

## 结构与可靠性

## 国外高压共轨喷油器电磁阀结构分析

刘 超<sup>1</sup>, 张武凯<sup>2</sup>, 从 博<sup>2</sup>

(1. 江苏心源航空科技有限公司, 江苏 无锡 214187; 2. 中国一汽无锡油泵油嘴研究所, 江苏 无锡 214063)

**摘 要:** 从结构和材料两方面分析了博世公司和电装公司的共轨喷油器电磁阀。分析表明: 两家公司的技术路线完全不同。博世公司采用球阀密封, 衔铁和衔铁杆分离; 铁芯和衔铁材料为合金结构钢; 衔铁采用渗碳淬火处理。电装公司采用平面阀密封, 预紧力较小; 铁芯材料为粉末冶金; 衔铁工艺复杂, 吸合面为软磁性能较好的粉末冶金材料, 撞击面为硬度较高的高速钢, 两者通过烧结工艺结合成整体。相比之下, 电装电磁阀结构更复杂, 密封性能优于博世电磁阀, 适用于超高压共轨喷油器。

**关键词:** 共轨喷油器; 电磁阀; 结构; 材料

中图分类号: TK423.8<sup>+</sup>4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2021)01-0032-04

## Structure Analysis of Overseas-Brand Solenoid Valves Used on High Pressure Common Rail Injectors

Liu Chao<sup>1</sup>, Zhang Wukai<sup>2</sup>, Cong Bo<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Aero-XY Technology Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214187;

2. FAW Wuxi Fuel Injection Equipment Research Institute, Jiangsu Wuxi 214063)

**Abstract:** The solenoid valves used on high pressure common rail injectors from BOSCH and DENSON are analyzed from the aspects of structure and material. The analysis shows that the two companies have two totally different technologies. BOSCH uses ball valves for sealing, and the armature and pole are divided. The material of the iron core and armature is alloy structural steel, and carburizing and quenching are applied on the the armature. DENSON uses plane valve for sealing, preload is small. The material of the iron core is powder metallurgy. The processing of the armature is complex. The pulling part of the armature is made of powder metallurgy with good soft magnetic property and the impact part of the armature is made of high speed steel with high hardness, the two parts are connected by sintering process; The DENSON solenoid has a more complex structure and better sealing performance compared to BOSCH solenoid, thus is more applicable for high pressure common rail injectors.

**Key words:** common rail injector; solenoid valve; structure; material

## 0 引言

目前国家针对燃油车的排放法规日趋严格, 这就要求发动机不断优化以降低排放。提高喷射压力可以改善柴油机燃油雾化效果, 促进油气混合, 使其充分燃烧。因此十几年来该技术一直被作为降低

柴油机排放的关键手段<sup>[1]</sup>。电磁阀是柴油机电控系统的核心部件, 其电磁力大小和快速响应能力直接影响燃油的喷射压力和喷射精度<sup>[2-3]</sup>。德国博世公司是目前世界上最大的高压共轨系统生产商, 日本电装公司为第二大高压共轨系统生产商<sup>[1]</sup>, 其他国外供应商还包括美国康明斯公司和德尔福公司

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-09-26

作者简介: 刘超(1988—), 工程师, 主要研究方向为发动机相关技术, c.liu@aero-xy.com。

等。本文针对博世公司和电装公司的共轨喷油器电磁阀进行分析。

## 1 结构分析

### 1.1 电磁阀工作原理

在共轨喷油器中,电磁阀的作用是克服弹簧力等负载使衔铁在一定速度下提升,从而打开密封阀<sup>[4]</sup>。电磁阀的主要部件包括铁芯、衔铁、衔铁杆、线圈、密封阀、阀座和基座等。其中:衔铁、衔铁杆和密封阀合称为运动组件。运动组件受力情况如图 1 所示。力平衡方程如式 (1)。

$$F = F_f + mg - F_a - PS \quad (1)$$

式中:  $F$  为合力,  $F_f$  为弹簧预紧力,  $mg$  为衔铁、衔铁杆等运动件所受重力,  $F_a$  为电磁力,  $P$  为油压,  $S$  为衔铁杆受力面积。

