

缸内直喷发动机的燃烧

缸内直喷就是将燃油喷嘴安装于气缸内，直接将燃油喷入气缸内与进气混合。喷射压力也进一步提高，使燃油雾化更加细致，真正实现了精准地按比例控制喷油并与进气混合，并且消除了缸外喷射的缺点。同时，喷嘴位置、喷雾形状、进气气流控制，以及活塞顶形状等特别的设计，使油气能够在整个气缸内充分、均匀的混合，从而使燃油充分燃烧，能量转化效率更高。

传统的汽油发动机是通过电脑采集凸轮位置和曲轴位置以及发动机各相关工况从而控制喷嘴将汽油喷入进气歧管。汽油在歧管内开始混合，然后再进入到汽缸中燃烧。

空气跟汽油的最佳混合比是 14.7/1（也叫理论空燃比），传统发动机由于汽油跟空气是在进气歧管内混合，那么他们只能均匀的混合在一起，所以必须达到理论空燃比才能获得较好的动力性和经济性，但由于喷嘴离燃烧室有一定的距离，汽油同空气的混合情况受进气气流和气门开关的影响较大，并且微小的油颗粒会吸附在管道壁上，这就使理论空燃比很难达到，这是传统发动机无法解决的一个问题。

要想解决这一难题，就必须把燃油直接喷射到汽缸中去，这就是FSI燃油直喷发动机可以做到的。直喷式汽油发动机采用类似于柴油发动机的供油技术，通过一个活塞泵提供所需的100bar以上的压力，将汽油提供给位于汽缸内的电磁喷射器，然后通过电脑控制喷射器将燃料在最恰当的时间直接注入燃烧室，通过对燃烧室内部形状的设计，让混合气能产生较强的涡流使空气和汽油充分混合。

然后使火花塞周围区域能有较浓的混合气，其他周边区域有较稀的混合气，保证了在顺利点火的情况下尽可能的实现稀薄燃烧。

在发动机低速或中速运转时采用分层注油模式，分层注油方式可充分提高发动机的经济性，因为在转速较低、负荷较小时除了火花塞周围需要形成浓度较高的油气混合物外，燃烧室的其它地方只需空气含量较高的混合气即可。

发动机高速运转时，大量空气高速进入汽缸形成较强涡流并与汽油均匀混合。从而促进燃油充分燃烧，提高发动机的动力输出。

电脑不断的根据发动机的工作状况改变注油模式，始终保持最适宜的供油方式。燃油的充分利用不仅提高了燃油的利用效率和发动机的输出而且改善了排放。

大众/奥迪采用的FSI燃油直喷技术在同等排量下实现了发动机动力性和燃油经济性的完美结合，是当今汽车工业发动机技术中最为成熟、最先进的燃油直喷技术，并引领了燃油发动机的发展趋势。

下面以大众/奥迪为例，介绍缸内直喷发动机的燃烧模式。大众/奥迪FSI发动机节气门采用电子式，节气门开度可根据发动机实际需要打开合适的开度；在每一个汽缸有上下两个进气道，下进气道由进气歧管翻板控制；大众/奥迪FSI发动机活塞顶部呈“ ω ”型，以改变气流的方向。如图：1所示。大众/奥迪FSI发动机由三种工作模式：分层充气模式、均质稀混合气模式、均质混合气模式。

