

金属纤维多孔材料 孔结构及性能

Porous Metal Fiber Materials
Pore Structure & Performance

■ 汤慧萍 王建忠 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

金属纤维多孔材料

孔结构及性能

汤慧萍 王建忠 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2016

内 容 提 要

本书介绍了金属纤维多孔材料的孔结构表征、控制及其与性能的关系；阐述了高温烧结过程中金属纤维的再结晶及晶粒异常长大机制，深入探讨了金属纤维多孔材料的烧结行为；采用同步辐射 X 射线层析表征技术，实现了金属纤维多孔材料的三维空间结构的重建和烧结结点的提取，解决了空间形状复杂的金属纤维多孔材料的表征和烧结颈的特征尺寸难以测量的难题；建立了考虑纤维夹角的烧结几何模型和不同工艺下的烧结图，揭示了烧结过程中烧结结点的形成与长大机制和孔结构的演化规律；实现了烧结结点、孔隙、纤维骨架的协同控制；建立了金属纤维多孔材料的力学性能、声学性能与孔结构之间的关系；为金属纤维多孔材料的制备和应用提供了重要的理论支持和实践指导。

本书可供从事金属多孔材料研发的工程技术人员阅读，也可供高等院校金属材料专业本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属纤维多孔材料：孔结构及性能/汤慧萍，王建忠著. —北京：冶金工业出版社，2016. 10

ISBN 978-7-5024-7370-9

I. ①金… II. ①汤… ②王… III. ①金属纤维—多孔性材料
IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 246702 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 唐晶晶 张熙莹 美术编辑 吕欣童 版式设计 彭子赫

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7370-9

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；固安华明印业有限公司印刷

2016 年 10 月第 1 版，2016 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm；15.5 印张；300 千字；235 页

78.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

序

金属纤维多孔材料是一种特殊的结构功能材料，在航空航天、节能环保、石油化工等领域中发挥着重要作用。孔结构表征、控制及其与性能的关系是金属纤维多孔材料重要的研究课题，深入探讨孔结构的演化规律，揭示微米级金属纤维烧结过程中纤维的再结晶与晶粒长大、结点的形成与长大机制，对促进金属纤维多孔材料的技术进步与规模应用具有重要意义。

西北有色金属研究院是我国金属多孔材料的主要发源地，也是金属多孔材料国家重点实验室的依托单位。作为该重点实验室学术委员会主任，我对过去五年来实验室在金属纤维多孔材料方向的发展一直保持高度关注。金属纤维多孔材料孔结构制备、表征和控制及其与材料力学和声学性能的关系在国内外尚无系统的研究和学术专著，但它本身具有重要的科学研究及工业应用价值。我很欣慰地看到，在国家自然科学基金的支持下，汤慧萍教授的团队在金属纤维多孔材料研究方面取得了多项开创性的成果：

(1) 在烧结机理方面，发现烧结结点的形成在正常的加热和冷却条件下，主要通过表面扩散机制来实现；采用快速升降温条件时，主要通过位错扩散机制完成。值得一提的是，这些机理是建立在采用同步辐射 X 射线层析表征技术、三维重构技术及准确提取烧结结点尺寸的实验基础上的。

(2) 在力学性能方面，发现金属纤维多孔材料的拉伸强度、压缩强度及弹性模量与相对密度之间为线性关系，不同于金属泡沫材料广为认可的指数关系，体现出金属纤维多孔材料独有的本构关系。

(3) 在声学性能方面，开发出了梯度孔结构金属纤维多孔材料，

表现出优异的吸声性能，在中高频范围内吸声系数保持在 0.8 以上，其低频吸声系数也超过了 0.2。这种梯度孔超薄材料（2mm）已经在受限空间的吸声降噪中得到应用。

《金属纤维多孔材料 孔结构及性能》一书的出版，不仅丰富了金属纤维多孔材料制备的基础原理，而且提供了多方面的实践指导，对从事金属多孔材料研究与开发的科技工作者具有重要的参考价值。

