

# 纳米磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 粉体掺杂聚苯乙烯 ICF 靶丸材料制备

宋丽贤<sup>1</sup>, 卢忠远<sup>1</sup>, 唐永建<sup>2</sup>, 廖其龙<sup>1</sup>, 易勇<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 材料科学与工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**为实现惯性约束核聚变中无接触点打靶实验构想,探索在聚苯乙烯(PS)中掺杂纳米磁性粉体,以制备磁性靶丸。采用本体聚合工艺制备了  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$  磁性靶丸复合材料,通过 FTIR、TG-DSC、SEM、VSM 等手段对该材料进行了分析表征。结果表明: $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$  靶丸复合材料的饱和磁化强度随磁性粉体含量的增加而增大;适量粉体的掺入提高了复合材料的拉伸强度和冲击强度,且随粉体含量的增加而增强;所制备的磁性靶丸复合材料悬浮时所需的外界磁场相对较弱,其磁性能满足磁悬浮的条件。

**关键词:**惯性约束聚变;聚苯乙烯; $\text{Fe}_3\text{O}_4$  掺杂;磁性靶丸材料

中图分类号:TQ586.1

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)09-0816-05

## Preparation of Polystyrene ICF Target Material Mingled With Nanometer Magnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4$ Particle

SONG Li-xian<sup>1</sup>, LU Zhong-yuan<sup>1</sup>, TANG Yong-jian<sup>2</sup>, LIAO Qi-long<sup>1</sup>, YI Yong<sup>1</sup>

(1. Department of Material Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The polystyrene ICF target material doped with nanometer magnetic  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  particle was prepared to fabricate the magnetic target without a support rod used in ICF experiment. The  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$  magnetic composite target material prepared by bulk polymerization process was characterized by FTIR, TG-DSC, SEM, VSM, respectively. As a result, the susceptibility, tensile strength and impact strength of the composite increase with the increasing of the content of nanometer magnetic  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  particle. The prepared magnetic composite target material can levitate in a weak magnetic field.

**Key words:** inertial confinement fusion; polystyrene;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  doping; magnetic target material

目前,惯性约束聚变(ICF)实用化的一个“瓶颈”是其能量增益(释放的热核能量与驱动

内爆的能量之比)过低<sup>[1-3]</sup>。ICF 的能量增益与靶丸的设计、制备和激光对靶丸的作用均匀性

有关<sup>[4-5]</sup>。靶丸的组成、结构、表面粗糙度、球形度和同心度均与激光的吸收和耦合、聚爆的均匀性和对称性以及聚爆效率等有着密切的关系。同时,激光应尽量均匀地在各方向上同时作用于靶丸上,才能使靶丸均匀对称地聚爆,从而提高聚爆效率,增大能量增益。激光聚变欲获得均匀对称的核聚爆,必须解决的首要问题是在激光聚变靶的周围建立一理想、均匀和干净的高温辐射场。国外开展激光聚变试验研究时,通常先借助显微镜将激光聚变靶丸粘结到一支支撑杆上,以支撑固定激光聚变靶丸<sup>[6]</sup>。采用这种杆支撑固定激光聚变靶丸方式会加大激光聚变靶丸表面的粗糙度和不均匀性,同时,靶丸和支撑杆的连接处与靶丸的其他部分所受到的激光束照射是不对称和不均匀的,从而难于将靶丸内氘氚核燃料压缩至高密度,导致激光聚变产生的能量增益下降<sup>[7]</sup>。如果用来驱动的激光能量远大于核聚变释放的能量,这还不能称其为实现了具有能量增益的聚变反应,这将使 ICF 失去其研究目的和意义。

为此,提出了通过磁悬浮方式来支撑固定激光聚变靶丸的构想,这不仅省去了原来杆支撑固定激光聚变靶丸的繁杂而精细的粘结工艺,而且由于磁悬浮支撑固定激光聚变靶丸是无接触的,可很好地解决激光束照射靶丸的不对称和不均匀问题,实现均匀对称的核聚爆,使打靶过程中的压缩比增高,产生的能量增益大。为实现此构想,本工作采用在聚苯乙烯中掺杂纳米磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粉体的方法来制备磁性靶丸材料,为制备磁性靶丸、实现无接触点打靶奠定基础。

## 1 实验

### 1.1 实验原料及试剂

改性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粉体,实验室制备;苯乙烯,分析纯,天津市科密欧化学试剂厂;乙醇,分析纯,天津市科密欧化学试剂厂;盐酸,分析纯,天津市科密欧化学试剂厂;甲苯,分析纯,重庆北碚化学试剂厂;氮气,工业级,绵阳市长俊气体有限公司。

