新工艺新材料的应用使燃油发动机具有持续强大的生命力

■ 上海大众动力总成有限公司教授级高级工程师　朱正德

摘要：本文重点介绍了新材料和新工艺在柴油发动机领域的应用，包括汽车轻量化促进复合材料应用以及激光造型工艺及其在企业中的应用等。

不久前，中国汽车工业协会发布了2016年上半年国内汽车和汽油发动机的产、销量信息，从中可清楚地看出，与2015年同期相比，两者均呈稳定增长，增幅都超过了6%。另外，尽管近年来新能源汽车呈现爆发式增长态势，2016年上半年的增幅更是达到了130%。然而在汽车总（产、销）量中的占比还是很低，仅为1.4%，且还是与政府在政策上的鼓励和支持分不开的，尤其是在上海这样交通拥堵的大城市。

众所周知，“节能与新能源汽车”乃是2015年国家推出的《中国制造2025》中10大重点发展领域之一，显然，此处“节能汽车”是指环保、节能和安全性俱佳的，但仍以燃油发动机为动力的那部分机动车。为此，就必须在产品（设计、开发）和制造（材料、工艺）两方面采用一系列新技术，包括走产品轻量化道路。尤其是，在中汽协的报告中还特别指出了，1.6L及以下的小排量乘用车在产、销总量中的比重已达到72%，且还有上升的趋势。事实上，大力发展节能、减排的高性能燃油发动机，尤其是对于小排量发动机的关注，已成为当前业界的一种趋势，并已成为国内外发动机生产企业重要的发展方向。

上海大众动力总成有限公司（以下简称“大众动力总成”，即VWPT）成立于2005年4月29日，在短短七八年间，企业已从一期扩展到三期（相当于由1个分厂发展为3个）。根据近日中汽协出台的“2016上半年车用发动机市场前十企业排行榜”的统计，VWPT与一汽-大众、上汽通用五菱同时高踞前三，上半年销量超过76万台，同比增长10.09%，较之位于榜首的一汽-大众差距才10万台，可较之第四位东风日产的50万台，整整超过26万台。事实上，与一汽-大众、上汽通用、上汽大众等企业不同，VWPT集中在一个基地，作为单一的发动机制造企业，无论是软件（生产组织）还是硬件（工艺的实施）都很紧凑和高效。尤其是产品自2013年起，与VW同步地从EA111升级为EA211，品种也增至5种，包括1.2L、1.4L和1.6L三种自然吸气型的，及1.2TSI和1.4TSI两种涡轮增压型的。在发动机产品水平处于行业领先的同时，相应的制造技术也在国内业界位于前

列，且毫不逊色于任何国外同行。

实现汽车轻量化已在业界形成共识

研究表明，汽车自重减轻10%，其燃油效率一般可提高15%，而燃油效率的提高意味着汽车的耗油量和排污（放）量降低，故减轻车辆自重是实现减排、节能等目标最有效的方法。而发动机作为汽车最重要的大总成，减轻其重量有着很大意义。其轻量化主要通过选用铝合金、镁合金和工程塑料等轻质材料作为结构材料、对组成发动机的零件进行结构优化，及通过将功能相近部件的集成化、模块化等途径来实现。

EA211系列采用了诸多新颖的产品技术和轻量化的优化措施，使其较之EA111在综合性能、包括能耗、减排上都有明显的提升。例如，EA211系列发动机更多地采用了铝合金、工程塑料一类的轻质材料，在零部件的结构优化上也有所突破。就以自然吸气的1.6L机型为例，后者的质量整整减轻了22kg，即达到18%左右，而燃油消耗也相应地下降了8%～10%。再从两者的排放水平来看，EA211的减排效果也很明显，就以1.6L MPI发动机为例，每公里CO_2的排放量可减少10g左右。事实上，作为主要途径之一，借助采用（或改用）轻质材料来替代传统材料以实现零部件轻量化，如在EA211系列中，将应用很多年的铸铁缸体改为铝合金就是一例。而自21世纪初以来，以工程塑料为代表的非金属材料在汽车上的应用也越来越广泛，进而对如何提升它们在汽车制造轻量化领域的应用水平也有了更多的认识和作为。

