

# MIM 支持块的充模流动计算机模拟<sup>\*</sup>

郭剑锋<sup>1)\*</sup> 向华<sup>1)</sup> 郑洲顺<sup>1)</sup> 金贝<sup>1)</sup> 曲选辉<sup>2)</sup>

1)(中南大学粉末冶金国家重点实验室,长沙 410083)

2)(北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083)

**摘要:** 以流体力学和热力学理论为基础,建立了充模流动过程的控制方程、初始条件和边界条件,并以支持块的充模流动为例,采用大型通用有限元软件 ANSYS 进行了计算机模拟,着重研究了浇口位置和浇口尺寸大小对压力场、温度场的影响,同时结合实验分析了转角处缺陷产生的机理。模拟结果表明:当采用尺寸大小为 4mm 的中间浇口进行注射时,可以得到良好的支持块预成形坯,与实验结果一致。

**关键词:** 金属注射成形; 支持块; 浇口; 充模流动; 计算机模拟

## Computer simulation of die Filling process for a MIM part

Guo Jianfeng<sup>1)</sup>, Xiang Hua<sup>1)</sup>, Zheng Zhoushun<sup>1)</sup>, Jin Bei<sup>1)</sup>, Qu Xuanhui<sup>2)</sup>

1)(The State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

2)(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The control equations, initial and boundary conditions for the die filling process of metal injection molding (MIM) were proposed on the basis of hydromechanics and thermodynamics. With ANSYS software, the die filling process of a complicated part was simulated. And the influence of position and dimension of the gate on pressure and temperature fields were studied. The cause for some defects appearing on the corners were analyzed based on the simulation results. The simulation results show that good green compacts of backup block could be made when the injecting gate is set at the middle position with dimension of 4mm, which was proved by the experiments.

**Key words:** metal injection molding(MIM); backup block; gate; die filling; computer simulation

## 1 前言

金属注射成形 (Metal Injection Molding 简称 MIM) 是将现代塑料注射成形技术引入粉末冶金领域而形成的一门近终形成形技术<sup>[1]</sup>。它的基本工艺是:首先将细小的金属粉末与有机粘结剂均匀混和并制成粒状注射料,在加热状态下用注射成形机将其注入模腔内冷凝成形,然后用化学溶解或热分解的方法将成形坯中的粘结剂脱除,最后经烧结致密化得到最终产品。其中注射成形是关键步骤,因为 MIM 制品的缺陷基本上是在这步引入的,如表面塌陷、内部缩孔、开裂、两相分离、欠注等,且这些缺陷不能在后续阶段得到弥补<sup>[2]</sup>。

注射料熔体在模腔中的流动是瞬态的、非牛顿、非等温的。研究工作费时耗材,而且有些参数本身无法通过试验获得。用充模流动计算机模拟,不但可以直观地看到充模过程中的流动前沿发展和压力场、温度场、流动速率场的分布,还可以对是否产生欠注、气孔、熔接线和裂纹等缺陷进行预测,从而指导生产中成形工艺参数的选择和模具的设计<sup>[3]</sup>。本文基于大型通用有限元分析软件 ANSYS/FLOTRAN 对实际生产中零件支持块的充模流动进行了计算机模拟,分析了浇口大小和浇口位置这两个因素对充模过程的影响。

\* 国家杰出青年科学基金资助项目(50025412),国家“973”计划资助项目(G2000067203)和教育部博士点基金资助项目

\* \* 郭剑锋,男,25岁,硕士,从事粉末注射成形计算机模拟研究。E-mail:arfengmail@163.com

收稿时间:2003-03-11

## 2 数学模型

目前对金属粉末注射成形过程的模拟研究绝大部分都是沿用塑料注射成形过程的研究方法,即基于连续介质模型,不考虑注射料在流动过程中的内部结构的变化及模壁冷凝层的影响,并认为流动是充分发展的,引入“润滑”近似,将充模过程视为广义的 Hele-Shaw 流动,使之成为一个相对简单的非线性动力学系统。该模型的基本控制方程为<sup>[4]</sup>:

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

其中:  $\vec{V} = u_1 \vec{e}_1 + u_2 \vec{e}_2 + u_3 \vec{e}_3 = u_i \vec{e}_i$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \rho g_i = 0 \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \vec{V} \cdot \nabla T - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} - \eta \vec{\gamma}^2 = 0 \quad (3)$$