黄伯云

2016 年 9 月

前 言

金属纤维多孔材料是一类重要的结构功能一体化材料,除具有孔形稳定、可加工、可焊接等优点外,还兼具容尘量大、可折叠、孔结构可控等优点,可广泛应用于能源、环保、化工、冶金等行业的过滤分离、阻尼缓冲、吸声降噪、电磁屏蔽、高效燃烧和强化换热等领域。

经过三十多年的发展,金属纤维多孔材料已经实现了工业化生产,在聚酯熔体过滤、高温气体净化等方面得到了规模应用。近年来,金属纤维多孔材料的应用领域不断拓宽,特别是在能量吸收、吸声降噪、表面燃烧等方面,有别于其他多孔材料,表现出巨大的潜力。

由孔隙、纤维骨架和烧结结点组成的孔结构是金属纤维多孔材料结构功能一体化的基础,是决定纤维多孔材料各项性能的关键因素。金属纤维多孔材料孔结构的形成与制备过程中的成形、烧结密切相关,特别是烧结过程。气流铺毡技术成形的金属纤维毛毡,因搭桥现象严重造成纤维之间的真实接触机会大幅度减小,导致金属纤维的烧结十分困难。此外,金属纤维在制备过程中经历了大变形,其内部出现了互相缠结的高密度位错,使得高温烧结过程中纤维骨架晶粒极易发生再结晶和晶粒异常长大,导致晶粒粗化甚至呈竹节状分布,致使纤维多孔材料的耐腐蚀性能和力学性能严重恶化。目前,有关烧结结点形成与长大机制及纤维骨架的晶粒尺寸和形貌控制等方面的研究鲜见报道,一定程度上制约了高性能金属纤维多孔材料的制备及其在工业生产中的规模应用。

本书共分7章,系统总结了研究团队近五年来在金属纤维多孔材料的孔结构表征、控制及孔结构与性能之间关系的最新研究成果。第1章简要介绍了国内外金属纤维及纤维多孔材料的发展现状及应用领域;第2章论述了金属纤维多孔材料的孔结构特性、孔结构参数提取及表征方法;第3章研究了金属纤维再结晶动力学、再结晶晶界结构与织构的演化规律;第4章建立了金属纤维多孔材料烧结颈颈长方程,绘

制了金属纤维烧结图,讨论了烧结结点形成机制及再结晶与烧结结点的协同控制;第5章论述了关于金属纤维多孔材料的拉伸、压缩和剪切性能,并建立了金属纤维多孔材料力学性能与相对密度的本构关系;第6章侧重于金属纤维多孔材料孔结构三要素对吸声性能的影响规律、梯度孔结构纤维多孔材料及超薄复合结构的声学性能;第7章运用数值模拟技术研究了金属纤维多孔材料成形及烧结结点长大过程。

本书由西北有色金属研究院金属多孔材料国家重点实验室汤慧萍和王建忠主持编写。汤慧萍、王建忠撰写了第1章、第2章及第4~6章;李爱君参与撰写了第4章;马军参与撰写了第4章和第5章;敖庆波参与撰写了第5章和第6章;中南大学王岩和刘咏撰写了第3章;中南大学郑洲顺和西安交通大学南文光撰写了第7章。在撰写过程中,学生邸小波、鲍腾飞、刘怀礼、张学哲、李超龙、于海欧、赵秀云、王建永、乔吉超在试样制备、性能测试、数据整理等方面付出了辛勤劳动,在此向他们表示衷心的感谢!

澳大利亚皇家墨尔本理工大学马前教授,中南大学刘咏教授、曹顺华教授,北京理工大学周萧明教授,西北有色金属研究院王建高工等对本书进行了审稿,为本书撰写提出了宝贵建议和修改意见,特此致谢!

本书所涉及的研究工作得到了国家自然科学基金项目的支持(项目编号:51074130,51134003),在此谨表谢忱!

