钢或中碳钢，原始的热处理工艺是调质，后因轴颈耐磨性差，疲劳强度低，因而又增加了氮化。但调质加氮化处理的曲轴使用寿命仍然较短、氮化时间很长、生产效率很低等，对于这些缺点人们很不满意。20世纪中期发明感应淬火后，感应淬火首先对曲轴轴颈淬火，使曲轴热处理工艺大为简化，耐磨性有所提高。后来又发明了曲轴轴颈及圆角同时感应淬火技术，使曲轴的疲劳强度达到空前的水平，曲轴寿命明显提高（见图5）。当然，由于氮化温度较低，也具有曲轴变形小等优点，所以曲轴调质加氮化的工艺现在仍有应用。轴颈及圆角同时感应淬火的曲轴变形较大，一般中间跳动1mm左右，采用合适方法回火，这种变形也是可以消除的。

恒精公司开发成功各种曲轴圆角感应淬火技术。图6是大型载重汽车柴油机曲轴圆角淬火的照片。图7是小型通用柴油机曲轴圆角淬火的照片。

结语

用感应淬火取代渗碳等化学热处理工艺，是节能环保的重要进步，也是感应热处理工程师的重要课题。开发先进的感应淬火工艺是“取代”成功的保证。

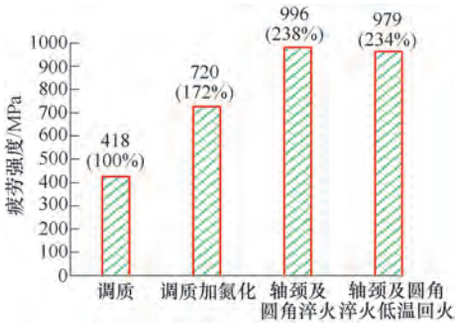


图5　三种曲轴热处理工艺对疲劳强度的影响



图6　大型载重汽车柴油机曲轴连杆轴颈圆角淬火照片

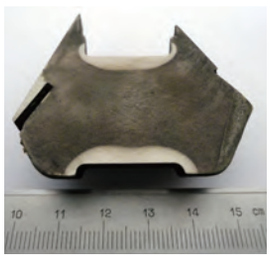


图7　小型通用柴油机曲轴圆角淬火的照片

注：本文其他作者为齐靖昌、林信智。



大功率柴油机凸轮轴表面强化工艺方案

潘晓松，高级主任工艺师，高级工程师，南车戚墅堰机车有限公司工艺技术部

在服役过程中，对于一定深度范围内具有较高的耐磨性、疲劳强度和力学性能要求的钢制工件，其表面强化常选用表面感应淬火、表面渗碳淬火等热处理工艺，并对其相应部位有明确的检测要求。长期以来，对于凸轮轴等关键构件的工艺方案，由于服役条件、性能要求、经验累积与成本控制等原因，同时涉及到材料与加工条件等特性要求，不同的设计方案往往具有不同的倾向。产品成熟期的客观限制，加之设计往往不能仅从材料性能数据进行简单判断，会使产品成品加工使用后、甚至加工过程中产生失效，往往导致质量成本增加或失控。

以我公司4410kW280系列柴油机凸轮轴（见图1）为例，该工件旧版设计（280AB型柴油机）采用渗碳淬火方案。

该工件材质采用20Cr，技术要求为：凸轮表面*C*和轴颈表面

*D*进行渗碳淬火，渗碳层深度2.0～2.5mm，硬度58～62HRC。淬硬层深度1.5～2.0mm（热处理渗碳层深度的工艺要求为2.7～3.2mm），在距离轴颈端面1.5mm范围内允许硬度降低到≥40HRC，其余部位硬度为255～302HBW。全长范围内的弯曲变形量≤0.4mm。