其中:  $e_1, e_2, e_3$  分别代表直角坐标轴 1、2、3 上的单位向量;  $\rho$  为密度;  $P$  为压力;  $g_i$  为重力加速度分量;  $\lambda$  为热导系数 0;  $c_p$  为比定压热容;  $\eta$  为粘度;  $T$  为温度;  $t$  为时间;  $\nabla$  为 Hamilton 算子;  $\vec{\gamma}$  为剪切速率; 考虑到注射料熔体为非牛顿流体;  $\eta$  为温度和  $\vec{\gamma}$  的函数。实验表明,可用幂律模型对其进行简化:

$$\eta(\vec{\gamma}, T) = m_0 \exp(T_a/T) \vec{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

其中:  $m_0, T_a$  为与材料有关的常数;  $n$  为剪切稀化指数,  $0 < n < 1$ 。

由于充模流动是一个瞬态过程,为了确定任意时刻的熔体前沿,可采用流体体积法(VOF 法)来进行分析,其特点是网格固定,空区域在熔体顶部。每个时间步求解控制方程为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = - \left( \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i F) \right) \quad (5)$$

其中:  $F$  为每个网格中已填充流体所占整个网格的体积比,  $0 \leq F \leq 1$ 。

流动边界条件由速度边界条件和压力边界条件构成,边界初始条件为:

模壁边界上:  $V = 0$ ;

自由表面上:  $\frac{\partial V_t}{\partial m} = 0$ ,  $V_t$  为自由表面切向速度分量,  $m$  为表面法向方向;

模腔边界处:  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ ,  $n$  为模腔边界法向方向,

流体前沿处  $P = 0$ ;

对于充模过程中,由于熔体与模壁之间的温差而导致的传热现象可用下面控制方程表示:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q \quad (6)$$

式中:  $\rho, \lambda, c_p$ ——分别为模具材料的密度,热导系数和比热,  $Q$ ——热源项。对于熔体前沿处,忽略熔体与空气之间的传热,即  $Q = 0$ .

## 3 模拟结果和分析

模拟试验的对象是一支持块,该产品用国内自行设计制造的模具注射成形。注射成形过程中,成形坯的边角处出现塌陷、掉角等现象。为此,本文作者以大型通用有限元分析软件 ANSYS 6.0 中的 FLOTTRAN 计算流体动力学模块对支持块的充模过程进行了动态模拟。试验中用 3 个不同位置的浇口进行模拟,如图 1 所示。

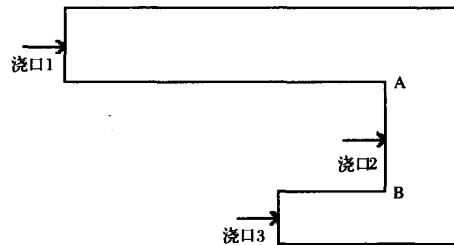


图 1 支持块浇口位置示意图

图 2 是支持块的有限元模型。模拟条件为在实验室制备该产品的条件:注射材料是羰基 Fe 粉和羰基 Ni 粉的混和粉末;粘结剂采用石蜡基粘结剂,粘结剂聚合物原料为石蜡(PW)、高密度聚乙烯(HDPE)、乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA);添加剂为硬脂酸(SA)。注射料的流变学参数及其热物理性能参数见表 1。模拟中采用四边形网格划分支持块模型,产生计算用有限元单元。

