

铁基粉末冶金液压马达阀板的研究与制备

左鹏军^{1,2)}, 王海文¹⁾✉

1) 陕西省机械研究院, 咸阳 712000 2) 陕西华夏粉末冶金有限责任公司, 咸阳 712000

✉通信作者, E-mail: zpj168@163.com

摘 要 阀板是液压马达的关键零件, 具有多台阶异形复杂结构和力学性能要求高等特点。本文采用粉末冶金技术替代原铸造工艺, 通过精选材料配方, 合理进行成形模具模架设计, 控制烧结熔渗过程, 优化热处理工艺参数, 制造出了高质量铁基粉末冶金阀板零件, 完全满足液压马达的应用要求, 可代替铸造阀板件。

关键词 粉末冶金; 阀板; 模具; 烧结

分类号 TF125.13

Development and preparation of Fe-based powder metallurgy valve plate used in hydraulic motor

ZUO Peng-jun^{1,2)}, WANG Hai-wen¹⁾✉

1) Mechanical Design Institute of Shaanxi Province, Xianyang 712000, China

2) Shaanxi Huaxia Powder Metallurgy Co. Ltd., Xianyang 712000, China

✉Corresponding author, E-mail: zpj168@163.com

ABSTRACT As the key component of hydraulic motor, valve plate shows the characteristics of complex multi-step shape structure and high mechanical property requirements. Replacing the original casting process, the high quality and qualified Fe-based valve plate used in hydraulic motor was produced by powder metallurgy technology. The raw Fe-based materials were selected carefully, the forming mold was designed reasonably, the sintering melting process was controlled intensively, and the heat treatment parameters were optimized. In the results, the Fe-based powder metallurgy valve plate can satisfy the application requirement of hydraulic motor.

KEY WORDS powder metallurgy; valve plate; mould; sintering

阀板是摆线液压马达中的关键零件, 属多台阶异形复杂结构件, 具有耐高压、无泄漏、高强度、抗冲击、耐磨损等特性。阀板零件三维数模见图 1 所示, 其形状结构复杂, 外部有一局部小外台阶,

内部有七个异形斜台阶孔。国内摆线液压马达阀板零件主要依靠铸造工艺来生产制造, 国外则采用粉末冶金技术替代铸造工艺来生产液压马达阀板。铸造工艺生产的阀板零件毛坯, 尺寸精度低, 后续机

收稿日期: 2017-04-15

基金项目: 陕西省重大科技创新专项资金资助项目 (2012ZKC04-5)

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2017.06.006; <http://journals.ustb.edu.cn>

加工量大,材料利用率低。采用粉末冶金技术制造液压马达阀板,材料利用率高、合金成分无偏析、组织结构均匀,零件制造精度高,零件的综合机械性能也得到提高^[1-2]。本文采用粉末冶金技术替代原铸造工艺,通过精选材料配方,合理进行成形模具模架设计,控制烧结熔渗过程,优化热处理工艺参数,制造出了高质量铁基粉末冶金阀板零件,完全满足液压马达的应用要求,可代替铸造阀板件。

1 阀板的制备

铁基粉末冶金摆线液压马达阀板零件简图见图2所示。阀板零件主要技术性能指标如下:最终密度 $\geq 7.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;表面硬度, HRC 36~46;抗拉强度, $\sigma_b \geq 620 \text{ MPa}$;气密性,使用 N_2 气测试,压力 3 MPa, 3 min 内无泄漏。由于阀板具有高密度、高强度、高气密封性要求且零件形状结构复

杂,需要制定切实可行的粉末冶金阀板制造技术工艺,以保证阀板零件局部小外台阶、内部7个异形斜台阶与阀板整体密度的均匀一致。结合粉末冶金阀板零件成形结构及零件最终力学性能要求,制定出的其粉末冶金制造工艺流程见图3所示^[3]。