同时感谢上海同步辐射光源多次安排SR-CT实验,为我们对烧结结点的准确提取和尺寸测量提供了条件。

希望本书的出版能对从事金属多孔材料工作的同行们和后来者开拓新思路、研发新产品有所帮助,对促进金属纤维多孔材料在我国高速发展的工业过程中的应用有所裨益。金属纤维多孔材料的制备及应用涉及多方面知识,恳请读者和同行们指出书中的不足和疏漏,在此表示感谢!

汤慧萍

2016年8月

于西安西北有色金属研究院

目 录

1 绪论	1
1.1 金属纤维概述	1
1.2 国外金属纤维及纤维多孔材料的发展现状	2
1.3 我国金属纤维及纤维多孔材料的发展现状	3
1.4 金属纤维多孔材料的制备方法	4
1.5 金属纤维多孔材料的应用领域	6
1.5.1 过滤与分离领域	6
1.5.2 吸声降噪领域	7
1.5.3 阻尼减振领域	7
1.5.4 高效换热领域	8
1.5.5 电磁屏蔽领域	9
1.5.6 表面燃烧领域	11
1.5.7 其他应用领域	12
参考文献	13
2 金属纤维多孔材料的孔结构及表征	16
2.1 孔结构组成及特征	16
2.1.1 孔隙	16
2.1.2 纤维骨架	23
2.1.3 烧结结点	26
2.2 孔结构分形表征	27
2.2.1 分形理论简介及应用	27
2.2.2 孔形貌特征参量的建立与计算	30
2.2.3 分形软件设计与开发	31
2.2.4 孔形貌分形维数的影响因素	34
2.2.5 材料性能与孔形貌分形维数的关系	42
2.3 孔结构 X 射线层析表征	45
2.3.1 同步辐射简介	45
2.3.2 烧结结点提取及尺寸测量	47

参考文献	50
3 金属纤维的再结晶	53
3.1 再结晶理论及基本研究方法	53
3.1.1 再结晶基础理论	53
3.1.2 电子背散射衍射 (EBSD) 方法及应用	58
3.2 金属纤维再结晶动力学	60
3.2.1 拉拔态金属纤维的微观组织及相成分	60
3.2.2 不同丝径金属纤维再结晶形核动力学	62
3.2.3 不同丝径金属纤维再结晶晶粒生长动力学	67
3.3 金属纤维再结晶晶界结构与织构演化	76
3.3.1 拉拔态金属纤维的晶界结构与织构	76
3.3.2 不同丝径金属纤维再结晶晶界结构演化	79
3.3.3 不同丝径金属纤维再结晶织构演化	85
3.3.4 表面与织构对金属纤维晶粒异常生长的影响	88
参考文献	89
4 金属纤维多孔材料的烧结	91
4.1 粉末固相烧结理论及基本研究方法	91
4.2 金属纤维烧结的几何模型	94
4.3 不同扩散机制作用下的烧结颈颈长方程	97
4.3.1 基于体积扩散机制的烧结颈颈长方程	97
4.3.2 基于表面扩散机制的烧结颈颈长方程	98
4.3.3 基于晶界扩散机制的烧结颈颈长方程	99
4.3.4 基于 Nabarro-Herring 体积扩散蠕变机制的烧结颈颈长方程	100
4.3.5 基于塑性流动机制的烧结颈颈长方程	102
4.4 金属纤维的烧结图	102
4.4.1 不锈钢纤维烧结图的建立及验证	102
4.4.2 铜纤维烧结图的建立及验证	107
4.5 快速升降温烧结结点的形成机制	112
4.5.1 快速升降温烧结技术	112
4.5.2 快速升降温烧结 316L 不锈钢纤维烧结图的建立	113
4.5.3 快速升降温烧结 316L 不锈钢纤维烧结图的验证	116
4.5.4 纤维骨架晶粒尺寸与烧结结点的协同控制	123
参考文献	130