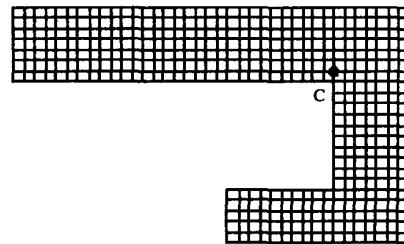


图 2 支持块的有限元模型

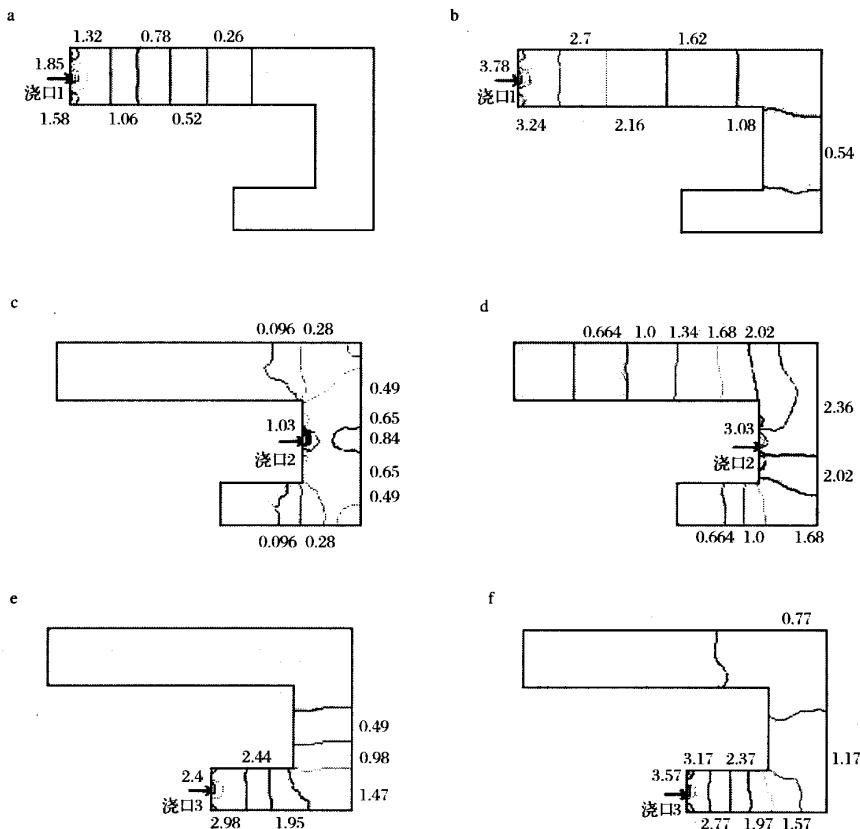
表 1 喂料的流变系数及热物性参数

注射料粉末	$n$	$T_a/K$	$m_0/(Pa \cdot s^n)$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	$c_p/[J(kg \cdot K)^{-1}]$	$\lambda/[W(m \cdot K)^{-1}]$
Fe - 2Ni	0.35	3512	0.17	4360	556	46.5

### 3.1 浇口位置对注射料熔体充模时压力场的影响

粉末注射成形模具的浇口是模具型腔的入口, 它有调解熔融注射料的注射压力、流速、剪切速率的作用, 尤其是当零件形状较为复杂的情况下, 浇口的位置和大小对熔融注射料的充填性能以及成形零件的质量都有很大的影响<sup>[6]</sup>。图 3 所示的是采用不同的浇口, 于体积流量  $q_V = 15cm^3/s$  时, 支持块充模过程中人口压力及流体动态压力场的变化情况。可以看出, 初始熔体充模时(时间为 0.059s), 用浇口 1 时的人口压力最小, 而且压力梯度也最小(见图 3c); 进浇口 3 时, 人口压力和压力梯度最大(见图 3e)。这是因为进浇口 2 时熔体在型腔内流经的途

径最短, 流动过程中压力损耗就最小, 而用浇口 1 和浇口 3 时熔体流经的途径相差不多。但是注意到, 就三个浇口的位置比较而言, 用浇口 3 时, 浇口附近的模腔尺寸最小(见图 3e)。在初始充模阶段, 从浇口 3 进入模腔的熔体最先接触模壁并与模壁产生热交换, 其散热模腔面积最大, 因此流体热量损失也较大, 导致凝固层的出现, 而凝固层的存在会减小流道横截面积, 从而使用浇口 3 时的人口压力增大。相比之下, 初始充模阶段, 浇口 2 附近最为开阔, 相邻的模壁面积较小, 热传导散失的热量相对较少, 所需人口压力也较小。初始充模阶段, 浇口 1 的人口压力介于浇口 2 和浇口 3 之间。



a,c,e 的时间为 0.059s; b,d,f 的时间为 0.114s

图 3 浇口位置不同时流体压力场的动态显示

充模快结束时(时间为 0.114s),进浇口 2 时的人口压力增加的幅度最大(见图 3d),这说明填充“死角”比较困难。用浇口 2,在接近充模结束时,熔体向前运动需要冲破的前沿膜比其他两种情况时宽,压力损耗增大,从而导致人口压力的快速增加。而用浇口 3 时,入口压力增加得最为缓慢(见图 3d),这是由于初始时候浇口 3 人口压力较大,模腔尺寸较小,加之凝固层的出现,流体粘度由于热量的散失而变得较大,随着充模过程的进行,流体在流动过程中因剧烈粘性摩擦作用将机械能转化成热能,产生的大量粘性热抵消了大部分轴向热传导所带来的热损耗,抑止了凝固层的增长,从而使人口压力的增长速率逐渐降低。