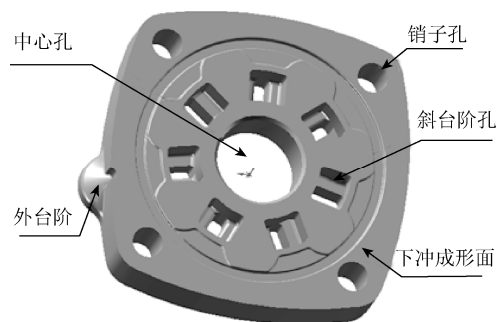


图1 阀板零件三维数模图

Fig.1 3D model of valve plate parts

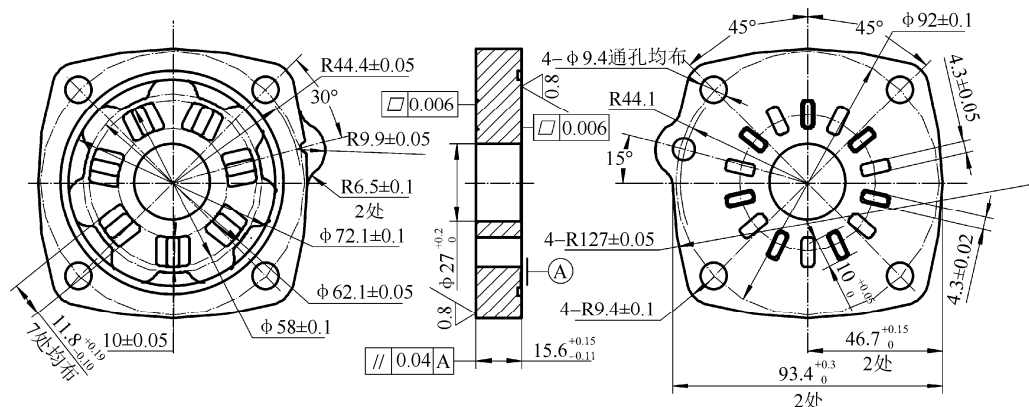


图2 阀板成品零件简图,单位:mm

Fig.2 Schematic diagram of valve plate products parts, unit: mm

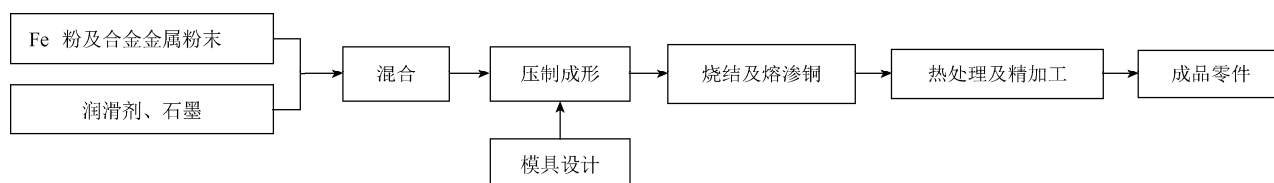


图3 粉末冶金阀板制造工艺流程

Fig.3 Process flow of powder metallurgy valve plate

1.1 材料的选择

采用粉末冶金技术工艺来制造液压马达阀板,首先需确定其主要材料和材料的成分配比。铁基粉末冶金烧结材料和一般钢铁材料基本相似,其性能主要决定于材料的密度、化合碳含量、合金元素的种类、含量、组织状态及淬硬性。铁基粉末冶金阀板采用铁(Fe)粉为主要基体材料,添加一定比例的合金元素钼(Mo)、镍(Ni)、铜(Cu)、碳(C)作为强化组元,以期增强基体的硬度及强度,提高材料的力学性

能。钼元素在铁中的扩散速度远低于碳元素的扩散速度,故钼元素不宜用粉末状态进行添加,一般和铁元素以预合金的形式来加入^[4-5]。润滑剂选用工业级纯硬脂酸锌(-200目),添加质量分数为0.7%。阀板材料配比及选用的材料牌号规格见表1。

