



# 部分扩散铁基合金粉末的 压缩性及烧结均匀化

杨宗坡 韩学义 韩金贵

(东北工学院)

**[摘要]** 研究了(%)Fe—1.5Cu—2Ni、Fe—7MC<sup>\*</sup>、Fe—2Cu—0.6P部分扩散粉末(分别混入碳)试样的压缩性、烧结均匀化程度、机械性能等。实验结果表明:部分扩散粉末具有较高的压缩性,同时也有较好的烧结均匀化性能,烧结后铜、钼、磷等元素得到较均匀的分布。上述三种材料的烧结态强度分别为500、600和700N/mm<sup>2</sup>。

## 一、前言

随着国民经济发展而出现的汽车、拖拉机、纺织机械等产品的更新换代,必然导致粉末冶金高强度材料的增加。因此,如何提高粉末冶金制品的强度及塑性,已成为我们的重要研究课题。一般说在一次压制烧结条件下,可通过提高制品密度来提高铁基制品强度。为此可采用高压缩性铁粉,即用低碳、低夹杂物、高松装密度的铁粉;或者进行合金化来强化制品,即采用雾化合金粉末。但这两种方法都存在一定缺点。实践<sup>[1]</sup>表明,部分扩散合金粉末是解决这一问题的较好方法。部分扩散合金粉末是采用高压缩性铁粉与微细的纯合金元素或母合金粉末一起进行适当处理,使铁粉与微细合金元素粉末产生未进行充分扩散的极薄扩散层,因而不影响铁粉的压缩性。由于合金元素在烧结前就粘结在铁粉颗粒表面上,因而在烧结时,合金元素可迅速扩散,提高了均匀化程度。

本文主要研究了(%): Fe—1.5Cu—

2Ni—0.6C、Fe—7MC—0.3C及Fe—2Cu—0.6P—0.6C的部分扩散粉末试样的粉末特点、压缩性、烧结均匀化程度及机械性能等。研究表明,部分扩散铁基合金粉末具有较高的压缩性,均匀化程度也较好,烧结态强度可分别达到500、600、700N/mm<sup>2</sup>。

## 二、试验条件

### 1.选用如下四种材料

A材料(%): Fe—1.5Cu—2Ni经部分扩散处理后混入0.6%C;

B<sub>1</sub>材料(%): Fe—7MC—0.3C混合粉末;

B<sub>2</sub>材料(%): Fe—7MC经部分扩散处理后混入0.3%C;

C材料(%): Fe—7MC—0.6P经部分扩散处理后混入0.3%C;

D材料(%): Fe—2Cu—0.6P经部分扩散处理后混入0.6%C。

试验用鞍钢一级铁粉,其主要化学成分和物理工艺性能如表1所示。

\*MC是以铁为基含有钼铬碳的母合金

表1 铁粉的化学成分和物理工艺性能

Fe%	C%	其它杂质%	流动性s/50g	松装密度g/cm <sup>3</sup>
98.4	0.04	1.52	34	2.42

表2 MC母合金化学成分(%)

Mo	Cr	C	Fe
15.05	7.50	4.30	余量

试验用MC粉为含有Cr—Mo的母合金，平均粒度1.8μm，化学成分如表2所示。

试验用含磷母合金粉的平均粒度为1.4μm，磷含量为15%，余为铁。

试验用镍粉、铜粉由电解法制得，-325目。

在D材料中的铜粉由还原法制得，-325目。

2. 混合料外加0.5%硬脂酸锌，成形压力为686MPa。

3. A、B<sub>2</sub>、C三材料在1200°C于氢气中烧结90分钟，采用三氧化二铝粉加0.5%炭黑作烧结填料；D材料分别在1050、1110、1130°C于氢气中烧结90分钟，填料同前。

4. 拉伸试样长94mm，端部宽9mm、标距32mm、宽6mm，厚约5~6mm。冲击试样按JB2866—81标准，无缺口。

### 三、试验结果

#### 1. 部分扩散粉末的压缩性

表3、表4列出了几种粉末试样的压缩性。

从表看出部分扩散粉末的压缩性均有所提高。纯合金元素部分扩散粉末的压缩性比母合金部分扩散粉末高，但母合金粉经部分扩散处理后仍比混合母合金粉末的压缩性高。

#### 2. 烧结均匀化

图1为A材料烧结后镍区的金相照片。图2(a、b)为图1中富镍区从中心到外部镍

表3 纯铁粉、Fe—Ni—Cu混合粉末及Fe—Ni—Cu部分扩散粉末压缩性(g/cm<sup>3</sup>)