5 金属纤维及纤维多孔材料的力学性能	132
5.1 金属纤维的拉伸性能	132
5.1.1 拉拔态金属纤维的拉伸性能	132
5.1.2 烧结温度下处理后的金属纤维的拉伸性能	134
5.2 金属纤维多孔材料的力学性能	140
5.2.1 拉伸性能	140
5.2.2 压缩性能	149
5.2.3 剪切性能	157
5.3 金属纤维多孔材料的力学性能与相对密度的本构关系	162
5.3.1 拉伸性能与相对密度的本构关系	162
5.3.2 压缩性能与相对密度的本构关系	164
参考文献	167
6 金属纤维多孔材料的声学性能	170
6.1 吸声机理	171
6.2 声学性能检测设备	172
6.2.1 检测设备	172
6.2.2 吸声系数计算公式	172
6.3 孔结构特性对材料吸声性能的影响	173
6.3.1 孔隙率的影响	173
6.3.2 纤维直径的影响	175
6.3.3 结点数量的影响	177
6.4 梯度孔结构金属纤维多孔材料的吸声性能	178
6.4.1 孔隙率梯度结构金属纤维多孔材料的吸声性能	178
6.4.2 纤维丝径梯度结构金属纤维多孔材料的吸声性能	181
6.5 受限空间用金属纤维复合结构的声学性能	183
6.5.1 穿孔板的工作原理	183
6.5.2 复合结构的设计与制备	184
6.5.3 复合结构的吸声性能	186
6.5.4 金属纤维多孔材料与致密板复合结构的隔声性能	190
6.6 其他结构参数对金属纤维多孔材料吸声性能的影响	191
6.6.1 材料厚度的影响	191
6.6.2 材料背后空腔的影响	192
6.6.3 纤维材质的影响	192
6.6.4 使用环境的影响	193

参考文献	195
7 金属纤维多孔材料制备过程数值模拟	197
7.1 金属纤维多孔材料成形过程数值模拟	197
7.1.1 刚性纤维沉降和流化过程	198
7.1.2 柔性纤维动力学模型	209
7.2 烧结结点形成过程数值模拟	215
7.2.1 基于表面扩散机制的结点形成过程数值模拟	215
7.2.2 基于晶界扩散机制的结点形成过程数值模拟	227
7.2.3 多种扩散机制综合作用下的结点形成过程数值模拟	230
参考文献	232

1 绪 论

金属纤维多孔材料是近年来受到国内外广泛关注的一种结构功能一体化材料，除具有金属多孔材料特有的孔形稳定、可加工、可焊接等优点外，还兼具容尘量大、可折叠、孔结构可控等一系列优点，广泛应用于过滤分离、阻尼减振、吸声降噪、电磁屏蔽、高效燃烧和强化换热等领域。由孔隙、结点和纤维骨架三要素构成的孔结构是金属纤维多孔材料结构功能一体化与多样化的基础，然而目前有关金属纤维多孔材料孔结构的基础理论研究还比较薄弱，孔隙的均匀性、结点的强度与分布状态，以及纤维骨架的微观组织与晶粒尺寸还得不到有效控制，一定程度上制约了金属纤维多孔材料服役性能的提高和现代工业中的规模应用。

1.1 金属纤维概述

制备金属纤维多孔材料的原料是直径为几微米至几百微米的金属纤维。1936年，一份美国专利报道了用集束拉丝法生产金属纤维^[1]，经过 30 多年的时间，利用此法生产的微米级纤维才达到商业应用程度。目前，世界上只有比利时、美国、日本、中国等少数国家可以生产金属纤维^[2]。

