



2004 CHINA MATERIALS
BEIJING • CHINA

粉末冶金专业论坛暨中日注射成形交流会 Powder Metallurgy 文集

Sept. 23–24, 2004

主办单位/Organizers

北京新材料发展中心

Beijing Advanced Materials Development Center

上海新材料协会

Shanghai Society for Advanced Materials

国家新材料产业发展战略咨询委员会

National New Materials Strategical Consulting Committee

承办单位

中国金属学会粉末冶金分会

安泰科技 AT&M

北京科技大学

协办单位

中国钢结构协会粉末冶金协会

中国通用机械零部件工业协会粉末冶金协会

日本粉体粉末冶金协会MIM委员会

www.materials.net.cn
www.materials-expo.com

专业论坛 - "粉末冶金专业论坛暨中 日注射成形交流会" 会议日程 2004 年 9 月 23 日 - 24 日

时间 Date	演讲题目 Speeches Themes	演讲人 Speaker
9 月 23 日上午 8:30 - 8:40 执行主席曲选辉教授致词 8:30 AM - 8:40 AM Sep. 23 Opening speeches: Prof. Qu Xuanhui		
9 月 23 日上午 8:40 - 10:00 主持人: 方玉诚 Hideshi Miur 8:30 AM - 10:00 AM Sep. 23 Presider: 方玉诚 Hideshi Miur		
8:40 - 9:05	粉末冶金产业化的重要技术方向 Major Technologies of PM Industrialization	中国金属学会粉末冶金分会理事长 - 曹勇家 Prof. Cao Yongjia- President, PM committee of Chinese Society of Metals
9:05 - 9:30	雾化法制取金属及合金粉末技术现状与发展 The Present State and Development of Atomized Metal & Alloy Powders Technologies	中国钢协粉冶协会秘书长 - 葛立强 Prof. Ge Liqiang Secretary, PM Association of China Steel Construction Society
9:30 - 10:00	汽车用粉末冶金零部件的发展与前景 The Development and Present of PM Automobile Components	中国机协粉末冶金分会顾问 - 韩凤麟 Prof. Han Fenglin Consultant, PM Association of China Machine General Parts Industry Society
10:00 - 10:20 茶歇 10:00 AM - 10:20 AM Sep. 23 2004 Tea Break		
9 月 23 日上午 10:20 - 12:00 主持人: 曲选辉 Yashimistu Konkawa 10:20 AM - 12:00 AM Sep. 23 Presider: 曲选辉 Yashimistu Konkawa		
10:20 - 10:45	中国金属粉末注射成形技术研究与工业展望 The Research and Industrialization View of MIM in China	北京科技大学材料学院副院长、长江学者 - 曲选辉 Prof. Qu Xuanhui Beijing Science & Technology University
10:45 - 11:10	注射成形工件尺寸的稳定性	Dimensional Stabilization of PIM Components 台湾大学教授 - 黄坤祥 Prof. Huang Kunxiang-Taiwan University

时间 Date	演讲题目 Speeches Themes	演讲人 Speaker
11:10 - 11:35	日本粉末注射成形 (PIM) 工业的现状 The Present State of Japanese PIM Industry	日本粉体粉末冶金协会 MIM 委员会委员长 - 寺内俊太郎
11:35 - 12:00	注射成形工艺制造的 SUS630 不锈钢的烧结 Sintering Properties of Stainless Steel SUS630 by Injection Moulding	Dr. Anchalee Manonukul National Metal and Materials Technology Center (Thailand)
12:00 AM - 13:30 PM 午餐 12:00 AM - 13:30 PM Sep. 23 Lunch		
9 月 23 日下午 1:30 - 3:10 主持人: 黄坤祥 贾成厂 Hideki - Kyogoku 1:30 PM - 3:10 PM Sep. 23 Presider: 黄坤祥 贾成厂 Hideki - Kyogoku		
1:30 - 1:55	金属注射成形生产的高性能烧结材料 Fabrication of High Performance Sintered Materials Through PIM	Professor Dr. Hideshi Miura Dept. of Intelligent Machinery & Systems Faculty of engineering Kyushu University
1:55 - 2:20	亚洲 MIM 技术的现状/The Present State of MIM Technology in Asia	Dr. Yoshimitsu Kankawa Mouldresearch Co., Ltd.
2:20 - 2:45	水雾化预合金粉 Fe-2% Ni 的烧结性能 Sintering Properties of Pre-alloy 2% Ni - Fe Water Atomized Powder	Hisataka Toyoshima ATMIX Corp.
2:45 - 3:10	金属注射成形金属间化合物 TiAl 的生产进展 Development for Production Technology of TiAl Intermetallic Compound By Metal Powder Injection Molding	Professor of Engineering Dr. Takashi Sugimoto Kansai University ORDISI
3:10 - 3:30 茶歇 3:10 PM - 3:30 PM Sep. 23 2 Tea Break		
9 月 23 日下午 3:30 - 4:45 主持人: 韩凤麟 Takoshi Sugimoto 3:30 PM - 4:45 PM Sep. 23 Presider: 韩凤麟 Takoshi Sugimoto		
3:30 - 3:55	精细金属注射成形产品质量的改进 Quality Improvement of the Micro Metal Injection Molding Product	Toshiko Osada, Shigeo Tanaka Taisei - Kogyo Co., Ltd.