压力MPa	294	490	686
纯铁粉	5.60	6.42	7.02
混合粉	5.83	6.48	7.14
部分扩散粉	6.07	6.78	7.35

表4 材料B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>粉末的压缩性(g/cm<sup>3</sup>)

压力MPa	196	392	588
B <sub>1</sub> 材料	5.06	5.60	6.28
B <sub>2</sub> 材料	5.40	5.94	6.60

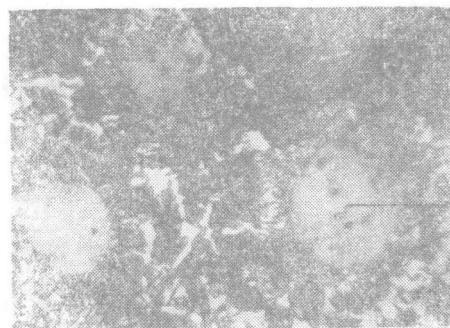


图1 A材料富镍区金相照片×630

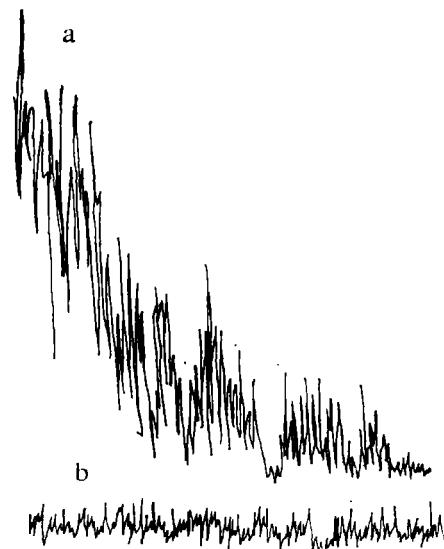


图2 A材料从富镍区中心按箭头方向扫描

(a)镍的分布；(b)非镍区铜的分布

的线扫描和贫镍区铜的线扫描。图片及曲线表明：由于镍的颗粒较大，扩散未能充分进行，在白亮区有较高的镍含量，这与电子探

针线扫描是相对应的。而铜的扩散比较均匀。

图3是B<sub>2</sub>材料烧结后电子探针二次相，图4(a、b)是该材料的电子探针面扫描铬、钼分布照片。图5(a、b)是在图3上的线扫描铬、钼分布曲线，显示出铬、钼沿着R—S方向的分布。从图可见：铬的分布是不均匀的。

图6、图7(a、b、c、d)是C材料烧结试样电子探针二次相及在此基体上铬、钼、

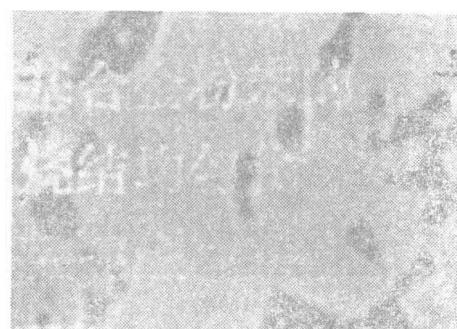
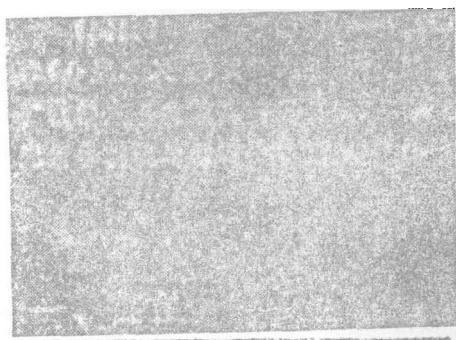
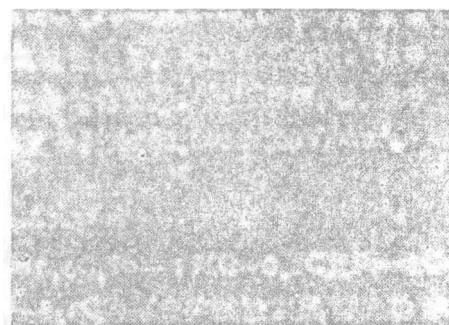


