

装配式凸轮轴加工工艺及其发展趋势

□ 东风商用车有限公司/龙建勇 方学周

装配式凸轮轴是近20年来开发的新型内燃机零件，适应了汽车工业轻量化、高性能、低排放和低成本的发展趋势。目前，世界上越来越多的汽车制造厂家将装配式凸轮轴用于高性能发动机上，其生产工艺的提高对促进我国汽车产业不断发展具有重要的现实意义。

传统整体式凸轮轴加工工艺及其缺点

传统整体式凸轮轴采用铸造或锻造毛坯切削加工成品，个别直接采用棒料加工成零件。为了保证零件加工精度，整体铸造或锻造的凸轮轴毛坯必须辅以大量的切削加工（采用车、铣、磨、抛光）及表面淬火、渗碳、氮化等强化处理。

传统整体式凸轮轴加工存在的主要缺点如下：

（1）发动机工作过程中，凸轮要求耐磨损、耐胶着、耐点蚀；轴颈要求滑动性能好；心轴则要求刚性、弯曲、扭转性能好。整体式凸轮轴很难同时满足上述要求，其材料利用也不合理。

（2）很难制造出凸轮密布排

列、结构紧凑的凸轮轴。

（3）需大量加工工序、机床、刀具、夹具和人员，工时长，占地面积大，成本高。

（4）对凸轮表面耐磨强化处理容易发生变形而需校直。

（5）毛坯凸轮型面余量大且不均匀，加工困难，影响零件加工质量。

（6）使大量材料变成废屑，同时难以降低产品成本。

（7）生产效率低，材料与能源消耗大，生产自动化水平较低。

装配式凸轮轴工艺技术优势

装配式凸轮轴（也称组合式轮轴）结构如图1所示。它由钢管（心轴）、轴颈（轴承环）、凸轮、泵桃片、塞和尾端件等若干个零件组成，分别进行材料优化及精益加工，再组装成凸轮轴。装配式凸轮轴工艺流程如图2所示。

装配式凸轮轴心轴一般采用冷拔无缝钢管，凸轮则采用碳钢或粉末烧结材料，碳钢凸轮可进行精密



图1 装配式凸轮轴结构

塑性成形, 并进行高频淬火或渗碳处理。

装配式凸轮轴的凸轮装配精度 ($C_{mk}=1.67$)一般可以达到如下级别:

角度: $\pm 0.5^\circ$ (粗锻件凸轮), $\pm 0.25^\circ$ (加工后的凸轮)。

轴向尺寸: $\pm 0.1\text{mm}$ 。

负载: 转矩 $> 150\text{N}\cdot\text{m}$, 轴向负载 $> 10\text{kN}$ 。

装配连接之后再根据产品要求对零件进行精加工处理。

装配式凸轮轴与传统凸轮轴相比具有如下技术优势:

(1) 可实现柔性设计、柔性生产与敏捷制造。在装配过程中, 可实现凸轮相位角与轴向位置的自由调整与修正, 有利于新产品的设计与制造, 缩短研发制造周期。

(2) 有利于材料分体优化与凸轮轴结构形式选择。可根据配气机构对凸轮轴各个部位的性能要求不同, 合理选择凸轮、轴颈与心轴的材料, 保证其质量要求。

(3) 采用近净成形工艺成形凸轮, 可大幅度降低制造成本。根据材料及形状要求, 采用冷精密塑性成形、粉末冶金烧结、精密铸造等工艺成形凸轮, 减少凸轮的切削加工过程, 节省工时、降低成本。

