



磁热疗用磁粉产热率的影响因素

邢臻真, 朱 宏

(南京工业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 为了研究和开发高产热率磁热疗用磁粉, 综合分析了组分与粒径、制备方法、表面包覆对磁粉产热率的影响规律, 对这些因素与产热率之间的定性关系进行了总结, 并指出了其定量关系的研究方向。结果表明: 不同组分的磁粉磁性能不同因而产热率不同, 相同组分不同粒径和粒径分布的磁粉对产热率的影响存在一定的规律; 制备方法影响粒径从而对产热率有影响; 合理的包覆材料和包覆量可提高产热率。

关键词: 磁粉; 磁热疗; 产热率

中图分类号: TH77, R730.5 **文献标志码:** A

文章编号: 1008-5548(2009)06-0075-05

Factors Affecting on Production Rate of Magnetic Powders for Magnetic Hyperthermia

Xing Zhenzhen, Zhu Hong

(College of Materials Science and Engineering,

Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to research and develop the magnetic powder with high heat production rate for magnetic hyperthermia, the effects of component and particle size, preparation method, surface coating on the heat production rate were introduced and analyzed. The qualitative relationships between these factors and heat production rate were summarized respectively. The research directions on the quantitative relationships were also pointed out. It was concluded that different components of magnetic powder had different heat production rate because of different magnetic properties, the different size and size distribution of magnetic powders with the same components had certain influence law for heat production rate, the preparation methods affected the size and thus affected heat production rate, the reasonable coating materials and quantity can increase heat production rate.

Key words: magnetic powder; magnetic hyperthermia; heat production rate

磁热疗概念的提出始于 1957 年, 是一种通过直接注射、静脉注射或介入等方式使磁粉定向聚集在恶

性肿瘤部位, 然后利用磁粉与交变磁场的磁致产热效应和细胞耐热性差将肿瘤组织加热到 42~48 ℃, 实现精确定位和无毒副作用杀灭肿瘤细胞的热疗新技术^[1]。根据热生物学研究, 人体正常细胞 48 ℃以上死亡而肿瘤细胞 42 ℃以上死亡, 因此磁热疗利用细胞耐热性差杀灭恶性肿瘤具有坚实的热物理学、热生物和医学等科学技术基础^[2], 展示了十分诱人的前景, 正日益受到世界各国的重视。

产热率是单位时间单位质量或单位体积的磁粉将磁场能量转化的热量, 一般用比吸收功率衡量, 另有用体积产热功率表示产热率, 都有公式可算出^[3]。由于磁粉使用量的限制, 要保证肿瘤组织在短时间内各部分的温度都能升高到 42 ℃以上, 就要求磁粉具备很高的产热率。因此产热率直接决定了磁热疗的效果, 是磁粉最重要的性能。迄今为止, 各国的研究者对磁热疗用磁粉进行了大量的研究工作, 已有的研究表明, 产热率受磁粉的组分与粒径、制备方法和表面包覆等因素的影响, 但是其影响规律的研究很不系统, 目前还没有确实统一的结论。本文将综合分析磁粉的组分与粒径、制备方法和表面包覆对产热率的影响规律。

1 组分与粒径对产热率的影响

至今, 已研究的磁粉组分主要有金属(Fe、Co、Ni)及其合金(NiCoFe、FeCo、NiFe)、磁铁矿(Fe_3O_4)、赤铁矿($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)、替代型铁氧体 MFe_2O_4 ($\text{M}=\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Zn}, \text{Co}, \text{Fe}$)、生物玻璃陶瓷等。不同组分的磁粉对产热率的影响不同, 这主要是因为不同组分的磁粉磁性能不同。其中, Fe_3O_4 由于其比吸收功率值较高、稳定性和生物相容性好等优点被研究的最多。

相同组分不同粒径的磁粉产热率也不同。最早使用的磁热疗磁粉为微米级的 Fe_3O_4 , 其升温速率为 4.7 ℃/min^[4]。1979 年, Gordon 等^[5]首次将纳米级磁粉应用于鼠乳腺肿瘤磁热疗的研究, 采用的 Fe_3O_4 仅为 6 nm, 该研究为纳米级磁粉的热疗奠定了基础。纳米磁粉的研究中最典型的例子是 20 世纪 90 年代以 Jordan 为首的团队对纳米 Fe_3O_4 磁热疗的一系列研究^[6-8], 他们的研究证明了纳米磁粉比微米磁粉或更