图3 B<sub>2</sub>组材料烧结后电子探针二次相



(a) 铬的分布



(b) 钼的分布

图4 图3的面扫描

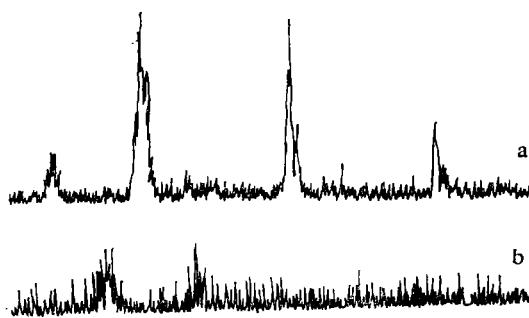


图5 图3箭头方向的线扫描

(a) 铬的分布 (b) 钼的分布



图6 C材料烧结后电子探针二次相

磷、铁分布的面扫描。从图可以看出铬的分布也是不均匀的。

表5列出了通过图6纵线方向扫描测定的磷、铬、钼、铁的重量百分含量。从表可见磷量是在0.115—0.435%之间，铬量是在0.228—9.216%之间，钼量是在0.394—1.312%之间波动。可见铬的含量波动最大，其最高含量与试件中铬含量的平均值之差也

大。而磷、钼分布的最大、最小含量与其在试件中的平均含量相近。

从上述几种材料的合金元素均匀化情况看，钼、铜、磷的分布较均匀，而铬、镍的分布都不理想。

### 3. 机械性能

表6列出了前述A、B<sub>2</sub>、C、D四种材料烧结后的物理机械性能。

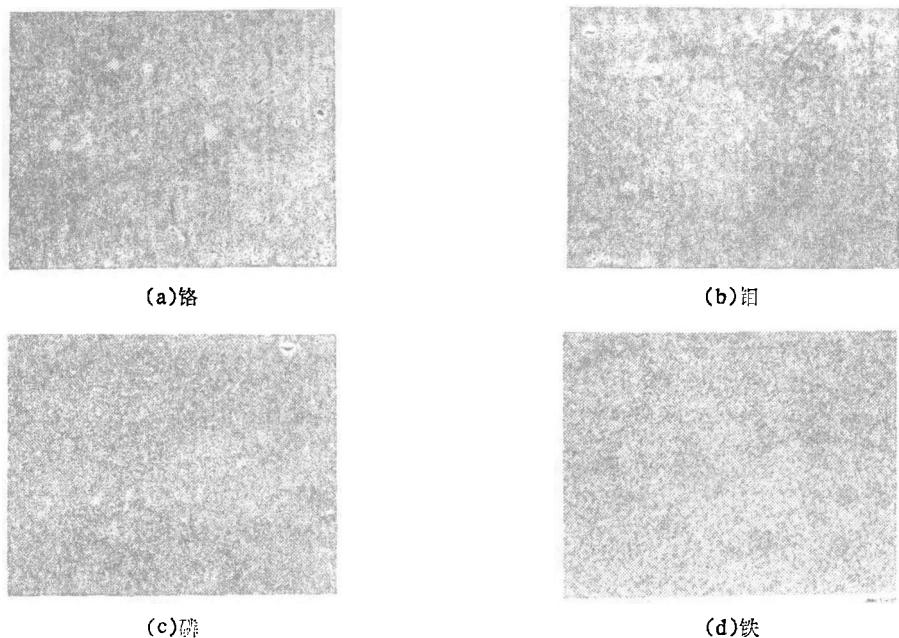


图7 C材料中合金元素的分布

表5 在图6纵线方向测定的磷、铁、铬、钼的分布 (wt%)