时间 Date	演讲题目 Speeches Themes	演讲人 Speaker
3:55 - 4:20	金属注射成形不锈钢的疲劳和冲击强度 Fatigue and Impact Strengths of Stainless Steel by Metal Injection Molding	Professor Dr. Hideki Kyogoku Dept. of Mechanical Engineering, School of Engineering, Kinki University
4:20 - 4:45	金属注射成形冷作工具钢的超声波疲劳性能 Ultrasonic Fatigue Property of Metal Injection Molded Cold Work Tool Steel	Kenji Doi; Kazuki Hanami; Tsuneo Teraoka; Takashi Sugimoto Osaka Yakin Kogyo Co., Ltd
9月24日上午8:30 - 10:00 主持人:葛立强 蔡一湘 8:30 AM - 10:00 AM Sep. 24 Presider: 葛立强 蔡一湘		
8:30 - 8:55	钛合金注射成形技术及应用 Ti - alloy MIM Technology and Application	广州有色金属研究院国家钛及稀有金属粉末冶金工程技术研究中心常务副主任 - 蔡一湘 Prof. CaiYixiang Guangzhou Non-ferrous Metal Research Institute
8:55 - 9:20	温压成型的应用与发展 The Application and Development of Warm Compaction	华南理工大学校长 - 李元元 Prof. LiYuanyuan Huanan University of Technology Principal
9:20 - 10:00	catamold 金属注射成形工艺 Catamold MIM Process	德国巴斯夫(中国)有限公司 German BASF (China) Corporation
10:00 - 10:20 茶歇 10:00 AM - 10:00 AM Sep. 24 Tea Break		
9月24日上午10:20 - 11:50 主持人:曹勇家 李元元 10:20 AM - 11:50 AM Sep. 23 Presider: 曹勇家 李元元		
10:20 - 10:45	高温烧结状态下获取材料信息的新方法 TOMMI - A new method for characterisation materials during thermal processes.	Dr. rer. nat. Andreas Diegler-Fraunhofer - Institut fuer Silicatsforschung ISC 德国弗劳恩霍夫应用研究协会硅酸盐研究所 迪格勒博士
10:45 - 11:10	喷射沉积粉末冶金新技术 PM New Technology - Spray Forming	航空材料研究院 田世藩 Prof. Tian Shifan Aviation Materials Research Institute
11:10 - 11:35	安泰科技的粉末冶金产业状况 PM Industrialization Situation of AT&M	安泰科技粉末冶金及环境技术事业部总经理 - 方玉诚 Dr. FangYucheng PM and ET Division of AT&M Corporation

时间 Date	演讲题目 Speeches Themes	演讲人 Speaker
11:35 - 12:00	MIM 的先进热处理工艺与设备 Advanced Thermal Process and Equipment of MIM	德国 CREMER 公司代表 -- Ingo Cremer, Dipl. Ing
12:00 午餐 12:00 AM Sep. 24 Lunch		

中国国际新材料产业发展研讨会 暨中外新材料企业家峰会

粉末冶金专业论坛暨中日注射成形交流会
2004 年 9 月 23 日 - 24 日

承办单位:中国金属学会粉末冶金分会
安泰科技股份有限公司
北京科技大学

协办单位:中国钢结构协会粉末冶金协会
中国通用机械零部件工业协会粉末冶金协会
日本粉体粉末冶金协会 MIM 委员会、材料评定委员会

执行主席:曹勇家(中国金属学会粉末冶金分会理事长)
曲选辉(北科大材料学院副院长、长江学者)
方玉诚(安泰科技粉末冶金及环境事业部总经理)
韩凤麟(中国机协粉末冶金分会顾问)
葛立强(中国钢协粉冶协会秘书长)
寺内俊太郎(日本粉冶协会 MIM 委员会委员长)
黄坤祥(台湾大学教授)

目 录

粉末冶金产业化的重要技术方	(2)
雾化法制取金属及合金粉末技术现状及发展	(15)
粉末冶金汽车零件的发展与前景	(20)
中国金属粉末注射成形技术与工业发展	(30)
注射成形工件之尺寸稳定性	(36)
Masakazu Achikita Sumitomo Me tal Mining	(42)
Professor Dr. Hideshi Miura	(47)
Development of Production Techno logy for Tial In ter metallic Compound by Me tallic Powder Injection Molding	(53)
Hisataka To yo shima ATMIX Corp	(54)
ULTRASONICFATIGUE PROPERTY OF METAL INJECTIONMOLDED	
COLD WORK TOOL STEEL	(65)
QUALITY IMPROVEMENT OF THE MICRO METAL INJECTION	
OLDED PRODUCTS	(70)
钛合金注射成形技术和应用	(76)
温压成形技术的应用和发展	(86)
Applications and Development in WarmCompaction Technology	(91)
MIM 零件的先进热加工工艺与设备	(100)
寺内俊太郎	(105)
Dr. Kankawa Yoshimitsu	(112)
Hideki Kyogoku	(114)
Dr. rer. nat. Andreas Diegeler	(120)
中国超细和纳米晶 WC - Co 硬质合金的现状与未来	(130)



曹勇家

简历

曹勇家 教授级高级工程师。生于1935年8月,江苏宝山人。毕业于莫斯科有色金属及黄金学院。中共党员。现任冶金工业部钢铁研究总院教授级高级工程师,北京京平金属材料厂厂长。中国金属学会理事、中国金属学会粉末冶金学会常务副理事长《粉末冶金技术》杂志副主编。为“乙种分离膜制造技术”的主要获奖者,获国家发明一等奖;研究成功“氮气雾化—热挤压工艺”制取粉末冶金高速钢材料,获国防科工委重大科研成果奖;研究成功重大军工配套项目“109工程用OB型磁粉芯”获冶金工业部科技进步三等奖,在中瑞科技合作期间,创立“粉末冶金低合金钢铁素体热复压”新工艺,通过部级鉴定。研制成功“汽车用粉末冶金结构零件”九种,大批量生产至今。研制开发“部分预合金粉末”、“易切削烧结钢”、“金属多孔材料”、“超细镍粉”、“高强度烧结钢”等粉末冶金新材料、新工艺。九十年代以来,致力于“粉末注射成形”新工艺研究及其新产品开发。建立了生产粉末注射成形产品的北京京平金属材料厂。发表学术论文数10篇,编著4本,参加翻译出版美国《金属手册》第九版第七卷(粉末冶金卷),参加《中国大百科全书》和《中国冶金百科全书》有关条目的撰写与编审。国务院政府特殊津贴获得者。

粉末冶金产业化的重要技术方向

中国金属学会粉末冶金分会理事长 曹勇家

摘要:粉末冶金的新工艺、新材料、新制品、新应用犹如灿烂星斗,不胜枚举。当今粉末冶金的发展必须加快产业化进程。“粉末冶金产业化的重要技术方向”。包括:

- (1)汽车用粉末冶金零部件;
- (2)粉末注射成形;
- (3)温压成形;
- (4)喷射成形;
- (5)自蔓延高温合成;
- (6)热等静压;
- (7)微波烧结;
- (8)放电等离子烧结。

关键词:粉末冶金,产业化,成形,烧结

1、前言

粉末冶金(Powder Metallurgy(PM))是制造金属、金属间化合物、金属—非金属化合物粉末和利用这些粉末通过成形—烧结制造工程材料、功能材料及其异型制品的工艺技术。粉末冶金能制造出传统熔铸和加工方法所不能制成的具有独特性能的材料和制品。

粉末冶金是使材料高性能化、多功能化、复合化、超精细化、纳米结构化和使制品高强度化、形状复杂化、微型化、精密化的制造技术,也是高效、节能、节材、环境友好、低成本、大批量的生产工艺。

当今,粉末冶金增长速度超过了其它材料和制品制造技术。由于相邻学科和相关技术的相互渗透和结合,更赋予了粉末冶金新的发展活力。粉末冶金新工艺层出不穷。在对已处于进入产业化而迅速成长和开发趋于成熟阶段的粉末冶金新技术调研的基础上,结

合我国实际

情况,提出了“粉末冶金产业化的重要技术方向”。

文中基本未涉及诸如磁性材料、特殊功能材料、超导材料、纳米材料等的生产制备技术,虽然这也属于粉末冶金技术范畴。

2、汽车用粉末冶金零部件

2.1 汽车制造业仍是粉末冶金(PM)发展的牵引力

过去5年,北美、欧洲和日本生产的轻型轿车的增长率分别是4.2%、4.7%和2%。铁基粉末的世界需求量以每年4.3%递增(中国20.7%),现在全世界的汽车生产能力已达7000万辆/年。

据预测,在未来5年内,全球轻型轿车的生产量将以每年3.5%增长,而亚太地区和中国的年增长率分别是4.8%和13.9%。

粉末冶金技术是多、快、好、省地生产中、

小型汽车零件的一条有效途径。

世界 PM 零件的最大市场是汽车制造业,在 PM 零件总销售量中,PM 汽车零件在美国占 71%、日本约为 88%、西欧约为 80%、韩国约为 79%、中国 27%。

2002 年美国单车用 PM 零件平均为 17.7kg,欧洲为 8.30kg,日本为 7.30kg。在中国生产的 PM 零件的单车平均使用量仅 2—3kg,预计 2006 年达 6kg(销售量 41400t)。

PM 零件在汽车上应用的增长主要有诸如连杆,PM 不锈钢排气系统法兰与传感器毂,可变阀定时(VVT)系统及变速器行星齿轮托架。VVT 系统装有 0.9~2.7kg 的 PM 零件。VVT 系统与变速器行星齿轮托架代表供应与制造整套系统的一种工业趋势。

2.2 PM 新技术在汽车用零部件生产中的推广应用

现在在汽车上应用的 PM 零件的生产仍以冷模压—烧结工艺为主。虽然其产品的精度、复杂程度、性能稳定性和成本等方面均有长足的进步,但是零件的密度较低,影响了零件的性能特别是力学性能的提高。零件的几何形状复杂程度也受到冷模压的制约。

PM 新技术的出现和产业化,对 PM 零件在汽车上的应用起到了重要的推动作用。简述如下。

2.2.1 Ancormax D 工艺

北美 Hoeganaes 开发了一种含硅的高密度、高性能的铁基 PM 材料。制造这种材料的工艺被称为 Ancormax D 工艺。能通过单次压制/烧结方法制造出密度达 7.4~7.45g/cm³ 的铁基零件。Ancormax 工艺使用了一种专有的压制润滑剂,加入量仅 0.45wt%。压制压力 620~690MPa,模具加热至 60~70℃。其压坯强度比传统冷压压坯高 20%~25%。

2.2.2 烧结硬化低合金钢

烧结硬化工艺是在烧结冷却阶段产生马氏体相变的一种工艺,由于 PM 烧结件中存在孔隙,比锻材更难淬火。

烧结硬化工艺特别适用于那些难以热处理的大型以及形状复杂的零件。近年来,已发生生产多种用于烧结硬化的低合金钢粉,使

得在烧结炉的冷却带发生马氏体相变成为可能。

用于烧结硬化的钢粉可以是元素粉末混合钢粉,但应用较广的是预合金化的低合金钢粉。两者都含有诸如锰、镍、钼或铬等合金元素,以改善烧结钢的淬硬性。

加拿大魁北克金属粉末公司(QMP)生产的 ATOMET4601、4701、4801 低合金钢粉都可作烧结硬化钢粉。在上述基体粉中添加铜 0.12%~2.0% 和碳粉。调节碳含量 0.35~0.95%。烧结温度 1120℃~1290℃,烧结时间 20~30min,冷却速率 0.4~1.5℃/s,在密度约 6.8g/cm³ 时可以得到表面硬度 30~45HRC 和抗拉强度 700~950MPa 的综合性能。

为满足烧结硬化工艺的要求,对烧结炉的结构尺寸作相应的设计调整,使能在高温烧结后达到要求的冷却速率。如:冷却带装备有气体淬火区。

烧结硬化钢零件已用于电动工具、家庭用具、办公机械及汽车制造。例如:用 ATOMET 4701 基体粉开发了电动工具用的一组 6 个高速、高扭矩、低噪音齿轮,可降低生产成本约 30%。

制得的汽车分动箱链轮,力学性能和尺寸精度均达到要求。Masco Tech Sintered Components 改造了生产线,只保留成形、烧结两道工序的成形和烧结硬化生产线,大大降低了生产成本。现已生产了数以百万计的这种链轮。

2.2.3 高速压制法 (High Velocity Compaction, HVC)