收稿日期: 2009-04-16

第一作者简介: 邢臻真(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为纳米生物材料, E-mail: xingzhenzhen64@126.com。

通信作者: 朱宏(1960-), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为纳米生物材料, 电话: 025-83581716, E-mail: hzhu@njut.edu.cn。

大尺寸磁粉有更高的产热率。

不同粒径磁粉在交变磁场下的产热机制及产热率 P (体积产热功率) 列于表 1。可以看出, 不同粒径的磁粉都可通过提高场强 H_m 和频率 f 来提高产热率。而磁粉本身也对产热率有影响: 对于毫米级磁粉, 较低密度与合适的几何形状可提高产热率; 对于微米级磁粉, Rayleigh 常数 b 越大产热率越大, 不同材料 b 不同, 如铁为 25 m/A, 镍为 3.1 m/A; 对于纳米级磁粉, 磁各向异性常数 K 和体积 V 都影响产热率, 若将磁粉分散在载液中, 则载液黏滞力 η 和粒子流体力学半径 R_h (包括表面包覆物的厚度) 对产热率有影响。

假设纳米磁粉颗粒为球体, 则体积公式为 $V = \pi R^3/6$ 。由表 1 可推论, 随着颗粒粒径增大, 体积增大, 奈尔弛豫时间也随之增大, 从而引起产热率增加。但有人认为, 随着颗粒变小, 比表面积增加, 表面效应对磁各向异性性能的贡献增大, 使各向异性常数增大^[12], 也会使奈尔弛豫时间增大, 从而产热率也增大。显然, 这两个推论是相反的, 但它们并不矛盾, 只是分别用于不同粒径范围。磁粉产热率并不是随着粒径大小单调变化的, 而是存在变化的临界粒径。

目前, 热门的磁粉主要分为两种: 一种是亚铁磁性-铁磁性磁粉, 主要是磁滞损耗产热, 产热率可由矫顽力和剩磁判断, 损耗面积即磁滞回线面积越大产热率越高, 但产热率受人体能承受的磁场条件限制; 另一种是超顺磁性磁粉, 无矫顽力和剩磁, 由弛豫产热。

表 1 不同粒径磁粉的产热机制及产热率计算^[9-11]

Tab.1 Thermogenic mechanism and calculation of heat production rate of magnetic powders with different sizes

磁粉粒径级别	产热机制	产热率 P 计算
毫米级(>1 mm)、 微米级(>1 μm)	涡流损耗	$\frac{2\pi^2 d^2 f^2 B_m^2}{3\rho}$ (平板状, 厚度为 $2d$) $\frac{\pi^2 R^2 f^2 B_m^2}{4\rho}$ (圆柱状, 上下底面半径为 R) $\frac{\pi^2 R^3 f^2 B_m^2}{4\rho}$ (球状, 半径为 R)
	磁滞损耗	$\frac{4\mu_0}{3} b H_m^2 f$
	微米级(100 nm~1 μm) 磁滞损耗(主要)	$\frac{4\mu_0}{3} b H_m^2 f$
纳米级(<100 nm)	磁滞损耗	$\frac{4\mu_0}{3} b H_m^2 f$
	奈尔弛豫、 布朗弛豫	$2\pi\mu_0 \chi_0 \sigma H_m^2 f^2 (\tau \ll 1); \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_B} + \frac{1}{\tau_N}$ $\tau_N = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\frac{KV}{kT}}} \tau_0 \exp(\frac{KV}{kT}); \tau_B = \frac{4\pi\eta R_h^3}{kT}$

注: 公式中, B_m 为磁感应强度; H_m 为磁场强度; f 为磁场频率; ρ 为电阻率; μ_0 为真空磁导率; b 为 Rayleigh 常数; χ_0 为磁化率; K 为磁各向异性常数; T 为环境绝对温度; η 为载液黏滞力; V 为磁粒子体积; R_h 为粒子的流体力学半径; k 为波尔兹曼常数; τ 为弛豫时间; τ_B 为布朗弛豫时间; τ_N 为奈尔弛豫时间; τ_0 为常数 (通常为 10^{-9} s)。

