

# GDI 喷油器金属注射成形加工技术\*

程 强<sup>1</sup> 张振东<sup>1</sup> 郭 辉<sup>2</sup> 谢乃流<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学汽车工程研究所, 上海 200093; 2. 上海工程技术大学汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:** GDI 喷油器中的磁路零件作为核心部件, 对加工技术的要求非常高, 而传统金属切削存在效率低、精度低、材料利用率低、性能不稳定等缺点, 故将金属注射成形技术(MIM 技术)引入 GDI 喷油器的生产过程中。根据 GDI 喷油器性能要求和 MIM 技术的成形特点, 选择铁基纳米晶软磁合金粉末  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  作为 GDI 喷油器磁路零件的成形材料, 并对磁路零件进行结构优化设计。通过对样品生产过程的全程跟踪测试, 分析了 MIM 技术较传统技术在生产制造、理化性能、软磁性能等方面的优势。分别采用三维电磁有限元仿真和试验测试的方法, 对不同成形技术的 GDI 喷油器样品进行了性能对比分析。结果表明, 采用 MIM 技术加工的样品有效降低了集肤效应和涡流损耗的影响, 启动电流上升速率加快, 动态响应时间缩短, 动态喷油量升高, 并且动态喷油量线性范围扩大, GDI 喷油器的综合性能显著提高。

**关键词:** GDI 喷油器 磁路零件 铁基纳米晶 金属注射成形

**中图分类号:** TK413.8<sup>+</sup>4; TF124

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1298(2014)07-0041-07

## 引言

汽油缸内直喷技术(GDI)在促进发动机混合气的形成、改善燃烧质量和降低污染物排放等方面有着突出的优势, 正逐渐取代传统的低压进气道喷射技术, 成为新型发动机研究的主流方向<sup>[1]</sup>。GDI 喷油器作为汽油直喷发动机的关键执行器件, 也成为当前的研究热点。各国学者针对 GDI 喷油器的研究主要集中在结构改进、优化驱动策略和改善雾化质量上, 对于 GDI 喷油器关键零件加工技术的研究相对较少, 亟需一种高精度、高效率、高稳定性的加工技术取代传统的加工技术。金属注射成形技术(MIM)是一门新型近终成形技术, 可快速制造高密度、高精度、高强度零件<sup>[2-5]</sup>, 在航天、兵器、汽车、工具、牙齿材料、医学材料等方面有着广泛的应用, 如: 石庚辰<sup>[6]</sup>、Ott 等<sup>[7]</sup>、Lenz 等<sup>[8]</sup>、马书旺等<sup>[9]</sup>分别针对 MIM 技术在引信 MEMS、超合金 718 粉末注射成形、氮氧化硅无人飞机发动机转子成形、软磁合金 Fe-50%Ni 注射成形等方面的应用开展了一定的研究工作, 肯定了 MIM 技术具有效率高、精度高、材料利用率高、稳定性好等优点。

由于 GDI 喷油器所用零部件具有体积小、数量

多、精度要求高等特点, 与 MIM 技术优点具有较高的匹配度, 因此本文将 MIM 技术应用于 GDI 喷油器零磁路零件的生产中, 并选择软磁合金性能优异的软磁合金粉末  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ <sup>[10]</sup> 作为 MIM 的成形材料, 通过 MIM 技术与传统技术所加工的样品性能对比, 对 GDI 喷油器进行深入研究。

## 1 GDI 喷油器金属注射成形加工技术

### 1.1 GDI 喷油器结构与工作原理

GDI 喷油器是一种高精度强力高速电磁阀<sup>[11]</sup>, 主要由衔铁、铁芯、轭铁、轭铁环、线圈、导向管、阀杆、阀座等组成, 其结构模型如图 1 所示。当电磁线圈接收到由发动机 ECU 发出的喷油信号后, 衔铁组件(由衔铁、导向环、阀杆、钢球组成)在电磁吸力的作用下克服液压力、弹簧力、摩擦力及自身重力, 向铁芯方向运动, 钢球离开阀座, 燃油从阀座上的喷孔喷出并形成喷雾; 当喷油信号结束后, 衔铁组件在液压力、弹簧力和自身重力的作用下, 向阀座方向运动, 钢球落座, 喷油结束, 至此完成一次喷油周期。

### 1.2 MIM 技术工艺

MIM 技术工艺过程主要由粉末及粘结剂的准备、混炼、注射、脱脂、烧结等 5 个阶段组成<sup>[10]</sup>, 如

收稿日期: 2013-05-26 修回日期: 2013-06-30

\* 国家自然科学基金资助项目(51275309)、上海市教委科研创新项目(13YZ110)、上海市研究生创新基金资助项目(JWCXSL1201)和上海工程技术大学基金资助项目(2011xy28)

