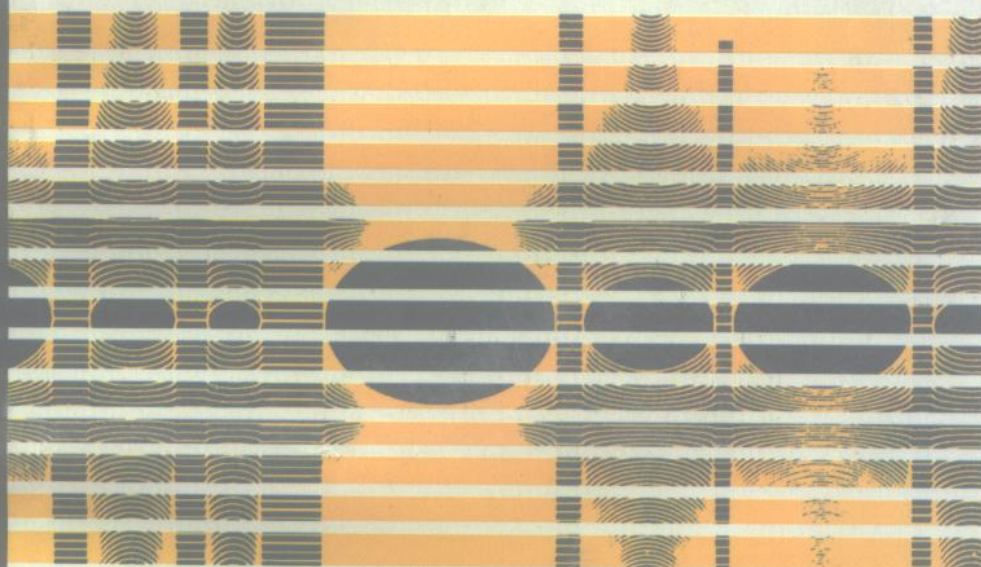


# 非晶态合金传感器 技术与应用



● 赵英俊 杨克冲 杨叔子 编著



■ 华中理工大学出版社

国家自然科学基金资助项目

# 非晶态合金传感器 技术与应用

赵英俊 杨克冲 杨叔子 编著

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

非晶态合金传感器技术与应用/赵英俊等编著  
武汉: 华中理工大学出版社, 1998 年 3 月

ISBN 7-5609-1685-6

I. 非...

II. ①赵... ②杨... ③杨...

III. 非晶态合金-传感器-概论

IV. TP212

非晶态合金传感器技术与应用

赵英俊 杨克冲 杨叔子编著

责任编辑: 李德

\*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编: 430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

开本: 850 × 1168 1/32 印张: 8.875 字数: 220 000

1998 年 3 月第 1 版 1998 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1-1 500

ISBN 7-5609-1685-6/TP·267

定价: 11.50 元

(本书若有印装质量问题, 请向出版社发行科调换)

DV22

内 容 提 要

本书系统地介绍了非晶态合金传感器技术的基本原理和应用。书中简述了非晶态合金与传感器技术有关的基本性能、敏感功能和材料处理方法，讨论了非晶态合金传感器的设计与开发方法；重点论述了四类非晶态合金传感器的工作原理和典型结构，即脉冲感应型磁场传感器、磁通门式磁场传感器、非接触式扭矩传感器和非晶态合金数字化仪；详细介绍了八类有实用价值的非晶态合金传感器及其应用系统。本书内容丰富、取材新颖，反映了国内外最新的研究成果。

本书可用作高等院校有关专业大学生和研究生的教学参考书，也可供从事传感器技术及非晶态合金研究的科技人员参考。

# 前 言

众所周知，传感器是各种仪器仪表和自动化设备的基础。尤其在当今以电子计算机为标志的信息社会中，传感器技术更承担着获取信息的重任，因此得到了日益广泛的关注，成为当代科学技术中最为活跃的一个分支。甚至有人讲，“征服了传感器，就几乎等于征服了科学技术。”这种说法，虽有失偏颇，但表明了这样两个事实：一是传感器对于促进现代科学技术发展的重要性，二是传感器的发展对现代科学技术的依赖性。