目前不同组分的磁粉能提供最高产热率的最佳粒径尚无统一的结论, 相关研究最多的磁粉组分是铁氧化物 (包括 Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)。Hergt 等^[11]的结论是铁氧化物产生最高产热率的粒径分布在超顺磁和亚铁磁转换的临界范围。Dutz 等^[14]分析了不同粒径 (10~100 nm) 铁氧化物的产热机制, 得到的结论是: 在低强低频磁场范围内, 粒径大于 60 nm 时, 磁滞损耗的产热率随粒径的减小而升高; 粒径小于 60 nm 时, 磁滞损耗的产热率随粒径的减小而降低; 粒径小至 14 nm 时, 弛豫出现, 磁滞损耗减小; 5 nm 甚至更小时, 只有很小的产热率。根据 Butler 和 Banerjee 的理论: 立方或类球结构的铁氧化物的单畴和多畴的转变临界尺寸为 80 nm^[14], 与 60 nm 较接近, 说明单畴和多畴铁氧化物的磁滞损耗的产热率随粒径的变化趋势是相反的。因此, 可认为组分为铁氧化物的磁粉粒径对产热率的影响规律为: 从多畴过渡到亚铁磁性单畴的粒子, 主要是磁滞损耗, 此时粒径越大, 矫顽力就越小, 则磁滞损耗越小, 产热率也就越低; 在稳定的单畴亚铁磁性区域, 粒子粒径越大, 矫顽力就越大, 则磁滞损耗越大, 产热率也就越高; 从单畴亚铁磁性过渡到超顺磁性区域的粒子, 具有高矫顽力和/或超顺磁性 (从具有高矫顽力和超顺磁的转变往往是个迅速的过程), 此时磁滞损耗与弛豫对产热率都有贡献, 粒子达到超顺磁性后粒径进一步减小, 其矫顽力和剩磁都为零, 无磁滞现象, 热量仅由弛豫产生, 由表 1 两种弛豫的计算公式可知, 体积或粒径越小, 奈尔弛豫或布朗弛豫越小, 则产热率越低。

具有超顺磁性的磁粉的研究比例越来越大。有文献报道, 在相同磁场条件下, 超顺磁磁粉产热率较同组分同质量的多畴磁粉产热率超过 1 000 倍^[15]。从另一计算角度看, 产生相同热量, 超顺磁磁粉所需的磁场强度比多畴磁粉要小的多。超顺磁磁粉具有较高产热率的原因可认为有以下几点:

1) 磁热疗要求低强低频, 这往往不能使具有高矫顽力的亚铁磁性-铁磁性磁粉充分磁化, 从而限制了磁场能量的吸收, 就不能达到磁致损耗的理论产热率, 而超顺磁磁粉达到饱和的磁场很小, 一般弛豫产热不会受到限制。

2) 超顺磁磁粉在介质中 (如肿瘤组织中的自由水) 作布朗运动产生的动能大于颗粒之间由于磁吸引产生的动能, 也大于使颗粒沉降的重力势能, 能够避免颗粒聚集沉淀, 保持颗粒纳米尺寸, 从而保证了产热率。

3) 超顺磁磁粉无剩磁, 无定向排列, 粒子间的吸附作用很小或没有, 颗粒无团聚也保证了产热率。

4) 超顺磁磁粉足够细小, 粒子在介质中容易发生

物理旋转,从而容易与周围的介质摩擦产热,对产热率有贡献作用^[16]。不同组分的磁粉超顺磁临界半径不同,常用的磁热疗磁粉中,常温下, Fe_3O_4 为16 nm, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 为20 nm。

有研究表明,磁粉的粒径分布对产热率也有显著的影响^[13]。磁粉的粒径分布范围若很大,会存在复杂的双向异性和形状,产热不均一。因此粒径应尽可能分布在产热率高的粒径范围内。Hergt等^[13]通过磁分离改变磁粉粒径分布,使粒径分布为正态分布而不是常见的对数分布,实现粒径分布变窄。该研究组在较早前通过优化粒子的成核阶段使晶核均匀生长的特殊制备工艺获得粒径分布较窄的磁粉(平均粒径为15 nm),比吸收功率值达600 W/g(400 kHz,11 kA/m),是目前磁热疗磁粉研究中较高的比吸收功率值^[17]。

2 制备方法对产热率的影响

制备方法是影响磁粉粒径和磁性的一个重要因素,决定了它对产热率也有影响。制备产物常因容易团聚而导致粒径分布不均匀,严重影响磁粉的产热率。制备单分散、粒径分布窄的磁粉是高产热率磁粉的研制的重要方面。

