

金属玻璃与经济建设

杨膺善

(冶金工业部钢铁研究总院)

金属玻璃是近十几年出现的新型合金，它具有明显优于常用合金的特性。称其为“玻璃”绝不是因为它象玻璃那样脆而透明，而是因为这种金属的内部原子排列象玻璃一样是长程无序的。金属玻璃的外观与一般金属一样具有光泽。我们知道，日常生活中人们接触到的金属的原子排列是长程有序周期性排列的，形成金属晶体。而金属玻璃内部的原子排列的这种长程无序，使得这类合金具有高强度、高硬度、高耐腐蚀性及非常“软”的磁特性等一系列可供应用的优异特性，从而在近年来得以飞速发展。

既然金属玻璃具有如此多的优点，为什么近十几年才出现金属玻璃条带呢？这是因为金属玻璃条带是用急冷方法获得的，而这种技术具有一定的难度。所谓“急冷”，就是将熔融金属液体以非常快的速度冷却成固体，使得液态金属中处于混乱状态的原子还未来得及“排队”就被固化下来了。对于不同成分的金属玻璃所要求的冷却速度不同，一般需要 10^4-10^6 °C/秒的冷却速度。这个冷速是很惊人的。这种新发展起来的制作金属的急冷固化法不仅可制作金属玻璃而且可制作微晶合金。微晶合金的应用也是本文将介绍的内容。

下面将分类叙述金属玻璃及微晶合金在经济建设中的应用。

一、金属玻璃作为软磁合金的应用

目前金属玻璃应用得最广泛的领域是做软磁器件。对于软磁合金来说，合金的磁性越“软”越好，即磁导率、饱和磁感应强度越高越

好，矫顽力、损耗越小越好。现在使用的软磁材料（坡莫合金、硅钢及铁氧体等）都是晶态的，晶态合金存在着磁晶各向异性，它阻碍了合金“软”性的改善。而金属玻璃是非晶态的，它不存在磁晶各向异性，所以它是天然的“软”。金属玻璃具有明显优于现用软磁合金的磁特性。

1.50—60周/秒配电变压器

在配电系统中，配电变压器有着广泛的应用，它与每家每户都有关系。现用的配电变压器是用取向硅钢片制作的，配电变压器一天24小时始终在工作，它本身要耗损电力。以15千伏安的小配电变压器为例，就要一直消耗322瓦的电力。而用金属玻璃制作的配电变压器可减少将近一半的损耗。美国做了一个估计，若将美国的全部现有配电变压器换成金属玻璃制作，则一年可节约10亿美元。

下面举两个实例：表1是美国联合公司试制的15千伏安金属玻璃变压器与硅钢变压器的性能参数的对比；表2是日本大阪变压器公司试生产的10千伏安油浸配电变压器与硅钢变压器的性能参数的对比。

从以上数据可以看出，金属玻璃的铁芯损耗及激磁电流明显下降。这是由金属玻璃的磁特性决定的。以美国的METGLAS 2605SC（一种金属玻璃商品牌号）为例，其磁特性与硅钢相比见表3。很明显，金属玻璃的 μ_m 高于硅钢很多，所以激磁电流显著低于硅钢。金属玻璃的 $P_{10/60}$ 也比硅钢低很多，所以变压器的损耗降了下来。

2.400周/秒航空变压器

金属玻璃的电阻率一般为125微欧厘米，

表 1 15 千伏安配电变压器

	激磁电流	芯 损	铜 损	总 损	节 能	工 作 温 度
硅 钢	2.5 安培	112 瓦	210 瓦	322 瓦	0	100°C
金属玻璃	0.12安培	14 瓦	166 瓦	180 瓦	1250 度/年	70°C

表 2 10 千伏安油浸变压器

	芯 损	负载损耗	效 率	铜 温 升	激磁电流	总 重 量	油	铁芯温升 (空气中)
硅 钢	<58 瓦	170 瓦	>97.3%	<55°C	<3.0%	95 公斤	23 升	34°C
金属玻璃	11.8 瓦	172 瓦	98.2%	39°C	0.15%	115 公斤	22 升	4°C

表 3

	饱和磁通密度	交流磁导率 μ_w ($B_m = 10000$ 高斯, $f = 60$ 赫兹)	$P_{10/60}$
硅钢 Z6H (带厚 0.3 毫米)	20300 高斯	80000 高斯/奥斯特	0.45 瓦/公斤
金属玻璃	16100 高斯	150000 高斯/奥斯特	0.14 瓦/公斤

