

我国快淬金属产业的形成与发展

王新林

(冶金工业部钢铁研究总院,北京 100081)

介绍了我国快淬金属的研究概况,重点叙述了材料研究、工艺技术装备和应用开发现状.简要报道了超微晶材料的应用研究以及快淬微晶合金的一些研究成果.

Abstract

A review of the researches of rapidly quenching metals in China has been given in this paper. Which put the emphasis on the present situation of material researches, equipment, application and development. The research achievements of super microcrystalline materials and rapidly quenching microcrystalline alloys have been briefly reported in the paper.

一、材料和工艺技术的两大变革

自从美国 Duwez 教授等于 1960 年首次用枪法获得快淬金属^[1],特别是 1969 年发明了单辊快淬工艺以制备非晶态合金长带以来,30 多年快淬金属兴旺发展、至今不衰,并已形成不同产业.

非晶态合金由于在微观结构上完全不同于人类几千年来所认识和使用的金属材料,因而具有一系列新的、优异的宏观性能,成为凝聚态物理中最活跃的领域之一,被誉为冶金材料学的一项“革命”.至今,制备非晶态合金的主要工艺技术是快淬方法,以大约每秒种一百万度的超急冷凝固技术,使液态金属来不及结晶就固化成形,比传统冶金工艺减少了多道工序并节能降耗,被称为是传统冶金工艺的一项“革命”.

我国快淬金属起步较晚,正式研究始于 1976 年,但发展很快.国家一直把这一领域列为科技新材料研究开发重点,使材料、工艺装备、应用和基础研究都取得较大进展.据统计,已取得各类科研成果 133 项,专利 12 项,制订了包括 28 个合金牌号的快淬金属国家标准^[2].经冶金系统联合攻关,已在冶金工业部钢铁研

物理

究总院建成年产百吨级非晶态合金中试线,现正在建年产百万只铁芯元件的中试线,已初步形成非晶产业.

需要说明的是,由于历史和习惯原因,我国通常称“非晶态合金”而往往不叫快淬金属(不同名称的严格含意是不同的),如全国性多次非晶态会议,国家级科研立项等都称为“非晶态”合金,实际内容包括以下四个方面:(1)用快淬工艺制成的非晶态金属;(2)用其他工艺方法制备的非晶态合金;(3)非晶态合金在某种条件下形成的纳米晶或微晶材料;(4)用快淬工艺直接形成的微晶合金等.但是,针对非晶态合金进入实用化而制订的我国国家标准 GB_n292-89,采用了“快淬金属”的标准叫法,这同国际快淬金属会议的名称相一致.

二、发展简况

我国快淬金属研究的初始阶段,同国外研究相似,也同几乎所有材料开发一样,主要集中于实验室研究,尤其集中于材料的物理性能分析和制备原理等基础研究.从材料类别看多集中于非晶态软磁合金的磁性和结构模型等.但是,材料开发、应用和形成产业的发展进程只用

了不到十年的时间.我国非晶态合金的实际产量示于表 1.显然,保持了逐年迅速递增的趋势,八年来产量增加 60 倍,接近于每年翻一番的增长速度.其中主要包括两部分产品,一为非晶态软磁合金,二为快淬(熔抽)钢纤维.

表 1 我国非晶态金属历年产量表

年 代	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
产量(t)	3	10	15	62	90	110	150	180

我国召开的历届非晶态会议和国际快淬金属会议(RQ)列于表 2.我国非晶态会议共开过八次,从会议论文数量看,我国非晶态材料研究

开发仍保持大量研究和发展的势头.国际快淬会议共七次,论文数量也基本可以说是有增无减.但是,就主要研究内容而言已有相当变化,主要表现在:非晶态软磁合金已基本成熟,现在主要在于应用开发研究和形成产业;快淬钨铁硼国内正在迅速发展,近几年将会达到年产近百吨的水平;纳米晶软磁合金开发研究突起,很快就会形成产业;机械合金化法、快淬催化剂合金、非晶态薄膜研究等,都在迅速发展,论文数量大量增加.