共沉淀法是制备纳米铁氧化物的经典方法之一,可制得超顺磁颗粒。该法影响磁粉粒径和磁性的因素较多。Qui等^[18]和Vayssieres等^[19]的研究都发现,随着反应体系中离子强度的增加,磁粉粒径减小,因此可通过控制离子强度来优化粒径进而获得产热率较高的粒子。结晶良好和纯度高的磁粉也是具有高产热率的前提。以共沉淀法制取的铁氧化物晶体结构最初并不完整,其比饱和磁化强度较低,需熟化处理,这个过程可促进颗粒晶体结构的完整化,也可促进颗粒中杂质在高温下溶解分离。共沉淀制法虽用的较多,但产物往往粒径不均一,分布范围较大。微乳液法可制备具有钝化层的核壳结构磁粉,该方法中的表面活性剂兼有反应“容器”和表面钝化的作用。Baker等^[20]采用该法制备具有表面活性剂钝化层的 $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的磁粉,比吸收功率为345 W/g(12 kA/m,250 kHz)。微乳液法中界面强度对磁粉质量有很大影响,若界面比较松散,颗粒之间的物质交换速率过大,则产物的粒径分布不均匀。溶胶-凝胶法制备的磁粉粒径一般较大,马明^[21]采用共沉淀法制备的 Fe_3O_4 粒子粒径为6.6~13 nm,而溶胶凝胶法制备的 Fe_3O_4 粒子粒径为37~623 nm,显然,后者的粒径无超顺磁粒子且粒径分布较宽。

近几年,一些新的制备方法也有报道。Grüttnera等^[22]采用高压均化法制备了包覆葡聚糖的氧化铁,比吸收功率为642 W/g(104 kA/m)。仿生合成是一项将磁粉的合成与生物体结合起来的制备方法,如利用趋

磁细菌(magnetotactic bacteria)的还原力合成主要分为 Fe_3O_4 的细菌磁小体(magnetosomes)。合成的 Fe_3O_4 近球体,粒径在30~50 nm范围(含脂膜包覆物),具有很窄的粒度分布和稳定的晶型,不易聚集,无杂质^[23]。Hergt等^[24]用趋磁细菌合成38 nm的 Fe_3O_4 ,比吸收功率高达960 W/g(10 kA/m,410 kHz)。在同样的磁场条件下,Hergt还比较了共沉淀法、机械球磨法和趋磁细菌合成法制备的30~35 nm的 Fe_3O_4 的产热率,获得的结论是:磁滞损耗按照“机械球磨→共沉淀→趋磁细菌”顺序减小,若无磁场强度的限制,最大的理论磁滞损耗产热率可达2 800 W/g(100 kA/m,400 kHz),但是100 kA/m的磁场条件远远超出人体承受的安全磁场强度范围0~15 kA/m^[25],而只有细菌磁小体能在10 kA/m时达到饱和,磁滞损耗产热可得到充分发挥,具有高发热率。但生物合成的条件复杂,实验难以控制及趋磁细菌蛋白对人体的影响未确定,该法未能得到很好的发展。

3 表面包覆对产热率的影响

表面包覆最直接的目的是为了改善纳米磁粉的分散性。同时,表面包覆对磁粉的磁性能也有影响,如磁各向异性、磁化率、矫顽力等。包覆材料的适当使用可明显提高磁粉的产热率,可认为有以下3种原因:

1)由于纳米磁粉颗粒显著的表面效应使颗粒表面的离子易与包覆材料发生化学键合形成包覆层^[26],产生强烈的表面各向异性场,磁各向异性常数增加,使奈尔弛豫时间值增加^[27],从而使产热率增大。2)纳米磁粉分散于载液中可能存在布朗弛豫,包覆层使粒子的流体动力学半径增大,布朗弛豫时间增大,则产热率增大。3)当纳米磁粉团聚严重时,颗粒磁矢量的翻转会受到邻近颗粒磁矢量的阻碍,使得势垒增大,弛豫受阻,从而造成产热率降低,包覆材料能改善颗粒的分散状况,使颗粒彼此相互作用减弱,前面的现象不再发生,弛豫增强,保证甚至提高了产热率。童乃虎等^[28]采用D-泛酸包覆铁氧化物进行研究,结果为包覆的磁粉比吸收功率值为146.64 W/g(8 kA/m,1 MHz),而未包覆的磁粉比吸收功率值仅22 W/g。