以EA211系列中几款自然吸气发动机所配的进气岐管（见图1）为例，长期以来所采用的铝合金材质已在近年被工程塑料，特别是其中的增强纤维复合材料（FRP）所取代。这一举措不但达到了明显的降低整车或总成重量的结果，还具有较高的综合性能。尤其是作为当今已较普遍采用的一种很有代表性的玻璃纤维增强复合材料，所具有的密度小、强度高的优势十分明显，尽管其刚度较之金属材料略低，但用于进气岐管一类的汽车零部件时（见图2），就将获得极佳的轻量化效果。

以玻璃纤维增强复合材料取代铝合金作为进气岐管的基体材料乃是实施汽车轻量化中的典型成果。被工程塑料所取代的铝合金虽然本身也是一种轻质材料，但将两者对比，前者的优势十分明显。首先是零部件轻量化的效果，可以进一步减重达到50%左右，至于材料自身和制造成本的降低，最少又可以下降1倍，而且在确保了零部件基本功能的前提下，还会进一步提高零件的减振性和吸能性。经过自2009年起在欧洲、2012年起在中国的一些主流企业的实际使用，证明了其可靠性。现今，已有越来越多的聚丙烯及改性复合材料被用于汽车零部件，对汽车业界来说，无论是从生产企业的降本增效，还是从汽车轻量化这一产品的发展目标，所呈现这一趋势都有着十分积极的意义。

一次性感应淬火在小型曲轴生产中的应用

众所周知，轴颈圆角是加工中难度最大，也是发动机运行时最容易成为裂纹起源的位置，出于提高曲轴疲劳强度的目的，必须对圆角进行强化处理。而把一次性感应淬火工艺（见图3a）用于曲轴生产虽已很成熟，但迄今在小排量发动机铸铁曲轴圆角强化领域仍然还是空白。事实上，对中、大功率发动机曲轴实施一次性感应淬火强化处理已有成功经验，可对于以铸铁材质为主，批量更大的小型铸铁曲轴，由于有待强化的圆角更小，很多情况下甚至仅为1.2mm，从而大大增加了进行淬火加热的难度。因为在采用淬火工艺时，若没有更为精巧的圆角淬火感应器（淬火头），以及更严谨的控制技术，就很难有效地对凹处进行可靠的强化处理。故在面对小排量发动机球墨铸铁曲轴的圆角强化处理时，迄今“轴颈面淬火+圆角滚压”依然是国内外汽车制造业的主流工艺（见图3b）。

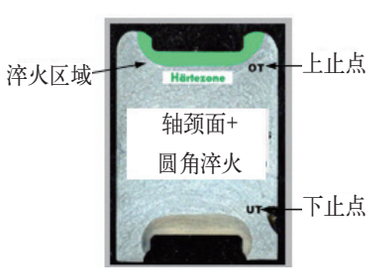
图1　铝合金进气岐管一例

图2　PP+GF35 改性复合材料进气岐管

1. 小型铸铁曲轴圆角感应淬火的生产实施

为了使“轴颈表面和圆角一次性感应淬火”（见图3a）能适应批量生产的需要，在实施阶段还需要解决诸如：高性能的专用感应淬火头、确定最佳热处理工艺参数（包括对淬火头的调整），以及通过对感应淬火头采取的一些节能优化措施，使其既有较明显的节能效果，又能提升曲轴的强化质量。长期以来，为企业普遍使用的同心圆形状的加热线圈存在一个致命的弱点，即很难充分地对最需要予以强化的圆角部位进行加热，因此就无法使曲轴圆角形成具有目标强度的硬化层。而通过改成为半圆形线圈，采用被称为“单次淬火”的工艺方案后，就不但能提高工件的表面强化的质量，而且通过采取有效措施，还能取得更高的热能利用率，此外，在与轴成直角方向装卸工件，能使操作更为方便，还可同时实施加热和冷却。