比较图 3 中的 b、d、f,可以看出,用浇口 2 时充模耗时也是最短的,用浇口 1 和浇口 3 耗时较长,但这两者相差不多。这是由于用浇口 2 时流体流经的路程最短,压力、温度的损耗相对较小,故而能够保持较大的充模速率。

### 3.2 浇口位置对温度场分布的影响

图 4 显示了模腔刚好充满时模腔内温度场的分布。由图可见,用浇口 3 时,成形坯内的温度在中心层很窄的范围内保持基本不变,然后急速下降到模壁温度(见图 4b);而用浇口 2 时,成形坯内温度可以在较大范围内保持不变(见图 4a)。在成形坯中心层及其附近,由于离模壁相对较远,热传导损失很小,同时由于新的热注射料补充进来,因此,温度变化不大。而在模壁附近,由于大量的热量通过轴向的热传导,被模壁带走,温度会急剧下降<sup>[7]</sup>。与浇口 3 相比,浇口 2 附近相邻的模壁面积相对较小,熔体行程在浇口 2 时也最短,因热传导而散失的热量就比较少,所以其成形坯内部的温度所维持的范围也会更大一些。在较大范围内维持内部温度,能够消除充模过程中由于注射料局部快速冷却而造成的欠注,同时可使得成形坯在保压冷却过程的收缩能够比较均匀一致,从而消除成形坯可能出现的应力集中、扭曲变形等情况。

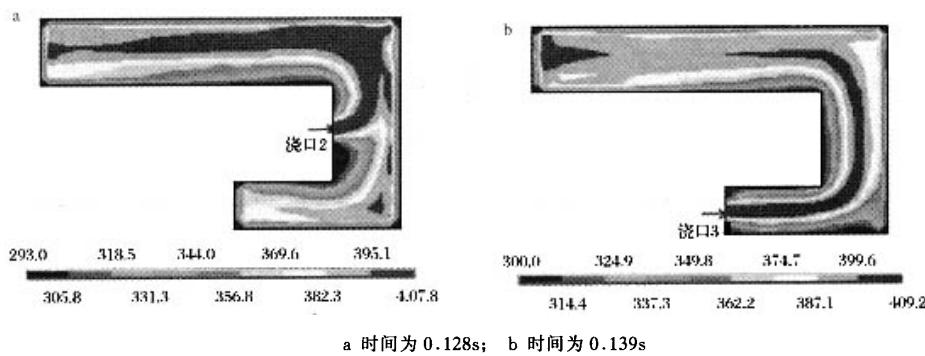


图 4 用浇口 2 和浇口 3 时模腔内的温度分布

从图 4 还可看到,在靠近模壁次层的某些区域,其温度比人口熔体的温度还高(接近 410℃)。这是由于粘性热耗散产生热量的结果。对成形坯中的温度分布进行分析,有助于热应力分析和缺陷的预测。

从试验反馈回来的情况表明,当选用浇口 2 时,支持块成形坯于转角 A、B 处(如图 1 所示)容易出现塌陷、掉角现象,而且在 A 处出现的几率较高。从图 3c 中也可以清晰看到,转角处压力梯度变化很大。压力场变化太大不仅使填充转角困难,同时使得粉末和粘结剂在转角附近区域运动不统一,造成粉末和粘结剂的分离,结果是引起注射料对模具的冲刷和在转角附近产生密度梯度,从而导致成形坯

在转角处产生缺陷。相对于转角 B 处而言,熔体流经转角 A 处直至充满支持块一端所经路程和时间都较充满另一段为长,温度、压力的变化也较为剧烈,所以转角 A 处更易出现应力集中。