* $P_{10/60}$ — $f = 60$ 赫兹及磁感应强度 $B_m = 10000$ 高斯时的损耗。

表 4

	额 定 功 率	芯 (25°C) 损	激 磁 功 率 (25°C)	总 重 量
3%Si-Fe 合金	45 瓦	2.4 瓦	6.1 伏安	295 克
金属玻璃	45 瓦	1.3 瓦	1.3 伏安	276 克

表 5

	总 体 积	总 重 量	工作磁通密度	芯 (100°C) 损	激磁功率 (100°C)
金属玻璃	200 厘米 ³	520 克	5500 高斯	5.4 瓦	7.6 伏安
铁 氧 体	300 厘米 ³	1000 克	2500 高斯	>6.3 瓦	72.7 伏安

表 6

	100 千赫, 输出功率 5 伏, 20 安培			250 千赫, 输出功率 15 伏, 1 安培		
	铁心温度	效 率	激磁电流	铁心温度	效 率	激磁电流
东芝金属玻璃环状铁芯	25°C	80%	70 毫安	35°C	74%	20 毫安
80%Ni-Fe 合金	45°C	77%	210 毫安	60°C	71%	80 毫安

表 7

屏蔽筒情况 屏蔽比 外磁场峰值	屏蔽筒尺寸: 直径 5.1 厘米, 高 40.6 厘米				屏蔽筒尺寸: 直径 10.2 厘米, 高 40.6 厘米			
	屏蔽层数	2	4	10	屏蔽层数	2	4	10
2 奥斯特		35	50	100		29	45	60
4 奥斯特		50	85	150		6	70	110
8 奥斯特		9	110	280		2.5	9	180

坡莫合金的电阻率为 50—70 微欧厘米, 硅钢为 45—48 微欧厘米。由于金属玻璃的电阻率较高, 所以它更适于在较高频率下使用。

下面比较了两台 45 瓦、400 周/秒的美国航空变压器的使用参数(见表 4)。两台航空变压器分别用金属玻璃及 3% 硅钢制作。可以看出, 随着使用频率的增加, 金属玻璃制作的变压器的重量也低于硅钢。

3. 开关电源

随着电子技术的进步, 电子元件与电源变压器两者体积及重量相差过于悬殊的矛盾日益激化。由于开关管的进步, 近年来开关电源发展很快。它抛弃了笨重的工频变压器, 使得体积和重量都大大减少, 并且提高了效率。开关电源工作频率在 10 千赫兹以上, 在国外已有工作频率为 200 千赫兹的开关电源出售。因为工作频率高, 所以目前都使用铁氧体。但与金属玻璃相比, 铁氧体的饱和磁感应强度及磁导率都较差。表 5 给出美国用两种材料制作的 10 千赫兹航空用开关电源的对比数据。可以看出, 用金属玻璃制作的开关电源的重量和体积大大地减少, 这对上天的装置来说是至关重要的。

表 6 是日本东芝公司用自己生产的金属玻璃铁芯制作 100 千赫兹及 250 千赫兹开关电源并与用 80% Ni-Fe 合金制作的开关电源相对比。

4. 磁屏蔽

在电子设备中, 屏蔽外来的及内部散发的电磁干扰是必要的, 一般使用坡莫合金来达到此目的。但坡莫合金价格较贵, 并且制成屏蔽筒以后往往需要大设备来退火。美国联合公司早已有一米宽的金属玻璃织物出售。这种类似于麻布的金属玻璃织物可以裁制成各种形状, 可以冲孔, 不需要退火就可以获得良好的屏蔽效果。其屏蔽参数见表 7。

5. 磁放大器

用金属玻璃制作的磁放大器已成功地应用在开关电源中。日本电设机器工业株式会社将内径 6 毫米、外径 12 毫米、高 5 毫米和内径 6 毫米、外径 12 毫米、高 3 毫米的钴基金属玻

璃铁芯做成磁放大器, 分别用于 24 伏、2 安培及 5 伏、10 安培的开关电源中, 开关电源的工作频率为 200 千赫兹。

6. 轴流电动机

美国已开始将金属玻璃用于电动机方面, 现已制出一台轴流电机样机。据专家估计, 电机本身的损耗可减少 75%。目前美国整数马力电动机本身一年要消耗 200 亿度电。如果全部换成用金属玻璃制作, 则一年可节约 150 亿度电, 约相当于一个 200 万千瓦的发电厂一年发出的电量。这是一个可观的数目。