高速压制法(HVC)是利用液压冲击机(高速锤)产生的冲击波压制粉末成形。HVC 可产生多重冲击波,间隔约 0.3s 的一个个附加冲击波将密度不断提高。铁基制品的密度达 7.5g/cm³,抗拉强度可提高 20%~25%。可经济地生产重达 10kg 的大型部件。

HVC 适用于制造阀座、气门导管、主轴承盖、轮毂、齿轮、法兰、连杆及轴承座圈等产品。

2.2.4 粉末热锻 (Powder Hot Forging (PHF))

通过粉末预成形坯的热锻得到高密度、高强度的 PM 零件,其典型实例是 PHF 发动机连杆,早已应用于各种汽车发动机上。与锻钢连杆相比,重量明显减少。例如:

1976 年 在 Porsche928V-8 发动机上应用

1981 年 在丰田 TOYOTA 佳美轿车 1.9L 发动机上应用

1995 年 在福特汽车上已装有 2500 万个 PHF 连杆

Mazda 汽车公司使用 Metaldyne 公司的 PHF 连杆于新四缸发动机。

德国宝马、瑞典 Volvo、美国通用等也都有大量应用。宝马(BMW)汽车 V8 发动机的 PHF 连杆的密度达到 7.65g/cm^3 ,抗拉强度 1014MPa ,屈服强度 340MPa ,成本降低 20%。

2.2.5 粉末注射成形 (Powder Injection Molding (PIM))

PIM 可以大批量生产高密度、高强度、高尺寸精度、三维复杂形状的零件。

现在 PIM 零件在汽车上应用于安全系统、发动机控制、燃料喷嘴、内装饰和一些机械、磁性和电子方面。例如:17-4PH 不锈钢气囊装置枢轴、启动调节器、316L 不锈钢燃烧器盖、Fe-2Ni 低合金钢可折合敞蓬顶夹、镍-铁钢巡航控制传感器座、440C 不锈钢燃油调节器、Si3N₄ 燃气涡轮盘、钛变速圆把手、用于发动机自动控制系统的 ZrO₂ 氧传感器、外部是 17-4PH 不锈钢芯部是高镍非磁性不锈钢复合的旋转传感器、镍钢 4600 的转向系统挂钩、赛隆(SIAION)涡轮增压传子、低合金钢变速阀摇臂、低合金钢汽车座椅齿轮等等。

2000 年 PIM 生产的汽车零件约值 5 千万美元(日本 40%,美国 35%,德国 25%),在 2002 年接近 1 亿美元,PIM 的产值年增长率达 20~30%。在汽车上的应用将持续增长。大部分产品是热处理至最高力学性能的高强度低合金钢。

PIM 产品在汽车上必将得到日益广泛的应用。

2.2.6 温压技术 (Warm Compaction)

温压技术是采用混有特定的润滑剂和粘

结剂的金属粉末在 $100\sim 300^\circ\text{C}$ 温度下压制,通过一次压制和一次烧结使零件密度提高 $0.15\sim 0.25\text{g/cm}^3$,密度可提高到理论密度的 92~95%,而成本增加较小。

德国 Sinterstahl GmbH 用温压技术生产出复杂的磨擦传动用同步齿环,综合成本降低 38%。

瑞典 Hoganas 公司温压 Ni-Cu-Mo 钢粉得到重载汽车变速箱用零件。

法国 Federal Mogul 烧结公司采用温压技术生产连杆,价格比 PHF 连杆低。到 2002 年生产 350~600g 各种连杆 1500 万件。

2.2.7 烧结钎焊

烧结钎焊技术适应结构更为复杂的零件,大大降低成本,减轻重量。如烧结钎焊器轮驱动分动器减速轮轂,它由上下两体分别压制后组装在一起,烧结和钎焊一次完成。烧结接缝的强度可达 340MPa ,重量降低 25%,机加工量减少 50%。德国 GKN 烧结金属公司的行星支架是采用烧结钎焊工艺制造的 PM 装配件,重 873g。用于福特汽车公司的新型五速自动变速箱。行星支架的抗拉强度为 800N/mm^2 ,屈服点为 650N/mm^2 ,硬度 67HRB。2000 年试生产线投产,2001 年日产 2000 件,2002 年日产 3000 件。

2.2.8 气门阀座圈 (Valve Seat Ring)

汽车内燃机阀系统工作条件十分严酷。气门头部温度一般高达 $800\sim 1000^\circ\text{C}$,气门阀座的工作温度高达 $500\sim 800^\circ\text{C}$,同时燃烧废气具有强腐蚀性。气门开闭时,通常都进行转动,从而气门与阀座表面发生摩擦作用。

改用无铅汽油、液化石油气(LPG)、压缩天然气(CNG)等燃料后。这时气门与阀座之间不会形成铅化合物的润滑膜,其工况更为恶劣。

现在,大批量生产的内燃机都已在使使用特制的 PM 阀座圈。PM 阀座圈合金是一类无行业标准、无国家标准、无国际标准的“定制合金”。这是一类高密度、高合金、耐腐、耐蚀、耐热的烧结合金,唯有采用粉末冶金的方法才能把耐热高强基体与硬质颗粒相、固体润滑相、导热合金等复杂成份综合于一体。综合

利用高温烧结、液相烧结、复压复烧、粉末热锻、冷锻、熔渗等粉末冶金工艺手段生产符合不同燃料和发动机工况条件要求的各种材质、性能的阀座圈。

根据发动机的工况和使用的燃料,现已开发出适用于有铅汽油、无铅汽油、LPG、CNG、柴油,以及功率大小不同的发动机的PM 阀座圈合金。现在汽车发动机中使用的阀座圈合金,90%以上是用粉末冶金技术生产的。

2.2.9 PM 钛零件 (PM Titanium Components)

钛及其合金具有密度小,比强度高和良好耐蚀等特性。在汽车行业中具有很大的应用潜力。在汽车零件中已被认定可以代替铁基零件的主要有发动机中的连杆、轴、阀弹簧、档圈等;排放系统中的吸气阀、排气阀等。