不同的包覆材料对产热率的影响程度不同,如采用油酸包覆的磁粉比吸收功率值为78.3 W/g(63 kHz,7 kA/m),高氯酸包覆的磁粉比吸收功率值为120 W/g。可认为是由于不同包覆材料对颗粒表面的化学吸附能力强弱有差异,化学键合强度不同,则磁各向异性常数也不同,从而产热率也不同。葡聚糖是较为理想的生物医药包覆材料,应用于磁热疗磁粉包覆的研究较多。Zhang等^[29]制备葡聚糖包覆的 Fe_3O_4 的比吸收功率值为75 W/g(55 kHz,14 kA/m),而未包覆的 Fe_3O_4

· 物 体 应 用 ·

的比吸收功率值仅为 4.5 W/g。Arkadiusz 等^[30]采用油酸钠和葡聚糖双层包覆来制备磁粉,其升温速率为 1.11 °C/min (1.5 kA/m, 681 kHz),认为葡聚糖可通过油酸钠层更好地固定在颗粒表面使结构稳定,从而保证产热率。

包覆量对产热率的影响也很大。包覆量过少,包覆层较薄,在载液中颗粒间产生的斥力不足以克服磁引力和重力的作用而发生沉淀,影响产热率;包覆量过多,颗粒在载液中分散状况好,且若存在布朗弛豫,如表 1 中,流体力学半径越大布朗弛豫时间越大,理论上产热率就越高,但过厚的包覆层会妨碍磁场对磁粉的取向作用,也会影响到产热率^[31]。吕永钢等^[32]研究了具有不同淀粉包覆厚度的同组分同粒径磁粉的产热率,含包覆层的磁粉粒径分别为 125、200、280 nm,比吸收功率值分别为 54、50、28 W/g。

4 结束语

基于磁粉的肿瘤磁热疗研究方兴未艾,选用合适的组分、精确控制粒径和粒径分布、改善制备方法、合理表面包覆,是研制出高产热率磁粉的必要条件。本文中基于国内外已开展的相关研究,综合分析了组分与粒径、制备方法、表面包覆对磁粉产热率的影响规律,对这些因素与产热率之间的定性关系作出了总结。但由于缺少大量实验研究的证明,本文未能对其定量关系作出结论。因此,高产热率磁粉的研制仍需明确以下定量关系:1)不同组分的最高产热率对应的确切粒径范围;2)何种制备方法及工艺参数更适用于制备高产热率磁粉;3)何种包覆材料及多少包覆量最适合高产热率磁粉的表面包覆。

参考文献 (References):