表 1-1 列出了金属纤维的制备方法特点，其中主要方法有 3 类^[2~5]：拉拔法（单丝拉拔法和集束拉拔法）、熔融纺丝法和切削法。后两种工艺生产成本低，制备的金属纤维直径一般在 20 μm 以上，纤维不连续且直径不均匀，主要应用于一些要求不高的领域；单丝拉拔法采用多模连续拉拔，纤维丝径均匀、连续性好、表面光滑、尺寸精确，但工序繁琐，生产周期长、成本高，生产的纤维直径通常在 10 μm 以上，主要用于某些特殊领域（如高精度筛网等）；集束拉拔法解决了熔融纺丝法和切削法丝径不均匀且不连续的问题，并克服了单丝拉拔法生产成本低等特点，生产效率大大提高，加速了金属纤维的商业化发展及应用。

表 1-1 金属纤维的制备方法与特点^[3~5]

序号	制备方法	纤维特点
1	单丝拉拔法	丝径大于 12 μm ，连续，横截面呈圆形，表面光滑，尺寸精确
2	集束拉拔法	丝径为 1 ~ 25 μm ，连续，横截面呈多边形，表面出现条纹沟槽
3	熔融纺丝法	丝径为 25 ~ 250 μm ，连续，横截面呈圆形

续表 1-1

序号	制备方法	纤维特点
4	振动切削法	丝径为 20~150 μm ，长度为 0.05~2cm，横截面呈三角形或菱形，表面粗糙
5	刮削法	丝径为 20~100 μm ，横截面呈三角形或正方形
6	碳基分解法	丝径大于 0.1 μm ，长径比为 20~1000
7	剔削法	丝径大于 8 μm ，短连续，横截面通常为三角形
8	坩埚熔融牵引法	丝径大于 25 μm ，连续或长度可控；小直径的基本为圆形，大直径的为心月形
9	填隙法	丝径为 0.01~0.3 μm ，长径比为 10~15
10	原位形变—萃取法	纤维的平均厚度小于 0.3 μm ，平均宽度约为 0.8 μm ，纤维骨架的晶粒宽度在 100~150nm 之间

目前，制备的金属纤维主要有不锈钢纤维、Inconel 合金（Inconel 601、Inconel 625）纤维、FeCrAl 合金纤维、哈氏合金纤维、Ti 纤维、Cu 纤维、Ni 纤维、W 纤维、Mo 纤维和 Al 纤维等。316L 不锈钢纤维主要用于低于 300℃并需耐碱溶液、有机酸和正常大气压下的氯化物腐蚀的环境；Inconel 601 纤维用于 500℃以下的氧化物气氛及比 316L 不锈钢纤维能耐更强酸腐蚀的环境；哈氏合金纤维主要用于比 316L 不锈钢纤维更耐矿物酸腐蚀的环境；FeCrAl 合金纤维主要用于耐高温环境；Ti 纤维主要用于耐氯化物、海水和硫酸腐蚀的环境；Cu 纤维主要用于高导电环境；青铜纤维适于制作自润滑轴承；Ni 纤维主要用于电池材料；钨、铁、钢、铝的纤维适于做不同用途的纤维增强复合材料，而且铝纤维还可用于制作吸声板^[3,5]。

1.2 国外金属纤维及纤维多孔材料的发展现状

世界上最早研制金属纤维及纤维多孔材料的企业是美国 Memtec 公司，它可以生产多种牌号的不锈钢纤维和一些合金纤维。美国的 GAMMA 公司和 3M 公司都曾致力于金属纤维的生产和研究，产品以 316L 不锈钢纤维为主^[3]。美国 GAF 公司采用碳基分解法制备出了 $\phi 0.1\mu\text{m}$ 、长径比为 1000 的铁纤维。日本 Mitsubishi Materials Corp. 采用填隙法制备出用于电磁屏蔽的细金属纤维。日本精线株式会社开发出了 316L 和 304 不锈钢纤维。德国 Fraunhofer IFAM 研究所采用熔抽法制备出了金纤维、FeCrAl 纤维和 Ni_3Al 纤维^[6,7]。