丰田公司研制了PM 钛汽车连杆和齿轮。

钛汽车喷嘴耐高温、耐磨损、质量轻、形状复杂、尺寸小,适合于用PIM 制造。

铝的比重小,PM 铝合金零件在汽车上的应用也受人们关注。

3、粉末注射成形(Powder Injection Molding(PIM))

3.1 粉末注射成形的原理

PIM 是制备三维复杂形状的金属和陶瓷零件的近终成形技术。是制取各种金属和陶瓷高性能零件的高效、节能、节材、环保友好、低成本、大批量生产的工艺。自20世纪80年代中期以来,发展十分迅速,产品应用范围日益扩大,有着很好的发展机遇和前景。

PIM 通常采用小于 $20\mu\text{m}$ 的细粉与高分子聚合物为基的粘结剂加热混合均匀,混合物经制粒成注射料。注射料在注射成形机内加热塑化状态下,具有良好的流变性。所以能在压力下注入形状十分复杂的模腔。注射料在模腔中固化成生坯,从模腔中脱除生坯,采用化学和加热分解等方法将生坯的粘结剂脱除。而后高温烧结致密化成零件,达到对形

状、尺寸、物理、化学、力学和使用性能等的要求。一般不需要或只进行少量的后续机加工。

PIM 产品的显微结构均匀精细,性能各向同性,其密度又接近理论密度,所以性能一般优于其他工艺制得的产品。

现在工业生产的PIM 材料有:纯铁、低合金钢、不锈钢、工具钢、高温合金、钛合金、有色金属、难熔合金、低膨胀系数合金、磁性材料、硬质合金、金属陶瓷、金属间化合物、氧化铝、氮化铝、氮化硅、氧化锆等。

PIM 制品已批量用于钟表、医疗器械、通用器械、电动工具、五金工具、生物医疗工程、计算机工程、电子通信、枪械武器、办公机械、仪器仪表、纺织机械、食品饮料机械、体育娱乐玩具器械等领域,特别是正在竭力进入汽车制造业,其应用市场迅速扩大。

3.2 PIM 的优点

PIM 的基本优点是:复杂形状、低成本和高性能。PIM 的其它优点还有设备的高生产率、高材料利用率、高表面光洁度和好的尺寸公差。

PIM 在零件生产量大和高度复杂程度时独占优势。对于零件设计者,应专门设计三维形状复杂的生产量大的零件,充分发挥PIM 的特点,取得生产成本的降低。

3.3 PIM 材料

现在PIM 工业生产的产品按材料所占百分比大致是:铁和钢21%,不锈钢21%,工具钢3%,难熔金属3%,硬质合金10%,氧化铝和氧化硅22%,共价陶瓷7%,精美瓷器2%,氧化锆3%和其它特殊材料9%。

3.4 PIM 产品应用及市场

PIM 零件的应用无处不在。在今后几年,一些应用领域将成熟,包括先进的信息系统的光-电和磁性零件、高强度钢的耐磨汽车零件、计算机、通讯和生物医学系统的微型零件。2002年全球PIM 零件的销售值约8亿美元。

PIM 年产值到2005年将很容易突破10亿美元,到2010年将超过20亿美元。

3.5 PIM 应用领域

(1)航天航空

航天航空应用的难处在于材料需经受高温侵蚀环境,能满足要求的是镍基或钴基高温合金或钛合金。现在的努力是考验无人驾驶设备和低应力用途的把手、挂钩、燃料和制动零件。

(2) 汽车

用其它工艺难以生产的许多形状复杂汽车零件,采用 PIM 生产。例如点火钥匙、磁传感器座、气囊致动器、汽车敞蓬顶夹、燃料喷射压力流量控制零件、巡航传感器座、发动机自动控制氧传感器、驾驶操纵系统挂钩、高性能发动机摇臂等。

现在多种 PIM 汽车零件在生产,用于安全系统、发动机控制、燃料喷口、内装饰和一些机械、磁性和电子方面,汽车将成为 PIM 最大应用领域之一。

(3) 办公机械

办公机械是 PIM 成熟的应用领域。邮政计量零件,邮费计量器的切刀,喷墨印刷喷嘴和激光印刷零件。高速印刷装置是将来应用的机会。

(4) 铸造和熔炼工业

精密铸造陶瓷芯由氧化铝、氧化硅、氧化锆制成,是 PIM 最大的应用领域。还包括各种流道口、过滤件、液体金属导流等。

(5) 计算机

在计算机硬盘驱动上用许多 PIM 的磁体、平衡块和插口。另外,PIM 还生产打印、数据储存、连接插件、插座、连接和散热片等磁性和机械零件。

(6) 切削刀具

1995 年全球 PIM 硬质合金产值约 2500 万美元,2002 年达 5000 万美元。主要用作复杂形状或大长径比的刀具,如中空钻头。一些工厂关注微电子线连接工具,是精密的陶瓷或硬质合金小尺寸工具,一些小到直径约 100 μm 。

(7) 军用

PIM 最早的成就是军用。最早 PIM 军用产品之一是不锈钢稳定翼。现在军用需求仍推动着 PIM 发展。其应用包括手枪、武器瞄准器、导弹和炮弹尾翼、火箭推进器、碎裂武器、

战斗装置定子、导弹运输容器的紧固件等。

(8) 牙科

从 20 世纪 80 年代中 PIM 用于生产正畸牙托。美国日产超过 25 万件。通常单件重小于 0.1g,PIM 生产正畸牙托年价值 6 千万美元,估计 2002 年达 1 亿美元。

(9) 电子和电子零件

从 20 世纪 80 年代中开始用 PIM 生产供电的电接插件和各种绝缘零件。

微电子领域多用低膨胀系数材料,如柯伐合金、因瓦合金或安装陶瓷如氧化铝的钨-铜、或纯金属如铝、铜、钼、钨。

(10) 枪械

手枪、猎枪、步枪和军用武器用了许多 PIM 生产的零件。典型的零件有瞄准器、瞄准器座、枪体、保险杆、悬带附件、掣子、发火控针、弹匣、扳机和扳机保险、滑块等。

在弹药方面,钨成形作子弹,和无铅的“绿色”子弹。

(11) 手动工具

一些专业工具公司采用 PIM 生产新一代的扳手、钳子、切线刀、管攻丝和其它耐久性工具。为满足力学性能指标,开发了新的 PIM 合金,包括各种工具钢、高强度不锈钢、可热处理钢。