实际配备的淬火感应装置，



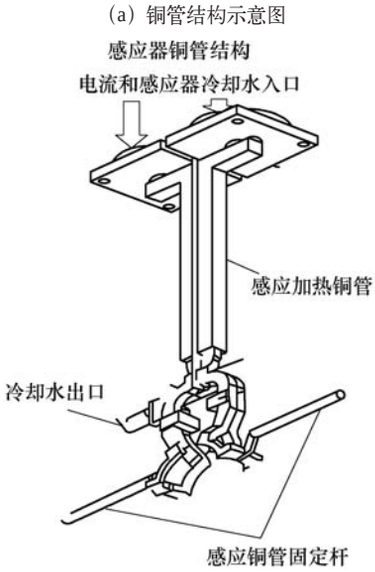
（a）强化区域一次性淬火

（b）轴颈面淬火+圆角滚压

图 3

主要由含矽钢片的感应核心铜管、两侧外壳铜板、淬火液铜管、绝缘胶合板和钨钢头经螺钉连接件等部分组成。图4a即是铜管结构示意图，其核心是含矽钢片的感应铜管，它既是感应电流利用电涡流进行加热的感应线圈，同时也是内部去离子冷却水的铜质冷却水管道。工作原理是利用交变电流在感应铜管中形成的交变磁场，在对应的曲轴轴颈表面产生感应电涡流，从而加热轴颈，当达到一定的温度时，淬火液铜管中喷出的淬火液将对轴颈激冷，实现了淬火。现今在用的淬火感应装置，多数是由一根感应铜管绕制而成，这样容易造成在较长的感应加热区域的后段铜管冷却不良。但图4b所示的整个半圆区域感应铜管则是由两根

（a）铜管结构示意图



（b）淬火感应器外观

图 4

独立的铜管绕制而成，两根铜管“进水”分开，而“出水”最后复合成一个出口。其优点是提高了冷却效果、保证淬火质量，并优化了淬火头的制造工艺。

2. 小型铸铁曲轴圆角感应淬火的工艺验证

工艺验证是指企业对一项新工艺或制造技术在批量生产条件下的可行性进行的确认，体现了对零件制造质量的一种评价。作为评定依据，主要将通过对曲轴表面形成的硬化层性状的试验，并对所获取的硬化层深度、硬度和金相组织的结果进行分析和评价。为了使验证、评定的过程和结论更具科学性，除“正面”评价外，又同时通过横向比对试验及对得到的实验数据的分析，使最终的验证结论更具有说服力。所谓的二种形态：以传统方式生产的EA111 自然吸气发动机曲轴；采用新强化工艺的曲轴中，还有20%左右的锻钢件，用于涡轮增压机型。对于前者，无论是产品本身或所采用工艺都很成熟，而后者因材质为锻钢，其属性决定了经感应淬火强化处理后的效果将更加稳定。

（1）本次以工艺验证为目的的试验主体即企业在生产中占产量80%左右的球墨铸铁曲轴，实际上，通过表面硬化层性状测试的结果已充分表明，无论是过去三年多来的几十份曲轴表面的硬化层检测报告，还是近期为了获取最新的状态而专门又做的试验的数据，测的结果都显示，那些相对稍微差些的样本的占比不但很小，而且也只是处于在下限附近，并未超差。

（2）至于只占工作量20%左右的锻钢件，其圆角的硬化层深度大多处在允许值下限，而且按照材料标准，对金相组织虽有要求，但图样上则并未明确的要求，说明在技术上对圆角经感应淬火强化后锻钢件的疲劳强度的提升是很有信心的。

（3）最后再分析一下球墨铸铁曲轴圆角在经过滚压强化处理后的状况，测得的结果表明，由滚压这种机械强化产生的硬化层的深度是相当浅的，很少达到1mm。这也意味着，那抵御疲劳破坏所必须的残余压应力都集中在表层，从而降低了抵抗工作中疲劳载荷的稳定性。

