

发动机同步带轮粉末冶金成形模具设计

徐永刚, 王吉忠, 杨 振

(青岛理工大学 汽车与交通学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 针对发动机同步带轮的粉末冶金成形工艺, 根据同步带轮的结构特点和粉末冶金模具设计原理, 采用成形速度和成形速率相等原理设计同步带轮成形模具; 采用变模数设计法设计成形中模; 对定位孔提出采用成形芯棒的设计方案; 将设计的模具图建立模具组立图, 理论分析所设计模具方案的可行性; 通过模具装机实验, 验证成形模具设计的合理性。结果表明, 试生产的同步带轮经过烧结等工艺达到了客户在精度、性能等方面的技术指标, 并且提高了齿形精度和模具的使用寿命, 成功开发了发动机同步带轮成形模具。

关键词: 同步带轮; 粉末冶金; 模具设计; 成形工艺

中图分类号: TB21 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2015)02-0093-05

Design for Powder Metallurgy Mold of Engine Timing Pulleys

XU Yonggang, WANG Jizhong, YANG Zhen

(School of Automotive and Transportation Engineering,
Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China)

Abstract: Aiming at the forming process for powder metallurgy of engine timing belt pulleys, the timing belt pulleys were designed according to structural characteristics of the timing pulleys and powder metallurgy mold design principles and using the principle of forming speed equaling to forming rate. The forming die was developed by the modulus design method. The forming mandrel design method for positioning holes was proposed. Through installing the assembly diagram by designed mold diagrams, the feasibility of the designed forming mold was analyzed theoretically. The reasonableness of the forming mold design was verified by mold installation experiments. The results show that the pilot productions of timing pulleys after sintering process meet to the need of customer in terms of technical indicators such as accuracy and performance. The profile accuracy and the mold life are improved, thus the engine timing pulleys mold is successful developed.

Keywords: timing pulley; powder metallurgy; mold design; forming technology

同步带轮是汽车发动机中重要的传动部件, 具有传动准确、工作时无滑动、有恒定的传动比、传动效率

高、维护保养方便等优点, 但是采用常规方法进行加工成形难度大、效率低、生产成本低。粉末冶金同步带轮的成本低, 生产效率高, 一次成形后不需要再加工轮齿, 原料利用率高, 并能保证形位与尺寸公差的一致性, 适合大批量生产。成形模具设计是粉末冶金工艺中的重要环节^[1]。在分析同步带轮结构特点和成形工艺的基础上, 本文中结合已有原料、模具配件和工艺装备, 开发同步带轮粉末冶金成形模具。

1 同步带轮结构特点及成形模具设计原理

1.1 同步带轮结构特点

图 1 为某发动机同步带轮零件图, 带轮的材料为铁镍合金 FC-0205。

从图 1 中同步带轮的结构、尺寸精度, 可以看出同步带轮有 2 个的特点: 1) 内部有 3 个均匀分布的弧形凹槽和 3 个定位孔; 2) 形位精度要求较高, 内孔的同轴度公差为 0.05 mm, 齿形跳动度为 0.1, 中心孔的垂直度为 0.03。综合分析, 如果选择常规方法加工同步带轮, 其形状以及内部微小尺寸控制难度大; 如果采用粉末冶金法进行成形, 零件的凹槽、定位孔及尺寸精度均可通过模具成形来保证^[2-3]。

1.2 成形模具设计原理

粉末冶金成形工艺是由粉末冶金零件压机和粉末冶金模具通过对所需粉末进行装料、加压、脱模等主要工步来完成, 并使金属粉末密实成具有一定尺寸、形状、孔隙度和强度坯块的过程。该同步带轮应采用不等高零件成形模具设计原理^[2]。

1.2.1 成形速度相等原理

根据不等高零件成形运动规律^[2], 在不等高零件成形过程中, 必须满足成形前、后粉末质量守恒定律, 才能使不同高度区域密度近乎相等, 即

$$H_n S \rho_0 = h_n S \rho, \quad (1)$$

式中: H_n 为第 n 个台阶的装粉高度, mm; h_n 为第 n 个台阶的压坯高度, mm; S 为压坯截面积, mm²; ρ 为粉末的成形密度, g/cm³; ρ_0 为粉末的充填密度, g/cm³。

对于不等高零件, 因为粉末压缩比相等, 各区装粉高度的公式为

收稿日期: 2014-08-05, 修回日期: 2014-08-12。

第一作者简介: 徐永刚(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为汽车制造工艺。电话: 18765428608, E-mail: xyg1987925@126.com。