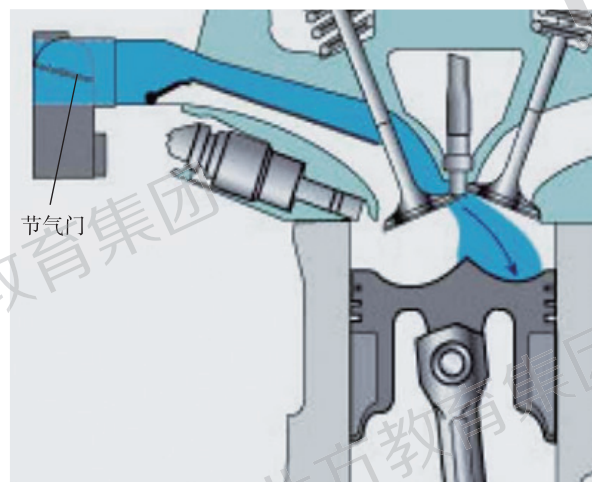


图1

一、分层充气模式

1. 进气

在分层充气模式下进气时，节气门处于打开状态，使节流损失小。进气歧管翻板封住下进气道，于是空气运动就加速了，此时吸入的空气呈旋转状进入气缸。如图 2 图所示。

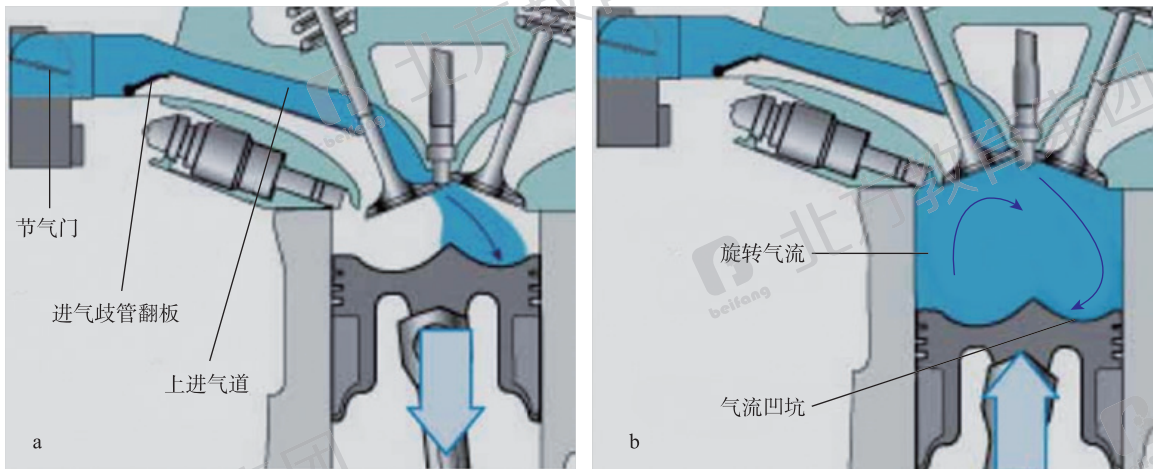


图 2

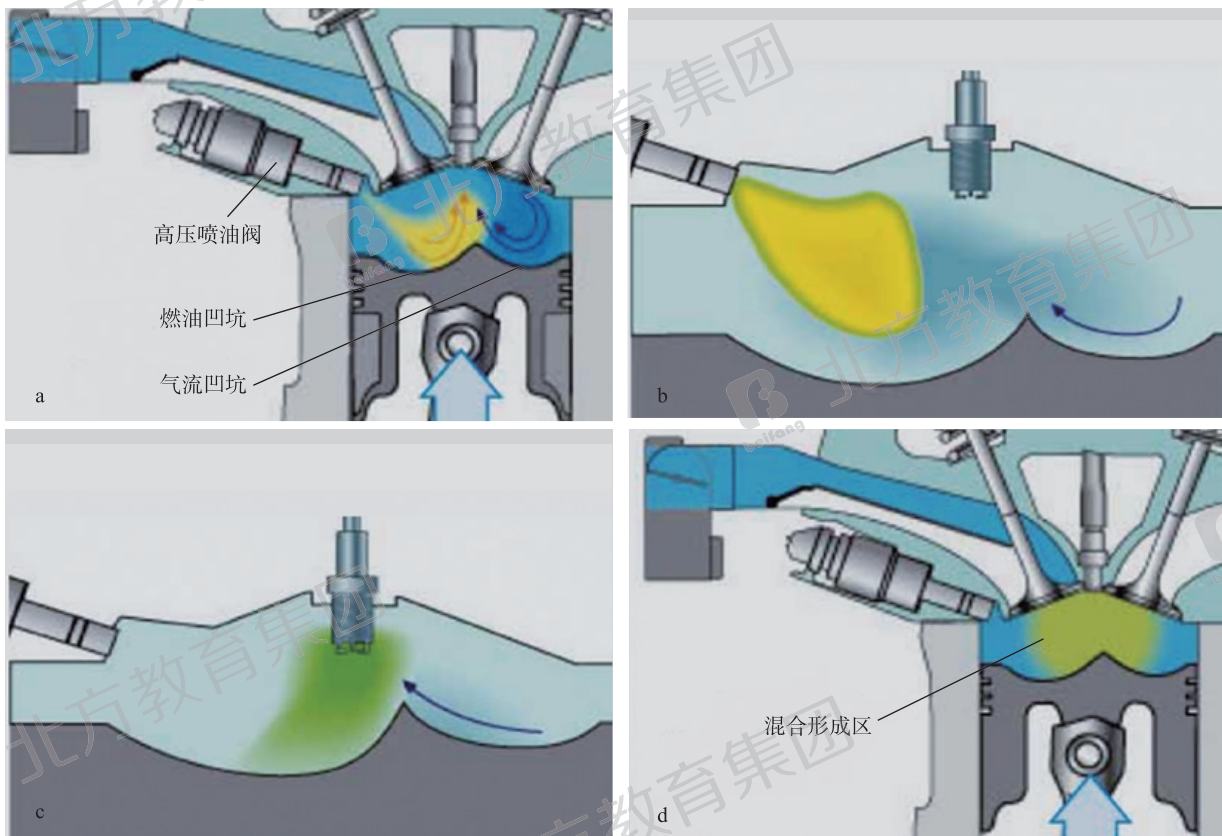


图 3

2. 形成混合气

喷油开始于约上止点前 60° ，结束于约上止点前 45° ，此时燃油被喷射到燃油凹坑内。喷油时刻

对混合气的形成有很大影响，喷油时刻过早会使燃油与空气均匀混合，过晚则是燃油雾化不良，不利于燃烧。如图3图所示。

3. 燃烧

火花塞跳火，此时只有混合好的气雾被点火燃烧，混合好的气雾周围的气体形成绝热层起隔离作用，这样，缸壁热损耗小，热效率也就提高了。如图4所示。

由于允许点火的范围较窄，因此要考虑混合气形成的可用时间。如果喷油和点火间隔过短造成混合气不充分（如图5所示），如果喷油和点火间隔过长就会变成均质混合气（如图6所示）。

在分层充气模式节气门不能完全打开，因为总是得保持一定的真空用于活性炭罐装置和废气再循环装置；发动机所产生的扭矩大小只取决于喷油量，在这里吸入的空气量和点火角并没有多大意义，这种模式和柴油发动机类似。