作者简介: 程强, 博士生, 主要从事汽车燃油喷射系统研究, E-mail: jonny\_cheng@126.com

通讯作者: 张振东, 教授, 博士生导师, 主要从事汽车电控技术、内燃机燃油系统及内燃机燃烧与排放研究, E-mail: usstzdz@126.com

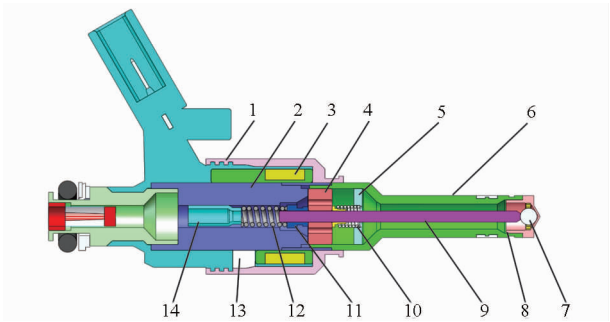


图 1 GDI 喷油器结构图

Fig. 1 Sketch of GDI injector

1. 轭铁 2. 铁芯 3. 线圈 4. 衔铁 5. 缓冲弹簧座 6. 导向管  
7. 钢球 8. 阀座 9. 阀杆 10. 缓冲弹簧 11. 导向环 12. 弹簧  
13. 轭铁环 14. 弹簧定位销

图 2 所示。MIM 技术作为一种近终成形技术,与传统成形技术相比,不仅能制造形状更复杂的零件,而且能在一定程度上克服传统技术存在的密度、组织、性能不均的现象,在提高零件精度、加工效率、材料利用率等方面独占优势。

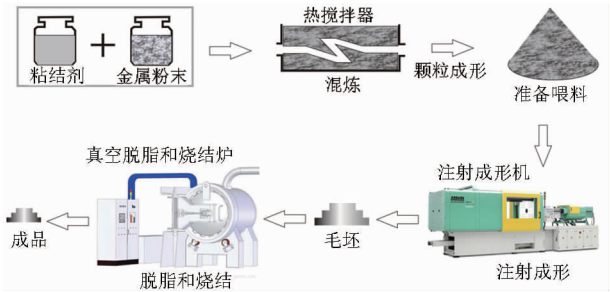


图 2 MIM 技术工艺流程图

Fig. 2 Process of MIM technology

1.3 基于 MIM 技术的零部件结构优化

为了充分利用 MIM 技术在加工复杂程度高、精度要求高、结构尺寸小等方面的优势,在不改变总体磁路结构的基础上,对 GDI 喷油器磁路零件进行优化设计,将传统加工技术中的多个零件组成的组件进行合并,形成一个零件,如图 3 所示;为了降低集肤效应和涡流损耗对 GDI 喷油器性能的影响,建立了如图 3e 所示的 CORE-Ⅲ 结构,该结构采用“梳齿型”,减小了铁芯的壁厚,提高了有效磁通密度,优化了磁路结构,降低了材料消耗。

通过对 GDI 喷油器样品加工过程中的跟踪测试及整体加工方案评估,得出如表 1 所示的参数对比表,由表可知,由于 MIM 技术属于近终成形技术,与传统技术相比减少了零部件的数量、装配工序和焊接工序,同时降低了累积误差,提高了产品的合格率。

1.4 不同加工技术零件理化性能分析

不同材料和工艺加工的喷油器零部件理化性能如表 2 所示,由表可知,采用 MIM 技术加工的铁基

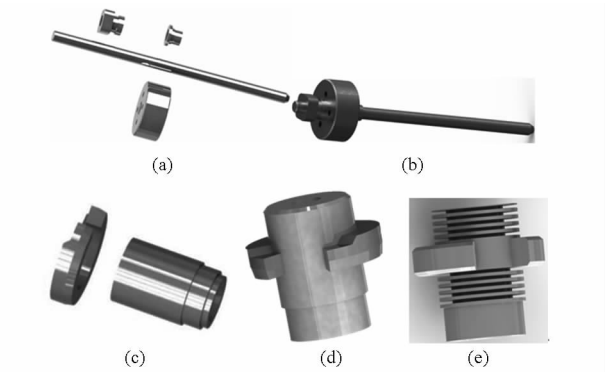


图 3 传统技术与 MIM 技术零件结构对比图

Fig. 3 Comparison of part structures produced by traditional technology and MIM technology

(a) 传统技术衔铁组件 (b) MIM 技术衔铁组件  
(c) 传统技术铁芯组件(Ⅰ) (d) MIM 技术铁芯组件(Ⅱ)  
(e) 改进 MIM 技术铁芯组件(Ⅲ)