(12) 五金件

PIM 产品已限于不能机加工的形状件,成功的有不锈钢管阀、联接件、配件和堵头件。其它目标包括绞链、把手、卡具和如门环等的装饰件。

(13) 家用和个人用品

家用的 PIM 产品包括茶杯、咖啡杯、啤酒杯、电动牙刷零件、理发推子、眼镜框铰接、开罐头起子、电刮须刀、器皿、把手、厨房器具、葡萄酒瓶软木塞起子、搅拌器、氧化锆剪刀等。

瓷茶杯是意大利 PIM 的成功之一例。建立了连续工艺。每周生产 35000 个茶杯。

最大量生产的 PIM 制品之一是电动牙刷的一组 0.34g 的金属齿轮。采用一付 16 腔模具,产量达到日产 6 万件。材料是时效硬化不锈钢。另外一个 PIM 生产的家用器具是胡椒

磨的齿、咖啡磨碎机和坚果夹碎器。

(14) 工业零件和工具

PIM 长期稳定的成功是生产耐磨件,材料是陶瓷、硬质材料和工具钢。硬质合金用于高可靠、严重浸蚀磨损零件,如水泥装载管和喷嘴。其它工业上的 PIM 金属的应用包括自动售货机零件和许多机械键、滑轮和校准块。

(15) 仪器和传感器

一个领先的应用是流量控制系统,如电磁阀。军用系统用作声纳、红外线、光学或电信号传输等的先进传感器。

一个新的应用是蜂窝电话的超导过滤。频率外噪声降低 1 万倍,

PIM 磁性传感器零件的市场很大。高导磁率合金用作微波系统、致动器、阀和其他传感零件的外壳。

Fe-Si 合金用于高速印刷、控制机构和自动阀的螺线管、磁放大器、继电器和小型发动机。加铝的 Fe-Si 合金称作“Sendust”,广泛用于如地铁的磁卡阅读器,现在正努力纳入 PIM 生产。

(16) 首饰

PIM 具有优势的另一领域是首饰业,因为它的材料利用率高。

(17) 医疗

PIM 医疗零件被认为是 PIM 最快增长的市场,估计到 2005 年 PIM 年生产的医疗零件将超过 1 亿美元。除了外科手术工具,钨高比重合金注射器的防辐射屏蔽;另一个概念召唤 PIM 去做显微外科机械手,它的最大尺寸小于 5mm。

(18) 微电子和光电子

新的电信和航空电子技术系统依赖于集成封装,要求低热膨胀系数和高热导率。

PIM 的目标是计算机网络零件。密封盒是低热膨胀合金做的,一种新的设计是 PIM 柯伐合金盒上有 W-Cu 板。

(19) 体育设备

运动鞋的抓齿和鞋钉。同时,作出努力生产飞镖和其它加重的体育设备,包括高尔夫球杆的基底。现在新的热潮是用 PIM 生产高尔夫球杆。

有关的发展是用 PIM 生产实习子弹,已经生产钨-聚合物子弹代替鸟枪子弹。粉末聚合物子弹成本最低,在这方面的起始订货每年数亿件。

(20) 电信

到 2001 年 PIM 钨高比重合金振子的生产已超过月产 1500 万个。某些手机设计超过 5 个 PIM 件。

蜂窝式电话的基地站是高热导材料如钨-铜的大用户。

(21) 手表

手表件的材料范围从不锈钢到氧化锆-碳化钛、硬质合金和钛。生产基本上已高度自动化。

随着 PIM 生产技术水平、知名度和信任度的提高,PIM 产品的应用领域日益广泛。而 PIM 产品的种类更是层出不穷。材料性能要满足使用要求,零件形状要复杂以体现 PIM 的优点,对市场需求要快速反应,生产批量要大,最后体现在低成本。

4、温压成形技术(Warm Compaction)

在众多为提高 PM 件密度的生产方法中,温压成形技术被认为是最为经济的一种新工艺。

数家国际知名的 PM 公司各自推出受到专利保护的温压技术,如瑞典 Hoganas AB 的 Densmix TM、美国 Hoeganaes Co. 的 Ancordense TM 和加拿大 QMP 的 Flowmet WPTM 等。

温压成形的工艺过程是将混有温压专用润滑剂(和粘结剂)的粉末加热至 130~155℃,然后在加热到上述温度的模具里压制成形。与传统 PM 冷模压相比,温压压坯的密度约有 0.15~0.30g/cm³ 的增幅。温压工艺的特点是工艺简单、成本低廉,在传统的粉末压机上稍加改装,经一次温压压制——次烧结即可生产出较高密度、高性能且质量稳定的产品,生坯强度提高 100%,拉伸强度提高 20%~30%

超过 20MPa,可在烧结前进行机加工。

4.1 温压工艺流程要点

温压工艺对粉末性能有一定的要求,如 Ancordense 温压工艺限定为高压比的水雾化铁粉,对铁粉中的 C、O₂、N₂ 和其它杂质含量都有限制 (O₂ < 0.1%、C < 0.006%、N₂ < 0.0013%)。对粉末的形状和粒度也有一定要求。专利化的润滑剂是一种复合的酰胺基蜡。低熔点的单酰胺在温压温度下熔化,起液体润滑作用。二酰胺和聚酰胺有较高的熔点,可起固体润滑剂的作用。

在温压过程中同时采用非聚四氟乙烯干粉润滑剂以静电吸附的方式粘着在阴模内壁,进一步提高了温压压坯密度,可达 7.55g/cm³。

烧结前采用低温预烧,将润滑剂脱除。否则导致最终烧结密度低于温压压坯密度。

4.2 温压 PM 零件的应用举例

温压成形技术是 20 世纪 PM 的一项重要技术进步,已用于生产。

美国 Chicago powdered Metal 公司 1995 年已开始用温压工艺生产电力机车发动机用齿鼓零件,重达 1.1kg,密度 7.3g/cm³;