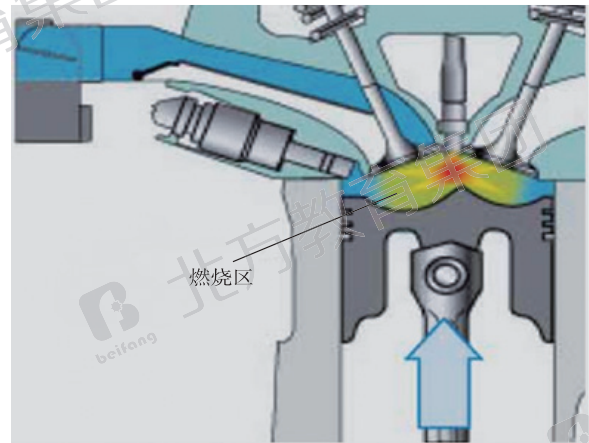


图4

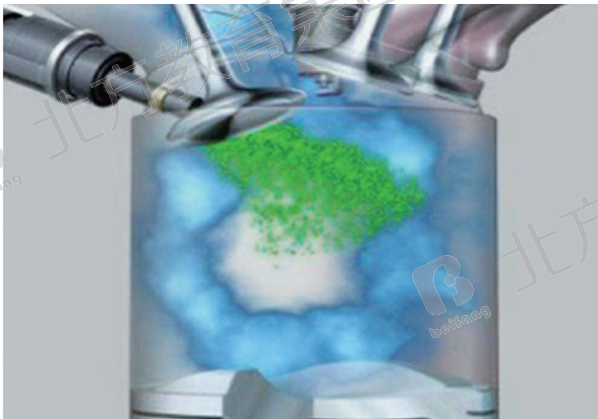


图5

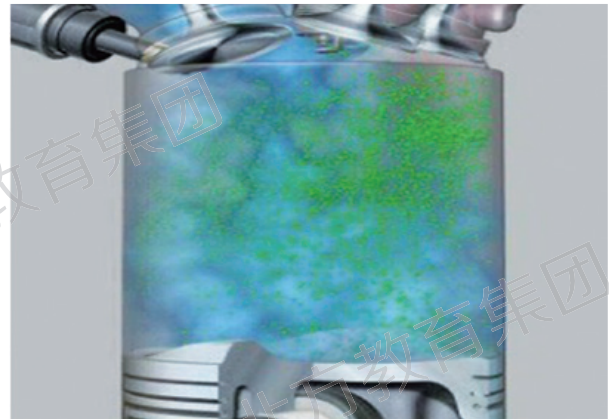


图6

二、均质稀混合气模式

1. 进气

在均质稀混合气模式下进气时与分层充气相同，此时节气门处于打开状态，使节流损失小，进气歧管翻板封住下进气道，如图7所示。

2. 形成混合气

喷油约在点火上止点前 300° 时喷入此时位于吸气行程，混合气形成可用时间较长，以利于混合气的充分混合，如图8所示。均质混合气空气-燃油比约 $\lambda = 1.55$ 。