### 1.2 实验仪器

S4000S 型电子天平,上海实验仪器有限公司;PHS-25 型 PH 计,上海精宏实验设备有限公

司;SH-2 型恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;HH-S2S 型恒温水浴锅,金坛市大地自动化仪器厂;78HW-1 型恒温磁力搅拌器,上海实验仪器厂;GS12-B 型机械搅拌机,上海市安亭电子仪器厂;KQ218 型超声波分散仪,昆山市超声仪器有限公司;404-1 型红外干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;减压蒸馏装置 1 套;各种型号烧杯若干。

### 1.3 分析表征手段

用英国 Leica Cambridge 公司 STEREO-SCAN-440 型立体扫描电子显微镜观察复合材料表面形貌和掺杂均匀性。

用英国 M-155 型振动样品磁强仪(VSM),在 1.4 MA/m 外场下,测量复合材料的饱和磁化强度。

用瑞士 Shimadzu 公司 FTIR-8400S 型红外光谱仪分析复合材料的聚合及掺杂情况。

用德国耐驰公司 STA-449C 型综合热分析仪测量材料的相变温度、分解温度,以及共聚物的组成、结晶度。

用承德试验机厂 LJ-10000N 机械式拉力试验机测量复合材料的拉伸强度;XJJ-50 型冲击试验机测量复合材料的抗压强度。

### 1.4 实验过程

将经减压蒸馏处理后的苯乙烯单体和一定量改性后的纳米磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粉体加入到 500 mL 的三口反应瓶中,将反应瓶放入一定温度的恒温水浴中,以 800 r/min 的转速搅拌混合 30 min,尔后加入适量的引发剂,进行聚合反应,反应过程处在氮气保护气氛中。当聚合反应至粘稠时,取下冷凝管并慢速搅动排气(主要为未反应的苯乙烯)。排气约 20 min 后,取下三口瓶,快速倾倒入初聚物,盛装在玻璃表面皿中,放入 85 °C 干燥箱中继续聚合至反应完全。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /聚苯乙烯(PS)复合材料形貌分析

为考察  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粉体在复合物基体中的分散状况,对  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 复合材料断面进行了扫描电镜观察。图 1 为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 复合材料不同放大倍数下的 SEM 图像。图 1a 为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 复合材料放大 1 000 倍的 SEM 图像,从图 1a

可看到:基体中有白色颗粒,初步断定该颗粒为所掺杂的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。大部分颗粒分散均匀,存在少量的团聚体,但团聚现象不太严重,团聚体的直径约为 500 nm。图 1b 是将镜头聚焦于图 1a 中部所呈现的粉体较为聚集的区域、分辨率为 10 000 时所得到的图像。通过放大分辨率,则可观测到聚苯乙烯基体中均匀分布着粒径约为 25 nm 的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒,由于纳米粉体的易团聚性,所以,在掺杂基体中出现团聚难以避免,但只要能保证大部分  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒呈 nm 级分布,则所制备的材料便达到了预期目标<sup>[8]</sup>。

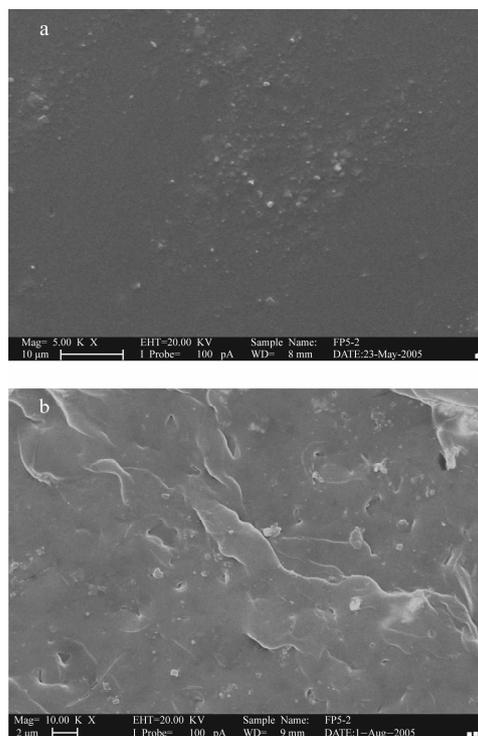


图 1  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$  复合材料 SEM 图像  
Fig. 1 SEM micrographs of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$   
a——放大 1 000 倍;b——放大 10 000 倍  
试样中磁粉含量为 6%

## 2.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$ 复合材料的红外光谱分析

为进一步证实所制得的复合材料为  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$  复合材料,对复合材料进行了结构及组成分析。图 2 为  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$  的红外光谱图。在图 2 中,于  $3\ 510\ \text{cm}^{-1}$  处出现的宽峰为干扰峰,结合  $3\ 300\sim 3\ 400\ \text{cm}^{-1}$  处出现的扁平吸收带,对应于磁性聚苯乙烯材料中吸附水的一OH 振动,判断该峰为样品未充分干燥含有