序号	P	Fe	Cr	Mo	总	十一
1	0.410	97.707	0.530	1.206	99.853	0.456
2	0.397	95.554	0.512	1.119	97.582	0.450
3	0.420	97.121	0.549	1.110	99.199	0.454
4	0.244	34.584	9.216	0.662	44.631	0.366
5	0.405	95.562	0.472	0.898	97.247	0.412
6	0.428	98.095	0.529	1.116	100.198	0.456
7	0.435	96.761	0.467	0.994	98.656	0.449
8	0.401	65.871	1.425	0.460	68.157	0.386
9	0.329	53.210	0.460	0.670	54.670	0.343
10	0.407	95.040	0.528	1.117	97.091	0.449
11	0.389	97.055	0.547	0.982	98.973	0.451
12	0.363	96.338	0.400	0.849	97.950	0.412
13	0.395	96.456	0.401	0.770	98.032	0.441
14	0.388	95.675	0.483	0.996	97.543	0.447
15	0.342	92.831	0.608	1.237	95.018	0.449
16	0.408	97.033	0.567	1.256	99.264	0.457
17	0.390	91.989	0.432	0.868	93.679	0.435
18	0.115	72.322	0.352	0.394	73.183	0.375
19	0.385	97.410	0.401	0.786	98.981	0.443
20	0.393	97.909	0.228	0.499	99.028	0.431
21	0.379	96.455	0.524	1.083	98.441	0.451
22	0.375	97.101	0.479	1.033	98.991	0.450

从表可见，含有镍、铜的材料具有较高的冲击韧性和塑性。在7%母合金含量的材料中加0.6%磷其强度可提高119N/mm<sup>2</sup>。

## 四、讨论

### 1. 压缩性

从实验数据看到，部分扩散粉末的压缩性较混合粉末高；纯合金元素部分扩散粉末比母合金部分扩散粉末的压缩性高。由于在部分扩散处理中消除了铁粉中的应力，同时形成松散的二次颗粒，故部分扩散粉末具有较好的压缩性。从图8、9、10可以看到经部分扩散处理后合金元素粉末与铁粉产生相互粘结的情况，粉末表层处于合金元素部分，即在接触表面处有很薄的过渡层。理论计算铁—镍之间的过渡层为0.1μm，铁—铜为1μm左右，这一薄的过渡层并不影响粉末的压缩性。由图11、12、13看出母合金粉末与铁粉之间也存在着与A材料类似的过渡层。另外，比较上述两种材料，由于纯合金元素粉末有较低的硬度和较高的塑性，故A材料有较高的压缩性；而母合金粉末中，微小而坚硬的

表6 A、B<sub>2</sub>、C、D四种材料的部分扩散粉末混碳压制烧结后的物理、机械性能

原料(设计)及 处理方式	总碳量(化验) %	密 度 g/cm <sup>3</sup>	收 缩 率 (ΔL/L)%	σ <sub>b</sub> N/mm <sup>2</sup>	H <sub>B</sub>	αk J/cm <sup>2</sup>	δ %
A	0.50	7.22	0.20	616.42	196.0	30.97	4.4
B <sub>2</sub>	0.54	6.94	0.19	643.86	—	13.03	—
C	0.51	6.87	0.57	763.42	225.0	9.21	—
D(%)	1050°C 烧结	未化验	7.28	0.57	517.44	212.5	6.17
Fe—2Cu —0.6P	1110°C 烧结	未化验	7.47	0.60	589.96	238.3	6.37
—0.6C	1130°C 烧结	未化验	7.40	0.77	622.30	205.0	7.55