表 1 MIM 技术与传统技术参数对比表

Tab. 1 Parameters comparison between MIM and traditional technique

| 参数      | 传统技术    | MIM 技术   |
|---------|---------|----------|
| 材料      | SUS430F | 铁基纳米晶    |
| 材料形态    | 棒材      | 粉末       |
| 材料利用率/% | 50 ~ 60 | > 95     |
| 零件数量    | 8       | 4        |
| 焊接次数    | 6       | 3        |
| 单件耗时/s  | ≥ 60    | ≤ 10     |
| 公差范围/mm | ± 0. 01 | ± 0. 005 |
| 合格率/%   | 86      | 98       |

表 2 不同材料及工艺下 GDI 喷油器零件理化性能

Tab. 2 Physicochemical properties of GDI injector parts by different materials and process

| 理化性能                        | 铁基纳米晶 MIM 技术         | SUS430F 切削加工         |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa    | 118 ~ 172            | 126 ~ 204            |
| 疲劳强度 $\sigma_N$ /MPa        | 98 ~ 126             | 112 ~ 158            |
| 硬度/HB                       | 115 ~ 135            | 90 ~ 110             |
| 切削性能                        | 无要求                  | 好                    |
| 焊接性能                        | 好                    | 一般                   |
| 耐腐蚀性                        | 好                    | 好                    |
| 热膨胀系数 $L/^{\circ}C$         | $8.3 \times 10^{-6}$ | $9.2 \times 10^{-6}$ |
| 密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$ | 7. 85                | 8. 2                 |

纳米晶零部件比传统切削加工的零部件具有更高的综合性能。

GDI 喷油器磁路零件的软磁性能是决定 GDI 喷油器动态响应性能的重要因素。为了研究传统技术与 MIM 技术所加工的零部件软磁特性,采用波形记忆法对其  $B-H$  曲线进行快速测量<sup>[12]</sup>,测试结果如图 4 所示,由图可知,铁基纳米晶软磁材料具有较高的磁导率和饱和磁感应强度。该测试结果可作为 GDI 喷油器电磁性能仿真计算时的材料属性。

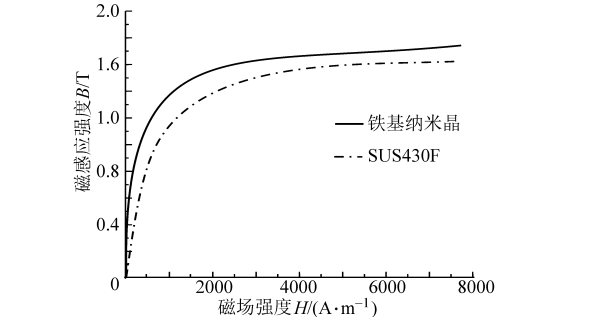


图 4 软磁合金  $B-H$  曲线

Fig. 4  $B-H$  curves of soft magnetic alloy

## 2 GDI 喷油器性能仿真分析

### 2.1 GDI 喷油器仿真模型建立

针对 GDI 喷油器的磁路结构建立如图 5 所示的三维结构模型,本文采用气球边界条件<sup>[12]</sup>。图 6 所示为 GDI 喷油器网格结构图,采用四面体网格单元类型对其三维模型进行网格剖分,网格数量为 487 230。为了研究不同加工技术对 GDI 喷油器电磁特性的影响,建立了不同结构的 GDI 喷油器模型,其剖视图如图 7 所示。