少量水分所致,这与下述热分析的结果一致; $3\ 081\ \text{cm}^{-1}$  处的峰对应  $=\text{CH}_2$  的伸缩振动, $1\ 600\sim 2\ 000\ \text{cm}^{-1}$  与指纹区处的  $689$ 、 $755\ \text{cm}^{-1}$  处的峰说明其为一取代苯; $2\ 923$ 、 $2\ 851\ \text{cm}^{-1}$  处有一  $\text{CH}_2$  的伸缩振动,在  $1\ 451\ \text{cm}^{-1}$  处又有一  $\text{CH}_2$  的弯曲振动,这些是苯乙烯原本所不具备的。因此,可说明苯乙烯已聚合。此外, $540\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的特征吸收峰。无论是  $\text{FeOOH}$  还是非晶  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,它们在红外谱图上均会与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  有所不同,但谱图上并未显现  $\text{FeOOH}$  和  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  的吸收峰,因此,可推断复合材料中的磁性粒子确实为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。

以上分析表明,复合到聚苯乙烯基体中的磁性微粒确实为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,同时也说明采用本体聚合法合成了  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$ <sup>[9]</sup>。

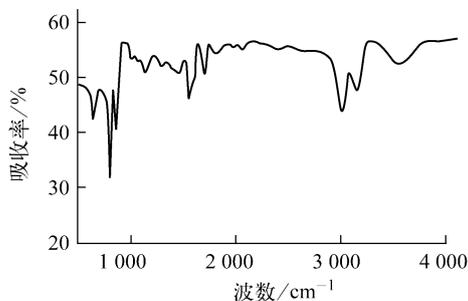


图 2  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$  复合材料的红外光谱图  
Fig. 2 FTIR spectrum of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$  composite

## 2.3 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$ 复合材料 TG-DSC 分析

为讨论  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$  复合材料的热氧化行为,对试样进行了 TG-DSC 分析,结果如图 3 所示。从图 3 的 TG 曲线可见,在  $200\ ^\circ\text{C}$  以下,试样的失重很小,曲线平直的一段稍有倾斜,说明在此过程中有小分子物质放出,主要归于试样中水分的排除;对比图中的 TG-DSC 曲线,约在  $290\ ^\circ\text{C}$ ,试样失重加速,主要归于材料中存在的少量表面活性剂的分解;DSC 曲线中  $394.2\ ^\circ\text{C}$  附近的小放热峰主要对应于  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  氧化为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,由于这一过程的质量变化很小,所以在 TG 曲线上看不到明显的变化;在  $360\sim 450\ ^\circ\text{C}$  温度范围内,TG 曲线出现了明显的失重台阶,这一过程包含聚苯乙烯的解聚、短链、挥发。聚苯乙烯的分解可分为两步: $360\ ^\circ\text{C}$  左右

开始分解,此时主要为聚苯乙烯的解聚反应;随温度的升高,聚苯乙烯的分解逐渐转变为无规则的断链反应,在  $436.3\text{ }^\circ\text{C}$  下聚苯乙烯无规则的断链反应速率达到最大值,这与 DSC 曲线上出现明显的放热峰一致;在  $450\text{ }^\circ\text{C}$  时,聚苯乙烯的分解结束;在  $450\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内,试样有缓慢的失重,这主要归因于含碳有机物的分解挥发。

以上分析表明,复合材料确为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  与 PS 共同组成,这与上述红外光谱分析的结果相一致<sup>[10]</sup>。

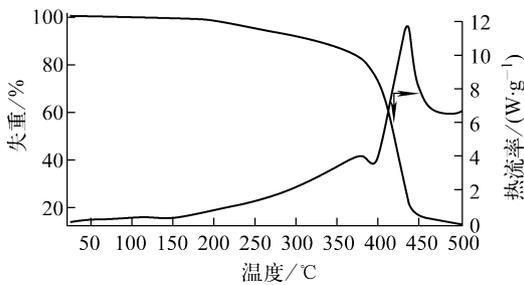


图3  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 材料的 TG-DSC 曲线

Fig. 3 TG-DSC curves of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS composite

## 2.4 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 复合材料磁性能分析

为考察  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 复合体系的磁性能,对不同  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量的复合材料进行了磁性能检测。由于掺杂粉体和掺杂数量的缘故,只测定了复合材料的饱和磁化强度。