(4) 空心管心轴、凸轮材料的优化及精密成形技术的应用, 可使凸轮轴整体质量降低20%~40%, 节约材料达30%以上。

(5) 可针对不同零件采用最适宜的热处理技术与表面强化技术, 从而大幅度提高凸轮轴的制造精度、产品质量和使用寿命。

(6) 凸轮轴的全部部件分体

加工, 并装配集成, 降低装配工时与装配成本。

(7) 提高凸轮轴整体刚度。其动态转矩可达800~1 000N·m, 并可降低摩擦、承受较高的阀门冲击载荷。

(8) 凸轮工作型面可根据产品性能要求, 任意设计选择。近净成形技术可用于不同曲率的凸轮加工, 有利于新型发动机的开发应用。

(9) 可大幅度节省凸轮轴金属加工设备与工时, 分体零件与设备小型化也降低了设备投资和场地面积。

(10) 凸轮在心轴上的排列可更加紧凑, 在多气门顶置凸轮轴的加工方面更优越。

(11) 部件分开加工, 可大幅提高生产自动化及集约化程度。

装配式凸轮轴的关键技术问题

1. 连接技术

随着发动机功率及转速的不断提高, 凸轮轴需承受载荷与传递转矩也越来越高, 凸轮与心轴的连接强度与使用寿命成为装配式凸轮轴最为重要的技术指标。

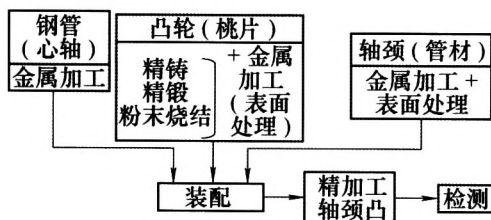


图2 装配式凸轮轴工艺流程

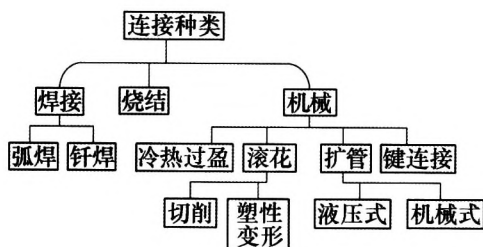


图3 装配式凸轮轴装配连接种类

各种连接方式的比较

连接种类	凸轮材料	制造方法	主要用途
焊接式	碳钢、合金钢	将凸轮焊在钢管后高频淬火	高性能、大型柴油机
烧结式	烧结合金	将凸轮通过烧结扩散连接在钢管上	高性能OHC、OHV结构发动机
机械式	烧结合金+碳钢+特殊钢	通过机械方式将凸轮固定于钢管上	高性能OHC、OHV结构发动机

因轴颈、凸轮和其他零件的装配方法不同而有多种连接方式（见图3及附表），可分为焊接式、烧结式和机械式连接。其中，机械式连接又分为热套法、冷套法、液压扩管法、机械扩管法、滚花法。

（1）焊接式凸轮轴由于焊接时容易产生热焊接变形，使凸轮轴的尺寸精度降低，应特别注意避免焊接处裂纹的发生，该方法仅限于钢质材料。

（2）烧结式凸轮轴在进行粉末烧结成形凸轮的同时，凸轮又要在液相状态下与钢管扩散连接，并在1 000℃以上的烧结炉内进行，由于装配后整体烧结时轴容易产生弯曲变形，造成尺寸精度误差。且烧结对材料的性能也有限制，需大型烧结炉，热效率不高，仅适用于粉末材料凸轮。

（3）扩管法首先使凸轮与钢管配合，然后从管内侧加液压或机械扩管，为了使扩管容易进行，要求心轴管壁较薄以利于塑性胀形，同时要有一定厚度来保证其强度和刚性，凸轮有足够的壁厚以承受扩管内压，防止凸轮胀裂或变形；且由于高压作业的特殊要求，也使其设备大型化。

（4）冷热套过盈连接法虽然在机械零件生产中被广泛采用，但存在凸轮轴工作时由凸轮向轴端导热，使得工作初始与完了时的连接过盈量发生变化，连接强度不能保持一致，可能发生失效。

（5）滚花法在可靠性、精度、设备、能耗等方面都有一定的优越性。

此外，也有采用粘结剂粘接

的事例，但由于这种方法硬化时间长、加工繁杂，因此对材料、粘接表面及温度、油、振动等工作环境都有特殊要求。另外，还有采用定位销、定位键完成心轴与凸轮结合的方式，但装配十分困难；也有几种方法混合使用的情况。