1.2 成形模架模具设计

最终确定的粉末冶金液压马达阀板材料配方为: Fe-0.5Mo-0.6Ni-2Cu-0.7C。为获得高密度成品零件,需有较高的压坯密度。本研制要求阀板零件

成品密度 $\geq 7.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，通过常规的压制烧结较难达到，试制时将压坯密度设计为 $(6.8\pm 0.1)\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，再通

过后续的烧结熔渗铜工艺使其达到最终成品零件的密度要求。

表1 粉末冶金阀板材料配比及选用材料规格

Table 1 Chemical composition and specification of powder metallurgy valve plate

原料	组元质量分数 / %	牌号规格	粒度	制取方法
预合金铁粉 (Fe-0.5Mo)	余量	AHC100.29	-100 目	水雾化预合金粉
镍粉	0.6	FNITZ-101	0.5~2.5 μm	羰基化
铜粉	2.0	FTD2	-200 目	电解
石墨	0.7	LC300-99.9	300 μm	天然

如图1所示，阀板零件外形带有一个局部外台阶，中心带有7个内斜台阶异形出油孔。如何保证此两处台阶密度与压坯整体密度的均匀性是阀板模具设计及成形的关键。图4所示为阀板压制成形模架模具结构图。模架结构为C型，采用上二下三结构，液压机上缸部分设计两层模板，下部采用三层浮动模板。主要模具由上模冲、下模冲、阴模、异形芯杆、销孔芯杆、中心杆等构成。在考虑模具设计时，采用将阀板外台阶设计在阴模上，通过调整阴模的装粉高度和浮动量，来保证外台阶密度与整体密度的均匀性。七个内斜台阶异形出油孔由单独的七根芯杆来成形，芯杆固定在浮动模版I上，通过调节浮动模版I的浮动量来保证异形出油孔斜台阶与压坯整体密度的均匀性。上模冲固定在上模板上，下模冲安装在固定模板I上，销孔芯杆安装在浮动模板II上，中心芯杆通过连接杆和下中心缸相连，阴模安装在阴模板上，阴模板和下缸通过导柱连接为整体，实现同步浮动。脱模采用下拉式。压制成形时上模冲下降加压，通过移粉及阴模板、浮动模板I、浮动模板II的相对运动来保证阀板各台阶密度的均匀性。成形的过程包括自动装粉→上模冲加压→阴模及芯杆浮动→压制保压→拉下脱模→复位到初始装粉状态^[6]。压制过程中上模冲、阴模、芯杆和下模冲的运动曲线见图5。由于下模冲的运动是对于阴模相对运动，所以用点划线来表示。压制成形后的阀板压坯如图6所示。

1.3 烧结熔渗

熔渗铜是将低熔点的铜高温熔化后渗透到高熔点的多孔金属骨架的孔隙中。通过烧结熔渗铜可填充金属骨架基体内部颗粒间孔隙，获得较高的密度、强度、硬度和冲击韧性。粉末冶金阀板烧结过程和

熔渗铜过程合为一步完成，采用顶部一次熔渗烧结，使低熔点的铜（熔点 $1083\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）浸渗到铁（熔点 $1535\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）骨架基体中。阀板顶部烧结熔渗过程如图7所示^[7]。