在成功制备出金属纤维的基础上，金属纤维多孔材料也得到了快速发展。1964 年，Garrett 公司开发出金属纤维毡阶梯迷宫式密封件。1969 年，Pratt & Whitney 飞机集团正式采用由 $\phi 8\mu\text{m}$ 镍基合金和钴基合金纤维制成的金属纤维毡

密封件叶片和内锐边密封材料,其孔隙率达到 80%、抗拉强度达到 6.7~13.4MPa 便可满足要求,工作温度可达 600℃。1979 年, Wright-Patterson 的空气动力学材料实验室开发出 Brunsloy 金属纤维密封件,其工作温度达到 800℃,适用于低温涡轮^[5]。20 世纪 70 年代,比利时 Bekaert 公司从美国引进了金属纤维及纤维毡的制备技术和装备,开始批量生产不锈钢纤维,产品质量超过了美国,并占领了世界上不锈钢纤维及纤维多孔材料市场 70% 的份额,成为最大的供应商。Bekaert 公司不断致力于研究更尖端的加工技术,现在可生产的金属纤维直径最细可达 1.0 μm ,所制备的金属纤维及纤维多孔材料已在过滤(气体、燃油及润滑油、食品及饮料、高分子、医药等)、吸声降噪、燃烧器、纺织品、建筑等领域得到了广泛应用^[8~10]。德国 Fraunhofer IFAM 研究所于 2015 年采用原位结晶法在烧结铝合金纤维多孔材料表面附着硅铝磷酸盐(SAPO-34),制备出了一种新型复合材料^[11]。

国际上针对金属纤维多孔材料结构功能一体化的研究也取得了一些重要成果。瑞典 Volvo 公司^[12]采用两层薄不锈钢板,中间用环氧树脂粘接不锈钢纤维开发出了一种夹芯结构的超轻不锈钢板材(hybrid stainless steel assembly, HSSA),它比铝更轻、刚性更好,并兼具隔音和防振特性。Volvo 公司预见,采用 HSSA 部件制造的汽车将比传统的汽车减重 50%~70%。HSSA 还可作为一种单片防火墙板,保护乘客不受发动机舱热量的影响。英国剑桥大学和美国麻省理工学院先后开发了两种夹芯板:CAMBOSS(Cambridge bonded steel sheets)和 CAMBRASS(Cambridge brazed steel sheets),前者采用黏结法,后者采用钎焊法使金属纤维与致密面板结合。德国 Fraunhofer IFAM 研究所将丝径为 154 μm 的 Al89Cu6Zn5 合金纤维和 2mm 厚的纯铝板通过低温瞬时液相烧结技术制备出了铝合金纤维三明治结构,实现了金属纤维与致密金属板的冶金结合^[13]。

1.3 我国金属纤维及纤维多孔材料的发展现状

我国对金属纤维及纤维多孔材料的研究始于 1979 年,起因是当时我国石化、冶金、纺织及航空部门大量引进的国外先进设备中需使用不锈钢纤维多孔材料作为过滤元件,但由于技术、原辅材料等问题,我国生产的不锈钢纤维的质量达不到国外同类产品水平。此后十几年间我国的金属纤维多孔材料产品经历了从进口原料到原料国产化及成品出口的过程。

目前,国内主要有西北有色金属研究院、长沙矿冶研究院有限责任公司等几家单位研究和生产金属纤维。西北有色金属研究院于 1998 年实现了金属纤维的产业化,建成了国内最大的金属纤维及纤维多孔材料科研、生产和检测基地,并于 2002 年顺利通过国家重点工业性试验项目“金属纤维及其制品”的验收,标