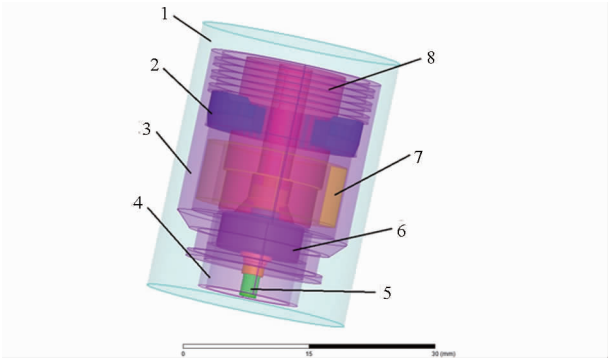


图 5 三维仿真结构模型

Fig. 5 3D simulation model

1. 空气边界 2. 轭铁环 3. 轭铁 4. 导向管 5. 阀杆 6. 衔铁  
7. 线圈 8. 铁芯

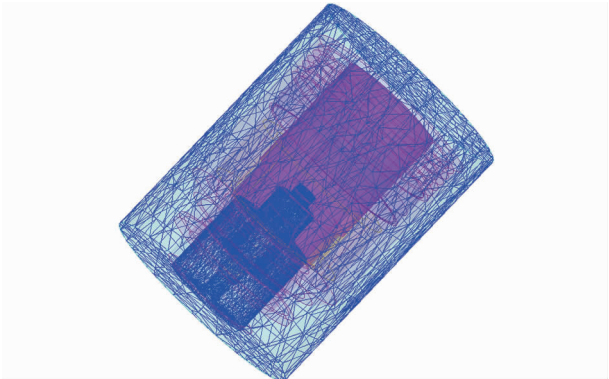


图 6 三维网格模型

Fig. 6 3D grid model

### 2.2 三维电磁有限元理论

为了研究不同结构的 GDI 喷油器电磁特性及

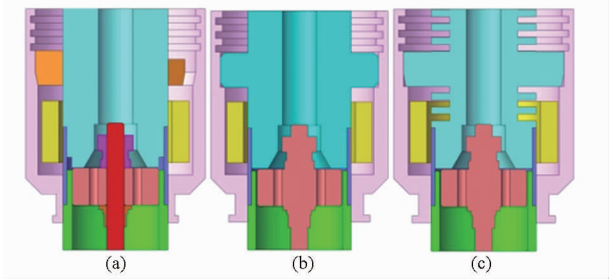


图 7 不同 GDI 喷油器结构模型

Fig. 7 Different GDI injector structures

(a) GDI-I (b) GDI-II (c) GDI-III

变化规律,采用三维电磁有限元法对其瞬态电磁场进行仿真计算。由于 GDI 喷油器工作过程属于低频瞬态过程,Maxwell 方程组<sup>[1,11,14-16]</sup>可以写成

$$\begin{cases} \nabla \times \frac{1}{\sigma} \times \nabla \times H + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $H$ ——磁场强度

$E$ ——电场强度  $t$ ——时间

在进行 GDI 喷油器三维瞬态磁场仿真计算时,瞬态包含两种含义:瞬态电磁过程和瞬态机械过程。在处理机械瞬态过程中,需要引入位移的离散计算,其离散格式<sup>[17]</sup>为

$$\left( \frac{dx}{dt} \right)^{t+\Delta t} = \frac{x^{t+\Delta t} - x^t}{\Delta t} \quad (2)$$

式中,  $x$  表示衔铁运动位移,对于非线性唯一变化,采用 Newton-Raphson 算法进行处理。

### 2.3 三维瞬态电磁有限元仿真分析

在 ANSYS Maxwell 仿真平台的基础上,采用三维瞬态电磁有限元仿真技术对 MIM 技术与传统技术的 GDI 喷油器磁路模型进行仿真分析。图 8 所示为  $t=0.15$  ms 时 GDI 喷油器 1/4 模型截面磁力线分布图,由图可知,对部分组件进行了一体设计之后,磁力线可通过衔铁上部进入铁芯形成回路,磁路中的有效磁通面积增加,尤其是将铁芯设计为“梳齿”型结构后,磁力线分布均匀合理,减小了集肤效

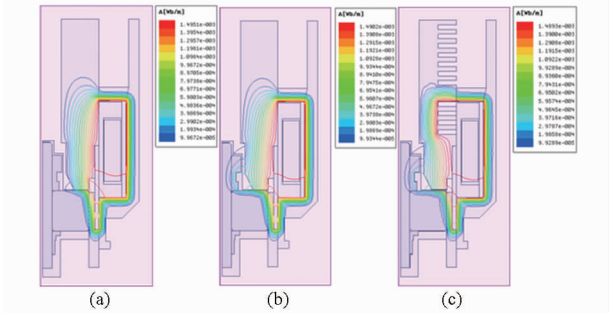


图 8  $t=0.15$  ms 时 GDI 喷油器磁力线分布图

Fig. 8 Magnetic flux distributions of GDI injectors

at  $t=0.15$  ms

(a) I (b) II (c) III

应和涡流损耗对 GDI 喷油器性能的影响,另一方面降低了材料的利用成本,采用该设计铁芯质量可减少 13.8%。

GDI 喷油器工作过程中磁感应强度随电流和时间的变化而变化,而磁感应强度决定了电磁力大小和上升速率,通过研究不同时刻磁感应强度的大小和分布,可以了解电磁力的变化规律,为提高 GDI 喷油器的动态响应速度提供依据。图 9 分别为 0.04 ms、0.15 ms 和 0.30 ms 时 GDI-I、GDI-II、GDI-III 磁感应强度分布图。0.04 ms、0.15 ms 和 0.30 ms 分别为感应电流产生时刻、峰值电流时刻和保持电流时刻,由图可知,当  $t=0.04\text{ ms}$  时,电流较小,由于集肤效应的存在使得磁力线分布于磁路零件的表面,磁路零件表面的磁感应强度较高,且在 GDI-I 和 GDI-II 铁芯表面的少数区域出现磁饱和现象(红色部分),GDI-III 由于采用“梳齿”型设计,磁感应强度分布较均匀;当  $t=0.15\text{ ms}$  时电流达到最大,磁感应强度也达到最大,GDI-I 和 GDI-II 的集肤效应表现得更明显,铁芯表面出现了明显的磁饱和现象,GDI-III 的磁饱和现象相对较弱;当  $t=0.30\text{ ms}$  时,GDI 喷油器处于保持阶段,此时由于电流变化较小,且衔铁组件处于静止状态,因此磁感应强度分布相对较均匀,可以看出,GDI-III 中的铁芯部分磁感应强度基本属于均匀分布。