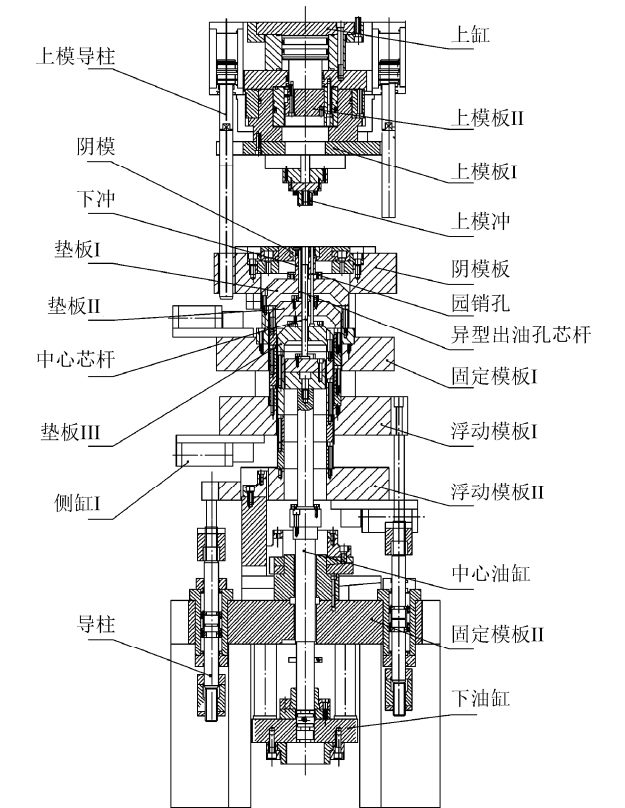


图4 粉末冶金阀板压制成形模架模具结构图

Fig.4 Forming mould diagram of powder metallurgy valve plate

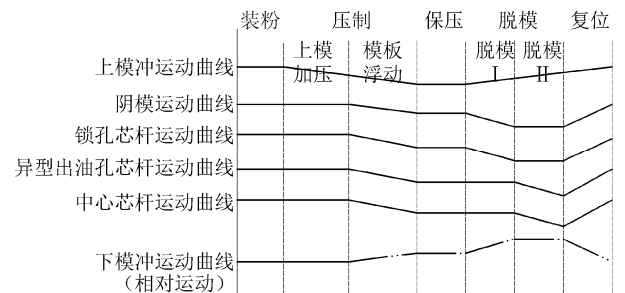


图5 阀板压制成形曲线

Fig.5 Press forming curve of valve plate



图 6 压制成形的阀板压坯

Fig.6 Pressing blank of valve plate

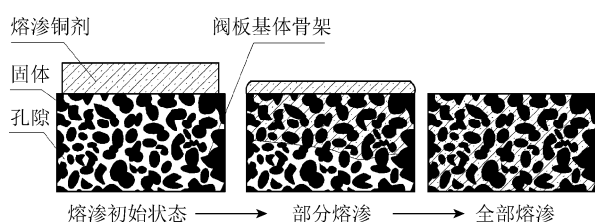


图 7 顶部熔渗铜烧结过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of top copper-infiltrated sintering process

粉末冶金阀板烧结设备为网带连续烧结炉, 采用氨分解保护气氛。阀板烧结熔渗工艺曲线见图 8。图中第一保温阶段为预热区, 设定温度为 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温时间 30 min 。第二个保温阶段预烧区, 设定温度 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温时间 30 min 。前两个区主要是使粉末冶金压坯中的成形剂硬脂酸锌有足够的时间从压坯中充分分解烧除, 形成更多的连通孔隙。第三保温阶段为烧结熔渗区。烧结熔渗区为高温区, 温度为 $1120\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在此区域将发生液相烧结及合金化反应。渗铜剂溶液沿着铁基体骨架毛细孔隙逐渐向基体内部渗透, 随后扩散溶解到铁粉颗粒内的晶界。由于铜的大量渗入, 烧结熔渗铜工艺后, 阀板烧结件的尺寸较压坯尺寸略有膨胀。在一定范围内, 烧结温度越高、熔渗进程加快, 熔渗效果越好。第四保温阶段为预冷区, 预冷区将阀板由熔渗烧结温度降至 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 30 min 后再进入冷却水套降温出炉。预冷目的是使奥氏体在下一阶段更快的冷却到奥氏体分解温度。阀板烧结熔渗铜效果检测采用金相显微镜进行观察。图 9 是阀板烧结熔渗铜后的放大 500 倍的金相图。图中浅白色的为铜, 从图中可以清晰的看出烧结态时铜溶液在毛细管力的作用下沿着晶