事实上，在执行滚压强化工艺时，圆角并未经热处理，故对所形成的硬化层并没有任何技术要求。相比之下，曲轴圆角采用感应淬火强化后，其硬化层深度远大于它，充分表明了这一深层硬化特性对提高曲轴等零件的强度，进而为实现零部件轻量化十分有利。图5为EA211和EA111这两款1.6L发动机曲轴的对比。从外观可见，EA211曲轴是通过改变结构来达到减轻重量的目的。图6是上海大众曲轴加工现场。

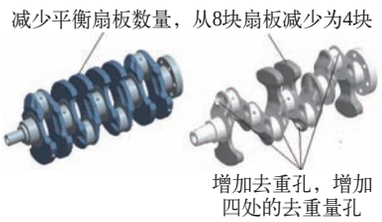
轻量化结构的改变主要有三处：①减少了用于平衡的扇形板的数量，从8块减少为4块。②增加了4处去重孔。③主轴颈和连杆轴颈直径减小。而曲轴重量由原来EA111 1.6L的1 235g减轻到EA211轻量化的曲轴的858g，重量降低率达到了30%。显然，在经过结构轻量化之后，EA211的曲轴变得更加细长，刚性差。但在采用了圆角感应淬火后，工件最薄弱的圆角部位藉助更深的硬化层，而大大地提高了其强度。

激光造型工艺及其在企业中的应用

激光造型作为一种新工艺，自2009年起开始进入国内少数主流汽车发动机厂，并用于缸体缸孔和连杆大头孔精加工等关键工序。通过实施这项工艺，有效地改善了配合面的性能、对提升发动机的质量和可靠性发挥了积极的作用，充分显示了这种先进技术的优越性，同时也展现了它十分广阔的市场前景。

1. 关键零件的配合面状态的重要性及其传统工艺技术的局限

作为发动机中二组重要的摩擦付，缸孔和连杆大头孔配合面的状态是否符合要求至关重要，将直接影响产品的运行质量和可靠性。可现今，无论是汽缸体缸孔还是连杆大头孔，所采用的最终精加工工艺大多数仍为珩磨。



EA111_1.6L曲轴　EA211_1.6L轻量化曲轴

图5 新、老两款系列发动机曲轴的结构比较

图6　曲轴加工现场

CYBER RC
赛 帕 埃 惜
日本サイバーRC株式会社
日本进口

Tool Regrind Machine
五轴全自动刀具磨床

Tool Regrind Machine
四轴全自动刀具磨床

Automatic Drill–Honing Machine
自动钻头钝化机

对象刀具

刀具种类	钻头、铣刀、丝锥、铰刀、3刃钻头、侧刃、3刃倒角刀、不等分铣刀、雕刻刀、枪钻
刀具材质	高速钢（HSS）、钨钢/硬质合金（carbide）
刀具最大把持直径	φ20（φ26 ※）※φ26规格为选配
刀具长度	45 ~ 200mm

特 征

- 操作简单　自动对刀、自动补正偏心　自动研磨
- 对应多种刀具
- 任意设置刀具参数
- 不需编程、可追加新程序，进行版本升级

地址：苏州吴中区金枫路216号
东创科技园C幢108
联系人：代女士
手机：13651758961
电话：0512–62695591
QQ：642504730
邮箱：cyberrc_dll@aliyun.com
◆广告 查询编号：0035

对前者，追求的是通过在表面进行宏观和微观几何加工，以获取一个开放性的表面微观结构，可保障表面的储油能力，并使经珩磨加工的工件表面在相对粗糙的基础上，呈现出平台结构的精细的表面形态。而对后者，由于与曲轴连杆轴颈组成运动摩擦付的，并非是连杆大头孔的内壁，而是一对（两半组成）轴瓦。因此，其内壁和轴瓦乃是紧紧地贴合在一起，两者之间不仅不允许存在高频次的相对运动，而且还要求在传递高负荷的扭矩时避免出现滑动，以免影响发动机的运行。