图8 A材料压制后烧结前电子探针二次相

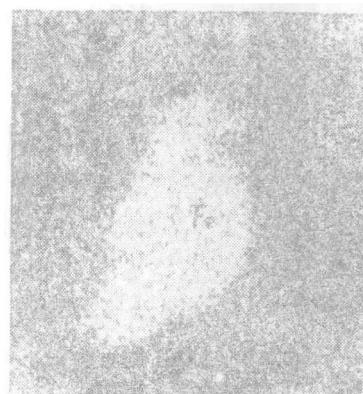
碳化物粘结在铁粉表面上，压制过程中一方面阻碍铁粉颗粒本身塑性变形，另方面增加粉末之间的摩擦力，使粉末压缩性下降。

## 2. 合金化问题

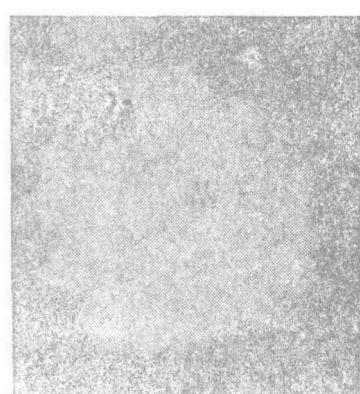
### (1) 试件中纯钼粉和含钼母合金粉烧结



(a) 铜的分布



(b) 铁的分布



(c) 钼的分布

图9 图8的面扫描

### 均匀化的比较：

假定合金元素钼为1.8μm的球形粉，在烧结试件内呈有规律的均匀分布，如图14(a)。每个钼球的扩散领域为球形。

如果把相等大小含Mo20%的母合金球形粉按试件中钼的含量计算，一个钼球的钼含量等于五个母合金球的钼含量，其分布如图14(b)。从图中钼的分布看，钼球的扩散半径为R，母合金球扩散半径为r，则 $r = 1/3R$ ，可见母合金粉中钼的扩散距离较纯钼粉的扩散距离小三分之二。故采用母合金粉末对合金均匀化是有利的。电子探针图象也证明了这一点。

另外从钼的扩散均匀化程度(F)分析，母合金也是有利的：

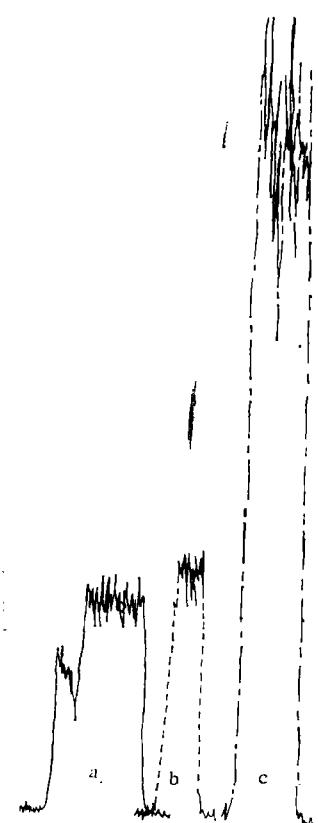
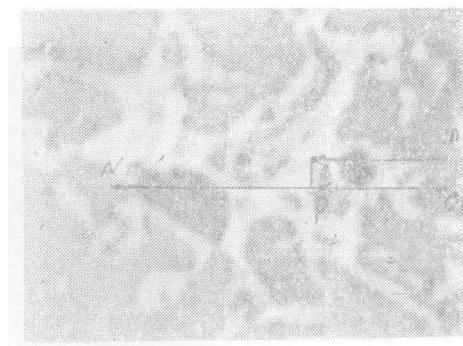
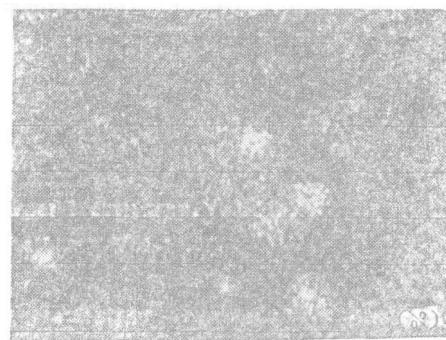