粒边缘均匀的填充了联通孔隙, 并加大了晶粒界面间的结合强度, 烧结熔渗效果良好^[8-10]。

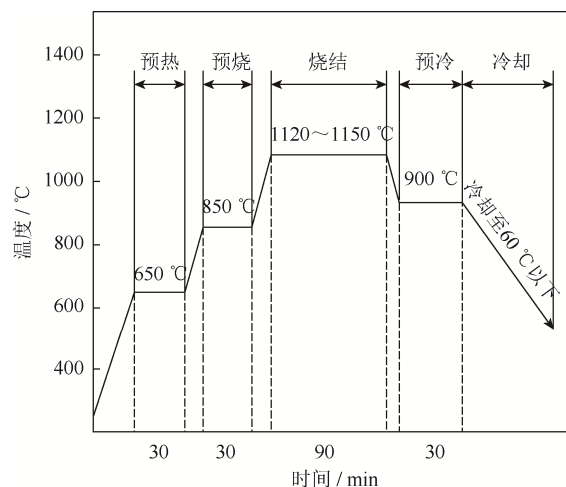


图 8 烧结熔渗工艺曲线图

Fig.8 Sintering infiltration process curve

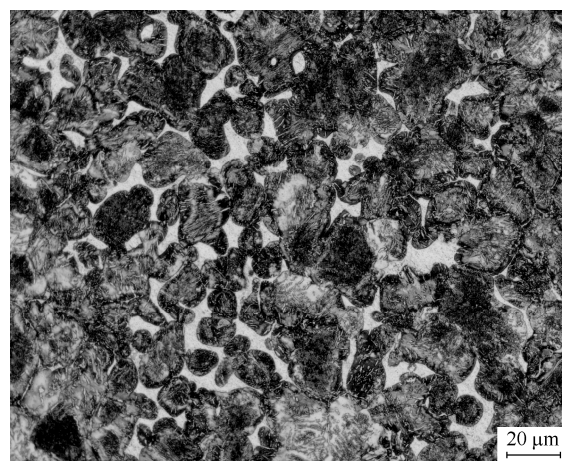


图 9 烧结熔渗铜零件金相组织

Fig.9 Metallographic microstructure of copper-infiltrated sintering parts

1.4 热处理及精加工

为进一步提高铁基粉末冶金阀板的机械性能, 需对阀板烧结件进行后续热处理。热处理过程中合金化元素 Mo、Ni、Cu 可增强阀板表面淬硬性和淬透性^[11-13]。图 10 为阀板渗碳淬火回火工艺。热处理工艺过程分为三步。第一步渗碳, 碳势设定为和材料的化合碳含量相同, 将待处理阀板零件加热到 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并保温 4 h , 使其奥氏体均匀化。第二步淬火, 将保温零件降至 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 淬于 20 号温机油 ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$) 中, 使之由奥氏体组织转变成硬且脆的马氏体。淬火介质采用温油, 温油可减少粉末冶金阀板淬火时冷却速度过快而造成的零件开裂现象。第三步回火, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温回火, 保温 2 h 。回火的目的