表 2 国内外非晶会议情况

中国会次	时 间	会 址	论 文	国际会次	时 间	会 址	论 文
全国 1	1978.5.4	无 锡	66	RQ1	1970	南斯拉夫 Slera	105
2	1980.12.3	昆明市	170	RQ2	1975.11.17	美国 Boston	165
3	1982.10.23	黄 山	260	RQ3	1978	英国 Brighton	650
4	1985.5.8	西安市	212	RQ4	1981	日本仙台	344
5	1988.10.11	成都市	195	RQ5	1984.9	德国 Warzburg	442
冶金工业部 1	1982.10	厦门市	93	RQ6	1987.8.3	加拿大 Montreal	423
2	1986.10	索溪峪	92	RQ7	1990.8.13	瑞典 Stockhlm	465
联合会议	1991.12	桂 林	247				

三、工艺装备水平和材料标准化

工艺装备水平和产量以美国最高. Allied 公司已具有每年生产非晶带 6.5 万吨的能力,早已实现了完全自动控制的连续生产和在线自动卷取,带宽 213mm,每卷达 350kg,可连续倒卷.多层非晶态合金薄带复合成 0.25—0.30mm 的厚带,叠片系数达 90%以上.我国的工艺装备水平虽然同美国有相当差距,但已具有喷制铁基非晶态合金薄带的中试生产能力,每炉容量 100kg,带材厚约 25 μ m,宽 100mm,自动卷取,卷重达 91kg,我国自己生产的非晶带材数量同国内市场需求的发展基本上相一致.

在材料研究方面,美国、日本、欧洲和我国都开展了大量工作,每年都有新材料出现.据统计,美国已有非晶合金牌号 58 个,日本几个公司的不同牌号累计达 73 个,(原)联邦德国 15 个,(原)苏联有 20 个牌号.我国纳入国家标准 GB_{n291-89} 的合金牌号有 28 个,各单位不同合金的不完全统计已达 80 余个.

在我国研究的非晶态合金中,按材料成分分为铁基、钴基、铁镍基、铁钴基、铜基、镍基等多类,材料性能包括软磁、硬磁、钎焊、弹性、增强材料等多种.可见种类繁多,但至今主要集中于非晶态软磁合金.以冶金工业部钢铁研究总院为例,研制出的一些主要非晶态合金列于表 3 和表 4 中.

表3 冶金工业部钢铁研究总院研制的部分非晶态合金

牌 号	基体成分	$B_s(T)$	$H_c(A/m)$	B_r/B_m	$\rho(\mu\Omega\cdot m)$	$P(W/kg)$	$T_c(^{\circ}C)$	$\mu m(\times 10^4)$	H_V	主 要 用 途
FJ-101	C ₀ 基	0.7	0.32	~0.5	126	$P_{5/20}kHz \leq 16$	315	30	965	磁头、磁屏蔽
FJ-103	C ₀ 基	0.69	0.24	0.95	120	$P_{5/20}kHz \leq 33$	315	40-165	960	频 磁 放 大 器 (200kHz)等
FJ-105	C ₀ 基	0.75	0.48	0.013	126	$P_{5/20}kHz \leq 20$	390	1.1	950	脉冲变压器等
FJ-106	C ₀ 基	0.6-0.7	<0.79	~0.5				18	1200	磁带机磁头
FJ-109	C ₀ 基	0.8	1.08	~0.03		$P_{6/20}kHz \leq 25$	332	1-35		20kHz 开关电源
FJ-110	C ₀ 基	0.68	1.08	0.03 -0.5		$P_{1/200}kHz \leq 27.7$	323	1-20		200kHz 开关电源等
FJ-113	C ₀ 基	0.69	1.11	0.91			324	30		100kHz 开关磁放大 器等
FJ-111	Fe-Ni基	0.8-1.0	1.6-4.8	≥ 0.85		$P_{4/10}kHz = 33.5$		30-80		漏电保护开关
FJ-201	Fe-Ni基	0.73	1.08	0.8			243	30		互感器等
FJ-202	Fe-Ni基	1.4	4.0	0.8		$P_{10/400}Hz \leq 1.4$	435	15		双极脉冲变压器
FJ-233H	Fe-Ni基	0.79	1.6	0.1		$P_{2/20}kHz \leq 15$	258	0.3-2		储能变压器、电感
FJ-301	Fe基	1.6	7.9			$P_{10/400}Hz = 3.5$	420	15		中频变压器
FJ-301Z	Fe基	1.61	2.4	0.92		$P_{3.5/10}kHz \leq 32$	420	31		高频大功率电源
FJ-301H	Fe基	1.61	3.63	0.05		$P_{10/1}kHz \leq 0.75$	420	1		单极脉冲变压器、电 感
FJ-302	Fe基	1.58	4.8			$P_{10/400}Hz \leq 1.7$	410	20		配电变压器、电源变 压器
FJ-303	Fe基	1.58	7.9			$P_{4/10}kHz \leq 20$	405	20		中、高频电源
FJ-305	Fe基	1.30	4.8			$P_{4/10}kHz = 25$	318	$\mu 4/20kHz = 1800$		发射机输出变压器
FJ-306	Fe基	≥ 1.1								磁分离、阴极