7. 磁头

由于金属玻璃具有初始磁导率高、电阻率高及硬度大的特点, 所以人们很早就想到它适于制作磁头。特别是近年来出现了金属磁带, 对磁头的耐磨性就有了较高的要求。日本在这方面动手最早, 投资最多, 现在日本 TDK 公司已经在市场上正式推出金属玻璃磁头商品。美国的 Kenwood 牌及 TEAC 牌立体声座就装有金属玻璃磁头, 其高频响应及清晰度都有改善。

冶金工业部钢铁研究总院与文化部音乐研究所合作, 已制出我国的金属玻璃立体声磁头, 并于 1981 年通过鉴定。经过测试及试听达到了日本三洋 9994 型录音机磁头水平。

上海钢铁研究所与福建电影机械厂、上海电影技术厂合作, 用金属玻璃制作电影录音机的录、还音磁头取得成功, 并通过鉴定与 Fe-Ni-Nb 硬坡莫合金相比, 金属玻璃磁头的三次谐波失真小, 在相同的高录流下失真度可降低一倍。耐磨特性比坡莫合金提高三倍以上。

8. 漏电保护器

为了人身的安全在电气设备上安装漏电保护器是必要的, 在国外早已大量生产使用。我国农村和城市每年因触电而死亡的事例颇多。上海钢铁研究所和冶金工业部钢铁研究总院于 1982 年联合鉴定了用钴基及铁镍基金属玻璃制作的漏电保护器。金属玻璃漏电保护器与用坡莫合金制作的漏电保护器相比具有灵敏度高和价格便宜的优点。

9. 其他磁性器件

我国在开展金属玻璃的应用方面投入了不小的力量,努力将金属玻璃用在一切可能应用的方面。1981年上海钢铁研究所用金属玻璃制成电磁传感器探头,将探头埋在路面下可感知路面上经过的汽车。金属玻璃探头的灵敏度高,体积小,成本仅为超声波探头的1/10,已正式应用在城市交通灯的自动控制上。1982年上海广播器材厂将上海钢铁研究所的钴基金属玻璃做成摄像管偏转聚焦线圈中的磁导筒,其重量仅为坡莫合金的1/3,已向国外出口偏转线圈。1982年上海钢铁研究所将金属玻璃用于测量汽车速度的测速雷达电源变换器中,其效率由坡莫合金的70%提高到74%。1982年天津第二电子仪器厂用北京冶金研究所的铁基非晶合金成功地制作了偏差电桥中的平衡元件。1982年北京冶金研究所将钴基金属玻璃用于20—50千赫兹自激式直流变换器,该变换器优于用坡莫合金制作的。

以上的应用实例清楚地表明,金属玻璃虽问世不久,但已开始磁性器件方面得到广泛的试用,显示出明显的优点。可以肯定,金属玻璃今后将在磁性器件方面得到更广泛的应用。

二、金属玻璃作为焊料的应用

焊接在金属工件加工过程中往往是不可少的工序。许多工件的质量直接取决于是否可焊及焊接质量的高低。甚至许多新型合金是否能推广使用也取决于该合金的焊料是否已解决。

以涡轮发动机叶片的钎焊为例。现用的粉末态钎焊料是将该料调成胶状敷于待焊处钎焊。虽然箔带状的钎焊料更易于使用,但粉末态成分的钎焊料无法轧制成箔带状。但是用急冷的方法就可以制得箔带状的钎焊料。冶金工业部钢铁研究总院制成的GHL6-2镍基钎焊料金属玻璃薄带,可作为850—900℃的高温钎焊料,用于涡轮发动机叶片、高温合金、不锈钢、钨、钼等材料的钎焊。钎焊接头在室温下的拉伸强度大于45公斤/毫米²。镍基金属玻璃钎焊料的主要优点是:韧性良好,便于运输及储存,

可冲制成各种形状,加工尺寸精确,特别适合于精密部件和要求严格控制钎焊料数量的薄壁件的钎焊。

再以铜基中温钎焊金属玻璃薄带为例。上海汽车电机厂生产的电机由于转子线之间及整流子铜排间的焊接工艺不过关,所以转子的质量与世界先进水平相比还存在较大差距。这主要是由于还使用着传统的浸锡焊接法。当上海钢铁研究所向上海汽车电机厂提供了铜基中温钎焊金属玻璃薄带以后,该厂一举改变了转子的质量。其经济效果是显著的:在输出功率不变的条件下,持续起动时间由原部颁标准0.2分钟提高到3分钟以上;钎焊接头强度由原来的4公斤/毫米²,提高到≥14公斤/毫米²;保用起动次数由原来6000次以上提高到10000次以上,使转子质量达到英国洛卡斯公司同类产品标准;每年节约锡3吨,节约电4万度以上,节约铜10吨左右,相当于价值十万元以上。