经过数十年的连续批量生产，该产品在服役与加工过程中，逐渐暴露出部分问题，主要表现为剥离、裂纹、磨损、压痕、变形、表面硬度波动等多种形式。

缺陷概述

（1）表面剥离、龟裂、磨损与压痕　现场实际检测表明，此类缺陷与表面硬度、表面淬硬层深度变化导致的疲劳强度的波动有关。

（2）裂纹　主要表现为淬火裂纹与网状磨削裂纹。金相检测表明，位于两端部连接法兰处的定位销孔与法兰孔易产生淬火裂纹，与渗碳淬火的产品结构相关；而网状磨削裂纹的产生，一般源于深层渗碳后组织粗大所伴生的碳化物级别粗大（如网状碳化物）。

（3）变形　仅在热处理工序中，工件一般历经的高温工序即有渗碳、正火、淬火等多道，渗碳过程（930℃×16～22h渗碳+880℃×2～4h正火）的多次高温，以及淬火后工件整体强度的提高，导致最终校直后仍有变形遗留到机加工工序，导致偏磨。

缺陷分析

长期以来，以下因素综合作用，相互影响：



（1）低合金化的20Cr易于控制材质成本，也具备较好的加工性能，但其本质晶粒度较为粗大，更深的渗层要求延续了高温保温时间，不仅推动晶粒度的长大，而且表层碳浓度的持续增加，促进碳化物在晶界的聚集与长大，形成网状，由此导致磨削裂纹。

（2）若控制晶粒度，则必须降低渗碳温度，实践表明，将增加每炉生产周期15%~20%。

（3）若在满足渗层深度的条件下控制碳化物级别，则使得渗碳后的正火不可或缺，而且表面碳浓度的降低，增加了后道淬火工序硬度降低的风险。现场生产中，为保证淬火硬度，表面渗层一般控制在共析或点状碳化物析出，但在连续多班次操作中，易于产生偏离，往往依靠后期的反复正火或补碳予以解决。

（4）为保证较深的渗层，高温条件下的长时间保温，以及正火、淬火等多次操作，促进

变形发生。全长变形除常见的C形、S形之外，尤其对于较长、非对称的尺寸结构，凸轮轴在端部法兰与第一节凸轮之间的变形增大，会形成L形变形结构，由于受力点难以控制，直接影响校直效果。在这种条件下，若表面碳浓度控制较低（过渡层共析、亚共析比例提高），发生偏磨后，往往直接导致表面硬度降低，带来表面剥离、龟裂、磨损等服役缺陷，甚至在柴油机试验阶段即可发现凸轮表面的压痕，直接影响工件的服役寿命，对于机车制造企业而言，上述缺陷无疑最为致命。

改进方案

对同类产品进行分析：我公司生产的同类240系列凸轮轴（见图2），采用材质为50Mn，工艺要求为凸轮面硬度58~63HRC，有效淬硬层深度2.5~5.5mm，采用调质+中频感应淬火工艺。此外，前期我公司与GE合作生产的GEVO16型凸轮轴（见图3），采用材质为67Cr，经调质+感应淬火，上述产品经过连续大批量生产服役，并不存在上述表面剥离、龟裂等缺陷。因此，我公司在280新型柴油机凸轮轴采用了合金钢调质+感应淬火的改进方案。

我公司大功率R12V280柴油机凸轮轴（见图4），材质同样采用GEVO16凸轮轴所用的67Cr，其技术要求为：

（1）调质处理后应进行实物试样性能检测，硬度269～325HBW，力学性能满足：抗拉强度≥12500PSI（参考换算值862N/mm^2）；屈服强度≥8000PSI（参考换算值552N/mm^2）；断后伸长率≥15%；断面收缩率≥30%，调质后应得到以回火索氏体为主的金相组织，晶粒度达到ASTM E 112的6级或更细。

（2）对排气凸轮、进气凸轮、供油凸轮进行感应淬火及回火处理，表面硬度为60～64HRC，淬硬层深2～9mm，淬硬层硬度（有效淬硬层深度的界定点硬度值）≥50HRC（工艺要求有效淬硬层深度2.8～9mm，淬火后全长弯曲≤0.2mm）。