新材料是科学技术发展的先导。对于传感器技术的发展来讲，敏感材料是一个最基本的问题。因为在各种传感器中，敏感元件是关键，而敏感元件的基本性能又取决于相应的敏感材料。因此，每出现一种新的功能材料，就立刻被尝试用于传感器技术。如半导体、形状记忆合金、非晶态合金、压电陶瓷、光导纤维、超导材料、微晶材料及新近的纳米材料，都无一例外。正是这些不断涌现的新型功能材料，为新型传感器的发展提供了物质基础，促进了传感器理论和技术的发展。当然，现代科学技术的发展对传感器技术提出了新的要求，这也促使传感器技术不断地吸取相关学科中最先进的成果，包括材料科学的成果，去发展自身。

非晶态合金是70年代发展起来的一种新型材料，它不仅具有独特的微观结构和优良的宏观性能，而且具有丰富而明显的物理效应。因此，从这种材料问世起，人们就开始了将它用于传感器技术的尝试。经过多年坚持不懈的努力，非晶态合金传感器技术取得了长足的进步，现在各种非晶态合金传感器几乎涉足了信号检测的各主要领域。

本书论述了国内外非晶态合金传感器技术与应用，分析了非

晶态合金传感器在国内外的发展趋势，提出了发展我国非晶态合金传感器技术的策略。作者力求从力学、磁学、电学和化学等方面，对非晶态合金的基本性能和敏感特性，进行系统的阐述和分析。在此基础上，提出了设计和开发非晶态合金传感器的可行方法。

本书重点论述了脉冲感应型磁场传感器、磁通门式磁场传感器、非接触式扭矩传感器和数字化仪等四类非晶态合金传感器的工作原理和典型结构。此外，还详细介绍了磁场传感器、电流传感器、位移传感器、力传感器、医用传感器以及高速无缝管材冷轧机芯棒断裂监视器等八类有实用价值的非晶态合金传感器及其应用系统。

本书内容的相当一部分取自我们近年来研究的理论、实验和应用成果。这些工作得到了国家自然科学基金委员会、上海钢铁研究所以及大冶钢厂等单位的支持、关心和帮助，在此表示由衷的感谢！

我还应着重指出赵英俊博士最近几年的研究工作。他在攻读博士和在博士后流动站工作期间，对非晶态合金传感器技术进行了系统的研究，尤其在非晶态合金磁场传感器的理论及应用方面颇有心得，并以此为基础，撰写出了这本专著。

本书的完成要感谢华中理工大学电磁测量教研室叶妙元教授的大力帮助，他热情关心和支持了本书的撰写工作，担任审稿，对全书做了仔细地审阅，提出了许多宝贵意见，并对研究工作也进行了许多指导。