表4 快淬薄箔钎焊料

牌 号	成 分	厚(μm)	钎焊温度($^{\circ}C$)	熔 点($^{\circ}C$)	流 动 性	用 途
GHL6-2	Ni基(高温)	30-50	1060-1100		良好	钎焊不锈钢
FJ-421	Cu基	30-60	650	590-660	良好	代银焊料
FJ-422	Cu基	30-60	700	790-875	良好	钎焊铜合金 铜银合金等
FJ-423	Cu基	30-50	900		良好	钎焊碳钢、 低合金钢等

四、应用概况

1. 非晶态配电变压器应用

至今,全世界已有6—7万台配电变压器在并网运行,主要集中于美国,是美国开发应用的重点,也是国内外关注的主要应用开发目标之一。根本原因在于利用非晶态软磁合金的优异软磁性能,铁芯损耗仅为硅钢的1/3,可以节约大量电能。有人推算,我国如果全部用非晶态合金代替现用硅钢变压器,其空载损耗可降低60—75%,每年可节电100亿度,价值10亿元以上。在“七五”期间,我国已用国产料制备出多台非晶态合金配电变压器,包括三相、50kVA配电变压器和单相卷绕式变压器,空载损耗比同类型硅钢变压器下降约60%。国内外的运行试用结果都表明,性能稳定可靠,制作技术可以解决,节能效果显著,应用市场广阔。现存主要问题是:要把价格降低到使用单位可以接受的程度仍有大量工作要做。

2. 非晶态合金在电子方面的应用

如果说美国发展非晶态合金重在电力方面的应用,那么就应该说日本和德国重点发展了电子方面的应用,我国的应用也集中于电子方面^[3]。我国1988年生产约80t非晶态软磁合金,几乎全部用于电子电器方面。

日本东芝公司1987年已建成月产50万个铁芯的一条龙生产线,目前正致力于扩大到月产150万个铁芯。三井石化公司也正在建立年产600万个铁芯的生产线。我国已经正式决定,“八五”期间在冶金工业部钢铁研究总院建立年产100万只铁芯的生产线。

我国在电子方面的应用开发有自己的明显特点:应用面广,用量比较大,性能优异,已初步形成产业化。几种主要应用如下:

(1)漏电保护开关的互感器,预计至今已有1000万只投放市场,具有性能优越,价格便宜的优点。

(2)开关电源和其他高频电源用变压器,是一个重要应用和发展领域^[4]。现在使用频率在

10—500kHz,功率从几瓦到几十千瓦,具有体积特别小、效率高、重量轻等显著优点,性能远优于现有其他软磁材料。

(3)磁放大器铁芯,使用频率已高达100—500kHz,性能优异。

(4)对于脉冲变压器,我国已研制出小功率、中功率和大功率各类非晶态变压器,性能远优于硅钢和坡莫合金。

(5)电源变压器,主要包括中频变压器、电焊机逆变器和各种400Hz变压器。以3kVA的400Hz变压器用矩形铁芯CD35×100为例,铁芯由原来45kg降到10kg,整个变压器由85kg减为20kg,且空载电流下降94%,空载损耗下降80%。

3. 其他应用

非晶态合金在国内还开发了多种产品和应用。(1)熔抽钢纤维,包括碳钢、耐热不锈钢纤维等,分别用于增强混凝土和耐火材料等,年用量已达100余吨。(2)非晶态钎焊料,这类合金包括高温、中温和低温焊料,美国和我国均有几十个牌号。它们的成分一般分别为Ni基、Cu基和Sn、Pb基合金。(3)快淬NdFeB等永磁合金,现在国内已能够批量生产,具有良好的应用市场。