志着我国在金属纤维及纤维多孔材料领域的研究及产业化方面已走到了世界前列，并打破了国外公司的长期垄断，使我国成为继美国、日本和比利时后能够规模生产金属纤维烧结毡的国家^[14]。开发的金属纤维包括不锈钢纤维、铁铬铝纤维、镍纤维、哈氏合金纤维，纤维直径为 2~40 μm ，已被广泛应用于纺织、过滤、冶金和造纸等领域，涵盖了工业、民用、军事的各个方面。还开发了多层金属烧结网及过滤元件（金属纤维波折滤芯、金属纤维滤袋、多层烧结网滤芯、多层烧结网滤盘）等。除此之外，西北有色金属研究院还进行了标准化研究工作，制定了《烧结不锈钢纤维毡》（YS/T 453—2002）和《不锈钢纤维烧结滤毡》（GB/T 20100—2006）标准。长沙矿冶研究院有限责任公司开发的金属纤维及其制品主要包括不锈钢纤维、铁铬铝纤维、金属纤维混纺纱线及纯金属纤维织物、导电塑料母粒、金属纤维燃烧器、烧结滤毡等。

近年来，华南理工大学机械制造及自动化研究所采用大刃倾角多齿状新型刀具同时切出多条金属长纤维，并以此切削纤维为原料利用烧结工艺制成了一种新型高孔隙率、大孔径的金属纤维烧结板，由于该烧结板具有三维网状孔隙结构和大比表面积的结构特征，已作为催化剂载体板应用于甲醇制氢微反应器^[15,16]。

1.4 金属纤维多孔材料的制备方法

已经商业化的金属纤维多孔材料（以集束拉拔法制备的纤维为原料）的制备工艺流程如图 1-1 所示。



图 1-1 金属纤维多孔材料的制备工艺流程

（1）牵切。集束拉拔法制备的金属纤维呈长绒束状，每束 1000~14000 根，长 1000~5000m，这样的纤维不适于直接铺毡，需要对其进行牵切处理。牵切处理是利用牵切机将金属纤维束牵切成具有一定长径比的短纤维的过程，主要通过调节牵切机的罗拉中心距、罗拉加压及牵伸速度来实现。牵切后的纤维长度通常为几毫米到几十毫米。牵切后的短纤维需要进行开松（开松是把大的纤维团块扯松成小块、小纤维束的过程），以备成形时用。

（2）成形。成形是制备金属纤维多孔材料的关键工序之一。目前，金属纤维毛毡的成形方法主要包括气流法、湿法和织造法^[3,17~19]。

1) 气流法。气流法是目前规模化制备金属纤维毛毡的主要方法。该法利用空气动力学原理，依靠气体的流场将开松后的毫米级短纤维进行分散、悬浮、均匀沉降在连续运动的成网帘（或尘笼）上形成具有多孔结构的毛坯，毛坯质量对金属纤维烧结毡孔结构的均匀性具有直接的遗传效应。要获得孔结构均匀性好

的纤网，喂料必须均匀，并且要保证纤维在气流中分布合理，且选择合适的气流速度和流体流向。目前，国内主要采用兰多（Rando）气流成网机制备金属纤维毛毡。

2) 湿法。湿法是借鉴造纸法而产生的。最初是采用纺纱废料（短纤及废丝）来加工生产一种特殊纸张，但是随着产品开发的不断深入，湿法也可用于制备金属纤维毛毡，其制备工艺流程如图 1-2 所示。



图 1-2 制备金属纤维毛毡的湿法工艺流程

湿法是目前生产金属纤维毛毡的另一种常用方法，其优点是生产速度快、加工成本低、各向同性效果好，纤网均匀度优于干法；其不足之处是产品品种变化灵活性小，生产过程耗水量大，难以实现批量连续生产。

3) 织造法。织造法是将经、纬纱线按照某种规律相互交织或编织而成机织物（简称织物）的方法。沿织物长度方向排列的纱线称为经纱，沿织物宽度方向排列的纱线称为纬纱。牵切后的短金属纤维需经过开松与除杂、粗梳、精梳、合并与牵伸、加捻与卷绕工序制备成适于织造的纱线。