本书的出版还得到了华中理工大学出版社有关同志的大力支持。作者在此表示衷心的感谢！

“嘤其鸣矣，求其友声。”由于作者水平有限，错误与不妥之处在所难免，切望读者批评指正，我们将不胜感激！

杨叔子

---

\* 中国科学院院士，华中理工大学前任校长，教授，博士生导师

# 目 录

|                              |      |
|------------------------------|------|
| 第一章 绪 论 .....                | (1)  |
| 1.1 非晶态合金与传感器 .....          | (1)  |
| 1.2 非晶态合金及其发展 .....          | (2)  |
| 1.2.1 非晶态合金 .....            | (2)  |
| 1.2.2 非晶态合金的研究与发展 .....      | (3)  |
| 1.2.3 非晶态合金的分类与制备 .....      | (4)  |
| 1.2.4 非晶态合金的应用 .....         | (7)  |
| 1.3 非晶态合金传感器技术的发展 .....      | (9)  |
| 1.3.1 非晶态合金传感器技术的研究与进展 ..... | (9)  |
| 1.3.2 非晶态合金传感器技术的发展趋势 .....  | (12) |
| 第二章 非晶态合金传感器基础 .....         | (14) |
| 2.1 非晶态合金的基本性能 .....         | (14) |
| 2.1.1 非晶态合金的力学性能 .....       | (14) |
| 2.1.2 非晶态合金的磁学性能 .....       | (19) |
| 2.1.3 非晶态合金的电学性能 .....       | (33) |
| 2.1.4 非晶态合金的化学性能 .....       | (34) |
| 2.2 非晶态合金的敏感功能 .....         | (35) |
| 2.2.1 作为敏感材料的非晶态合金 .....     | (35) |
| 2.2.2 非晶态合金的磁-机变换功能 .....    | (39) |
| 2.2.3 非晶态合金的磁-电变换功能 .....    | (48) |
| 2.2.4 非晶态合金的其它变换功能 .....     | (59) |
| 2.3 非晶态合金材料的处理 .....         | (63) |

|       |                           |      |
|-------|---------------------------|------|
| 2.3.1 | 非晶态合金结构的特点 .....          | (63) |
| 2.3.2 | 材料处理的基本方法 .....           | (68) |
| 2.3.3 | 材料处理对改善非晶态合金性能的作用 .....   | (72) |
| 2.3.4 | 材料处理对增强非晶态合金基本效应的作用 ..... | (76) |
| 2.4   | 非晶态合金传感器的设计与开发 .....      | (79) |
| 2.4.1 | 非晶态合金传感器的基本构成要素 .....     | (79) |
| 2.4.2 | 基本传感器与组合传感器 .....         | (84) |
| 2.4.3 | 传感器工作原理的选择与确定 .....       | (85) |
| 2.4.4 | 非晶态合金敏感功能的基本变换表 .....     | (89) |
| 2.4.5 | 非晶态合金传感器的一般开发过程 .....     | (90) |

### 第三章 典型非晶态合金传感器.....(93)

|       |                          |       |
|-------|--------------------------|-------|
| 3.1   | 脉冲感应型磁场传感器.....          | (93)  |
| 3.1.1 | 工作原理 .....               | (93)  |
| 3.1.2 | 基本结构 .....               | (97)  |
| 3.1.3 | 分析与设计 .....              | (104) |
| 3.1.4 | 典型性能 .....               | (109) |
| 3.2   | 磁通门式磁场传感器.....           | (112) |
| 3.2.1 | 工作原理 .....               | (112) |
| 3.2.2 | 探头结构与磁芯 .....            | (117) |
| 3.2.3 | 检测方法 .....               | (120) |
| 3.3   | 非接触式扭矩传感器 .....          | (126) |
| 3.3.1 | 基本原理 .....               | (127) |
| 3.3.2 | 结构要点 .....               | (129) |
| 3.3.3 | 形成单轴磁各向异性 $K_b$ 的方法..... | (131) |
| 3.3.4 | 检测电路及其性能 .....           | (135) |
| 3.4   | 非晶态合金数字化仪.....           | (136) |
| 3.4.1 | 平面定位原理 .....             | (137) |
| 3.4.2 | 典型结构 .....               | (142) |