（3）对零件进行酸蚀检查。

该产品试制后投入批量生产，不仅满足了柴油机更高功率的要求，而且有效消除了上述缺陷发生的倾向。

工艺方案实效比较

与渗碳方案相比，感应淬火方案具有以下特点：

（1）成品表面硬度与强度更加稳定　相比于渗碳，感应淬

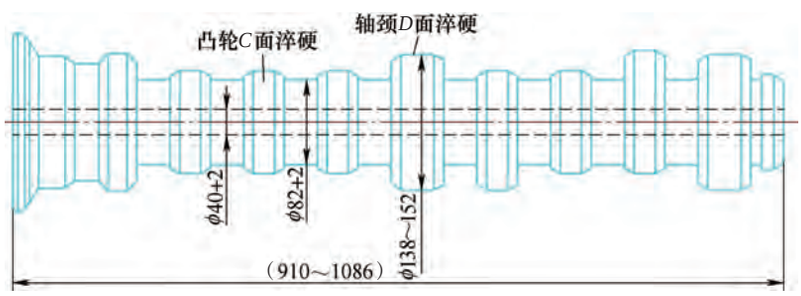


图1　280AB系列柴油机凸轮轴

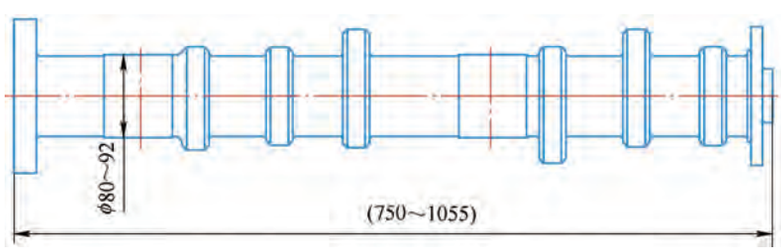


图2　240系列凸轮轴

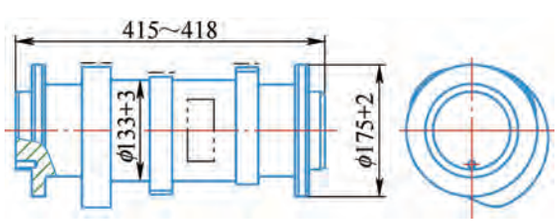


图3　GEVO16型凸轮轴

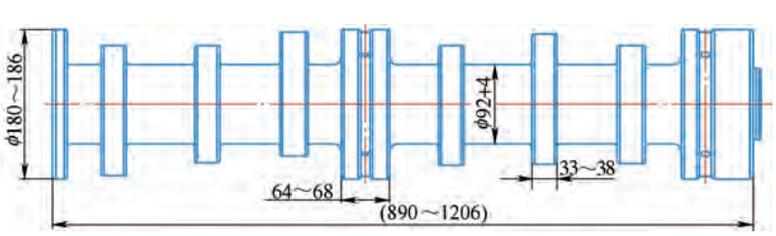


图4　大功率R12V280柴油机凸轮轴

火可以获得更深的有效淬硬层深度（渗碳层深度控制在2.7～3mm，淬火后有效淬硬层深度不大于渗碳层深度；而感应淬火实际可达深度2.8～8mm），加工成品后可望获得更可靠的疲劳寿命；合金钢含碳量的提高（如67Cr中w_C=0.65%～0.70%）有助于表面强度的进一步提高。