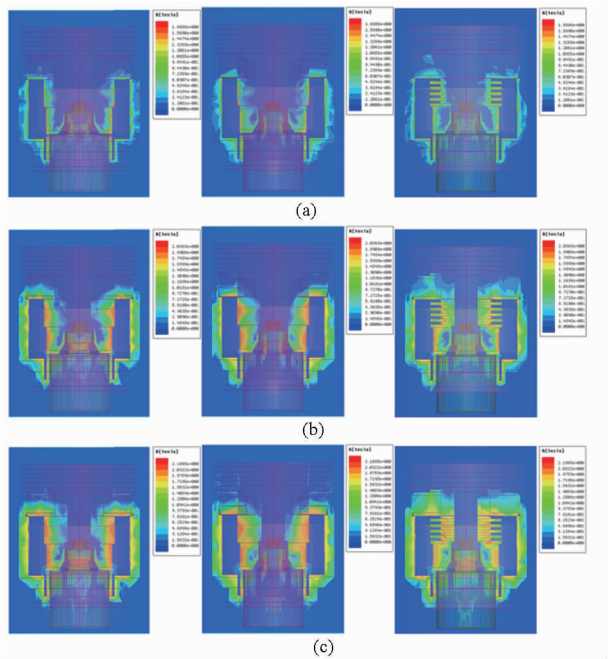


图 9 GDI 喷油器不同时刻磁感应强度分布图  
Fig. 9 Magnetic induction intensity distributions of GDI injectors at different time  
(a)  $t=0.04\text{ ms}$  (b)  $t=0.15\text{ ms}$  (c)  $t=0.30\text{ ms}$

磁力线及磁感应强度并不能直接反映 GDI 喷油器的涡流损耗,因此有必要对其涡流损耗进行仿

真分析<sup>[14]</sup>,如图 10 所示, $t=0.15\text{ ms}$  时为不同加工技术下磁路结构中的涡流损耗,由图可知,随着 MIM 技术的应用及结构的优化,GDI-III 的涡流损耗明显小于 GDI-I 和 GDI-II。

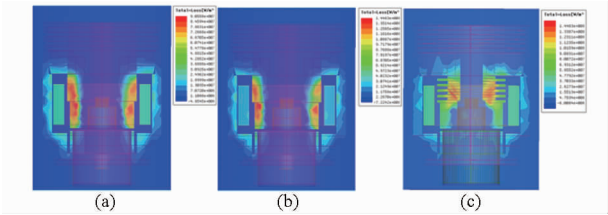


图 10 GDI 喷油器涡流损耗分布图  
Fig. 10 Eddy current loss distributions of GDI injectors  
(a) GDI-I (b) GDI-II (c) GDI-III

图 11 所示为 GDI 喷油器电磁力仿真结果,由图可知,采用 MIM 技术的 GDI 喷油器具有较快的电磁力上升速度和较大的保持电磁力,这主要是由于 MIM 技术改善了磁路结构,降低了涡流损耗。

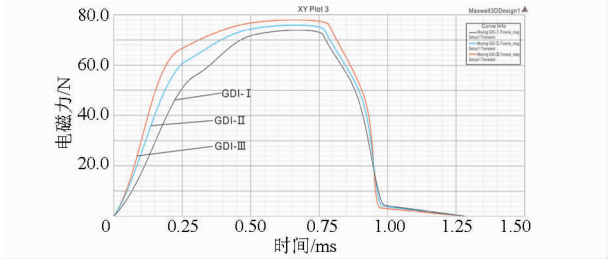


图 11 电磁力仿真计算结果  
Fig. 11 Simulation results of electromagnetic force

3 GDI 喷油器性能试验分析

3.1 GDI 喷油器综合性能测试系统

GDI 喷油器的动态响应特性和流量特性是评价其综合性能的重要指标<sup>[18]</sup>,图 12 所示为 GDI 喷油器综合性能测试系统,该测试系统主要由恒温油箱、高-低压燃油泵、驱动控制仪、精密电子天平等组成。