### 3.3 浇口大小对注射料熔体充模流动的影响

图 5 所示的是在体积流量相同( $q_V = 15 \text{ cm}^3/\text{s}$ ),浇口大小不同的情况下,从充模开始到充模快结束前转角 A 处压力场动态变化的情况。不难看出,浇口为 4 mm 时,转角 A 处的压力变化要比 2 mm 时平缓得多。再看图 6,当浇口由 2mm 加大到 4mm 后,转角 A 处附近一点 C(见图 2)的充模速度始终要大于加大前该点的充模速度。较高的充模速度有

利于熔体的均匀填充,减少热损失和由此带来的粘度、压力的增加。可见,浇口的加大利于支持块保持

转角形状。但是浇口的尺寸太大也会导致注射压力的突降,有可能造成短射等,不利于熔体的充模。

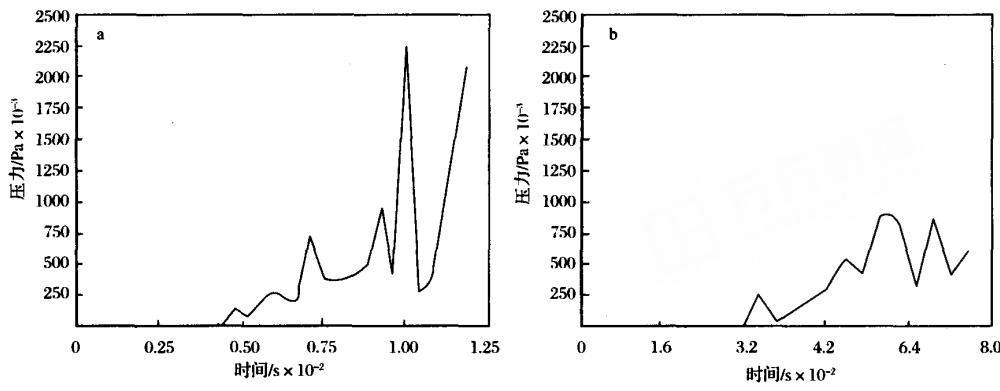


图5 浇口大小不同时,转角A处压力场的变化

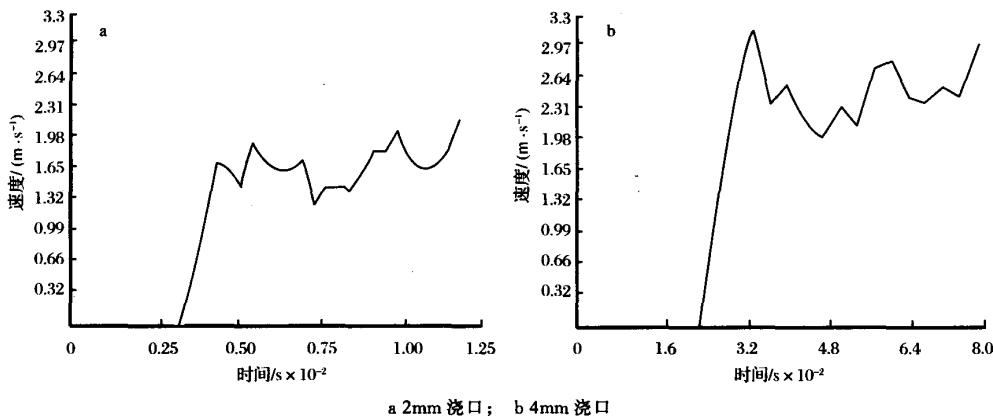


图6 浇口大小不同时,转角A附近一点x轴方向上速度( $v_x$ )的变化

通过以上分析可知,金属注射成形的充模过程是一个非牛顿、非等温、瞬态的复杂过程,由于充模过程非常短暂,很难由试验进行观察和测试。运用计算机模拟技术可以很方便的测试浇口位置和大小,预测模腔内压力场、温度场的分布情况以及可能出现的缺陷,从而指导并加快模具和过程的设计,减少成形过程中的问题。本文中经过模拟分析得到注射成形支持块的最佳浇口位置及大小是于浇口2处采用4mm的浇口。据此设计模具浇口并进行注射试验,得到的产品无缺陷,证明了模型模拟的可行性和准确性。