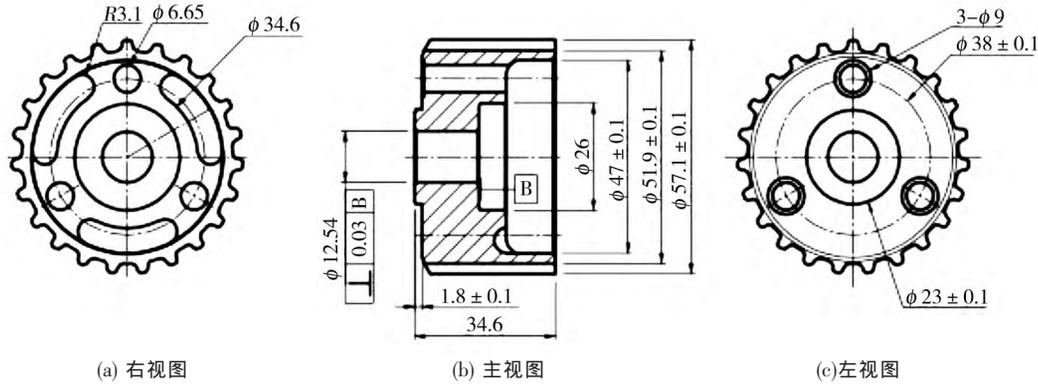


图 1 同步带轮零件图

Fig. 1 Diagram of timing pulley parts

$$\frac{H_1}{h_1} = \frac{H_2}{h_2} = \frac{H_3}{h_3} = \dots = \frac{H_n}{h_n} \quad (2)$$

粉末压缩比 ε 是粉末压缩前、后高度的比值,即

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (3)$$

由式(1)–(3)得:

$$H_n = \varepsilon h_n = \frac{\rho}{\rho_0} h_n \quad (4)$$

设计成形模具时,要设计模具有效段高度、模具总高度和装粉高度,式(4)是基本公式。

成成品各部分速度之间应满足速度平衡方程,即

$$\frac{H_{n-1}}{H_n} = \frac{v_{n-1}}{v_n} \quad (5)$$

式中 v_n 、 v_{n-1} 分别为 n 、 $n-1$ 区成形速度, m/s。成形速率相等原则即各工作区的成形起始时间相同,且满足式(5)。

1.2.2 成形速率相等原理

在成形过程中,单位时间内粉末被压缩的体积与装粉体积之比称为成形速率。由于发动机同步带轮是不等高零件,因此粉末在各区内的成形速率公式为

$$\lambda_n = \frac{H_n - h_n}{H_n t} = \frac{v_n}{H_n} \quad (6)$$

式中: λ_n 为粉末成形速率, s^{-1} ; t 为粉末成形时间, s。

在不等高零件中,任意高度内都有

$$\frac{v_{n-1}}{v_n} = \frac{\lambda_{n-1} H_{n-1}}{\lambda_n H_n} \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)可得

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_n \quad (8)$$

在粉末成形时,零件的不同高度区都在同一时间进行粉末压缩和成形,并且各部分所用成形速率相等,所遵循的原理即为成形速率相等原理。由此可知,在压制不等高零件时,要使不同高度的各个区域遵循成形速率相等原理,从而保证零件不同高度区的平均密度相等。

2 同步带轮粉末冶金模具的设计

1) 齿形成形通过控制材料的流动方向,成形出理想的形状尺寸,是同步带轮成形模具中最关键的环节。由于成形过程中单位压力增大,载荷集中,因此要求模具工作部位刚性好。另外还应设置过载保护,防止毛坯的超差、材料不均匀等导致的过载^[3]。

2) 同步带轮属于轴类零件,在成形过程中轴向密度差较大,因此模具应采用芯棒成形结构,以保证同步带轮轴向密度分布均匀^[4]。

3) 该同步带轮有 3 个定位孔,应采用芯棒成形结构成形定位孔,可以延长模具使用寿命,提高装配精度。

该同步带轮采用德国 DORST 压机进行压制,铁粉的松装密度约为 3.2 g/cm^3 ,零件的毛坯密度不得小于 6.6 g/cm^3 ,为了节约成本,模具配件采用已有的五档同步器齿毂模具配件,例如,垫板、压盖等。由此可知,该同步带轮成形模具的设计主要包括中模、上模冲(2 个)、下模冲(3 个)、芯棒(2 个)的设计。

