

汽车关键件表面强化工艺及质量控制

□上海大众动力总成有限公司/朱正德

为了使汽车动力总成中曲轴、连杆和齿轮等关键件能适应高速、高载荷和交变负荷下的工况，就必须施以零件表面强化工艺，而感应淬火、渗碳和滚压等强化处理，已成为企业广泛应用的主流工艺。随着企业对产品质量的日益重视，利用相关专业标准规范工件表面强化质量的检测与评定，以提升对产品质量的监控水平已成趋势。

表面强化工艺在汽车关键件生产中的应用

由发动机、变速器等组成的动力总成是机动车中最重要的总成之一，其中的曲轴、连杆和齿轮等又是在恶劣工况下，承担动力传递的关键零件。现今，感应淬火、渗碳淬火等热处理、化学工艺，以及滚压、喷丸等机械强化处理，已成为生产企业实施表面强化的主流工艺，并获得了广泛应用。

自20世纪80年代以来，感应热处理已成为汽车制造业中大量重要零件表面强化的一种主要手段。鉴于这些工件中极大部分的强化只需表层硬化，而内部不允许硬或脆，为此就需采用表面淬火的热处理工艺。而感应淬火则是利用交流电的集肤效应，使涡流集中在工件表层，达到只加热表层的目的，至于感应加热时的淬火介质和加热之后

的冷却方式则可有多种情况。为了进一步满足工件表层关键的使用性能，例如高耐磨或高耐腐蚀性，若采用普通材料做基体，而用化学热处理的方法使表层合金化，就能达到既提高了相应性能，又节省费用的效果，渗碳则是其中最常用的一种方法。

渗碳淬火是以变速器齿轮为代表的众多重要零件表面强化的主流工艺。那些表面被渗碳的钢，一般都是含碳量较低的低碳钢或低碳合金钢，具有较好的渗碳工艺性。发动机中那些关键件，如曲轴之类的旋转件，其工作环境虽极为恶劣，但主要表现为在交变载荷状态下，工件将会承受着的很大弯曲应力和扭转应力。其性质显然与上述变速器齿轮的情况有所不同，因此，对于材质以球墨铸铁为主的小排量汽车发动机曲轴，基本都采用轴颈

（主轴颈、连杆轴颈，及轴前端、输出端）感应淬火，而轴颈与曲柄间的过渡圆角处则采取机械滚压表面强化的路线。另外，对材质主要为锻钢的用于重载车等场合的中、大排量发动机（尤其是柴油机）曲轴，执行的是对整个工件进行感应淬火的工艺。当然，也有些生产球墨铸铁曲轴的企业，实施等温淬火工艺过程中，又加上一道喷丸强化，从而有效地提高了曲轴的疲劳寿命。

一档从动齿轮是变速器中一种重要零件，在某外资企业的一款轿车变速器产品中，齿轮采用的材料为低碳合金钢27MnCr5JV，执行的热处理工艺为碳氮共渗淬火。必须指出的一点是，之后往往还会安排一道后续清理抛丸工序，包括：零件经过碳氮共渗+淬火处理后，根据产品对最终零件表面的残余应

力要求，分别采用强化抛丸、喷丸等处理方式，使零件表面一定深度（一般要求达到 $30\mu\text{m}$ ）处的残余压应力能达到一定值。从而通过附加少量的抛丸残余应力，提升了零件表面的疲劳性能。

零件经表面强化处理后的质量监控

1. 相关标准的推出及评定

为了适应现代汽车制造业批量生产方式的需要，行业以专业标准的形式，确立规范的技术指标和检测方法，对表面强化处理后的零件做出较为客观的评价。现今，企业遵循的标准大致有两类：覆盖利用表面硬化处理的所有零件的通用标准；针对某些具体的零件，如曲轴、齿轮等而制订的专业标准。前者一般由国家或国际标准化组织（ISO）等机构提出，并相互借鉴、融合。如国际标准化组织于2002年推出的ISO 2639-2002《钢件渗碳淬火硬化层深度的测定和校核》，就是参照了英国国家标准BS 6479:1984后制订的。我国在2005年发布的国标GB/T 9450-2005是在ISO 2639-2002的基础上形成的，而稍后出现的行业标准JB/T 9204-2008《钢件感应淬火金相检验》，其实是国标GB/T 9450内容的延伸。相比之下，后者中的那些针对性更强的专业标准，在国外基本上都是由一些大企业集团，如德国大众、法国雪铁龙、美国通用等所制订，且推出时间较前者晚了不少。像大众汽车的VW50019就是一个面向经表面硬化处理后的变速器中传动件有关特性的标准，自1999年