图10 图8箭头方向三元素的线扫描

(a)铜的分布; (b)铁的分布; (c)铬的分布

图11  $B_2$ 材料压制后烧结前电子探针二次相

(a)铬的分布



(b)镍的分布

图12 图11的面扫描

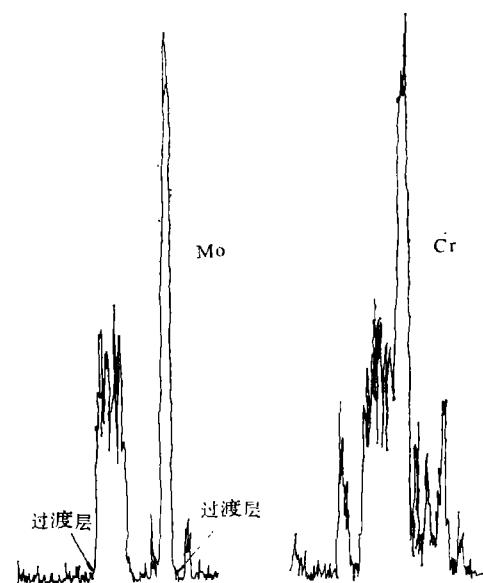


图13 探针通过图11的mN及op方向Mo、Cr分布

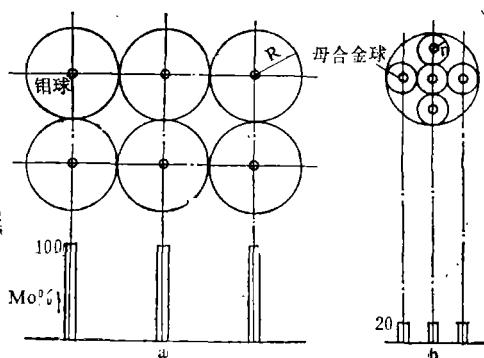


图14 钼球和含钼母合金球的扩散模型

(a)上部：纯钼的球形扩散模型；下部：扩散前钼分布；(b)上部：含钼母合金的球形扩散模型；下部：扩散前钼的分布

$$F = \frac{m_t}{m_\infty}$$

式中 $m_t$ 为 $t$ 时间从钼球表面扩散出来的钼量， $m_\infty$ 为无限时间从钼球表面扩散出来的钼量，对一定成分的试件是一定的。可见钼球表面愈大，均匀化程度也大。对一个纯元素钼粉来讲其表面积为 $4\pi r^2$ ，而与钼球含钼量相等的五个等大小的母合金球表面积为 $5 \times 4\pi r^2$ 。即在单位时间内扩散出来的钼量，五个母合金球比一个纯元素钼球大很多，其均匀化程度也高。

### (2) 各合金元素扩散比较

在试验的烧结温度下，铜早已熔化。由于毛细管力，铜很快散开，并扩散到 $\gamma$ -Fe内。磷以 $Fe_3P$ 形式加入，在烧结温度下也形成液相，即产生 $\alpha - Fe + Fe_3P \rightarrow L$ 反应，磷以液相为载体也迅速扩散到 $\gamma$ -Fe内<sup>[2]</sup>。

其它元素如铬、钼、镍等其扩散系数分别为： $D_{Cr} 1150^\circ C = 6.8 \times 10^{-10}$ ； $D_{Mo} 1100^\circ C = 4.0 \times 10^{-11}$ ； $D_{Ni} 1200^\circ C = 9.3 \times 10^{-11}$

比较三元素在 $\gamma$ -Fe中扩散系数，其扩散顺序为铬、镍、钼依次减少。但是母合金脱碳后，由于铬与氧形成氧化物的自由能负值较大，氧化物薄膜阻碍铬的扩散。钼与镍比较，钼是碳化物形成元素，可是有碳存在可促进钼的扩散。因此形成如探针测定的结

果<sup>[3]</sup>。

X光结构表明，含钼母合金是由 $\alpha$ 相、复合渗碳体( $M_3C$ )及 $Mo_2C$ 构成。在高温下首先发生 $\alpha \rightarrow \gamma$ 转变，同时还发生复合碳化物溶解及 $Mo_2C$ 分解过程。由于铬、钼的扩散能力较低，在较大母合金颗粒处仍存在富铬、富钼区。