表 1 列出了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 复合材料在不同  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量情况下的饱和磁化强度。测试结果表明,所制得的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 材料具有一定的磁性,其饱和磁化强度的大小随复合材料中  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量的增加而增加,当基体中  $w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  为 2% 时,复合材料的饱和磁化强度为  $3.38\text{ kA/m}$ ;  $w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  为 3% 时,复合材料的饱和磁化强度为  $3.67\text{ kA/m}$ ;  $w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  达到 6% 时,复合材料的饱和磁化强度增加到了  $5.36\text{ kA/m}$ <sup>[11]</sup>。

根据文献[12]推导出的靶丸悬浮时所需外界磁场强度的理论模型并结合这里的实验数据可知,随磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粉体含量的增加,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 模拟靶丸悬浮所需的外界磁场强度逐渐减小,当靶丸中  $w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  为 2% 时,悬浮磁场的强度为  $1.43\text{ mT}$ ;  $w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  为 6% 时,悬浮磁场的强度减少到  $1.02\text{ mT}$ 。

表 1  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 材料的饱和磁化强度

Table 1 Saturation intensity of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS composite

样品号	$w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ / %	饱和磁化强度/( $\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$ )
1	2	3.38
2	3	3.67
3	4	4.31
4	5	4.77
5	6	5.36
6	10	8.2

## 2.5 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 复合材料力学性能分析

为考察复合材料体系的力学性能与基体材料的差别,对复合材料的拉伸强度和冲击强度进行了测试,结果列于表 2。由表 2 可知,复合材料的拉伸强度和冲击强度随  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量而变化。拉伸强度随  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量的增加而增大,在  $w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  由 0% 增至 6% 范围内,复合材料的拉伸强度提高较大,由  $22.15\text{ MPa}$  升至  $27.34\text{ MPa}$ ;  $w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  继续增至 10% 时,拉伸强度基本不再变化。

表 2  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 复合材料的力学性能

Table 2 Mechanical property of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS composite

样品号	$w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ / %	拉伸强度/ MPa	冲击强度/ ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$ )
0	0	22.15	4.6
1	2	22.17	5.8
2	3	24.16	7.4
3	4	25.33	8.2
4	5	27.12	9.8
5	6	27.34	10.3
6	10	27.36	10.6

## 3 结论

采用本体聚合法制备了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 磁性复合材料,并对其进行了分析表征。结果表明:在合成的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 复合材料中,纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒在基体中的分散均匀;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 复合材料的磁性能随磁性粉体含量的增加而增大,当  $w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  由 2% 增加到 5% 时,复合材料的饱和磁化强度增加了 55%;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS 磁性复合材料的拉伸强度和冲击强度均随  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量

的增加而增加,拉伸强度较 PS 基体材料增加了 23%,冲击强度较 PS 基体材料增加了 1.3 倍,而当  $w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  继续增加到 10% 时,材料的拉伸强度和冲击强度基本不再变化,分别为 27.36 MPa 和 10.6 J/m。

#### 参考文献:

- [1] 张家泰. 激光等离子体相互作用物理[D]. 北京: 中国工程物理研究院北京研究生部, 1995.
- [2] WANG G C. Suggestion of neutron generation with powerful lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 1987, 14(11): 641-645.
- [3] YOSHIDA H, KATAKAMI K, SAKAGAMI Y. Magnetic suspension of a pellet for inertial confinement fusion [J]. Laser and Particle Beams, 1993, 11(2): 455-459.
- [4] NUCKOLLS J H, WOOD L. Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear (CTR) application[J]. Nature, 1972, 239(15): 139-142.
- [5] LOWDERMILK W H. Status of the National Ignition Facility Project[J]. Proc SPIE, 1998, 30(4): 16-37.
- [6] STEPHEN M L. Fabrication of low density foam shells from resorcinol formaldehyde[J]. J Appl Polymer Sci, 1997, 65(5): 11-21.
- [7] MISHRA K K, KHARDEKAR R H, PANT H C, et al. Fabrication of polystyrene hollow microsphere as laser fusion target by optimized density-matched emulsion technique and characterization[J]. Pramana-Journal of Physics, 2002, 59(10): 113-131.
- [8] 徐国财, 张立德. 纳米复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002:1-5.
- [9] 荣国斌. 波谱数据表: 有机化合物的结构解析 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2002: 255-257.
- [10] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002:262-265.
- [11] 都有为. 铁氧体[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996:11-86.
- [12] 宋丽贤, 卢忠远, 廖其龙. ICF 用磁性玻璃靶丸悬浮磁场的确定及材料制备初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(11): 1 705-1 708.
- SONG Lixian, LU Zhongyuan, LIAO Qilong. Study on the establishment of levitation magnetic field and preparation of materials for ICF magnetic glass targets [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(11): 1 705-1 708(in Chinese).