（2）心部性能　由于渗碳工件的表面硬度与心部性能是在淬火操作过程中同时获得，而心部能获得的强度主要取决于材质的成分（280AB凸轮轴主要取决于20Cr当批的含碳量），因此，为保证更为关键的表面硬度，实际生产中心部性能只能作为次要控制因素；而感应淬火之前，心部性能在独立的调质工序中获得，并不受后道淬火的影响，因此更加可控。相比两种方案的技术要求，感应淬火的心部性能要求不仅明显高于渗碳方案，而且易于实现。此外，相比长周期高温渗碳造成的组织粗大倾向（280AB凸轮轴一般达到5级左右），调质获得的细晶粒度（一般达到6～7级）显然有助于心部性能达到更高。值得一提的是，由于心部性能的整体提高可能导致刀具磨损加大，机加工宜选用加工能力更高的工序设备。

扫描二维码，关注美国先进的无旋式曲轴感应淬火与回火技术资料

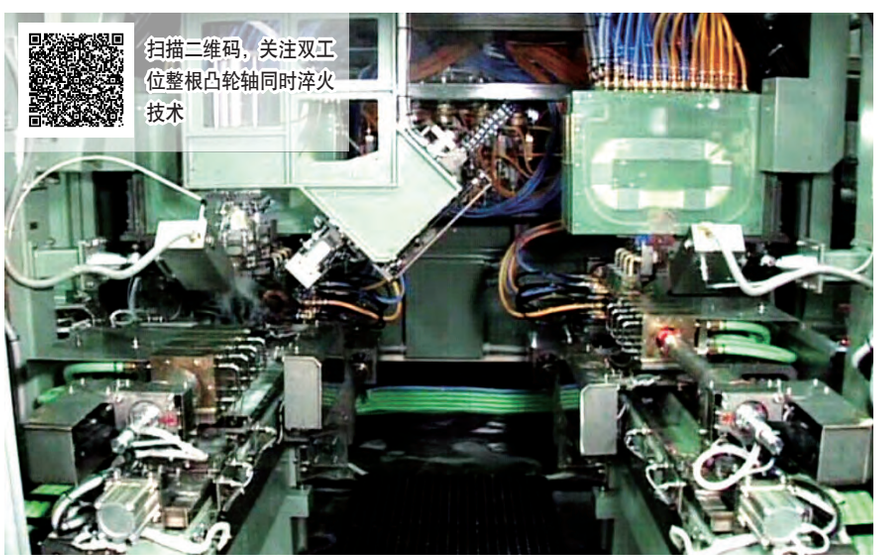


（3）加工效率　现场操作表明，凸轮轴在热处理工序的生产周期，采用感应淬火的方案至少比渗碳方案减少20%～30%。此外，由于不需要采用提前预留余量、渗碳后剥除渗碳层等反复加工，加工余量的减少也促进了机加工效率的提高与成本控制。

（4）加工缺陷的消除　由于感应淬火表面形成细针状马氏体，消除了由于组织粗大造成的网状磨削裂纹等缺陷，同时针对指定部位的感应淬火，调质后加工的法兰孔加工后不需反复加热，该部位裂纹自然避免。不仅如此，由于避免了反复长周期高温加热，调质、感应淬火的凸轮轴产生的变形更规则（以C形居多，少量S形，L形极少出现），有利于校直并避免偏磨发生。

（5）质量检测　现行采用的渗碳技术标准，一般不会对所有渗碳材质在不同深度范围的组织提出限定要求，使得诸如20Cr等低合金钢渗层深度较深时，往往评判依据匮缺，工件淬火后，其硬度状态也往往采用硬度计法、锉检法等方法进行局部检测。而采用调质+感应淬火后，不仅评判的技术标准更为齐全，而且现场检测过程中，在GEVO型凸轮轴成功生产的基础上，R12V280凸轮轴业已采用酸蚀检测的无损快速方法进行淬硬层的全表面检测（酸蚀检测的工艺已有另文说明，参见《淬硬表面的快速无损检测方法与常见问题探讨》）。

扫描二维码，关注双工位整根凸轮轴同时淬火技术



结语

综上所述，经不同方案比较，调质+感应淬火的工艺方案已成为我公司大功率柴油机的设计与加工主流。

MW 20141112