(4)还有许多应用如催化剂、结构材料等,还在迅速发展。

五、几个最新进展

1. 纳米晶软磁合金

利用快淬工艺制备非晶态合金,再由非晶态合金在适当温度下产生纳米晶结构的方法得到了迅速发展,并形成了产业。1987—1988年,日立金属公司的吉泽、山内等人首次研制出了具有纳米晶结构的软磁合金^[5]①,成分为 $\text{Fe}_{73.5} \cdot \text{Cu}_1 \text{Nb}_3 \text{Si}_{13.5} \text{B}_9$ (at%),原始状态呈非晶态,经530—550℃退火后形成晶粒尺度为10—20nm的颗粒。在最佳性能状态下常出现两个相:一个是 $\alpha\text{-FeSi}$ 单一固溶体,体积约占70—80%;另

① 吉泽克仁,小熊繁,山内清隆,1988年第102回日本金属学会春期大会讲演概要393。

一相是晶面相,为富 B,Nb 而少 Si 的区域,层厚约 1nm,体积占 20—30%。典型的纳米晶软磁合金(Finemet)的性能如表 5 所示。最近,纳

米晶软磁合金又开发出了高 B_s 类^[6], B_s 高达 1.70T,除 Finemet 等铁基外,也研究出了钴基、镍基纳米晶合金^[7]。

表 5 Finemet 与非晶合金性能的比较

合金	带厚 (μm)	B_s (T)	B_7/B_s (%)	H_c (A/m)	相对 磁导率	磁芯损耗 (kW/m^3)	λ_s ($\times 10^{-6}$)
合金 A	18	1.24	54	0.53	100,000	280	+2.1
合金 B	18	1.18	58	1.1	75,000	280	~0
FT-1H	20	1.35	90	0.8	5,000	950	+2.3
FT-1M	20	1.35	60	1.3	70,000	350	+2.3
FT-1L	20	1.35	7	1.9	22,000	310	+2.3

我国已经研究出并能较大批量制备纳米晶软磁合金,而且已经在高频变压器、开关电源、多种互感器、大功率中高频变压器等方面应用,均已获得很好的使用效果。其特性达到了表 5 所示指标,它的高频损耗低、稳定性好、电磁性能优异且价格较为便宜。

2. 真空下喷制极薄非晶态合金带材

通常,实验和生产的非晶态条带多是用非真空单辊技术,带厚最薄也在 $15\mu\text{m}$ 以上。最近,为了适应变压器向高频化发展等需要,在真空下制作极薄带取得了成功并已在日本东芝公司投入生产。生产的厚 $3.8-5.5\mu\text{m}$ 的钴基非晶态合金带材,在频率 100kHz 和磁感 0.1T 下的铁芯损耗,仅为铁氧体的 1/10,初始磁导率在 1MHz 频率下仍可达到 10000 以上,性能优异^[6]。

3. 非晶态催化剂材料

同晶态催化材料相比,非晶态催化材料的优点有:(1)比常规晶态催化剂有更宽的成分范围;(2)具有高浓度的高度配位不饱和的活性中心,表面能高;(3)各元素分布均匀,可以充分发挥各种助剂的作用。由于其结构、表面状态、物理和化学物质的特殊性能,非晶态催化材料很可能成为一代全新的催化剂材料。

所研究的合金系列主要有铁基、镍基以及贵金属基合金,实用性研究多集中于“加氢催化”和“电极催化”两个方面。我国现已研究出了几种催化剂,其中化纤产品加氢催化的 Ni-Al 系骨架催化剂,可使产品转化率比传统催化剂物理

提高达 6%。

4. 快淬 NdFeB 永磁合金

利用快淬工艺技术制备铁基稀土永磁合金 NdFeB 磁粉,近来得到迅速发展。美国 GM 公司 1986 年投资 7000 万美元在印第安纳州建厂,大量生产并出口销售多种磁粉。我国大约从 1986 年开始研究,至今已有多家建造生产设备,有的公司还从美国引进了小型生产 NdFeB 的快淬设备并已初步投产。预计,随着引进设备的投产和国内自制设备的工艺技术发展,在最近三年内,我国快淬 NdFeB 的生产能力将突破百吨,其应用和市场将会迅速打开。

5. 值得重视的其他快淬非晶、微晶材料

美国已用单辊法制备出宽 560mm、厚 0.8—1.0mm 的不锈钢带;日本川崎钢铁公司制备出宽 500mm、厚 0.3mm 的硅钢薄带;我国用机械合金化法制备非晶粉末和块材,用雾化法制备非晶粉末等,都得到迅速发展。

六、重要应用开发前景

我国的快淬金属产业,以冶金系统为主已形成较大规模,具有从基础研究、材料研究、工艺装备和技术研制、多种应用并形成产业的配套体系。但是,同美国、日本相比仍有较大差距,同国外研究与开发的深度和发展速度相比也存在明显不足。