三、金属玻璃细丝作为磁分离介质及电沉积材料的应用

将金属玻璃喷制成0.04毫米厚、0.5毫米宽的细长丝,因其两侧边缘呈尖劈状,所以在外磁场的作用下细丝边缘产生很强的磁场梯度。利用这种高磁场梯度进行磁分离是目前一个专门的技术领域。高磁场梯度磁分离技术可以将高岭土中的弱磁性物质 Fe_2O_3 萃取出来。作为产生高磁场梯度的细丝介质一方面应该具有饱和磁感应强度高、磁性“软”的特性,另一方面由于磁分离介质工作在矿浆中,所以必须同时兼有良好的耐腐蚀特性。成分为 $Fe_{75}Cr_{15}P_{10}C_7$ 的金属玻璃细丝就兼有此种特性。苏州瓷土公司使用钢铁研究总院提供的0.2毫米宽的金属玻璃细丝,可以很方便地将含2.01% Fe_2O_3 的高岭土净化为只含0.7% Fe_2O_3 的特级品高岭土。高磁场梯度磁分离技术还可以用来净化各类污水、工厂废水及去除医院废水中的细菌等。金属玻璃细丝因为是用急冷法一次成形,故成本很低。

表 8

	电积时间 (小时)	析出率 (电积 16 小时)		实收率 (按合质金计) (%)	电流效率 (%)	直流电耗 (度/公斤)	电积尾液含金量 (电积 16 小时) (克/升)
		金	银				
金属玻璃细丝	12	99.77%	99.73%	~100	2.33	41.3	0.0004
钛板	50	92.73%	94.37%	~83.45	0.95	50.3	0.024
不锈钢板	>50	79.65%	80.07%		0.68	60.4	0.055

* 电积后溶液含金量为 2 克/米³。

金属玻璃细丝还由于具有很高的表面积重量比,所以代替现用的钛板或不锈钢板做电积阴极材料表现出明显的优越性。辽宁省冶金研究所用钢铁研究总院提供的金属玻璃细丝做电积金、银的阴极材料,该材料与其他材料的对比结果见表 8。

可以看出,金属玻璃细丝的优点是异常明显的,它可以缩短生产周期,大大提高效率,多回收金银,并降低电耗。

四、微晶合金用于制作机械部件

前面已述金属玻璃是用急冷的方法制作的,只有成品为薄带或细丝才能保证快速冷却。以上叙述的应用都是使用带材或丝材。金属玻璃在尺寸方面受到的限制,大大地缩小了其应用的范围。是否能用急冷的方法制作大块合金呢?这正是本节所要讨论的问题。

用急冷的方法直接制作大块的金属玻璃目前是不可能的,但用急冷的方法可制得微晶粉末。它虽然不是金属玻璃,但生产方法与制作金属玻璃的方法相似,所以具有与现用合金不同的成分及特性。将此种微晶粉末热等静压成所需形状的机械部件,则具有前所未有的优良特性。急冷微晶合金是基于金属玻璃制作方法的新领域,它可适用的范围及产量将来很可能会超过金属玻璃。

1. 工具钢

美国的 Crucible 钢铁公司及瑞典的 Uddeholm 公司用惰性气体或氮气保护,通过急冷固化制成圆球状颗粒,再经过热等静压成型就可以按照常规加工高速切削钢的方法进行轧制或

锻造。由于微晶粉末中不存在粗大的碳化物,经过加工以后有了相对均匀的细小碳化物,所以使得间断切削寿命比传统钢锭锻造的高速钢切削寿命增加了四倍,并且增加了使用的可靠性。Crucible 钢铁公司及 Uddeholm 公司分别发展了各自的 CPM 系列及 ASP 系列微晶高速钢。

2. 超合金

超合金主要用于汽轮机中。用急冷微晶粉末通过热等静压可制成汽轮机中的叶轮。这种方法和用传统的加工钢锭的方法相比有如下优点:

(1) 由于制作的部件非常接近于最终工件的形状,所以缩短了工艺流程,节约了材料,总起来可节约费用 50—60%。

(2) 由于不存在宏观偏析和具有很均匀的微晶及细树枝状微观结构,所以过去不可锻的成分现在也变得可以热加工,甚至具有超塑性。

(3) 由于消除了大块的碳化物,所以改善了加工性能,并且延长了机床的使用寿命。

(4) 由于不象大块的超合金铸锭那样会存在各种缺陷,所以具有良好的工艺稳定性。

现在已有若干牌号的超合金可供选择: IN-100(Ni-10Cr-15Co-3Mo-4.7Ti-5.5Al), Mar M-509 及 Rene 95 (Ni-14Cr-8Co-3.5Mo-3.5W-3.5Nb-2.5Ti-3.5Al)。