- [1] 王煦漫,张彩宁.纳米材料在肿瘤磁热疗中的应用及展望[J].纳米材料与应用,2007,4(3):14-17
- [2] 李鼎九,胡自省,钟毓斌.肿瘤热力学[M].第二版.郑州:郑州大学出版社,2003
- [3] HILGER I,FRUHAUF K,ANDRA W,et al. Heating potential of iron oxides for therapeutic purposes in interventional radiology[J].Academic Radiology,2002,9: 198-202
- [4] GILCHRIST R K,MEDAL R,SHOREY W D,et al. Selective inductive heating of lymph nodes[J].Ann Surg,1957,146:596-606
- [5] GORDON R T,HINES J R,GORDON D. Intracellular hyperthermia a biophysical approach to cancer treatment via intracellular temperature and biophysical alterations[J]. Medical Hypotheses,1979,5:83-102
- [6] JODAN A,WUST P,SCHOLZ R,et al. Cellular up take of magnetic fluid particles and their effects on human adenocarcinoma cells exposed to AC magnetic fields in vitro[J]. Int J Hyperthermia,1996,12(6):705-22
- [7] JODAN A,WUST P,SCHOLZ R,et al. Effects of magnetic fluid hyperthermia (MFH) on C₃H mammary carcinoma in vivo[J]. Int J Hyperthermia,1997,13(6): 587-605
- [8] JODAN A,WUST P,SCHOLZ R,et al. Endocytosis of dextran and silan coated magnetite nanoparticles and the effect of intracellular hyperthermia on human mammary carcinoma cells in vitro[J]. J Magn Magn Mater,1999,4:185-196
- [9] 姜寿亭,李卫.凝聚态磁性物理[M].北京:科学出版社,2003
- [10] ROSENSWEIG R E. Heating magnetic fluid with alternating magnetic field[J]. J Magn Magn Mater,2002,252:370-374
- [11] DUTZ S,HERGT I,MTIRBE J,et al. Hysteresis losses of magnetic nanoparticles powders in the single domain size range[J]. J Magn Magn Mater,2007,308: 305-312
- [12] 都有为,陆怀先,王挺祥.界面活性剂对Fe₃O₄磁性与穆斯堡尔谱的影响[J].物理学报,1982,31(10):1417-1420
- [13] HERGT R,HIERGEIST R,ZEISBERGER M,et al. Enhancement of AC-losses of magnetic nanoparticles for heating applications[J]. J Magn Magn Mater,2004,280: 358-368
- [14] DUTZA S,HERGTA R,MÜ RBE J,et al. Hysteresis losses of magnetic nanoparticle powders in the single domain size range[J]. J Magn Magn Mater,2007,308: 305-312
- [15] BUTLER R F,BANERJEE S K. Theoretical single domain grain-size range in magnetite and titanomagnetite[J]. J Geophys Res,1975,80: 4049-4058
- [16] 何跃明.恶性肿瘤的磁靶向热疗[J].国外医学:物理医学与康复学分册,2003,23(2):96-100
- [17] HERGT R,ANDRA W. Magnetic hyperthermia and thermoablation magnetism in medicine[M]. 2nd ed. Berlin: Wiley-VCH,2006
- [18] HERGT R,HIERGEIST R,HILGER I,et al. Maghemite nanoparticles with very high AC-losses for application in RF-magnetic hyperthermia[J]. J Magn Magn Mater,2004,270:345-357
- [19] QUI X P. Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles[J]. Chinese J Chem,2000,18(6):834-837
- [20] VAYSSIERES L,TRONC E,JOLIVET J P,et al. Size tailoring of magnetite particles formed by aqueous precipitation:an example of thermodynamic stability of nanometric oxide particles[J]. J Colloid Interface Sci,1998,205:205-212
- [21] BAKER I,LOUDIS J A,LIAO Y,et al. Fe/Fe oxide nanocomposite particles with large specific absorption rate for hyperthermia[J]. Applied Physics Letters,2007,90(23):233112-1-233112-3
- [22] 马明.肿瘤热疗用磁性纳米材料研究[D].南京:东南大学生物医学工程系,2004.
- [23] CORDULA G,KNUT M,JOACHIM T,et al. Synthesis and antibody conjugation of magnetic nanoparticles with improved specific power absorption rates for alternating magnetic field cancer therapy[J]. J Magn Magn Mater,2007,311:181-186
- [24] PHILIPSE A P,MAAS D. Magnetic colloids from magnetotactic bacteria:chain formation and colloidal stability[J]. Langmuir,2002,18(25):9977-9984
- [25] HERGT R,HIERGEIST R,ZEISBERGER M,et al. Magnetic properties of bacterial magnetosomes as potential diagnostic and therapeutic tools[J]. J Magn Magn Mater,2005,293:80-86
- [26] ATKINSON W J,BREZOVICH I A,CHAKRABOTY D P. Us-able frequencies in hyperthermia with thermal seeds[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering,1984,31:70-75
- [27] 王煦漫,古宏晨,杨正强.磁流体在交变磁场中的热效应研究[J].功能材料,2005,39(2):275-278

- [28] 陆怀先,都有为,王挺祥,等. 有机包裹的 Fe_3O_4 颗粒表面自旋钉扎效应研究[J]. 物理学报,1985,134(1):121-125
- [29] 董乃虎,徐宏,古宏晨. 新型水基磁流体的制备及其生物磁热效应研究[J]. 功能材料,2006,37(4):555-558
- [30] J6ZEFCAK A,SKUMIEL A. Study of heating effect and acoustic properties of dextran stabilized magnetic fluid[J]. J Magn Magn Mater, 2007,311:193-196
- [31] BRUSENTOV N A,GOGOSOV V V,BRUSENTOVA T N,et al. Evaluation of ferromagnetic fluids and suspensions for the site-specific radio frequency-induced hyperthermia of MX11 sarcoma cells in vitro[J]. J Magn Magn Mater,2001,225(1-2):113-117
- [32] 罗新,方裕勋. 在埃磁天平法研究磁流体的磁性及稳定性[J]. 华东地质学院学报,1997,20(2):120-125
- [33] HILGER I,FRUHAUF K,ANDRA W,et al. Heating potential of iron oxides for therapeutic purpose in interventional radiology[J]. Academic Radiology,2002,9(2): 198-202
- [34] MATSUMINE A,KUSUZAKI K,MATSUBARA T,et al. Novel hyperthermia for metastatic bone tumors with magnetic materials by generating an alternating electromagnetic field[J]. Clin Exp Metastasis,2007,24: 191-200