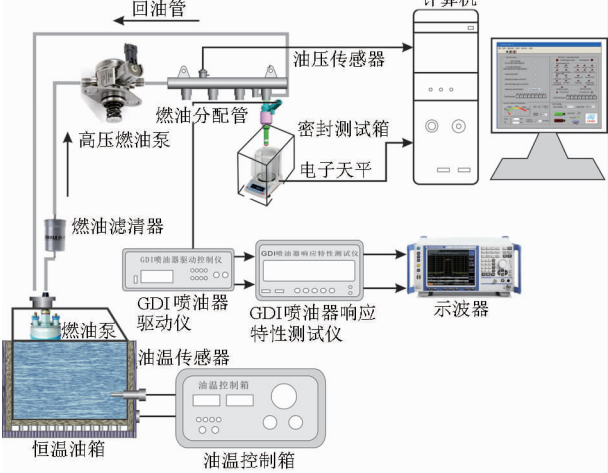


图 12 GDI 喷油器综合性能测试装置示意图  
Fig. 12 Experimental facilities of GDI injector performance testing

基本测试原理为:采用温度控制箱对燃油温度进行精确控制,减小油温变化对喷油量测试结果的影响;GDI 喷油器驱动控制仪采用意法半导体公司开发的 L9707 GDI 喷油器驱动芯片对 GDI 喷油器进行电流驱动控制,并采用响应特性测试仪对电流信号进行测试;GDI 喷油器喷油量由精密电子天平在密封的条件下进行称量。

3.2 动态响应特性分析

GDI 喷油器线圈电流变化与电磁力的变化直接相关,而电磁力的上升速率和下降速率直接决定了动态响应特性,因此通过电流曲线测试能从一定程度上了解 GDI 喷油器的动态响应特性<sup>[18]</sup>,图 13 所示为 GDI 线圈电流变化曲线,由图可知,在驱动电压相同的条件下,采用 MIM 技术的 GDI 喷油器样品具有较快的电流上升速率和较大的峰值电流。

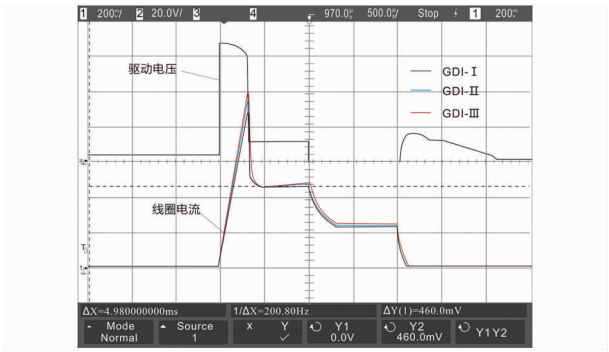


图 13 GDI 喷油器线圈电流曲线

Fig. 13 Current curve of GDI injector winding

由于采用电流测试动态响应速度为间接测试法,并不能精确反映 GDI 喷油器的动态响应特性,为了能更为精确的测试 GDI 喷油器动态响应特性,本文采用瞬态位移法对其位移进行测量,如图 14 所示。GDI 喷油器驱动仪驱动喷油器衔铁组件运动,激光位移测试仪对衔铁组件的位移进行瞬态采集,并将采集数据传输到计算机进行处理。图 15 为传统技术与 MIM 技术的 GDI 喷油器位移变化曲线,由图可知,采用 MIM 技术的 GDI 喷油器具有较快的动态响应速度,结果表明,GDI - I 、GDI - II 、GDI - III 的开启延迟时间分别为 0.26 ms 、0.21 ms 、0.18 ms ,关闭延迟时间分别为 0.09 ms 、0.10 ms 、0.12 ms 。这主要是因为采用 MIM 技术提高了材料的综合性能,降低了涡流效应和损耗。

3.3 动态流量特性分析

动态流量特性是指喷油量与喷油时间(喷油脉宽)之间的关系,是反映 GDI 喷油器工作性能的关键指标之一。本文利用图 13 所示装置采用称重法对不同样品的动态流量特性进行测试,通过调节 GDI 喷油器驱动仪脉冲信号的占空比改变喷油时