上述方法都存在各自的问题，因此应尽量采取措施进行避免，具体应用要视所具备的技术条件，产品性能要求等而定。

2. 装配与装配设备

凸轮轴对凸轮相位角与轴向间距要求很高，因此如何保证装配式凸轮轴的装配精度极为重要。不同的连接方法对装配设备及装配过程有不同的要求。随着液压扩管法连接技术的应用，由最初主要使用简易调准夹具，发展到采用机械手将凸轮与轴颈装入心轴，采用专用或复合模具，模具作为凸轮的定位工具，凸轮相位角与轴向间距主要靠模具型腔制造精度来保证。

目前装配过程以及装配设备向着高效率、自动化方向发展。如日本日野公司生产的装配式凸轮轴，在装配之前将凸轮轴和轴颈中频感应加热至150℃左右，经加热后的凸轮和轴颈顺序送至工作台的夹具上，采用数控装配机对凸轮和轴颈按规定顺序、轴向间距与相位角要求进行装配，最后进行凸轮铜焊连接。德国EMAG（埃马克）公司采用的热套法装配式凸轮轴（见图4），在装配之前将凸轮、轴颈加热至200℃左右后，数控装配机用机械手按照设定的位置将凸轮和轴颈装配在心轴上。1995~2000年，德国EMAG公司与mahle公司合

作，向德国奔驰、宝马、奥迪公司和法国PSA雪铁龙标致汽车公司共提供了14条自动装配式凸轮轴生产线，2001年后向加拿大Linamar公司、德国奔驰公司Smart轿车、奔驰Manhein重型货车凸轮轴、德国MAN公司重型货车凸轮轴的生产共提供6条生产线。

3. 心轴及凸轮的精密成形

装配式凸轮轴的心轴为高刚性的精密钢管，一般采用无缝热成形厚壁钢管或高精密冷拔钢管，适用于各种规格，满足客户特定尺寸和高同心度需求。

凸轮一般采用碳钢或粉末冶金材料，凸轮可以采用净形（Net-shape）或近净形（Near-net-shape）技术成形桃型凸轮，如钢质凸轮冷、温精密锻造、合金铸铁凸轮精密铸造、粉末烧结材料凸轮烧结成型，以大幅度降低制造成本，提高生产效率。碳钢凸轮可进行高频淬火或渗碳处理，具有较高的耐胶着、耐点蚀性能。烧结合金材料Fe2C2P2Ni2Cr2Mo是制作凸轮的理想材料。精密粉末冶金凸轮为精密烧结件，外轮廓已成形，需进行表面渗碳和氮化外，仅内孔需要加工。

精锻凸轮要求高强度时，使用轴承钢锻件，需整体硬化或者表面感应硬化。

目前凸轮材料已由合金铸铁向粉末烧结材料、钢质材料发展，精密塑性成形与精密烧结成型技术应用越来越广泛。由于凸轮型线左右不对称，为了防止误装以及识别进排气凸轮等，一般在精密成形的同时给出标记。