3. 铝合金

商用铝合金通常是由铝锭加工而成,尺寸较大的杂质铁和硅常弥散其中,以致于造成固溶处理的困难,限制了成型能力和断裂强度的提高。此外也不利于耐疲劳、耐腐蚀、耐应力腐蚀及耐蠕变等耐用特性的改善。但是用急冷固

表9 制造时固化的冷却速度对 2024-T4 铝合金的影响(用冷挤压的方法使急冷的微晶粉末成型)

	铝 锭	在空气中固化成微晶粉末	用液态金属急冷在冷的固体表面上的方法制作微晶粉末
冷却速度(°C/秒)	0.1	100	10 ³
树枝状间距(微米)	60	7	0.7
金属杂质尺寸(微米)	10—20	4—6	0.5—1
0.2% 屈服强度 (MPa)	280	290	330
极限强度 (MPa) ¹	460	480	540
断裂颈缩(%)	37	33	39
疲劳寿命 (200MPa 下) (次数)	10 ⁸	3×10 ⁸	7×10 ⁸

化的方法就可以使这些杂质或者固溶于基体之中,或者以非常细小的尺寸弥散于基体之中,使得它们是无害的甚至是有利的。这就是急冷固化带来的本质上的好处。从表9可看出,由于急冷而使得铝合金的强度显著增加,但并不降低可塑性,同时疲劳寿命及应力断裂寿命都有很大提高。

当在2024铝合金中加入1%及3%锂后,10⁷次疲劳寿命的应力从172.5兆牛顿/米²分别增加到221兆牛顿/米²及290兆牛顿/米²,0.2%屈服强度由286兆牛顿/米²分别增加到388及561兆牛顿/米²。这些特性表明,当材料的重量不变时,强度增加了30%,这对飞机制造者来说是非常具有吸引力的。

用急冷固化方法获得的某种成分铝合金,经过热处理后其屈服强度高达850MPa,比现在最好的铝合金7001或7075都明显高。现已用合适的成分将1500公斤热压坯加工成飞机结构件进行考验。

1978年Alcoa公司制作了一些经过3400磅热压成型的MA87铝合金粉末压块。这些很大的压块成功地轧成了厚板,并且锻成了很大的飞机锻件。

Reynolds公司已经建成了一台可在空气中大量制作微晶粉末的离心式设备,其冷却速度为10²—10³°C/秒。

4. 大量生产的微晶纤维与薄片

人们对钢纤维增强水泥日益感兴趣,这是因为纤维可使水泥增加张力强度和压缩强度,并且耐用。对于高炉及反应堆来说,钢纤维能使可浇铸的耐火材料更能经受热的及机械的反

复冲击,从而使用寿命提高1—2倍。

将直径80微米、长度3毫米的铝纤维以8%的体积比弥散在聚合物中,可以提供足够的电导率,可做一般家庭用的导线。这种纤维和薄片还可以作为便宜的填料混在塑料中,从而可以降低材料成本。另外由于缩短了塑料在模具中的冷却时间,从而提高了模具的利用率。

增强水泥及耐火材料用的纤维,其最佳尺寸为:截面积0.1—0.4毫米²,长度20—40毫米。用急冷的方法可以很容易地大量制造这种短纤维。与过去的剪切钢丝或钢片的方法相比,成本可大大降低,由5.5美元/公斤降到3.4美元/公斤,降低38%。由于价格便宜,产品扩大到了耐火材料市场,由不到25吨扩大到1978年的1000吨。

Battelle公司现在可以用急冷法生产1毫米见方25微米厚的薄铝片。

总的来看,急冷固化的方法为人们带来了新材料。只有材料有了长足的进步,产品才会有明显的改善,这一点逐渐被人们所认识。我国已开始在这方面投入力量,但资金和人力尚感不足。

参 考 文 献

- [1] 美国联合公司样本,(1982)。
- [2] Proceedings of the 3rd Joint Intermag-MMM Conference (1982); Montreal, *IEEE Transaction on Magnetics*, MAG-18-6(1982)。
- [3] H. Jones, Rapid Solidification of Metals and Alloys, Chamelleon Press Limited, (1982)。
- [4] B. Cantor, Rapidly Quenched Metals III, The Metals Society (1978)。