|                                           |              |
|-------------------------------------------|--------------|
| 3.4.3 两种数字化仪的比较 .....                     | (146)        |
| <b>第四章 各种功能的非晶态合金传感器<br/>及其应用系统 .....</b> | <b>(147)</b> |
| 4.1 磁强计与磁场传感器 .....                       | (147)        |
| 4.1.1 非晶态合金多谐振荡器 .....                    | (147)        |
| 4.1.2 用于低温环境的多谐振荡器型磁强计 .....              | (154)        |
| 4.1.3 剪切波磁强计 .....                        | (163)        |
| 4.1.4 基于逆 Wiedemann 效应的磁场/电流传感器 .....     | (167)        |
| 4.2 电流传感器 .....                           | (170)        |
| 4.2.1 大电流传感器 .....                        | (171)        |
| 4.2.2 高频大电流传感器 .....                      | (176)        |
| 4.2.3 鼠笼电机二次电流及电磁力矩的检测 .....              | (182)        |
| 4.3 高速无缝管材冷轧机芯棒断裂监视器 .....                | (186)        |
| 4.3.1 监测原理 .....                          | (186)        |
| 4.3.2 漏磁场的形成与分布特性 .....                   | (187)        |
| 4.3.3 芯棒轴向位移传感器 .....                     | (191)        |
| 4.3.4 芯棒位置信号的处理、分析与判别 .....               | (192)        |
| 4.3.5 芯棒断裂监视器的主要技术性能 .....                | (198)        |
| 4.4 位移传感器 .....                           | (200)        |
| 4.4.1 线性差动变压器(LVDT) .....                 | (200)        |
| 4.4.2 PLCD 位移传感器 .....                    | (206)        |
| 4.4.3 基于大 Barkhausen 效应的距离传感器 .....       | (215)        |
| 4.5 磁性防盗系统 .....                          | (225)        |
| 4.5.1 基本原理 .....                          | (225)        |
| 4.5.2 非晶态合金磁性标签及检测方法 .....                | (226)        |
| 4.5.3 系统结构及应用方法 .....                     | (231)        |
| 4.6 用于汽车配电器的位置传感器 .....                   | (233)        |
| 4.7 非晶态合金力传感器 .....                       | (237)        |

|               |                   |       |
|---------------|-------------------|-------|
| 4.7.1         | 基于磁滞回线的力传感器 ..... | (237) |
| 4.7.2         | 其它几种力学量传感器 .....  | (246) |
| 4.8           | 非晶态合金医用传感器 .....  | (249) |
| 4.8.1         | 心机图传感器 .....      | (249) |
| 4.8.2         | 眼动传感器 .....       | (254) |
| 4.8.3         | 呼吸传感器 .....       | (258) |
| 4.8.4         | 癌症软热疗 .....       | (262) |
| 参 考 文 献 ..... |                   | (268) |

# 第一章 绪 论

## 1.1 非晶态合金与传感器

众所周知,传感器是各种仪器仪表和自动化设备的基础。尤其在当今以电子计算机为标志的信息社会中,传感器技术更承担着获取信息的重任。不难想象,如果失去传感器技术的支撑,任何先进的自动化设备都将成为“空中楼阁”,难有用武之地。因此,传感器技术得到了日益广泛的关注,成为当代科学技术中最为活跃的一个分支。甚至有人讲“征服了传感器,就几乎等于征服了科学技术”。这种说法,虽有失偏颇,但表明了这样两个事实:一是传感器对于促进现代科学技术发展的重要性,二是传感器的发展对现代科学技术的依赖性。

对于传感器技术的发展来讲,敏感材料是一个最重要的问题。因为在各种传感器中,敏感元件是关键,而敏感元件的基本性能又取决于相应的敏感材料。因此,每当一种新的功能材料出现,人们立刻就开始将其用于传感器技术的尝试。如半导体、形状记忆合金、非晶态合金、压电陶瓷、光导纤维、超导材料、微晶材料及新近的纳米材料,都无一例外。正是这些不断涌现的新型功能材料,为新型传感器的发展提供了物质基础,促进了传感器理论和技术的发展。

非晶态合金是70年代发展起来的一种新型材料,它具有独特的微观结构和优良的宏观性能,不仅在电力、电子、机械、化工等行业获得了广泛的应用,而且在传感器技术中的应用亦日益广泛。

传统的敏感材料大致上可以归为半导体、陶瓷和晶态金属材料

料。虽然半导体材料仍为敏感材料的主体，但是金属材料，尤其非晶态磁性合金，在许多方面表现出明显优于半导体等敏感材料的特性，因此可以借此生产出更多性能卓越的传感器来。例如，用非晶态合金制成的温度传感器具有耐辐射、低温区灵敏度高等特点，可以用来测量核火箭发动机上4.2~300K的温度。而用晶态金属或半导体制成的温度传感器在强辐射环境下，则因内部电阻变化过大，无法提供准确的测量结果。再如用非晶态合金制成的磁场传感器仅需非常简单的电子电路，即可得到优于10V/mT的灵敏度，并且信号的信噪比和传感器的热稳定性明显优于同类的半导体传感器。这样制成的传感器不仅结构简单，成本低廉，而且可靠性高。