据日本通产省调查报告提供的新金属材料市场预测,到 2000 年日本产值将达到 1600 亿

日元而跃居首位.早在60年代,国外有人嘲讽非晶态合金为“愚蠢的Duwez合金”,认为毫无研究和应用价值.现在,几乎没有人怀疑快淬金属是材料和工艺技术的两大变革,具有重大应用价值和发展前途.至今,不仅是软磁合金材料,已在永磁材料、钎焊料、增强结构材料、催化材料等多方面发展并获得了成功.在材料形态上,也不仅有薄带和薄膜,已经发展出厚带、粉末、丝材、块材、纤维和表层,甚至研究出了管、球、复合材料等.在工艺装备方面,也不仅是液相急冷的单辊法喷制非晶薄带,已经发展出双辊法快速凝固厚带或薄板,多种喷制纤维和丝的方法,快淬粉末也已形成产业.

我国在快淬金属产业初具规模的基础上,应该重点开拓市场,广泛应用于国民经济发展

上.同时,决不能放松对国际上快淬金属发展的跟踪和竞争,要有重点地继续研究开发一些新材料和新工艺,建立具有我国特色的快淬金属产业.

- [1] P. Duwez et al., *J. Appl. Phys.*, **31**(1960),1136.
- [2] 国家标准-GB_{n292-89},快淬金属的分类和牌号.
- [3] 王新林等,非晶态合金及其应用,冶金部科技司出版,(1990),46.
- [4] 唐与谏,国外金属材料, No. 1(1992),5.
- [5] 日K昭64-31922(日立金属).
- [6] 日K平1-242757(日立金属).
- [7] 日K平2-80533(TDK).
- [8] M. Yagi et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26-5**(1990),1409.

第六届全国原子分子物理会议简讯

第六届全国原子分子物理会议于1992年8月14日至18日在长春市召开.这次会议由中国物理学会原子分子物理专业委员会与吉林大学原子与分子物理研究所联合主办.中国物理学会原子分子物理专业委员会主任王忠烈教授主持了会议.吉林大学校长伍卓群教授和吉林省物理学会理事长、中国科学院学部委员吴式枢教授等到会祝贺并发表了热情洋溢的讲话.

这次会议有13个特邀报告:氢原子集团的结构与能量计算(苟清泉),电子与原子分子碰撞物理实验(徐克尊),重粒子加速器中的原子分子问题(刘兆远),原子团簇的结构和性质(王广厚),利用离子准分子获得XUV激光(王骥),分子反应动力学中的几个原子分子物理问题(孔繁敦),分子的非线性光谱效应和高激发态研究(王祖贻),离子阱中的离子囚禁与冷却(朱熙文),分子里德伯能级结构(李家明),激光分离同位素中的原子与激光相互作用物理(林福成),分子结构中的李代数与不可约张量方法(李伯符),激光等离子体软X射线激光与原子物理过程(潘守莆)和(e, 2e)碰撞反应及其进展(郑延友).会议收到175篇学术论文,其中原子分子结构方面37篇,原子分子光谱方面36篇,原子分子碰撞方面63篇,粒子与固体表面相互作用方面七篇,电磁场中的原子与分子方面15篇,

团簇方面九篇,其他方面有三篇.

这次会议交流和检阅了我国从第五届全国原子分子物理会议以来在原子分子物理研究领域取得的新成果.与历届会议相比,这次会议的明显特点是原子分子碰撞方面的论文所占比例大大增加,实验研究和分子物理方面的论文所占比例也有不同程度的增加.这些情况表明,近两年来我国在原子分子物理这一重要领域的研究工作取得了可喜的进展.这次到会的有来自全国50多个单位的140余位学者,其中35岁以下的青年同志约占60%.

这表明我国从事原子分子物理研究的队伍不断壮大,后继有人,大有希望.

会议期间与会代表参观了吉林大学原子与分子物理研究所和超硬材料国家重点实验室.由吉林大学原子与分子物理研究所负责编辑,正式出版了会议文集《原子与分子物理》(吉林大学出版社).

经过到会的原子分子物理专业委员会委员和部分单位代表的讨论和协商,决定第七届全国原子分子物理会议于1994年在合肥举行,由中国科学技术大学承办.

(吉林大学原子与分子物理研究所 王治文)