是消除阀板淬火过程中产生的内应力,减小其马氏体组织脆性,提高材料的韧性^[14-15]。

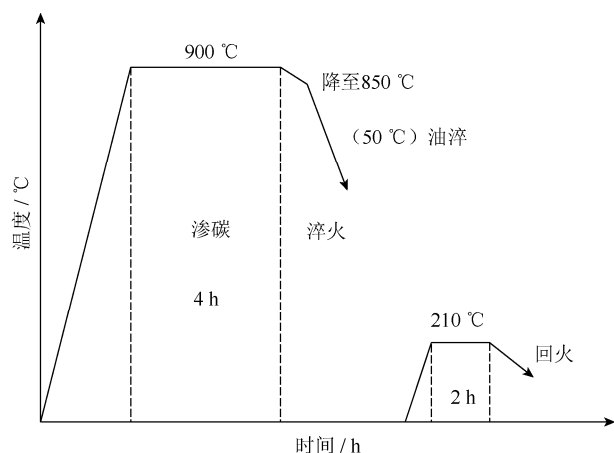


图10 阀板渗碳淬火及回火工艺

Fig.10 Quenching and tempering process of valve plate carburization

热处理后的阀板上下表面需要精密磨削及双面研磨精加工。阀板上下表面精磨量单为0.2 mm,设备用精密平面磨床。上下表面研磨量单边为0.05 mm,设备用精密双面研磨机。精加工后,零件表面粗糙度(R_a)满足0.4 μm 要求,平面度0.006。精加工完成后,尺寸精度检验合格,浸油包装。阀板成品零件如图11。

2 性能测试

对粉末冶金阀板成品零件需进行力学性能检测。检验的项目有:整体密度、表观硬度、抗拉强

度、冲击韧性及气密封性等。密度测试选用梅特勒密度仪,排水法进行检测。零件表观硬度选用TH300洛氏硬度计进行检测。抗拉强度及冲击韧性检测选用MTS材料试验机和摆锤冲击试验机进行测试。气密封性能采用自行设计的阀板专用气密封性测试装置进行检测。阀板成品零件性能检测结果如表2所示,阀板成品密度为 $7.412 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,相对密度达到95%,抗拉强度为655 MPa,冲击韧性为 $17.8 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$,洛氏硬度HRC 41.2,使用 N_2 气介质,压力3 MPa,5 min内无泄漏。检测数据满足阀板零件设计性能指标要求。按用户要求,将阀板成品零件安装在液压马达上进行台架耐久测试。连续测试时间240 h。经过加载测试表明,研制的铁基粉末冶金阀板运行状态良好,达到了摆线液压马达的实际应用要求。



图11 阀板成品零件

Fig.11 Finished valve plate parts

表2 铁基粉末冶金阀板成品零件力学性能测试结果

Table 2 Mechanical performance of Fe-based powder metallurgy valve plate finished parts

阀板配方材料	密度 / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	硬度, HRC	抗拉强度 / MPa	冲击韧性 / ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)	气密封性
Fe-0.5Mo-0.6Ni-2Cu-0.7C	7.412	41.2	655	17.8	无泄漏

3 结论

通过对液压马达阀板零件的形状和性能要求进行分析,确定了铁基粉末冶金阀板的制造工艺,选择了材料配方,进行了模架模具设计和烧结熔渗过程及热处理等工艺参数优化控制。试验结果表明,采用Fe-0.5Mo-0.6Ni-2Cu-0.7C材料配方,通过“材料混合→冷模浮动压制成形→一次烧结熔渗铜→热处理及精加工”粉末冶金工艺路线,获得了高质量的合格铁基粉末冶金阀板成品零件。经用户台架试验,完全满足摆线液压马达的使用要求,可以替代铸造阀板件。

参考文献

- [1] Zuo P J. *The Research of Manufacturing and Form Process about Powder Metallurgy Valve Plate on Cycloidal Hydraulic Motors* [Dissertation]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2010
(左鹏军. 摆线液压马达粉末冶金阀板制造及成形工艺研究[学位论文]. 西安: 西安交通大学, 2013)
- [2] Shao R, Zuo P J, Zhang J X, et al. Numerical simulation of the Fe-based powder metallurgy hydraulic motors valve plate compaction. *Powder Metall Ind*, 2017, 27(2): 12
(邵瑞, 左鹏军, 张江学, 等. 铁基粉末冶金液压马达阀