简而言之，采用非晶态合金材料和相应的新传感原理，充分利用非晶态合金优良特性，研制各种功能的新型传感器，以满足现代科学技术对传感器技术不断增长的需求，具有极其深远的意义。正是因为如此，非晶态合金传感器技术正在成为各国科技工作者、厂商和政府有关部门的关注热点。

## 1.2 非晶态合金及其发展

### 1.2.1 非晶态合金

非晶态合金(amorphous alloy)即指经原子凝聚而成、长程无序而短程有序的合金材料。所谓“非晶态”，也是相对于晶态而言的，两者之间并没有绝对的界限。图1-1从缺陷密度上定性地说明了晶态和非晶态的相互关系。通常使用的工业材料一般含有 $10^7 \sim 10^9/\text{cm}^2$ 程度缺陷的不完全结晶状态。不含缺陷的金属为完全结晶。在结晶中最多能导入 $10^{11}/\text{cm}^2$ 的缺陷。如果在结晶中能以4个原子的间隔均匀地导入位错(约 $10^{14}/\text{cm}^2$ 以上)，则接近于非晶态结构。

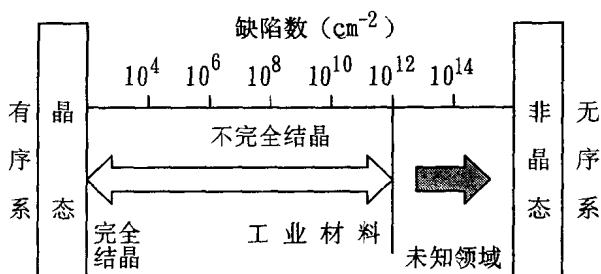


图1-1 非晶态金属与晶态金属的关系

自古以来，人们就知道玻璃是非晶态材料的典型代表，因此非晶态合金又被称为玻璃态合金(glassy alloy)或金属玻璃(metallic glass)。另一方面，由于迄今制备非晶态合金的主要工艺是快速凝固法，所以在冶金行业更多地称非晶态合金为快淬金属。

## 1.2.2 非晶态合金的研究与发展

在人类数千年的文明史中，所使用的金属一直都是晶态材料。虽然在1934年就有关于用蒸发沉积法制成非晶态合金的报道，但是直到1960年喷枪法的实现，才标志着非晶态合金的真正诞生。1969年发明的单辊快淬工艺，是非晶态合金薄带制造技术的关键性突破。它不仅为非晶态合金各种性能的深入研究提供了条件，而且为非晶态合金材料的工业化生产奠定了基础。自此以后，各种形态的非晶态合金及其制造方法层出不穷，有关非晶态合金研究、开发和应用的工作也在全世界范围内逐步展开。在这一领域进展较快的国家包括美国、日本、德国和前苏联等。

我国在此领域虽然起步较晚(1976年)，但是发展比较快。国家一直将这一领域列为科技新材料研究开发的重点，使材料、工艺装备、应用和基础研究都取得了较大的进展。

非晶态合金之所以如此受人青睐，就是因为它具有许多晶态合金无法比拟的特性。这些特性包括由结构上的特殊性决定的一般性质和由结构特殊性及其成分特殊性共同决定的特殊性质，表1-1

对此做了归纳。正是这一系列独特的优异性能，使非晶态合金作为新一代的功能材料获得了日益广泛的应用。同时这些应用又反过来促进了非晶态合金的基础研究和生产技术的发展。

表1-1 非晶态合金的特性

| 1. 一般性质(结构特殊性) | 2. 特殊性质(结构、成分特殊性)                     |
|----------------|---------------------------------------|
| ①低弹性, 高强韧性     | ①高耐腐蚀性: 钝化                            |
| ②高电阻率          | ②软磁特性: 低矫顽力, 低铁损, 高磁导率, 高磁致伸缩等等       |
| ③化学活性          | ③低温度系数: 电阻率, 弹性系数, 热膨胀系数等等            |
| ④耐辐射损伤         | ④表面活性: 触媒能, 气体吸收, 吸附能力, 化学选择性         |
| ⑤低声波衰减率        | ⑤超导特性: 低临界电流密度, 窄转变温宽, 小辐射效应, 小应力效应等等 |