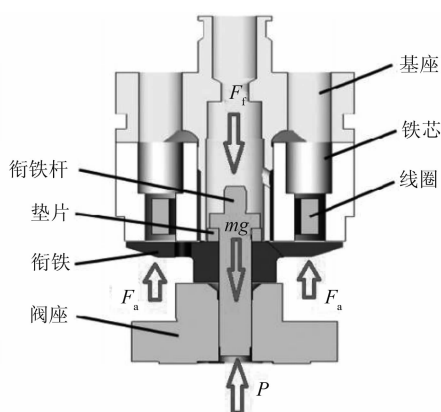
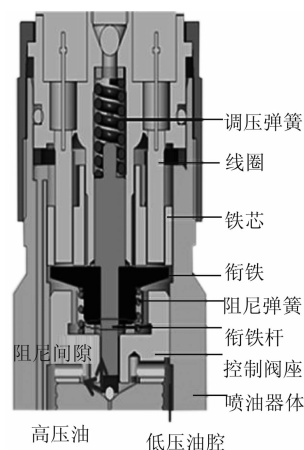


图1 电磁阀受力示意图

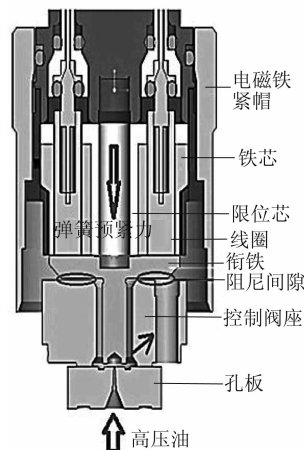
工作过程中,当线圈断电时,  $F_a = 0$ , 此时  $F > 0$ , 运动组件在合力的作用下向下运动,直到落座,电磁阀处于关闭状态;当线圈通电时,在电磁感应作用下产生磁场,此时  $F < 0$ , 运动组件受到向上的电磁力,开始向上运动,电磁阀打开;运动组件上升一定距离后基座对衔铁进行限位,保持电磁阀开度,此时电磁阀铁芯和衔铁之间存在非常小的间隙,称为最小气隙。运动组件上升距离称为行程。通过控制驱动电流的波形和频率即可对电磁阀实施控制。共轨喷油器电磁阀的快速响应性是其核心指标,一般为几百微秒级。因此,为实现电磁阀精确控制和快速响应功能,衔铁和铁芯材料一般采用高磁饱和、低矫顽力的软磁材料,同时衔铁必须具备较高的抗压强度,保证其在连续的高速冲击下能正常工作。

### 1.2 结构分析

博世公司和电装公司的共轨喷油器电磁阀结构如图 2 所示。



a) 博世电磁阀结构



b) 电装电磁阀结构

图2 不同公司电磁阀结构

(回油孔在其它剖面上,图中箭头为示意)

从图 2 中可以看出:博世共轨喷油器电磁阀的衔铁和衔铁杆分离,采用球阀密封,衔铁下方设有阻尼弹簧,衔铁完全落座后衔铁和控制阀座之间存在间距很小的阻尼间隙,配合阻尼弹簧,可减小衔铁落座时的冲击力。球阀开启后,低压油在控制阀座处按图 2a) 中箭头所示方向分流,一部分直接流入低压油路,另一部分流入电磁阀所在区域,对其进行冷却。电装共轨喷油器电磁阀的衔铁和衔铁杆采用整体式结构,密封方式为平面阀密封,无阻尼弹簧,在衔铁和控制阀座之间也设有阻尼间隙,以减小衔铁落座时的冲击力。平面阀开启后油路同样分成两部分,一部分冷却电磁铁,另一部分则流入低压油路。可见两种电磁阀都采用阻尼间隙的结构来减小衔铁落座时的冲击力,但这种结构的加工精度和装配精度要求较高。当阻尼面积为定值时,阻尼间隙增大,液力阻尼作用减小,对阀座的冲击力变大,使得运动组件落座时震荡次数增加,从而影响喷油器多次喷射稳定性<sup>[5]</sup>。

两种电磁阀的铁芯如图 3 所示。博世公司铁芯

焊接在电磁阀基座上,通过开槽减小涡流。电装公司铁芯两边设置扁位,通过过盈配合及塑封固定在电磁阀基座上。

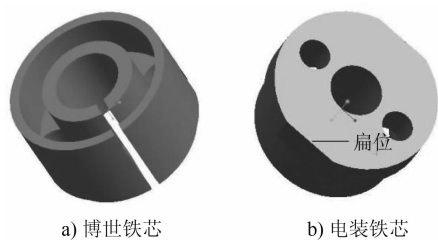


图3 两种电磁阀铁芯示意图

两种电磁阀的衔铁如图4所示。博世衔铁表面无凸台式撞击面,开设通槽,可方便密封阀开启后低压油流通,降低其对衔铁运动的影响。电装衔铁表面有凸台式撞击面,通过开设小槽和圆孔增加低压油流通面积。