3. 燃烧

混合气燃烧发生在整个燃烧室内，此时点火时刻可自由选择。

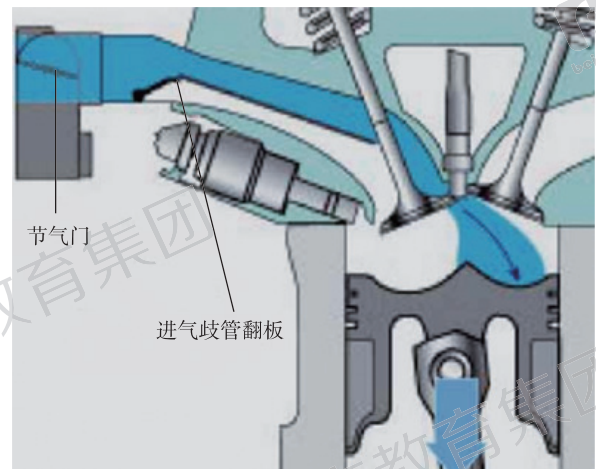


图7

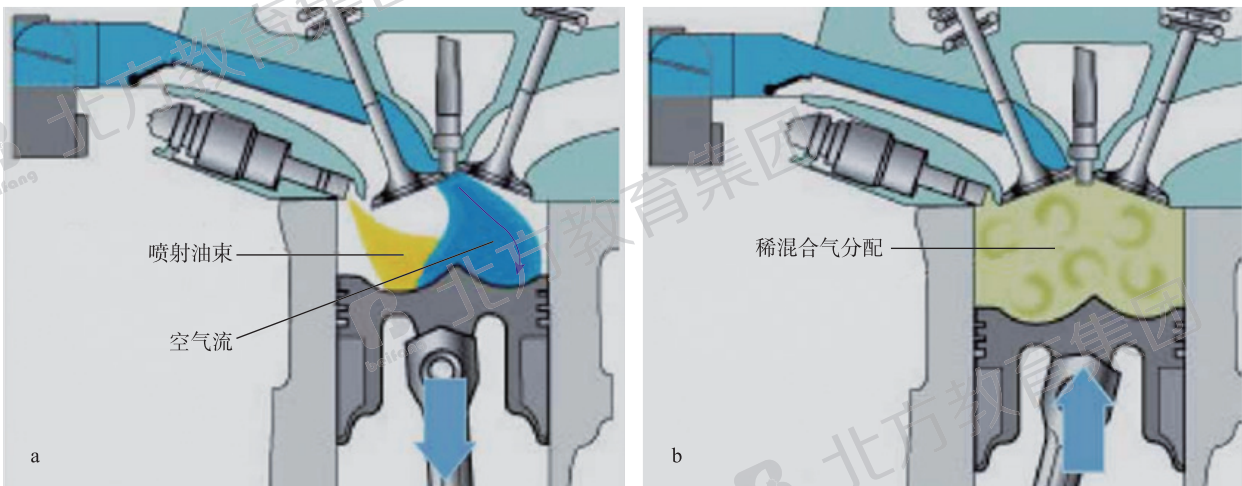


图 8

三、均质混合气模式

1. 进气

在均质混合气模式下进气时，节气门按照油门踏板的位置来打开；进气歧管翻板根据工作点来打开或关闭，在中等负荷和转速范围时是关闭的，在其他负荷和转速时进气道是打开。如图 9 所示。

2. 形成混合气和燃烧

混合气的形成和燃烧方式和在均质稀混合气模式相同。均质混合气空气 - 燃油比 $\lambda = 1$ 。

在均质混合气模式下发动机喷油量及点火提前角的计算方式和传统电控汽油机一样，是根据转速、负荷等传感器计算的。



图 9

四、缸内直喷点火系统

1. 缸内直喷式汽油机对火花塞的要求

现代缸内直喷式汽油机的点火系统普遍采用分缸独立高能点火系统，各缸的高能点火线圈直接与火花塞相连。与现代先进的进气道喷射汽油机无异，但是对火花塞提出了比进气道喷射汽油机更高的要求：

- (1) 高的耐热性能

为了实现分层燃烧，混合汽应有足够的时间暴露在火花塞触点周围，点火应尽量深入到易于点燃的足够浓的混合气区域，并且为了保证稳定可靠的点燃，火花塞电极周围处于着火界限内的混合气区域应足够大，因此缸内直喷式汽油机的火花塞要位于燃烧室较深的部位，其端部的温度也要比进气道喷射汽油机更高，必须具有更高的耐热性能。

为了使火花塞能够更好地散热，采用以下措施：

- 1) 采用突出的金属壳来降低接地电极的温度；
- 2) 采用铜芯接地电极来传热。

(2) 高的抗积碳性能

分层燃烧时，较浓的混合气集中在火花塞周围，特别是油束引导的分层燃烧过程喷射的油束会直接碰撞到火花塞，导致火花塞更容易积碳，这将会降低火花塞的绝缘性能而引起漏电，导致火花塞不点火，因此缸内直喷式汽油机用的火花塞应具有自洁能力和高的抗积碳性能。

为此，采用以下措施来提高火花塞的抗积碳性能：

- 1) 采用直径较小的直形绝缘体末端改善自洁能力；
- 2) 减小火花塞间隙防止积碳；
- 3) 采用两段直径中心电极来改善自洁能力；
- 4) 采用半表面放电型设计来改善自洁能力。

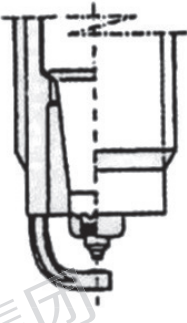
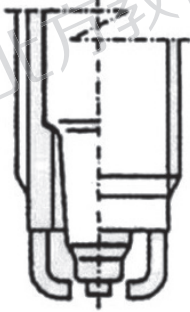
(3) 高的点火性能和耐久性

为了实现分层稀燃，必须确保在稀混合气中稳定可靠地点火，因此要求火花塞具有高的点火能量和较长的火花持续时间，并用铱合金的触点来提高火花塞的耐久性。

2. 缸内直喷式汽油机火花塞技术的现状

表1示出了目前缸内直喷式汽油机使用的两种火花塞：铱合金电极的标准型火花塞和半表面放电型火花塞。它们与进气道喷射汽油机使用的火花塞是有区别的，在维修保养时绝不能任意换用。