### 1.2.3 非晶态合金的分类与制备

根据不同的分类标准，可以把非晶态合金分成许多不同的类别。

根据合金成分，目前在技术上得到广泛应用的非晶态合金有三类，即过渡金属-类金属(TM-M)型合金，稀土-过渡金属(RE-TM)型合金和过渡金属-过渡金属(TM-TM)型合金。

TM-M型非晶态合金主要由大约80%(原子)的Fe,Co或Ni等过渡族金属与B,C,Si等类金属元素所组成。类金属元素在此起着阻止结晶，形成非晶态的作用。这类合金在室温下，具有很好的铁磁性，是优良的软磁材料。

RE-TM型非晶态合金的合金成分变化范围比较宽，典型的稀土金属(RE)的含量为20%~80%。RE多为Gd,Tb,Ho和Dy，TM则为Fe,Co和Ni。与TM-M型非晶态合金相比，RE-TM型非晶态合金的

形态多为薄膜，晶化温度更高，可达800K左右。磁性独特，视成分不同，可软可硬。

TM-TM型非晶态合金是由后过渡族金属(Fe,Co,Ni)和前过渡族金属(Zr,Nb,…)组成的非晶态合金，如Fe-Zr合金、Co-Zr合金等等。这类合金在形成热特性和结晶行为等方面都与TM-M型非晶态合金相似。通过添加少量类金属元素(如Si,B等)，可以获得很好的软磁特性，因而极受重视。

表1-2 非晶态合金的制造方法

| 分类    | 制造方法   | 材料形状                                                                           | 典型合金                                 |
|-------|--------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 汽相法   | 真空蒸发沉积 | 极薄膜( $10\sim1000\ 10^{-7}\text{mm}$ )                                          | Fe, Ni, Mo, W 等                      |
|       | 溅射     | 薄膜 ( $100\sim1000\ 10^{-7}\text{mm}$ )                                         | Co-Zr-Nb-Mo 等                        |
|       | 电解汽相沉积 | 薄膜 ( $100\sim1000\ 10^{-7}\text{mm}$ )                                         | TiN, BN, HfC 等                       |
|       | (PVD)  |                                                                                |                                      |
|       | 化学汽相沉积 | 薄膜 ( $\sim 5\text{mm}$ )                                                       | BN, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 等 |
| 液相急冷法 | (CVD)  |                                                                                |                                      |
|       | 离心法    | 薄带、薄片                                                                          |                                      |
|       | 单辊法    | 薄带 (.05 $\sim$ .1mm $\times$<br>$\sim 100\text{mm}$ )                          | Fe-Si-B, Fe-Si-B-C 等                 |
|       | 双辊法    |                                                                                | Fe-Si-B, Fe-Si-B-C 等                 |
|       | 喷气法    | 薄带(.02 $\sim$ .1mm $\times$<br>$\sim 10\text{mm}$ )                            | Fe-Si-B, Co-Fe-Si-B-C 等              |
|       | 液体纺丝法  | 粉末 ( $\sim 500\ \phi\ \mu\text{m}$ )<br>细丝 (10 $\sim 500\ \phi\ \mu\text{m}$ ) | Fe-Si-B 等                            |
| 电解法   | 电镀法    | 薄膜 (1 $\mu\text{m} \sim 5\text{mm}$ )                                          | Fe-W-Ni-Mo 等                         |
| MA法   | 机械合金化  | 粉末 ( $\sim 200\ \mu\text{m}$ )                                                 | Co-Zr, Fe-Zr, Ni-Zr 等                |
| 烧结法   | HIP    | 烧结块                                                                            |                                      |