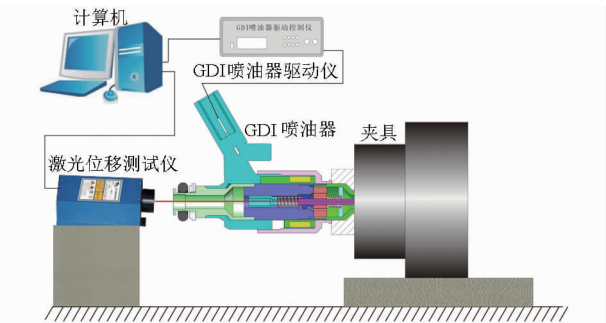


图 14 瞬态激光位移测试系统示意图

Fig. 14 Schematic of laser displacement measurement system

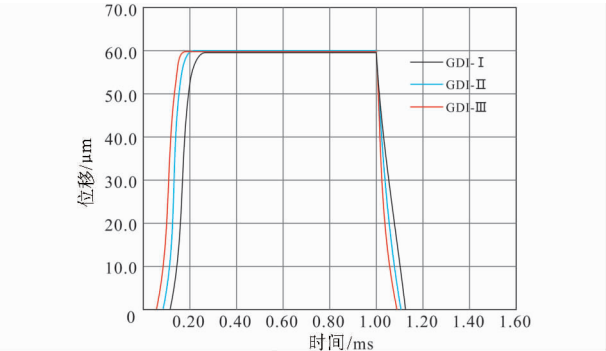


图 15 GDI 喷油器衔铁组件位移变化曲线

Fig. 15 Variation displacements of armature assembly of GDI injectors

间,喷油量利用精密电子天平进行称量,称量信号通过信号采集卡传输给计算机,形成喷油量动态流量曲线。

不同 GDI 喷油器样品的动态流量特性曲线如图 16 所示。可以看出,由于采用 MIM 技术并利用铁基纳米晶材料制造磁路零件可有效改善 GDI 喷油器的电磁性能并大幅缩短 GDI 喷油器开启及关闭延迟时间,使得基于 MIM 技术优化后的 GDI 喷油器样品的动态流量特性明显优于其它两种样品,其主要优点表现为:有效喷油时间延长,在相同喷油脉宽下的喷油量更大;动态流量曲线的线性范围更宽;在小喷油脉宽时的喷油量波动更小。上述优点对于提高不同工况下汽车发动机空燃比的控制精度及低速、小负荷工况的运行稳定性都特别有利。

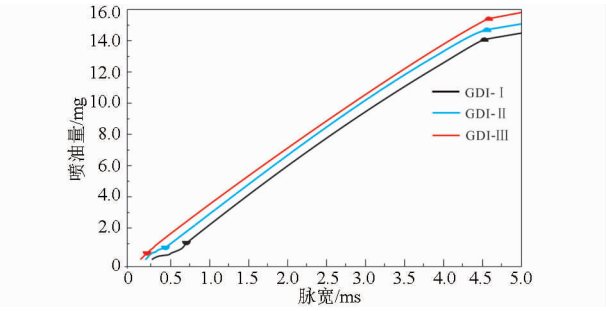


图 16 GDI 喷油器动态流量曲线

Fig. 16 Dynamic flow rate curves of GDI injectors

## 4 结论

(1) 针对 GDI 喷油器目前生产中存在的产量低、材料利用率低、性能低等现状,对 GDI 喷油器的加工技术进行了深入调查,综合分析了 MIM 技术的发展背景、应用范围、工艺过程及技术特点,结合 GDI 喷油器磁路零部件体积小、数量多、精度要求高的特点,将 MIM 技术应用于 GDI 喷油器磁路零件的制造过程。

(2) 根据 GDI 喷油器的性能要求,选择铁基纳米晶粉末为 MIM 技术的成形原料,并针对 MIM 技

术特点,对 GDI 喷油器结构进行了改进,通过样品试制,分析了 MIM 技术与传统技术在生产制造、理化性能、软磁性能等方面的优势。

(3) 进一步对不同 GDI 喷油器样品的综合性能进行了仿真和试验两方面对比分析,结果表明,采用 MIM 技术并选择合适的材料有利于降低 GDI 喷油器的集肤效应和涡流损耗,从而改善 GDI 喷油器的综合性能,与传统技术相比 MIM 技术加工的样品在电磁性能、动态响应特性以及动态流量特性等方面有着明显的优势。