眼下随着取消了在相关件加工止口的机械约束这种简化结构，这就直接带来了对连杆大头孔内壁与轴瓦之间的配合会提出更高的要求，即：被紧紧压入孔中的轴瓦与孔壁之间必须有足够的摩擦力，以确保发动机在高速运转中轴瓦不会有滑移。为此，只能由连杆大头孔内壁的有特定要求的表面微观结构来实现和保证。

鉴于珩磨加工所采用的油石（砂条\珩磨条）的磨料粒度、浓度、磨粒在磨具中的分布都是随机的，为了加工出具有不同要求的工件表面，就只能通过改变砂条规格（粒度、比例）和机床的压力、速度等工作参数来实现。但由于其中不可控因素很多，从而使加工的一致性较差。以前面提到的缸孔内壁为例，实际所形成的沟槽深度、宽度、密度等情况同理想的表面构造总会有差距，故将会直接影响发动机的运行。

2. 激光造型原理和在缸孔深加工中的实际应用

激光造型是利用激光头所发出的数控激光束在被加工表面制作出符合事先设定要求的表面微观结构的一种工艺方法。在实施表面造型的加工过程中，高能量的光束将有部分被工件表面反射、有部分则被吸收，被吸收的光束能在瞬间将材料加热并使之达到气化状态。这种激光刀产生的光束的切削能力取决于脉冲频率、功率、开关时间及进给速度等。由于温度升高是瞬间产生的，并且具有很高的能量聚集密度，因此光束只在一个有限的局部做瞬间切削，工件材质的特性不会因此而产生变化。

激光造型设备的数控系统对激光头的上下和旋转运动，以及激光束的开关时间和能量进行控制，从而可获得有着不同要求的表面微观结构。图7给出的是实施缸孔内表面激光造型时的运动轨迹。该图表明了为了在被加工表面上形成所要求的微观结构，完全可以依据事先设置的一系列参数和所编制的、需执行的相应程序，藉助激光造型设备的数控系统来获得。因此，用户利用这种先进的制造技术就能在工件表面产生可控的微观形貌。激光造型工艺与传统珩磨工艺的本质区别就在于前者能按严格定义、利用数控加工的方式产生可控的表面微观构造，而后者加工出的结果客观上是不受控的，故仅就符合要求的合格率而言，前者就高于后者。

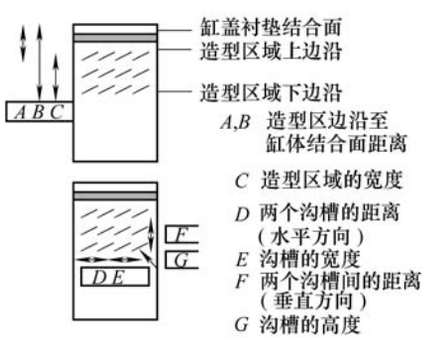


图7　缸孔内表面激光造型的运动轨迹

图8是采用这项新颖工艺加工的缸孔的实况，结合前述，可以发现真正实施激光造型的只是位于承受高负载的缸孔上死点附近的区域，可以保证活塞环在该区域受到高负荷时的良好润滑。图8所示是发动机已在运行了超过十多万公里、再拆解后的缸壁表面情况，在图8中，无论是激光造型形成的规则沟槽，还是下部珩磨加工后的网纹都清晰可见。这也说明了利用激光造型技术可使磨损大幅度降低，从而延长了发动机的使用寿命。

3. 激光造型在连杆大头孔精加工的应用

在发动机生产企业，虽然缸孔和连杆大头孔最后一道精加工都是采用珩磨工艺，但从前面介绍可知，两者的被加工面所应具有的工艺性能大相迳庭，完全不同。正因为如此，在引入激光造型这一新工艺的方式，以及对“按需定制”，即所期望形成的表面微观结构上，连杆大头孔与之前描述的缸孔的情况有着很大的差别（见附表）。