织前准备工程的工艺流程应根据构成织物的原料和织物品种而定，一般要经过络筒、整经、浆纱、穿结经工序。

织物在织机上的形成过程是由以下几个工艺程序和机构来完成的：

- ① 按照经纬纱交织规律，把经纱分成上下两片，形成梭口的开口机构。
- ② 把纬纱引入梭口的引纬机构。
- ③ 把引入梭口的纬纱推向织口的打纬机构。
- ④ 把织物引离织物形成区的卷取机构。
- ⑤ 把经纱从织轴上放出输入工作区的送经机构。

织造法生产的织物类型主要包括斜纹织物、缎纹织物和平纹织物。

(3) 叠制。无论采用气流法还是湿法制备的金属纤维毛毡，其厚度通常为 1.5~2.0mm，大于该厚度的纤维多孔材料或为了获得具有设计孔隙率或孔结构的纤维多孔材料，通常需要将纤维毛毡进行多层叠制后烧结而成。目前主要采用手工铺制的方法进行叠制。

(4) 烧结。烧结也是制备金属纤维多孔材料的关键工序之一。目前，烧结技术主要包括固相烧结技术和液相烧结技术。固相烧结技术主要指随炉升降温烧结技术，它是目前制备金属纤维多孔材料最常用的烧结技术。首先将具有一定形状和尺寸的金属纤维毛毡在室温下置于真空或气氛保护烧结炉中，然后以 5~20℃/min 的加热速度升温到设定的烧结温度，保温一定时间后随炉冷却到室温。

的烧结过程。

(5) 平整。利用辊压机对烧结毡（金属纤维多孔材料）表面进行平整，以备后续使用。

1.5 金属纤维多孔材料的应用领域

与其他多孔材料相比，金属纤维多孔材料以其具有良好的导电性、导热性、耐高温、耐腐蚀以及强度高、弹性模量可调等优点，在过滤与分离、吸声降噪、阻尼减振、高效换热、电磁屏蔽和表面燃烧等领域具有广阔的应用前景。

1.5.1 过滤与分离领域

金属纤维多孔材料具有渗透性能好、可折叠、可再生、寿命长、高纳污量等特点，是适于高温、高压及腐蚀环境中使用的新一代高效过滤材料，广泛应用于高分子聚合物过滤、化工与医药行业过滤、食品与饮料过滤、气体过滤、污水处理、热凝结水过滤、油墨过滤、高温气体除尘、炼油过程的过滤、粘胶过滤、超滤器的预过滤、真空泵保护过滤器、飞行器燃油过滤、液压系统过滤等^[20,21]。

目前，用于制备过滤材料的金属纤维毡主要有不锈钢纤维毡、FeCrAl 纤维毡、镍纤维毡、Inconel 合金纤维毡和哈氏合金纤维毡。西北有色金属研究院采用 FeCrAl 纤维毡制备的机动车尾气净化器可有效解决陶瓷载体热容量大、热导率低、机械强度相对低的不足，还可以解决蜂窝金属载体制备工艺复杂的难题^[22,23]。同时，金属纤维载体还可以达到欧Ⅳ标准对汽车尾气中颗粒含量排放要求。采用 FeCrAl 纤维毡的柴油发动机尾气净化器体积与普通的消声器相近，采用装配式结构，安装与维修都较为简便，适合城市车辆，特别是城市公交车辆的改造和改装。此外，安装柴油发动机尾气微粒捕集器后，还可同时降低柴油机的排气噪声。目前已被欧洲汽车厂商批量使用^[24]。另外，金属纤维毡制成的过滤器可在烟气温度达 500℃ 以上的环境中长期工作，经该过滤器处理过的烟气完全满足国家规定的大气污染物排放标准^[25]。

图 1-3 所示是西北有色金属研究院制备的用于冶金、石化、水泥、多晶硅等行业高温烟气除尘的金属纤维毡过滤元件，其过滤精度为 3μm。



图 1-3 金属纤维毡过滤元件
(过滤精度为 3μm)