根据材料的形态，非晶态合金可以分成薄带、薄膜、细丝、

粉末、纤维、烧结块等等。TM-M型非晶态合金材料一般以薄带和细丝为主，RE-TM型非晶态合金则以薄膜为主。

根据材料的性能和用途，还可以将非晶态合金分成磁性材料、钎焊材料、弹性材料、增强材料等等。其中磁性非晶态合金又可以分为软磁合金和硬磁合金。在众多的非晶态合金材料中，非晶态软磁合金一直是各生产厂家研究开发的重点。

不同形态的非晶态合金是借助于不同的生产工艺制造出来的。表1-2概括了非晶态合金的主要制造方法。

在上述这些方法中，用得最多的是液相急冷法。利用不同的设备和工艺，使熔融态的合金熔液以大于或超过 $10^4 \sim 10^6 \text{K/s}$ 的速度冷却下来，即可生产出各种成分的非晶态合金薄带、细丝和粉末。图1-2和图1-3分别说明了液相急冷法生产非晶态合金薄带和非晶态合金细丝的基本过程。

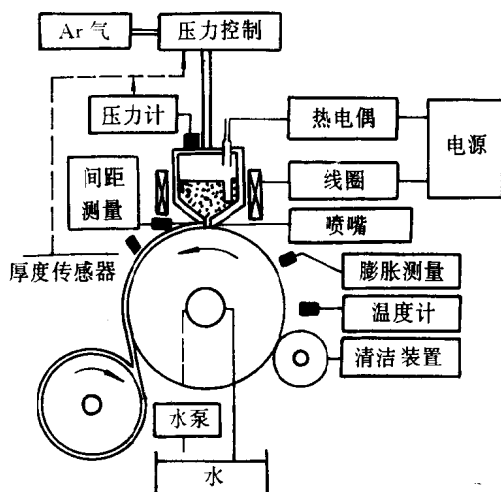


图1-2 非晶态合金薄带的基本生产过程



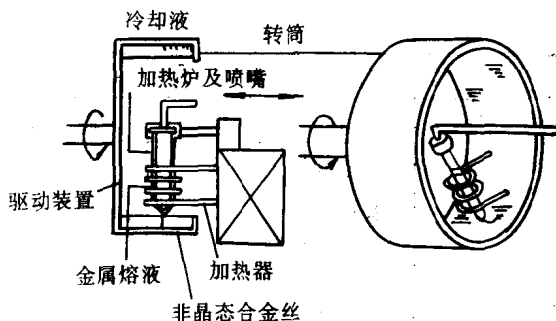


图1-3 非晶态合金细丝的基本生产过程

### 1.2.4 非晶态合金的应用

虽然最初研制非晶态合金是为了在冶金学上探求提高组成合金各组元之间的溶解度的问题，但是随着人们对非晶态合金性能了解的加深和非晶态合金生产工艺的成熟与完善，尤其制备非晶态合金长薄带急冷法的发明，使非晶态合金在各生产领域获得了日益广泛的应用。表1-3以非晶态合金的性质为线索，对其应用情况进行了概括。

表1-3 非晶态合金的应用范围

| 材料性质 |         | 应用范围         |             |
|------|---------|--------------|-------------|
| 类型   | 特性      | 用途           | 典型产品        |
| 磁学性质 | 高磁通密度   | 高磁通密度材料      | 电力变压器，高频变压器 |
|      | 低损耗     | (Fe, Ni基)    | 磁头，开关电源     |
|      | 高磁导率    | 高磁导率材料(Co基)  | 磁致伸缩式数字化仪   |
|      | 高磁致伸缩   | 高磁致伸缩材料(Fe基) | 各种传感器(温敏、   |
|      | 低磁通密度   | 低磁通密度材料(Ni基) | 压敏、方位等)，可调  |
|      | 低磁致伸缩   |              | 电感，磁光存储器等等  |
|      | 垂直磁各向异性 | 磁记录材料        |             |