表 1 目前用于缸内直喷式汽油机的火花塞

	标准耐久型	半表面放电型
类型		
特征	<ul style="list-style-type: none"> - 突出的跳火间隙 - 两段直径中心电极 - 细长的直形绝缘栓端部 - 铜芯接地电极 - 铱合金电极 - 伸长的金属壳 	<ul style="list-style-type: none"> - 突出的跳火间隙 - 半表面放电 - 2个接地电极 - 伸长的金属壳
优点	耐久性好	抗积碳好
缺点	抗积碳差	沟槽影响耐久性

(1) 标准型火花塞

这种伸长型火花塞的接地电极伸入燃烧室较深，故将铜芯嵌入电极以提高其散热性，并通过增大金属端部的截面缩短电极本身的长度。另一方面当部分负荷充量温度较低并进行分层燃烧时，需防止积碳，为此采用带有较长直形绝缘体和较小顶端直径的电极，以提高其局部温度。为了防止积碳，采用两段直径的电极并减小火花间隙。采用上述措施后，即使在容易产生积碳的分层燃烧时也能获得良好的点火性能和耐久性。但是采用的细长电极的耐久性较差，故采用贵金属替代原有材料，考虑到缸

内直喷式汽油机都使用高能点火线圈，采用抗烧蚀性好的钕合金电极来提高耐久性，然而这种标准型火花塞对连续积碳的自洁能力仍然不足，必须采用进一步的改进措施。

(2) 半表面放电型火花塞

和标准型火花塞一样，它也是伸长型的。火花塞的过热问题依然存在，为防止接地电极过热也采用伸长的金属壳，不过其接地电极比标准型火花塞短，因此不再需要如前所述的带铜芯电极。但是火花发生在紧靠绝缘体顶端表面的周边，因此即使发动机在可能形成积碳的工况下运行，也具有优异的自洁效果。

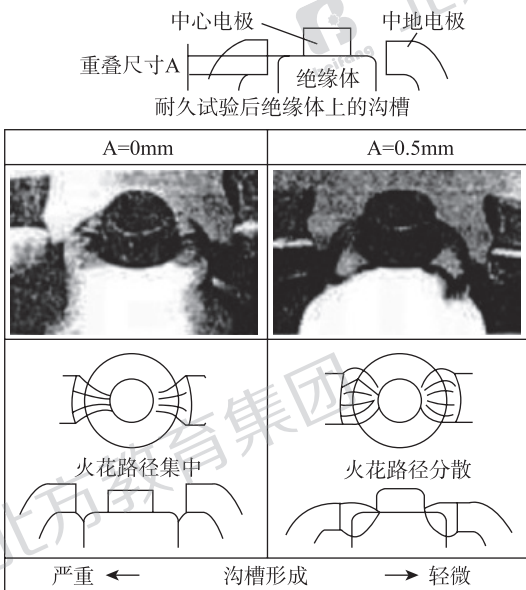
与标准型火花塞相比，这种火花塞在减少阻抗的下降和抗积碳性能方面更优越，在直喷式汽油机上表现出良好的使用性能，尤其是在发动机怠速和分层燃烧运行状态。

这种半表面放电型火花塞优异的自洁效果是以电极之间放电时在绝缘体顶端表面形成沟槽为代价的，从而成为其潜在的弱点。缸内直喷式汽油机比进气道喷射汽油机的压缩比高，更容易出现沟槽。目前电极烧蚀是缩短火花塞使用寿命的主要原因，过多的沟槽将导致抗高温能力下降，加速火花塞的损坏，这是在缸内直喷式汽油机维修保养中经常会遇到的毛病。