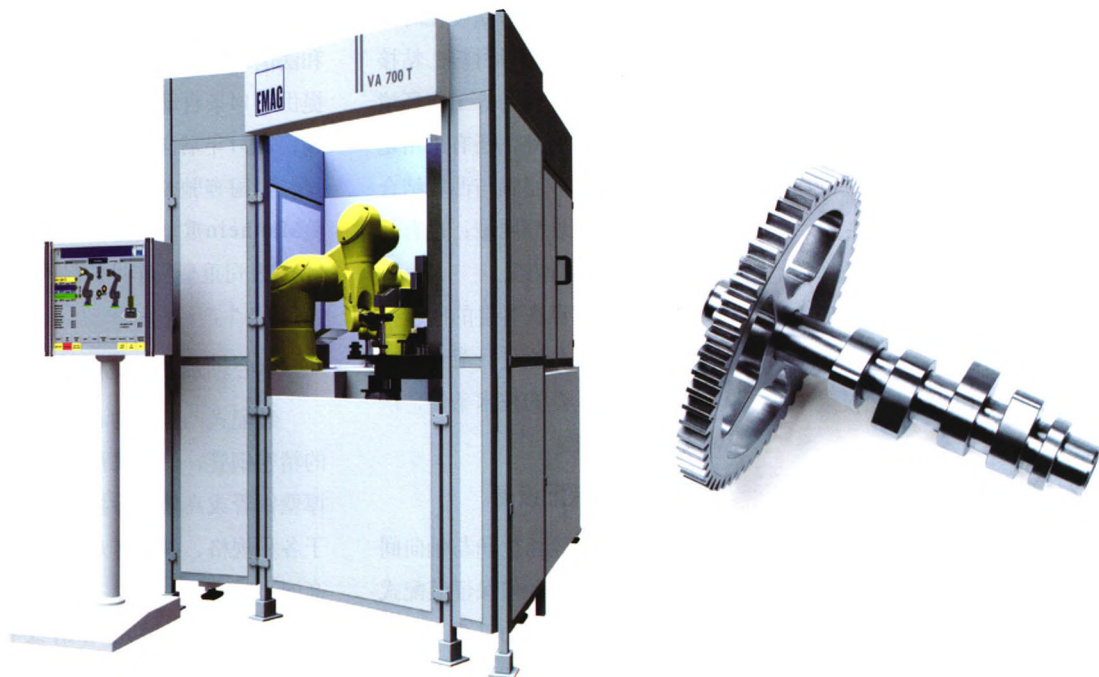


图4 埃马克用于制造组合式凸轮轴热套设备VA 700 T及经过热套的成形凸轮轴

装配式凸轮轴技术应用现状和发展趋势

目前, 装配式凸轮轴品种很多, 其长度范围为120mm到12m, 质量最大12 000kg。日本丰田汽车公司、美国MTS2SA公司、TORINGTON公司、通用汽车公司和福特汽车公司都已将装配式凸轮轴应用于生产之中。德国的大众汽车公司、奔驰汽车公司、THYSSENKRUPP公司和英国的T&NT公司也都先后开发研制了装配式凸轮轴的生产工艺及设备。

我国在装配设备、凸轮材料、快速成形和热处理等方面与发达国家有较大的差距, 从而影响到装配式凸轮轴在我国的应用发展。目前我国上海大众汽车公司有一条生产装配式凸轮轴的生产线, 以及上海通用汽车公司采用耐磨烧结铁基合金材料凸轮与空心钢管扩管

连接方法制造装配式凸轮轴, 已应用于轿车发动机上。大连德国蒂森克虏伯普里斯坦公司采用轴向滚花连接方式, 以1 200万根中空装配式凸轮轴的年产量成为全球市场的领导者。

吉林大学对装配式凸轮轴已经研制开发了多年, 重点针对滚花连接方式进行了研究, 对连接机理进行了探讨, 应用计算机模拟方法对连接部位工作状态的应力应变做了模拟研究, 并对装配力做了不同情况的试验分析。在连接试验的基础上开发了自动化中空装配式凸轮轴新型滚花连接技术与三轴CNC装配机(专利技术), 以实现高精度快速装配与高强度连接。

装配式凸轮轴已发展20多年, 装配过程以及装配设备向着高效率、自动化方向发展, 精密塑性成形与精密烧结成型技术应用越来越

广泛, 现在正大力开发应用复合材料, 例如陶瓷材料等制造凸轮轴。随着装配式凸轮轴生产技术的提高, 性能更好、成本更低、技术多样化的装配式凸轮轴将会涌现出来。

结语

装配式凸轮轴是凸轮轴制造技术的发展和升级, 是实现创新跨越的关键。在减轻质量、降低成本、大幅度节省工序及设备方面具有传统凸轮轴无法比拟的优势, 且具有凸轮型面、结构形式随意、材料分体优化选择、整体刚性及强度高、柔性加工、敏捷制造等显著优点。在大力提倡环境保护、开发低能耗、无污染发动机, 并使其达到成本低、轻型化的今天, 装配式凸轮轴以其特有的优势, 在汽车、铁路以及船舶发动机等领域的应用发展前景十分广阔。AME