颁布1.0版后，2011年6月颁布最新版为第5版。而PV1069-2013则是一个关于球墨铸铁曲轴经感应淬火后，对表面硬化层进行相关试验的专业标准。但在国内，仍然是以国标或行业标准的形式出现，如GB/T 23339-2009《内燃机曲轴技术条件》即是一个颇有代表性的例子。可以看到，汽车行业对该质量监控标准重视程度的持续提高。

现今，国内大多数有外资背景的汽车主机或总成厂，都是执行其母公司的相应规定，并要求其配套件供货商也必须遵照这些标准。例如，上海通用生产的变速器，其中的齿轮均外购自某国企，为此他们就会对该配套厂提出明确的供货（验收）要求。而大部分国企和民企中的主机厂和总成厂，则往往都是选用相应的国标，再结合自身的实际情况，然后拟定出有针对性的检测和评价指标，作为动力总成生产及监控关键零件质量的重要依据。当他们在承担一些外资企业的配套任务时，就如前所述地必须入乡随俗了。至于国内还有相当数量的专业零部件厂，对于他们生产的产品需要达到的技术指标和验收方法，则完全取决于它们所配套的主机厂或总成厂所提出的要求。

2. 评定步骤和主要内容

变速器中齿轮、发动机中曲轴等重要零件，在经过表面强化处理后，对其质量进行评定的步骤和主要内容：表面强化处理→工件化学成分→硬化层硬度分布→硬化层金相组织→机械强化区域的残余应力。

在此需说明的是，对上述工艺过程的监测，本质上属于对零件

制造质量的一种评价。而上述中的“化学成分”取决于毛坯，因此这一指标虽然很重要，对表面强化处理的结果会有直接影响，但并非是本文叙述重点。至于评定依据，国内外均有相应的标准予以明确规定，如德国大众汽车的TL124-2010就是一个主要针对发动机曲轴和轴承盖等零件所用的球墨铸铁的标准，而TL4521则是一个专门用于变速器齿轮等传动件的低合金钢的标准。对应的，现今国内的材料标准也已相当完善，加上工件材料的成分分析测试是较单一，生产厂还可利用、借助公用实验室或毛坯供货厂商的相应测试手段。

典型案例解读

1. 对改进产品和工艺有推动作用

输入轴是某国有企业所生产的变速器中一种重要零件，所选用的材料为20CrMo低合金钢。在对其实施热处理工艺时，采用VKES5/1型多用途可控气氛热处理炉进行渗碳淬火和低温回火。要求其表面硬度为 $(82\pm 2)\text{HRA}$ ，心部的硬度为30~45HRC，有效硬化层深度为0.5~0.7mm。该零件呈长轴状，各段的直径差别较大，之后在对工件的检查中发现，其中部比较粗的部位硬化层深度和表面硬度均低于规定的要求。分析后认为，渗碳温度和碳势给定相对较低是关键的影响因素，由于淬火温度偏低，使溶入奥氏体的含碳量不高，导致了工件表面硬度不足、工件表面容易出现硬度软带，以及硬化层深度的不合格。

为此采取的三步措施为：

(1) 在渗碳淬火前增加预氧化工序，先将工件加热到(400±10)℃，再保温、冷却使其表面残油被清除的同时，形成一层很薄的氧化膜。

(2) 渗碳温度从原来的890℃提高到930℃，而碳势设定由1.05%提高至1.08%。

(3) 确定合适的淬火温度，兼顾了心部的硬度指标，及避免在硬化层出现粗大的马氏体组织等不利因素产生。最终将淬火温度由840℃调整为830℃，碳势设定则仍按原温度设定值给定的0.85%℃。

最终，在执行经过改进的渗碳淬火工艺后，所生产的变速器输入轴的各项与热处理相关的质量指标已得到了有效的控制，见表1。

由表1可见，企业为确保所产重要零件经表面强化处理后的质量能满足产品的技术要求，根据其产品特点在标准GB/T 9450-2005的基础上做了完善和修改。其中新增的表面硬度和硬化层、心部金相组织是关键质量指标，但对于心部硬度做评价时，则未按硬度梯度曲线的方式，而是采用简单的中部区域重复检测。

事实上，国标GB/T 9450-2005所解决的问题乃是较为单一的，即

明确了钢制零件经渗碳淬火及碳氮共渗后硬化层深度的定义，并规定了检测和表达结果的方法。而生产厂家为了对自身产品进行更有效的监控，往往在关键零件图样上以“技术条件”的形式增添了相关项，对检测要求予以明确和规范。