2.1 成形中模的设计

中模主要用于同步带轮的齿形成形,因此采用变模数设计法^[2]提高齿形精度。材料选用 45 号钢,具有较高的强度和较好的切削加工性,经适当热处理后可获得一定的韧性、塑性和耐磨性,中模内径尺寸公差为 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 。影响中模几何尺寸的工艺主要是成形和烧结,因此成形中模设计过程中必须考虑成形回弹率 δ 和烧结收缩率这 2 个工艺参数^[5]。

烧结收缩率 φ 指压坯烧结后的收缩量与压坯烧结前的尺寸(包括直径、高度等)之比,即

$$\varphi = \frac{d_2 - d_1}{d_1} \times 100\% \quad (9)$$

式中: d_2 为压坯烧结后的尺寸, mm; d_1 为压坯烧结前的尺寸, mm。

成形回弹率 δ 指粉末冶金压坯的尺寸与成形时

模具尺寸之比,即:

$$\delta = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \times 100\%, \quad (10)$$

式中 d_0 为成形时的模具尺寸, mm。

式(9)和(10)即为由粉末冶金产品尺寸和工艺参数 φ 及 δ 直接计算模具型腔径向尺寸的计算公式。取烧结收缩率 φ 和压坯成形回弹率 δ 分别为 0.1% 和 0.2%^[1], 计算出同步带轮中模齿顶圆直径为 $d_d=56.94$ mm, 齿根圆直径为 $d_g=51.75$ mm。

成形中模高度的确定公式如下:

$$H_z = \frac{\rho_p h_p}{\rho_s} + h_d, \quad (11)$$

式中: H_z 为成形中模高度, mm; ρ_p 为同步带轮毛坯密度, g/cm³; h_p 为同步带轮毛坯高度, mm; ρ_s 为混合粉末松装密度, g/cm³; h_d 为下模冲在中模中的定位高度, mm, 本设计中取为 20 mm。将相关数值代入式(11), 得 $H_z=6.6/3.2 \times 34.6 + 20 = 90$ mm。

根据计算结果, 该同步带轮成形中模模具如图 2 所示。另外, 粉末冶金工艺中的烧结收缩率及成形回弹率在径向和轴向甚至各不相同的截面位置都是各不相同的。一般情况下, 收缩率和成形回弹率在轴向的值往往大于在径向的。模具的配合间隙仅在径向得到体现, 方法是按制件外径或内孔的相应成形件为基准制造, 与之相邻的配合件取配合间隙后, 按双向公差加工制造。

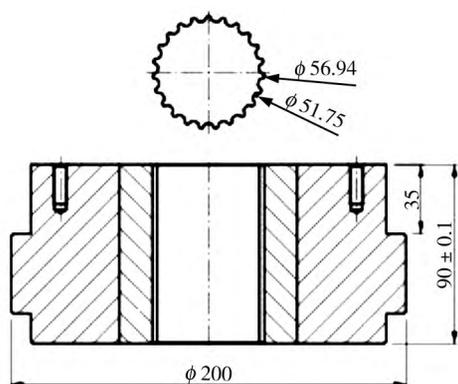


图 2 同步带轮成形中模

Fig. 2 Forming die of timing pulley

2.2 上模冲和下模冲的设计

根据同步带轮的结构和成形特点, 上模冲主要针对产品上表面形状及轴向尺寸设计, 上模冲与中模内腔上半部配合, 上模冲设计为上外冲和上内冲。

同步带轮内部结构主要由下模冲成形而成, 内部有弧形凹槽, 深度为 3.1 mm, 圆弧半径为 17.28 mm, 设计模具时应保证凹槽的形状及尺寸。下模冲外形与中模内腔下部配合, 下模冲设计为下一冲、下二冲和

下三冲, 更有利于产品成形和提高产品质量。

为了保证成形坯的精度, 模具尺寸公差应控制在 0.02 mm 之内, 材料均选用碳钼莱体钢 Cr12MoV, 属于合金工具钢, 该材料具有较强的耐磨性、淬硬性、强韧性、热稳定性、抗压强度等优良性能, 热处理至 HRC 洛氏硬度为 54~58, 模具有效段的径向尺寸公差应控制在 ±0.02 mm 之内^[4]。