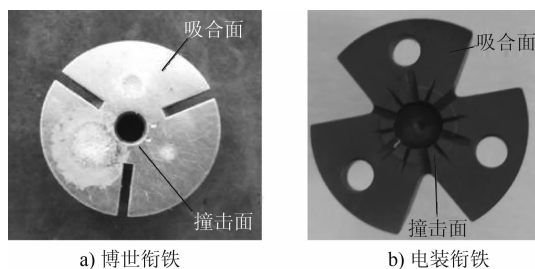


图4 两种电磁阀衔铁示意图

### 1.3 参数对比

对两家公司电磁阀的部分指标进行测试,结果如表1~表3所示。其中,硬度测试位置如图4所示。两种电磁阀的最小气隙、行程以及衔铁和铁芯外观尺寸基本相同。由于博世公司采用球阀密封,为线接触密封,工艺设计中,球阀座面直径不可能设计得很小,在高压情况下,燃油作用在球阀上的液力极大,容易导致泄漏增加<sup>[6]</sup>,因此为保证密封性,必须加大预紧力以提高球阀接触应力。电装公司采用平面阀,密封为环带面接触,接触应力小,耐久性好,密封性能优于球阀<sup>[7]</sup>,因此,其所需预紧力明显小于博世电磁阀。由公式(1)可知:电装电磁阀开启时所需的电磁力较小,衔铁撞击面所受冲击载荷相应也较小,因而其硬度较低。

表1 两家公司电磁阀部分指标对比

| 品牌 | 最小气隙/mm | 行程/mm | 预紧力/N |
|----|---------|-------|-------|
| 博世 | 0.04    | 0.052 | 65    |
| 电装 | 0.04    | 0.054 | 48    |

表2 两家公司衔铁和铁芯尺寸对比

| 品牌 | 衔铁      | 铁芯      |       |
|----|---------|---------|-------|
|    | 最大直径/mm | 最大直径/mm | 高度/mm |
| 博世 | 17.8    | 18.8    | 11.4  |
| 电装 | 17.6    | 18.1    | 10.5  |

表3 两家公司衔铁和铁芯硬度 HV 对比

| 品牌 | 衔铁  |     | 铁芯  |
|----|-----|-----|-----|
|    | 吸合面 | 撞击面 |     |
| 博世 | 794 | 795 | 193 |
| 电装 | 209 | 667 | 142 |

## 2 材料分析

### 2.1 材料组织分析

将衔铁沿轴线剖开,对其进行金相检测。博世衔铁的材料组织如图5所示。表面为针状马氏体,硬度为696(HV0.3);芯部为板条状马氏体,硬度为443(HV5);通过硬度法测得渗碳层深度为0.35 mm(CHD550HV0.3),说明博世衔铁采用了渗碳淬火热处理。

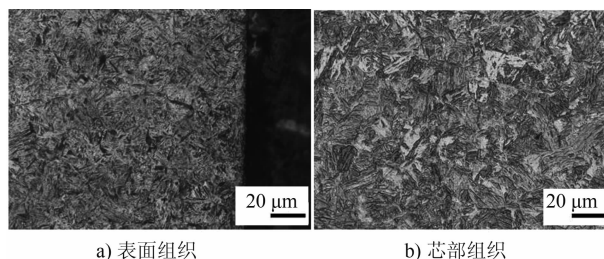


图5 博世衔铁组织

电装公司衔铁的材料组织如图6所示,其撞击面有大量碳化物,分布在马氏体基体上;芯部为铁素体组织和填充物,过渡区有明显的晶粒生长。金相检测结果与前述测试结果中撞击面硬度高、吸合面硬度低相对应。