3. 缸内直喷式汽油机火花塞技术的改进

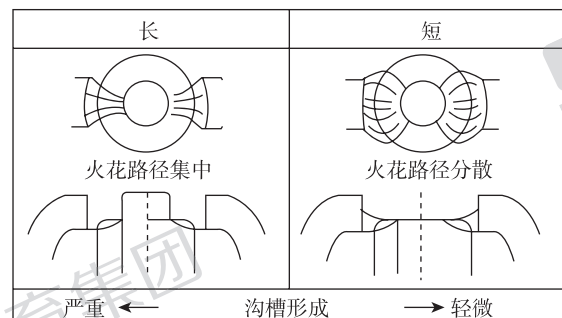
目前缸内直喷式汽油机广泛应用的半表面放电型火花塞在绝缘体顶端表面形成沟槽，已成为影响火花塞耐久性的重要因素，必须予以关注和改进。

半表面放电型火花塞的沟槽是由于在中心电极与接地电极之间产生的电容放电，使端面的绝缘材料剥落而形成的。电容放电的电压和次数、火花强度与持续时间是形成沟槽的主要因素，而燃烧室中的压力、气体流动和温度是其外在因素。增大火花塞的固有电阻、接地电极与中心电极绝缘体的重叠尺寸，如图 10 所示，和接地电极的数量以及缩短中心电极的突出长度，如图 11 所示，或采用空气放电电极火花塞与半表面放电型火花塞相结合的混合型火花塞都能减少沟槽的形成。用金属氧化物半导体材料镀覆放电表面，能够降低火花塞的跳火电压减少沟槽的形成，但是当火花放电时这种镀层会快速消失。为了防止镀层脱落，利用 NTC（负温度系数）热敏电阻具有电阻随温度升高而降低的特性，采用含有这种热敏电阻材料的金属制成中心电极。在跳火过程中来自中心电极的分散粉末飞溅到绝缘体表面形成氧化物薄膜，从而降低跳火电压（降低 4.0kV）来减少沟槽的形成。



增大接地电极与中心电极绝缘体的重叠尺寸可减少沟槽的形成

图 10



缩短中心电极的突出长度可减少沟槽的形成

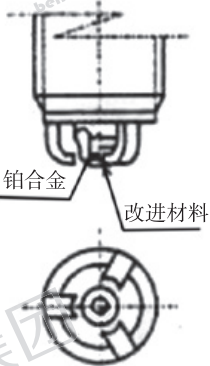
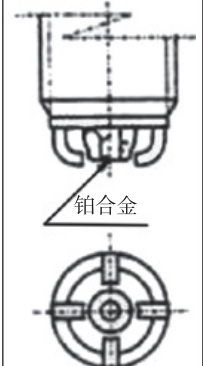

图 11

采用改善沟槽形成的方法，开发出了三种新型长寿命的半表面放电型火花塞，如图 12 所示。

- (1) 3 个接地电极的半表面放电型火花塞；
- (2) 4 个接地电极的半表面放电型火花塞；

(3) 3个接地电极的混合型火花塞。

在实际运行中，它们都显示出了优良的自洁能力，具有高的抗积碳能力和耐久性，能确保分层燃烧过程的稳定性，特别是带有3个接地电极的混合型火花塞，能满足现代缸内直喷式汽油机分层燃烧等更为严酷的运行条件。

3个把接地电极半表面放电型火花塞 (3-SSD)	4个把接地电极半表面放电型火花塞 (4-SSD)	3个接地电极混合型火花塞
 <p data-bbox="509 892 719 950">中心电极直径$\phi 2.2$ 空气间隙0.6</p>	 <p data-bbox="719 892 922 950">中心电极直径$\phi 2.0$ 空气间隙0.6</p>	 <p data-bbox="922 892 1112 950">中心电极直径$\phi 2.2$ 主间隙0.9子间隙0.5</p>
<ul style="list-style-type: none"> ·半表面放电 ·3个接地电极 ·改进后的中心电极材料 ·铂合金 (镀层) 	<ul style="list-style-type: none"> ·半表面放电 ·4个接地电极 ·铂合金 (闸片) 	<ul style="list-style-type: none"> ·半表面放电和空气放电 (混合型) ·铂合金或铱合金

三种长寿命半表面放电型火花塞

图 12