上模冲高度 H_s :

$$H_s = h_{sy} + h_{sj} + 20 \text{ mm}, \quad (12)$$

式中: h_{sy} 为上模冲压入中模深度, mm; h_{sj} 为上模冲与压机固定所需高度, mm。

下模冲高度 H_x :

$$H_x = H_z + h_x + 20 \text{ mm}, \quad (13)$$

式中: h_x 为下模冲与座板固定高度, mm。

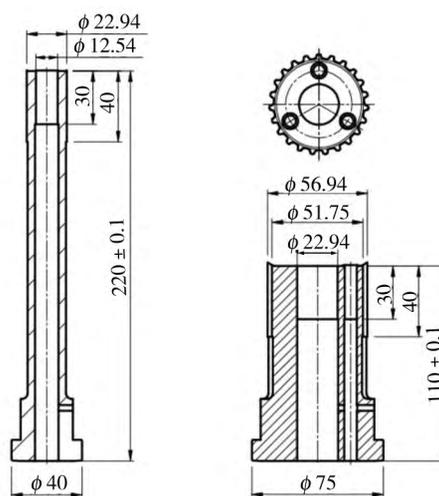
根据配合原理和式(4)、(9)、(10)、(12)、(13), 得上模冲和下模冲径向、高度和有效段高度等尺寸^[6], 结果如表 1 所示。

表 1 上模冲和下模冲尺寸

Tab. 1 Upper punch and lower punch size

模具名称	内径/mm	外径/mm	高度/mm	有效段高度/mm	
上模冲	上外冲	22.94	56.94	110	40
	上内冲	12.54	22.94	220	40
下模冲	下一冲	56.94	26.00	165	40
	下二冲	26.00	46.95	262	60
	下三冲	12.54	26.00	372	50

上模冲和下模冲模具如图 3、4 所示, 其中, 上模冲和下模冲模具底座的尺寸和结构设计根据五档同步器齿毂模具配件确定。



(a) 上内冲

(b) 上外冲

图 3 同步带轮上模冲

Fig. 3 Upper punch of timing pulley

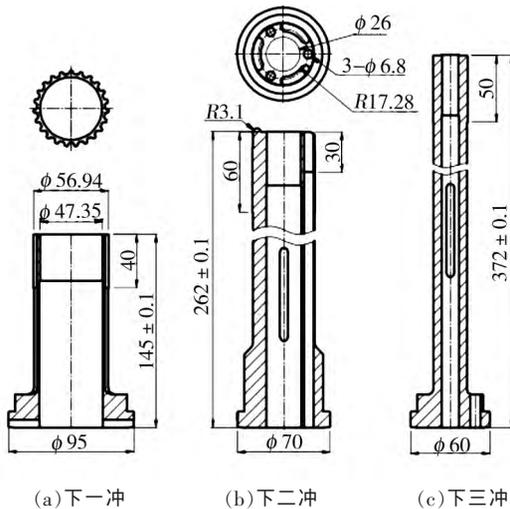


图 4 同步带轮下模冲
Fig. 4 Lower punch of timing pulley

2.3 同步带轮成形芯棒的设计

同步带轮成形模具设计 2 个成形芯棒，即芯棒 1 和芯棒 2。芯棒 1 与下三冲滑配，芯棒 2 与下二冲滑配，主要用于定位孔的成形，配合间隙均为 0.02 mm。成形芯棒材料均选用钨钴类硬质合金 WC，热处理至 HRC 洛氏硬度为 60~63，芯棒 1 有效段径向尺寸公差控制在 ±0.01 mm 之内，芯棒 2 有效段径向尺寸公差控制在 ±0.02 mm 之内^[7]。

成形芯棒的高度公式如下：

$$H_{sl} = H_z + h_{db} + h_{xg}, \quad (14)$$

式中： h_{db} 为下模冲垫板厚度，mm； h_{xg} 为芯杆固定所需高度，mm。

根据式(14)可以得到芯棒 1 和芯棒 2 的高度： $H_{sl1} = 520$ mm, $H_{sl2} = 520$ mm，芯棒的有效段长度均为 $L_{xy} = 70$ mm，芯棒底座的尺寸与结构根据同步带轮模具和五档同步器齿毂模具配件进行设计。同步带轮成形芯棒如图 5 所示。