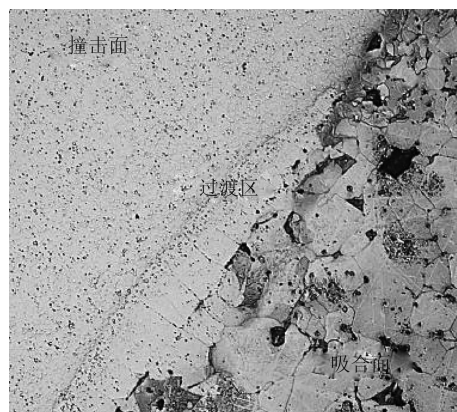


图6 电装衔铁组织

两家公司的电磁阀铁芯组织如图 7 所示。博世铁芯为球化不完全的粒状珠光体加铁素体，电装铁芯组织和衔铁相同，主要为铁素体，并夹杂填充物。

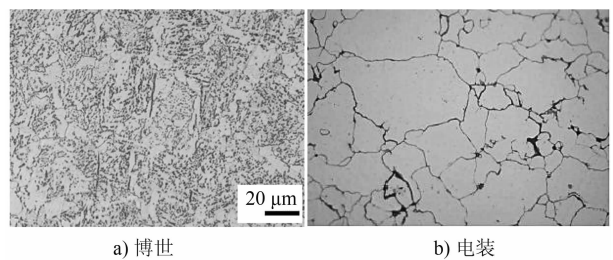


图 7 铁芯组织

2.2 化学成分分析

对两家公司的铁芯和衔铁进行化学成分分析。博世的铁芯和衔铁化学成分如表 4 所示。除碳含量，其他元素含量基本相同。

表 4 博世衔铁和铁芯化学成分

| 部件 | w (C) /% | w (Si) /% | w (Mn) /% | w (Cr) /% |
|----|----------|-----------|-----------|-----------|
| 铁芯 | 0.19     | 0.32      | 1.20      | 1.16      |
| 衔铁 | 0.53     | 0.31      | 1.13      | 1.13      |

注：衔铁经过渗碳，碳含量仅供参考。

电装公司衔铁化学成分如图 8 所示，吸合面基本为 Fe 元素，而撞击面除 Fe 元素还含有较多的 Cr、Mo、W 等元素。

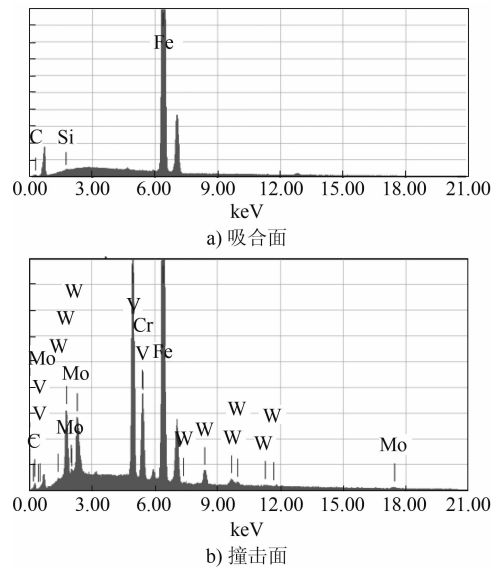


图 8 电装衔铁化学成分

综上，结合两家公司衔铁和铁芯硬度测试结果，可以判断：（1）博世铁芯和衔铁采用同种类型的合金结构钢，且衔铁采用渗碳淬火工艺。（2）电装衔铁吸合部分材料为粉末冶金，软磁性能较好；撞击部分为高速钢，冲击性能较好，两者通过烧结工艺结合成整体。（3）电装铁芯材料为与衔铁吸合面相似的粉末冶金。

3 总结

本文对目前世界上主要的共轨系统生产商博世公司和电装公司的高压共轨喷油器电磁阀的工作原理、结构和重要零部件进行了分析。结果表明：两家公司采用了完全不同的技术路线。博世公司采用球阀密封，衔铁和衔铁杆分离；铁芯和衔铁材料为合金结构钢，衔铁通过渗碳淬火工艺提高硬度以满足高速冲击需求。而电装公司采用平面阀密封，预紧力小；衔铁工艺复杂，采用不同材料烧结而成，撞击面为高速钢硬度高，保证强度，吸合面为粉末冶金，保证软磁性能。相比而言，电装公司的电磁阀密封性能更优，可适用于超高压共轨喷油器，但其结构、工艺复杂，加工难度较大。

参考文献

[1] 张靖. 柴油机高压共轨燃油系统-高速电磁阀的控制及其测试系统研究与开发 [D]. 南京：东南大学，2003.

[2] 黄茂杨. 柴油机高压共轨燃油喷射系统-高速电磁阀结构与控制参数优化及其特性测试系统的研制 [D]. 南京. 东南大学，2005.

[3] 陈小敏，常汉宝. 共轨柴油机燃油喷射系统研究现状及展望 [J]. 内燃机与配件，2011（5）：12-14.

[4] 吴松，吴潇潇，周庭波，等. 共轨喷油器电磁阀性能优化与试验验证 [J]. 现代车用动力，2016，161（1）：54-58.

[5] 陈楠，周飞，旷鹏达，等. 阻尼参数对喷油器多次喷射影响试验研究 [C]. 2015 年 APC 联合学术年会论文集，2015：187-190.

[6] 安士杰，欧阳光耀. 电控喷油器控制电磁阀理论与试验研究 [J]. 内燃机学报，2003（5）：356-360.

[7] 高敏明，俞建达，王凌云，等. 高压共轨喷油器平面阀技术研究 [C]. 中国内燃机学会燃烧节能净化分会 2014 年学术会议，2014：985-989.