- 板压制成形数值模拟. 粉末冶金工业, 2017, 27(2): 12)
- [3] Han F L. *Production Process of High Density Powder Metallurgy Automobile Parts*. 1st Ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2013
(韩凤麟. 高密度粉末冶金汽车零部件生产工艺. 1 版. 北京: 化学工业出版社, 2013)
- [4] Zhang H C. *Practical Technology of Powder Metallurgy*. 1st Ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004
(张华诚. 粉末冶金实用工艺学. 1 版. 北京: 冶金工业出版社, 2004)
- [5] Dang W L, Liu X Q, Wang L M, et al. Influence of carbon content on the properties of diffusion alloyed Fe-Cu-C sintered materials. *Powder Metall Technol*, 2013, 31(2): 83
(党文龙, 刘祥庆, 汪礼敏, 等. 碳含量对 Fe-Cu-C 扩散预合金粉末烧结性能的影响. 粉末冶金技术, 2013, 31(2): 83)
- [6] Sun J L, Zuo P J. Design of multilayer die carrier automatic PM special hydraulic machine. *Chin Hydraul Pneumatics*, 2010(8): 54
(孙继龙, 左鹏军. 多层模架全自动粉末冶金专用液压机设计. 液压与气动, 2010(8): 54)
- [7] Shao R, Lin Y Y, Zuo P J. Influencing factors of iron-based powder metallurgy thrust plate infiltrating copper quality. *Met Mater Metall Eng*, 2009, 37(4): 12
(邵瑞, 林育阳, 左鹏军. 铁基粉末冶金配流盘渗铜质量影响因素. 金属材料与冶金工程, 2009, 37(4): 12)
- [8] Wang S P, Yang C F, Hu H Z, et al. Development of multilevel tensioning blocks for 40F-6 gasoline engines. *PowderMetall Ind*, 2009, 19(5): 21
(王士平, 杨传芳, 胡焕芝, 等. 粉末冶金40F-6汽油机多台阶涨紧块零件的研制. 粉末冶金工业, 2009, 19(5): 21)
- [9] Wang J L. Development of high strength powder metallurgy Fe based ORT ring gear. *Powder Metall Technol*, 2008, 26(5): 374
(王季林. 高强度铁基粉末冶金ORT齿圈的研制. 粉末冶金技术, 2008, 26(5): 374)
- [10] Jia J X, Liao X W, Li D G, et al. Study on properties of Fe-Mo-Ni-Cu-C sinter hardening steel. *Powder Metall Technol*, 2014, 32(6): 451
(贾吉祥, 廖相巍, 李德刚, 等. 合金化 Fe-Mo-Ni-Cu-C 烧结硬化钢性能研究. 粉末冶金技术, 2014, 32(6): 451)
- [11] Huang X X, Liu X Q, Yang Z Y, et al. Research progress of iron-copper sintered alloy. *Powder Metall Technol*, 2015, 33(2): 133
(黄晓星, 刘祥庆, 杨中元, 等. 含铜铁基粉末冶金零件烧结性能的研究进展. 粉末冶金技术, 2015, 33(2): 133)
- [12] Xu Q, Liu Y B, Xu L, et al. Properties of Fe-based pre-alloy powders with different contents. *Powder Metall Technol*, 2017, 35(2): 103
(徐强, 刘一波, 徐良, 等. 不同配比铁基预合金粉的胎体性能研究. 粉末冶金技术, 2017, 35(2): 103)
- [13] Gu M, Wang D G, Jiao M H, et al. Densification of iron-based powder during warm compaction process. *Trans Mater Heat Treat*, 2014, 35(6): 15
(谷曼, 王德广, 焦明华, 等. 铁基粉末温压过程中的致密化. 材料热处理学报, 2014, 35(6): 15)
- [14] Shen X P, Xu G S. Defect analysis of powder metallurgy compact. *Powder Metall Technol*, 2012, 30(4): 279
(申小平, 许桂生. 粉末冶金压坯缺陷分析. 粉末冶金技术, 2012, 30(4): 279)
- [15] Yang X. Research progress on densification mechanism of powder metallurgy high-velocity compaction. *Powder Metall Ind*, 2016, 26(5): 57
(杨霞. 粉末冶金高速压制致密化机制的研究进展. 粉末冶金工业, 2016, 26(5): 57)