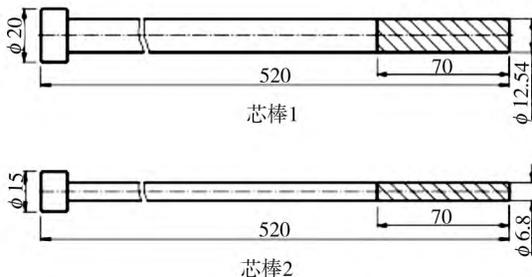


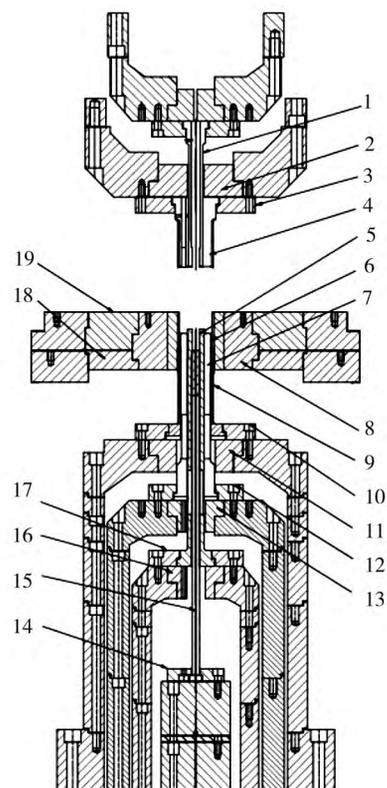
图 5 同步带轮成形芯棒
Fig. 5 Forming mandrel of timing pulley

3 同步带轮成形过程

根据设计的模具图(图 2—5)建立模具组立图,如图 6 所示。上内冲和上外冲分别固定在上内冲垫板和

上外冲垫板上,下一冲、下二冲和下三冲分别固定在下一冲垫板、下二冲垫板和下三冲垫板上,中模固定在中模垫板上^[8]。在压坯的成形过程中,首先要进行粉末的送装,这是通过压机的送料机构驱动送料靴完成的,在此过程中,上模冲通过压机运动机构回到原位,而上外冲在压机气缸的作用下处于向上回升状态,而中模和下一冲在压机气缸和弹簧的作用下上升,直到达到要求的装粉高度,并且通过调整螺母保证装粉高度。粉末成形过程中,上内冲在驱动机构作用下下降,同时上外冲在气缸的作用下处于向上回升状态,然后上模冲压入中模,对粉末进行压缩成形,此时,下一冲因受到压力而回至模具垫块处,同时随着压制压力的增大,粉末对中模的摩擦力增大,使中模随着浮动板开始向下运动,形成下模冲和芯棒的向上运动,实现粉末的双向成形,这样能使压坯的密度更加均匀,并且外形尺寸精度和一致性高。此时在中模、芯棒 1 和上、下模冲之间形成了一定的密闭空间(成形坯的体积),完成粉末的成形^[9]。脱模时,上模冲随着压机滑块上行,当脱出中模上端一段距离后,下模冲随着压机顶出缸活塞杆上升,同时将同步带轮成形坯顶出中模后复位,完成一个工作循环^[10]。

图 6 所示的成形模具组立图的配合情况说明设计



1—上内冲;2—上外冲垫板;3—上外冲压盖;4—上外冲;5—下三冲;
6—下二冲;7—芯棒 2;8—中模;9—下一冲;10—下一冲压盖;11—下一冲垫板;12—下二冲压盖;13—下二冲垫板;14—芯棒 1 压盖;15—芯棒 1;
16—下三冲垫板;17—下三冲压盖;18—中模垫板;19—中模压盖。

图 6 同步带轮成形模具组立图
Fig. 6 Assembly diagram of timing pulley mold

的成形模具在理论上可行,然后根据模具图纸进行模具的加工制造,将制造完成的模具及配件进行装机实验,依据成形原理进行压制,得到成形品,如图 7 所示。对成形品进行检测,得到的尺寸及相关数据符合技术要求。