### 3. 关于机械性能

A材料中的镍、铜均是活化烧结元素。镍是表面活性元素，可增加表面能。铜是在烧结时形成液相，因而均有促进烧结作用。

同时，镍、铜均可溶于铁中强化铁素体，但是强化效果不大。镍溶于铁素体后可提高其韧性，另外， $Fe-Ni$ 系在13%Ni时形成奥氏体。在镍粉末颗粒较大时，因镍扩散距离大及通过颗粒表面扩散量少，在原颗粒中心处仍有较高浓度，故可形成奥氏体<sup>[4]</sup>，可有效地提高制品的塑性和韧性。

B材料中的铬、钼通过如下途径起强化作用：铬部分溶入铁素体起一定强化作用，另一部分以碳化物形式存在，其主要作用是改变烧结件在冷却时的相变动力学，增加奥氏体稳定性，使其得到更细的组织<sup>[5]</sup>；钼是碳化物形成元素，在烧结冷却时使S曲线右移，在组织中可得到贝氏体，含钼母合金量增多，其强度也增加，到7%时为最大。

C材料的磷可溶入铁素体中，形成置换固溶体，具有强烈的强化作用。磷在烧结时使液相形成，促进烧结过程。本试验中，在含有7%的MC的铁基材料中加0.6%磷，抗拉强度大约提高18.6%。但材料的塑性和韧性下降。

### 五、结论

1. 部分扩散粉末的压缩性高于混合粉末；纯合金元素镍、铜的部分扩散粉末的压缩性高于MC母合金部分扩散粉末。

2. 母合金部分扩散粉末有较好的均匀化程度。几种材料研究表明，钼、磷、铜烧结

均匀化程度较好。镍、铬的均匀化程度较差。

3. 利用“部分合金化技术”充分发挥合金元素的强化作用。选择适当的元素配合可得

到强度为500、600及700N/mm<sup>2</sup>的铁基粉末冶金材料。

### 参 考 文 献

- [1] G.Zapf and K.Dala1, Modern Developments in Powder Metallurgy, Vol.10, 129
- [2] P.lindskog等, Modern Developments in Powder Metallurgy, Vol.10, 97.
- [3] 杨宗坡 宫声凯, 粉末冶金技术, 1(4), 1—5, 1983
- [4] J.Junstall等, The International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology, 16 (1), 69, 1980
- [5] Henry H.Hausner, Handbook of Powder Metallurgy, Second Edition, Chemical Publishing Co.

## COMPACTIBILITY OF PARTIALLY DIFFUSION-ALLOYING IRON-BASED POWDERS AND THEIR HOMOGENEITY AFTER SINTERING

Yang Zongpo, Han Xueyi and Han Jingui  
(Northeast Institute of Technology)

**ABSTRACT** Compactibility, homogeneity and mechanical properties, etc. of as-sintered specimens made from partially diffusion-alloying powders of Fe-1.5 Cu-2 Ni, Fe-7 MC\* and Fe-2 Cu-0.6 P(mixed with carbon respectively) have been studied. It demonstrates that partially diffusion-alloying powders possess superior compactibility as well as sintering homogeneity. After sintering distribution of copper, molybdenum and phosphorus etc. elements was very homogeneous. The strength of above three as-sintered materials is 500, 600 and 700N/mm<sup>2</sup> respectively.

MC\* is iron-base master alloy containing Mo, Cr and C.

(上接第82页)

## A STUDY ON LIQUID SINTERING MECHANISM AND PROPERTIES OF Fe-Ti ALLOY

Zhang Zhongjun

(Anshan Institute of Iron and Steel Technology)

**ABSTRACT** The present paper reports the processing technology for producing Fe-Ti alloy with high oxygen affinity by using conventional P/M method and describes some important mechanical properties of Fe-Ti sintered samples produced by this method.

注: 图2左纵坐标“0”以下应力-0.2; 图3、6、9、11左纵坐标单位应为N/mm<sup>2</sup>; 图10左纵坐标单位应为g/cm<sup>3</sup>。