#### 4 结论

1)从流体力学和热力学的基本理论出发,建立

了金属注射成形充模过程的数学模型和边界条件。

2)采用不同位置的浇口进行了充模模拟,分析了充模始末入口压力和模腔压力场的动态变化情况,确定了注射成形支持块浇口的最佳位置在浇口2处。此时充模所需入口压力最小,模腔内的压力梯度也相对较小,充模结束时,能够在较大范围内保持坯块内部温度,减少欠注出现的几率,同时防止成形坯因冷却不均而可能出现的扭曲。

3)采用不同的浇口尺寸进行模拟,确定采用较大尺寸的浇口(4mm)进行支持块的注射成形。此时熔体在转角处能够保持较高的充模速度,降低了该处的压力波动和压力梯度,有利于粉末和粘结剂的均匀填充,防止因两相分离造成的密度梯度,使成形坯较好的保持转角形状。

**参考文献**

- 1 German R M. Powder Injection Molding, Metal Powder Industries Federation. Princeton: New Jersey, 1991. 1~17
- 2 曲选辉, 颜寒松, 李益民等. MIM 粘结剂中聚合物性质的估算. 材料工程, 1997(7):11~13, 32
- 3 敦晖, 李晓明, 曲选辉等. 充模流动计算机模拟在硬质合金 MIM 中的应用. 硬质合金, 2001, 18(4): 197~200.
- 4 曲选辉, 温宏宇, 敦晖等. 粉末注射成形过程计算机模拟的研究. 材料工程, 2001(6): 33~36
- 5 Florin Ilinca. Metal Injection Molding: Simulation of Three - Dimensional Flow with Free Surface Boundary and Experimental Comparison. ANTEC 2000;718~722
- 6 林好转. 金属粉末注射成形的喂料性能及成形的模具研究:[博士后研究报告]. 长沙: 中南工业大学, 1998
- 7 毛金英. 粉末注射成形二维充模流动计算机模拟:[硕士学位论文]: 长沙: 中南工业大学, 1999

## 2005 年全国粉末冶金学术及应用技术会议 征文通知

为促进我国粉末冶金学术及应用技术的交流与发展, 经中国机械工程学会粉末冶金分会、中国金属学会粉末冶金分会、中国有色金属学会粉末冶金及金属陶瓷学术委员会、中国钢协粉末冶金协会、中国机协粉末冶金专业协会共同研究决定: 2005 年第四季度在山东莱芜市联合主办“2005 年全国粉末冶金学术及应用技术会议”。届时将邀请工程院院士、专家学者、企业家及企业界科研工程技术人员出席会议。会议将进行粉末冶金学术领域及应用技术领域的广泛交流和探讨。会议将对促进粉末冶金界产学研结合和技术创新, 实现我国粉末冶金学术和产业技术的可持续发展发挥重要作用。

**会议主题:**

科技推动产业, 合作促进发展

**征文范围:**

- △ 国内外粉末冶金技术的发展趋势
- △ 粉末冶金基础理论与新技术
- △ 粉末冶金机械零件及模具设计
- △ 难熔金属及硬质合金
- △ 磁性材料及电工材料
- △ 摩擦及减摩材料
- △ 新技术、新工艺、新材料等方面的研究成果
- △ 测试技术(包括超细、纳米材料的检测)
- △ 营销及管理理念的改革经验
- △ 产学研结合的经验与成果
- △ 其他

**征文要求:**

1. 论文必须内容新颖、数据可靠、逻辑性强。文中附表附图要精选, 简明示意。
2. 论文字数控制在 6000 字以内。
3. 提交的论文保存为 word 文档, 用 E-mail 或软盘发到:

中国机协粉末冶金专业协会秘书处

E-mail: cmpma@sohu.net

地址: 北京市西城区月坛南街 26 号一号楼 5050 室

邮编: 100825

联系人: 沈基慎

电话: 010-68596299 13521559470

传真: 010-68519230

4. 来稿署名作者请明确排序并注明所属单位。请在来稿中提供一份第一作者简介, 列于首页页末。作者简介要写明技术职称(或学位)、行政职务、所从事的专业和取得的科研成就。
5. 论文截止日期: 2005 年 6 月 30 日。
6. 稿件作者自留底稿, 论文稿件恕不退回。

中国机协粉末冶金专业协会秘书处