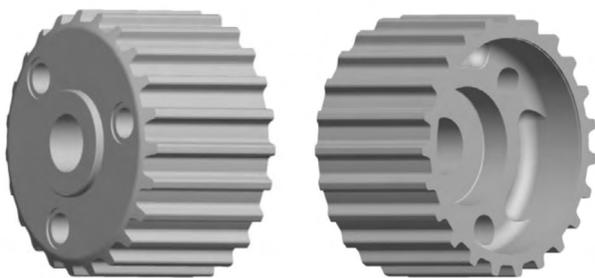


图 7 同步带轮成形品示意图

Fig. 7 Molding products of timing pulley

4 结论

1)在发动机同步带轮粉末冶金成形模具设计中,采用了 2 个成形芯棒和中模变模数设计法,有效地提高了模具装配精度、齿形精度和使用寿命。

2)根据成形模具设计图纸和模具配合原理,将加工制造的模具进行装机实验并且试生产同步带轮的成形品,经过烧结等工艺,将制造的样品经过装机实

验,达到了客户在精度、性能等方面的技术指标,成功开发了某发动机同步带轮成形模具,材料利用率高达 98%。

3)同步带轮粉末冶金成形模具在生产中有较高的实用价值,其设计思想与开发过程对同类产品开发展具有一定的借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] 邱红羽,张华诚.粉末冶金模具设计手册[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [2] 赵华.模具设计与制造[M].北京:电子工业出版社,2012.
- [3] 吴朗,陈鹏.粉末冶金铁基渐开线直齿轮的成形模具设计[J].制造技术与机床,2009(10):149-151.
- [4] 宋正和,朱斌.汽车发动机用粉末冶金曲轴主轴承盖的模具设计[J].锻压技术,2011,36(5):101-103.
- [5] 杨宏亮.粉末冶金模具设计原理及应用[J].模具制造,2003(28):41-43.
- [6] NARASIMHAN K. Powder metal gears up for a hard-nosed approach[J]. Metal Powder Report, 2003(6):24-30.
- [7] LAWLEY A, MURPHY T F. Metallography of powder metallurgy materials[J]. Materials Characterization, 2003, 51(5):315-327.
- [8] 黄培云.粉末冶金原理[M].北京:冶金工业出版社,1982.
- [9] 吴成宝,胡小芳,段百涛.粉体堆积密度理论计算[J].中国粉体技术,2009,15(5):76-81.
- [10] 韩凤麟.粉末冶金零件在汽车发动机中的应用[J].现代零部件,2003(1):73-76.

(上接第 92 页)

3 结论

1)采用向一定浓度的葡萄糖、氨水和氢氧化钠的混合溶液中缓慢滴加 AgNO_3 溶液的方式,在热碱活化处理后的粉煤灰微珠表面成功制备出纳米晶银镀层,镀层结构完整,包覆均匀、致密,制备的镀银复合粉体电阻率可达 $0.05 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

2)热碱活化化学镀银是利用强碱与 SiO_2 和 Al_2O_3 发生的强烈作用,在粉煤灰微珠表面生成大量羟基基团,通过羟基基团的亲核性对银铵阳离子产生极性吸引并在葡萄糖的还原作用下还原为单质银。

参考文献(References):

- [1] 全北平,徐宏,古宏晨,等.粉煤灰空心微珠的研究与应用进展[J].化工矿物与加工,2003(11):31-33.
- [2] 沈志刚,王明珠,麻树林,等.空心微珠填充聚丙烯复合材料的研究[J].中国塑料,2001,15(8):32-35.
- [3] 王明珠,沈志刚.粉煤灰空心微珠的高附加值应用研究[J].中国粉体技术,2005,11(1):15-19.

- [4] LIU Xinzhong, REN Gui, CHEN Zuxing. Study on production of aerated concrete by circulating fluidized bed fly ash[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48(Suppl 2):70-72.
- [5] 王宇,张骁勇,毛丽,等.空心玻璃微珠化学镀银的研究[J].材料科学与工程学报,2004,22(5):753-756.
- [6] TAO Huiqing, YAO Jianfeng, ZHANG Lixiong, et al. Preparation of magnetic ZSM-5/Ni/fly-ash hollow microspheres using fly-ash cenospheres as the template[J]. Materials Letters, 2009, 63(2):203-205.
- [7] DU Jianhua, LI Chao, LIU Guimin, et al. Preparation of Cu coated nano SiO_2 composite particles by heterogeneous precipitation[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2008, 13(5):291-295.
- [8] 毛倩瑾,于彩霞,葛凯勇,等.粉煤灰空心微珠的改性及其吸波特性[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(12):1673-1675.
- [9] 邵谦,杨玉香,葛圣松.空心玻璃微珠表面化学镀镍活化新工艺[J].材料工程,2007(8):28-31.
- [10] 傅圣利,李义和,王本根,等.玻璃表面无钼活化化学镀镍的研究[J].电镀与精饰,2000,22(5):10-13.
- [11] 朱国庆,张瑾,张辉.空心玻璃微珠无钼活化化学镀银的研究[J].电镀与环保,2012,32(4):32-35.
- [12] 杜仕国,高欣宝.电磁屏蔽导电复合材料[J].兵器材料科学与工程,1999,22(6):61-66.