瑞典 Hoggans 公司温压 Ni-Cu-Mo 钢粉制造的变速箱零件 Latch Cone,密度为 7.25~7.35g/cm³,用于重载车(如公共汽车和大卡车);

华南理工大学于 2001 年研制成功高性能斜齿轮和薄壁气门导管;

美国福特卡车变速箱上的转矩涡轮毂;

日本日立粉末金属公司生产的小节锥、半角斜伞齿轮。

法国 Federal Mogul 公司生产的温压和烧结连杆是温压工艺的一项重大突破,2002 年生产重量 350~600g 各种连杆 1500 万件。

中国的宁波东睦粉末冶金公司和扬州保来得工业公司从国外引进技术、生产线与购买温压用粉末进行生产各种较高密度的 PM 零件。

4.3 流动温压技术 (Warm-Flow Compaction Process(WFC))

流动温压工艺是在一定温度下,将一定

量的粗粉和微细粉以及热塑性润滑剂相混合配制出性能均一并具有良好流动性的混合粉末,然后像温压工艺一样在 80~130℃下进行压制,最后烧结而制得成品的粉末冶金新技术。用于流动温压的粉末一般要求加入 10%~20%(质量分数)的细粉末,流动温压可以在标准 PM 设备上进行。压制压力大约 600MPa,混合粉在流动温压时具有向各个方向填充模腔的粘流行为,因此可以直接成形复杂形状的零件,如凹槽、横孔、盲孔和螺纹孔等。所得到的压坯密度高、性能均一。流动温压的适应性较好,流动温压工艺是相对简单的工艺,对于复杂外形的零件,可降低成本,因而具有发展潜力。

5、喷射成形 (Sprag Forming) (SF)

5.1 喷射成形原理

喷射成形通称雾化沉积,是用快速凝固方法制备大块致密金属材料的粉末冶金技术。

喷射成形把液态金属的雾化(快速凝固)和雾化熔滴的沉积(熔滴动态致密固化)结合起来,在一步冶金操作中完成。它直接从液态金属制取具有快速凝固组织特征、整体致密、接近零件实际形状的高性能材料。通过改变熔滴射流与沉积器的相对位置和沉积器的运动形式,可以得到盘、柱、管、环、板、带等不同形状的近终形坯件。如果采用两种不同合金雾化射流可以制备复层的双性能材料(坯件)。采用注入增强颗粒雾化共沉积则可以制备颗粒增强金属基复合材料。

5.2 喷射成形产品市场

喷射成形技术开创于 20 世纪 70 年代。

90 年代进入了工业规模的生产应用阶段。1993 年第二届国际喷射成形会议对喷射成形的潜在市场进行了调查,各种产品的产量总计可达 10 万吨,年销售额近 15 亿英镑,显示了良好的发展前景。

5.3 喷射成形的优点

与铸造法相比,SF 法的优点是:

(1)能利用快速凝固获得微细组织,而且是各向同性组织。改善了冷、热加工性能。

(2)不存在宏观偏析,能够制造铸造法不能制造的高合金材料,而与粉末冶金制粉一致密化相比,其优点是:

①能省略工序,经济性高;

②一道工序(非活性气体气氛中)完成半成品。为此,对于铝、钛等活性金属,由氧引起的污染非常少,力学性能得以提高;

③用一道工序能获得高密度的半成品。

5.4 SF 制品的应用领域

大致归纳有:

(1)汽车部件:Al 合金、Mg 合金、Ti 合金、各种耐磨部件、复合材料、金属间化合物等;

(2)一般产业:耐磨轧辊、工具钢、轴承材料、各种复合材料、高合金管、模具材料、超塑性材料等;

(3)电子元件:软磁材料(坡莫合金、铁硅铝、硅钢)、硬磁材料(Al-Ni-Co 系,稀土系等)、触点材料(Cu-Ni-Cr-Si 合金、Cu-Ni-Cr-Sn 合金)等;

(4)航空航天部件:Al 合金、Ti 合金、Ni 合金、Co 合金、复合材料、金属间化合物、超塑性材料等。

5.5 SF 管、辊、板

覆层合金具有高的耐腐蚀性,其使用寿命大大高于无涂层的抗腐蚀合金和经热喷涂的管材。在碳钢外沉积不锈钢或 IN625 高温合金还供应给化工设备和锅炉制造。SF 生产的特殊用途耐热合金、不锈钢无缝管的最大外径达 380mm,壁厚 20~50mm。

喷射成形的热轧辊(17Cr 铁、高速钢)和冷轧辊(0.8C-3Cr, 0.8C-5Cr)得到了实际应用,轧辊最大尺寸外径 800mm、长 500mm。与原来的铸造辊相比,寿命延长 2~3 倍。SHS 制备的 $\phi 100 \sim \phi 320$ mm 辊环已在工业上应用。

SF 技术可以制造最宽 1.2m,长 2m,板厚 8~50mm 的板材半成品。如设置两个中间包,就能通过一次操作制造出复层钢板。清华大学试验了 SF 铝钢双金属材料,可在电解槽、轻工、造船、冶金、原子能等工业工程领域得到应用。铝钢双金属平底不粘锅也已进入人们的日常生活中。

5.6 铝合金

5.6.1 SF 高强铝合金

高强铝合金(2000 系、7000 系)以其优异的综合性能在商用飞机上的使用量已经达到其结构重量的 80%以上,SF 的 2024 合金经热处理后具有更高的力学性能, SF 的 7075+1Ni+0.8Zr 合金、2024-2Fe-2Ni、7150-0.5Fe-0.4Si 热处理过程中晶粒无明显长大,使得 2000、7000 系铝合金具有更高的力学性能。