## 参 考 文 献

- Cvetkovic D, Cosic I, Subic A. Improved performance of the electromagnetic fuel injector solenoid actuator using a modeling approach[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2008, 27(4): 251–273.
- German R M, 黄坤祥. 美国 MIM、PIM 及相关 PM 技术之现状[J]. *粉末冶金技术*, 2006, 24(5): 384–387.  
German R M, Huang Kunxiang. The condition of MIM, PIM and relative PM technology in the USA[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2006, 24(5): 384–387. (in Chinese)
- Li D, Huo H, Tan Z, et al. Metal injection molding of pure molybdenum[J]. *Advanced Powder Technology*, 2009, 20(5): 480–487.
- 段柏华, 曲选辉, 林冰涛, 等. MIM 用金属粉末的现状 & 发展[J]. *粉末冶金工业*, 2008, 18(4): 31–35.  
Duan Bohua, Qu Xuanhui, Lin Bingtao, et al. Present status and development of metal powder in MIM[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2008, 18(4): 31–35. (in Chinese)
- 韩凤麟. 金属注射成形——21 世纪金属零件成形工艺[J]. *粉末冶金工业*, 2012, 22(2): 1–9.  
Han Fenglin. Metal injection molding—a part-forming technology in 21th century[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2012, 22(2): 1–9. (in Chinese)
- 石庚辰. 可用于 MEMS 加工的金属粉末注射成型工艺[J]. *探测与控制学报*, 2010, 2(3): 1–5.  
Shi Gengchen. Metal powder injection molding for MEMS processing[J]. *Journal of Detection & Control*, 2010, 32(2): 1–5. (in Chinese)
- Ott E A, Peretti M W. Metal injection molding of alloy 718 for aerospace applications[J]. *JOM*, 2012, 64(2): 252–256.
- Lenz J, Enneti R K, Onbattuvelli V, et al. Powder injection molding of ceramic engine components for transportation[J]. *JOM*, 2012, 64(3): 388–392.
- 马书旺. 金属注射成型软磁合金[D]. 北京: 北京科技大学, 2007.  
Ma Shuwang. Soft magnetic alloy prepared by MIM[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2007. (in Chinese)
- 李智勇, 陈孝文, 张德芬, 等. 非晶纳米晶软磁材料的发展及应用[J]. *金属功能材料*, 2007, 14(4): 28–31.  
Li Zhiyong, Chen Xiaowen, Zhang Defen, et al. Development and application of amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials[J]. *Metallic Functional Materials*, 2007, 14(4): 28–31. (in Chinese)
- Ricco M, De Mattheis S, Olabi A G. Simulation of the magnetic properties for common rail electro-injector[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155: 1611–1615.
- Watanabe H, Ichise S, Nagaoka T, et al. Development of compact and high performance fuel injector using electromagnetic field simulation[C]. *SAE Paper 2005-32-0019*, 2005.
- Zhang Y, Ruan J, Huang T, et al. Calculation of temperature rise in air-cooled induction motors through 3-D coupled electromagnetic fluid-dynamical and thermal finite-element analysis[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(2): 1047–1050.
- Nagy L, Szabó T, Jakab E. Electro-dynamical modeling of a solenoid switch of starter motors[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 48: 445–452.
- Naseradinmousavi P, Nataraj C. Nonlinear mathematical modeling of butterfly valves driven by solenoid actuators[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(5): 2324–2335.
- 时岩, 常思勤. 发动机喷油器用电磁直线执行器动态建模与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 21–26.  
Shi Yan, Chang Siqin. Modeling and experiment of electromagnetic linear actuator for fuel injector of engine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(1): 21–26. (in Chinese)
- Liu Q, Bo H, Qin B. Design and analysis of direct action solenoid valve based on computational intelligence[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(10): 2890–2896.
- 郭辉, 张振东, 程强, 等. 一种电控喷油器动态时间参数测试方法[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(5): 626–628.  
Guo Hui, Zhang Zhendong, Cheng Qiang, et al. Investigation on measurement method of dynamic response time for an electronic fuel injector[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(5): 626–628. (in Chinese)

# Application of MIM Technology in GDI Injector Production

Cheng Qiang<sup>1</sup> Zhang Zhendong<sup>1</sup> Guo Hui<sup>2</sup> Xie Nailiu<sup>1</sup>

(1. Institute of Automotive Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

2. College of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Magnetic circuit parts as key components in GDI injector require highly processing technology, but the traditional metal cutting exists the problems of low efficiency, low precision, low material utilization rate and unstable performance, so the metal injection molding technology (MIM technology) was introduced into the GDI injector production. According to the forming characteristics of GDI injector and the performance requirements of the MIM technology, the Fe-based nanocrystalline soft magnetic alloy powder  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  was selected as the molding material of GDI injector magnetic circuit parts, and the structures of the magnetic circuit parts were optimized. Through tracking test of the whole sample production process, the advantages of the MIM technology compared with the traditional technology were analyzed. The MIM technology has advantages in manufacture, physicochemical properties, soft magnetic properties. The characteristics of the GDI injector based on different molding technique were compared by the method of 3D electromagnetic finite element simulation and experiment. The results show that, the samples which were processed by the MIM technology effectively reduce the influence of the skin effect and eddy current loss, accelerate the starting current rise rate, shorten the dynamic response time, increase the dynamic injection quantity and expand the linear range of dynamic fuel injection quantity. The comprehensive performance of GDI injector is improved significantly.

**Key words:** GDI injector    Magnetic circuit components    Fe-based nanocrystalline    Metal injection molding technology