《中国粉体技术》2010年第1期要目

- 董俊玲,张仁健,符凉斌(中国科学院大气物理研究所):中国地区气溶胶气候效应研究进展
- 王轩,陈建华,王伟(中国环境科学研究院):气溶胶吸湿特性研究现状
- 吴蓬萍,韩志伟(中国科学院大气物理研究所):中国夏季硫酸盐气溶胶间接辐射强迫的数值模拟研究
- 李莹莹,曹军骥,李库,等(中国科学院地球环境研究所):示踪气体浓度衰减法定量评价汉阳陵地下遗址厅的空气渗漏情况
- 刘艳菊,张美根,张仁健,等(北京市理化分析测试中心):2009年春季大气PM_{2.5}和黑碳浓度变化特征
- 朱凌云,张美根,高丽洁,等(中国科学院大气物理研究所):东亚地区硝酸盐湿沉降模拟研究
- 胡荣章,刘红年,张美根,等(南京大学大气科学学院):南京地区碳气溶胶的数值模拟研究
- 荣敏艳,银燕,陈倩(南京信息工程大学):混合相对流云对大气气溶胶变化响应的数值模拟研究
- 李红,王峰威,邓利群,等(中国环境科学研究院):环形溶蚀器大气颗粒物采样系统条件实验研究:涂层溶液浓度的季节对比
- 孙珍全,邵龙义,李慧(北京市理化分析测试中心):沙尘期间PM₁₀与PM_{2.5}化学组分的浓度变化及其来源研究
- 王玄玉(防化指挥工程学院):气溶胶对远红外激光辐射的衰减规律研究
- 黄建华,张连众(南开大学物理科学学院):软骨环对微米颗粒在人体上呼吸道中沉淀的影响
- 段英,吴志会,银燕,等(河北省人工影响天气办公室):河北地区毛毛雨和低云的变化趋势及其气溶胶云物理效应
- 冯喜媛,高枫亭,药明(吉林省气象科学研究所):长春市可吸入颗粒物PM₁₀分布及其与气象因子的相关分析
- 高丽洁,张美根,朱凌云(南开大学环境科学与工程学院):对京津地区酸性沉降现状及成因的研究
- 郭金平,段英,游积平,等(河北省人工影响天气办公室):河北地区秋季大气气溶胶物理特征分析
- 洪盛茂,焦荔,何曦,等(杭州市环境监测中心站):杭州主城区PM_{2.5}浓度变化特征及其组分变化
- 洪也,周德平,马雁军,等(中国气象局沈阳大气环境研究所):沈阳城区春节期间大气细颗粒物元素的浓度变化及其来源
- 黄潇,曹杰,刘文清,等(云南大学大气科学系):北京地区奥运期间NO₂浓度时空分布特征分析
- 钱立行,蔡协宏,刘育甫,等(台湾中山大学环境工程研究所):元宵节高空焰火燃放期间大气悬浮微粒浓度及其化学成分的分析
- 马雁军,王扬锋,刘宁微,等(中国气象局沈阳大气环境研究所):辽宁中部城市群可吸入颗粒物PM₁₀、PM_{2.5}的污染水平
- 王欣欣,刘艳菊(北京市理化分析测试中心):北京市居室几种常见有害气体全年污染水平调查
- 杨宏宇,郭毓秀,黄德琳,等(台湾中华技术学院土木防灾工程研究所):台湾中部地区空气品质劣化与天气类型相关性分析
- 张小玲,赵秀娟,蒲维维,等(中国气象局北京城市气象研究所):北京城区和远郊区大气中PM_{2.5}的元素特征对比分析
- 张章堂,马志明,黄汉祥,等(台湾宜兰大学环境工程系):纳米微粒测量系统性能评估的研究