5.6.2 SF 高比强、高比模量铝合金

SFAl-Li 合金的晶粒和第二相明显细化,合金的偏析程度降低,从而可显著提高合金中锂的含量。

SF2024+1%Li、Al-1.55%Li、Al-1.74%Li 合金具有良好的综合力学性能,合金韧性大幅度提高。

5.6.3 SF 低膨胀、耐磨铝合金

SF 显著改善了 Al-Si 合金中初晶硅相的形态和分布,降低了氧含量,提高了合金的性能。

SF GHAlSi17Cu4Mg 合金经挤压,冷轧成管材,再机加工成零件已正式用于 Mercedes Bens 新一代 V8 和 V12 发动机汽缸衬套。

5.6.4 SF 耐热铝合金

SFAl-8.5Fe-1.2V-1.7Si 快速凝固合金材料经热等静压前后的性能分别 δb 为 281, 313MPa 和 δ 为 9.5%,18%。由于氧含量的降低,合金的断裂韧性得到显著提高。

5.6.5 SF 铝基复合材料

将 SF 技术与铝基复合材料制备技术结合在一起开发出一种“喷射”共沉积(Spray co-deposition)技术,很好地解决了增强粒子的偏析问题。SF7075+SiC 复合材料中 SiC 体积分数可达 20%,表现出良好的综合性能, SF8090+SiC 复合材料的力学性能更为优越,尤其弹性模量提高 25%。

5.7 SF 高温合金

SF 适用于众多牌号的变形高温合金。用 SF 高温合金比较容易解决大尺寸铸锭存在的严重偏析,变形塑性恶化及晶粒控制等问题。SF 直接得到环形坯,工序大大简化,费用降低 30%。1995 年建成的半工业性涡轮盘柱形坯

雾化沉积装置,对其制备的沉积坯纯洁度检验为零夹杂,优于经真空感应+电渣重熔+真空自耗三次熔炼的变形涡轮盘。

5.8 SF 铜合金

快速凝固铜合金不仅保持很好的导电性能,而且极大地提高了合金的室温和高温强度,改善了合金的耐磨和耐腐蚀性能。

SF Cu-Cr-Zn 系合金,可以得到均匀细化的显微组织,比普通连铸铸锭的铜合金电极寿命增长一倍。Osprey 公司生产的 Cu-10Ni-3Cr-3Si 合金变形热处理后,具有良好的综合性能,适用于电子器件方面的应用。SF Cu-Cr-Zr+Al₂O₃ 铜基复合材料为解决汽车工业中大量使用的镀锌板焊接电极头表面局部合金化对使用寿命的损伤方面已有成效。SF Cu-15Ni-8Sn 可取代昂贵的铍青铜 Cu-2Be-Pb。SF 可制备常规工艺因宏观偏析而无法生产的高锡青铜合金,锡含量可以高达约 14%,例如 Cu13.5Sn0.5Pb。

6、自蔓延高温合成(Self-Propagation High-Temperature Synthesis)(SHS)技术

SHS 是近年迅速兴起的材料制备技术。SHS 利用化学反应自身放热来制备材料。SHS 技术高效、节能、投资少,产品质量高、生产成本低、设备及工艺的通用性强等,已成为多种材料及制品制备的工业生产技术。采用 SHS 工艺可以合成陶瓷材料、金属基与陶瓷基复合材料、金属间化合物、梯度材料。高温超导等高技术结构材料和功能材料,也可以合成特种耐火材料、铁合金等工业用材。最近在开发纳米材料、氢化物、有机材料及环保材料的合成方面又取得较大进展。到目前为止,SHS 工艺已发展到近 40 种,它们主要用于新型特种粉末材料的合成、粉末烧结产品、加工与铸造致密产品的生产及制品的焊接与涂层。

6.1 SHS 技术的应用

6.1.1 SHS 制备粉末工艺

根据粉末制备的 SHS 化学过程,可分为:SHS 化合法和 SHS 还原—化合法

SHS 制备的各种材料的粉末品种已超过

300 种,还在不断增多。

6.1.2 SHS 烧结

采用在 SHS 合成材料的同时,烧结成致密材料,例如:合成 Ni₃Al 时,粉坯被加热到 600℃就可点燃进行 SHS,在 750℃烧结可获得 97%理论密度的材料,SHS 烧结已广泛应用于金属间化合物的合成和致密化。

超高压反应烧结可降低烧结温度,是制备致密超硬材料的有效手段。超高压烧结立方氮化硼或金刚石及其与硬质合金的复合材料已工业应用。

6.1.3 SHS 致密化技术

SHS 热压已应用于金属间化合物、硬质合金、梯度材料、复相陶瓷、复合材料和金刚石工具材料的制备,如 TiC 基硬质合金辊环、刀片等。

采用 SHS 热等静压(HIP)制备 Al₂O₃ 颗粒强化的 Ni₃Al 基材料,在 800℃就可获得致密材料,而采用预合金 Ni₃Al 粉的常规 HIP,在 1150℃才能得到致密材料。SHS HIP 也制得了六方 BN 坩埚、氮化硅叶片等。

6.1.4 SHS 熔铸

利用 SHS 反应形成的高温熔体,可制备碳化物、硼化物和氧化物等陶瓷和金属陶瓷铸件。

SHS 和离心技术结合,可以制造陶瓷内衬钢管和难熔化合物(外层)—氧化铝(内层)复合管。

6.1.5 SHS 焊接

将 SHS 反应料放在焊接件的对缝中,通电点燃后,施加压力就可以进行陶瓷—陶瓷、陶瓷—金属、金属—金属的焊接。

6.1.6 SHS 涂层

熔铸涂层:碳化钛—碳化铬基涂层刀片的耐磨性比常规涂层高几倍。

通过气相传输反应,可在金属、陶瓷或石墨等的表面形成 10~250 μm 厚的金属陶瓷涂层。

6.2 SHS 产品的应用

SHS 制备的粉末、材料、制品等的应用十分广泛,包括陶瓷、金属间化合物、金属陶瓷、复合材料和梯度材料的制备。一些 SHS 产品已取得了工业应用。例如 TiC 磨料,MoSi₂ 加