由附表可见，相比缸体中的

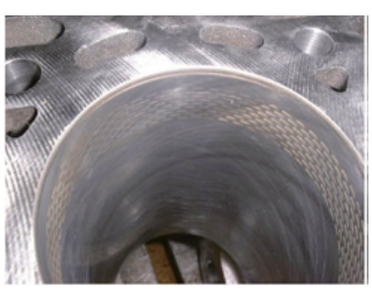


图8　采用激光造型工艺加工后的缸孔

缸孔、连杆大头孔技术状态对比表

	配合状态	表面加工后的要求	传统（终）精加工方式	引入“激光造型工艺”	激光造型区域
缸孔	动配合	平台结构、耐磨性号，存在适量储油沟槽	粗珩+精珩	在粗、精珩中插入这道新工艺	一周，全覆盖
连杆大头孔	静配合	保持最够的粗糙度，呈均匀的凸峰结构	粗珩+精珩	用新工艺取代传统工艺	局部、断续

缸孔，连杆大头孔在引入这项新的制造技术后，原来的精加工工艺发生了根本变化，激光造型完全取代了之前的珩磨而成为精加工中的最后一道工序。图9是连杆大头孔激光造型设备的主体部分，从图9中可见，该设备有一个很大的回转工作台，其上拥有“上下料”和“加工”2工位。在加工工位，对向设置的两个旋转激光头在完全封闭的环境下，完成了对工件大头孔圆周的4个矩形表面的烧蚀造型。经仔细观察后可以清晰地从图10中看到，4个箭头所指处的局部阴影区域即是。那每一块造型区域又有多大呢？对于一台小排量轿车的发动机，其连杆大头孔的外径一般不超过50mm，厚度不超过20mm，

图9　连杆大头孔激光造型设备

图10　大头孔圆周上的造型区

则取高（轴向）为13～15mm，宽（圆周向）度、即弧长则稍大些，但一般不用长度单位mm表示，而采用对应的角度标注，约在35°左右。

结语

如前所述，缸孔激光造型乃是在粗珩后的表面上加工出规则、均匀的沟槽。而对于连杆大头孔，则是在精镗后的圆周面上完成较均匀的凸峰状造型，无疑两者是不一样的，所产生微观结构的均匀程度也是不同的，后者更为困难。但相比之下，在企业中将激光造型用于实际生产的首先是后者。主要原因就是这样做直接带来了“在确保产品质量的同时，降低了制造成本”的效果。相比传统的一条珩磨短线（含有粗珩、在线检测、精珩及在线检测等多个工位），图9所示的设备要便宜的多，仅为前者的几分之一。而且，采用这一新工艺后运行费用也会更低，原因是既不再需要像珩磨头那样复杂又昂贵的机床附件，更不涉及到油石（珩磨条）、乳化液等消耗品。

参考文献：

[1] 金善勤，等. 汽车材料及热加工工艺［M］. 上海：上海交通大学出版社，1998：10-40.

MW（收稿日期：20160909）

CYBER RC
赛 帕 埃 惜
日本サイバーRC株式会社
日本进口

Tool Regrind Machine
五轴全自动刀具磨床

Tool Regrind Machine
四轴全自动刀具磨床

Automatic Drill-Honing Machine
自动钻头钝化机

对象刀具

刀具种类	钻头、铣刀、丝锥、铰刀、3刃钻头、侧刃、3刃倒角刀、不等分铣刀、雕刻刀、枪钻
刀具材质	高速钢（HSS）、钨钢/硬质合金（carbide）
刀具最大把持直径	φ20（φ26 ※）※φ26规格为选配
刀具长度	45 ～ 200mm

特 征

- 操作简单　自动对刀、自动补正偏心　自动研磨
- 对应多种刀具
- 任意设置刀具参数
- 不需编程、可追加新程序，进行版本升级

地址：苏州吴中区金枫路216号
东创科技园C幢108
联系人：代女士
手机：13651758961
电话：0512-62695591
QQ：642504730
邮箱：cyberrc_dll@aliyun.com
◆广告 查询编号：0035