2.专业标准有效提高工件的抗失效能力

如前所述，与国标GB/T 9450-2005这样的通用标准相平行、主要由欧美一些大企业集团推出的专业标准，在国内的应用也相当普遍，影响也很大。与前者相比，专业标准针对性更强，其内容的表述更详细和具体，虽然这给实际操作人员提出了更高的要求 and 更大的工作量，但与此同时也提升了评定的价值，特别是由此将能有效地提高工件的抗失效能力。

就发动机曲轴检测来说，按“大众汽车”体制下的规定，务必参照相应的标准、即按照PV1069-2013这个“感应淬火热球墨铸铁曲轴表面硬化层的相关试验”专业标准的要求，对曲轴进行检测。图1给出了被测试工件的受检部位，覆盖了工件的所有区域，除了连杆轴颈(PL)、主轴颈(ML)这两个最重要的部分外，包括轴端

(Za和Po)和法兰(FL)也被监控；还根据受力特点，分别对轴颈上、下两个方位(即图中的OT和UT)进行监测；至于圆角，还强调了务必测出对应(主轴颈或连杆颈)的左右两处。

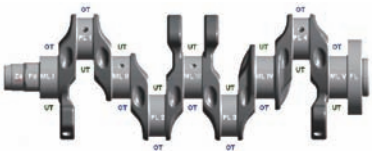


图1 被测试曲轴的受检部位示意图

表2是对某一工件进行表面硬化层的测试后部分结果的列表。从中可见，对于这一大类的球墨铸铁曲轴，硬化层的深度均要求控制在1.8~5.2mm。硬化层深度的定义与GB/T 9450-2005的表述是一致的，只是通用标准中边界值规定值为450HV，而在这里规定值为325HV(打点时的间隔和逐点测试硬度时的负载由企业自定，硬度梯度曲线见图2)。另外，对应的金相组织的评定也是相当严格的，除了需在报告中有如表1简单说明外，均要求附有各个被检位置的金相图。在这方面，一些大品牌的汽车企业做得更为规范。

需要强调的一点是，相比变速器里的齿轮类零件，发动机曲轴、连杆之类的旋转件的工作方式和受力情况还是有很大差别的，这也决定了两者所定的主要评价指标的不同，在上述的曲轴检测中，就没有再把表面硬度作为一项评价指标。

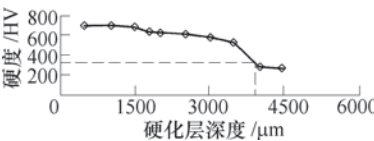


图2 根据硬化层深度逐点测试法绘制的硬度梯度曲线

表1 二种工艺状态下对输入轴硬化层的测试结果

	硬化层深度/mm	硬化层金相组织	心部金相组织	表面硬度/HRA	心部硬度/HRC
质量要求	0.5~0.7	高碳马氏体+碳化物+残余奥氏体	低碳马氏体+少量游离铁素体	82±2	30~45
原工艺	0.39~0.471	高碳马氏体+碳化物+少量残余奥氏体	低碳马氏体+极少量游离铁素体	78.0 77.5 76.0 80.5	32.0 31.0 35.0 30.0
改进后工艺	0.625~0.641	高碳马氏体+碳化物+残余奥氏体	低碳马氏体+少量游离铁素体	83.5 81.5 82.5 83.0	34.0 36.5 35.5 38.5

残余应力分析——验证表面机械强化效果的有效方法

在上述的零件表面强化质量的评定内容中，最后一项是关于机械强化区域残余应力的测试。为了提升变速器齿轮类零件的疲劳强度和使用寿命，在编制工艺时，均会添上一道后续的“喷丸”工序，以增加工件表面对塑性变形和断裂的抵抗能力，事实证明这是一种十分有效的方法。

同样为了提高发动机的核心件曲轴的抗疲劳强度，特别是弯曲强度，在工件的危险部位，即曲柄与轴颈的交汇圆角处，实施了“滚压”工艺（见图3）。

由于圆角处的材料在滚轮的

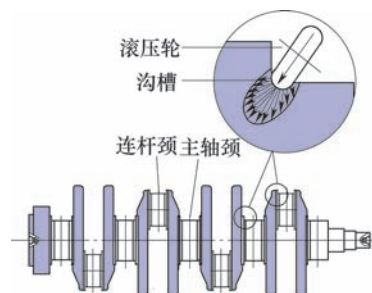


图3 曲轴的圆角滚压工艺

变形并试图向外流动，而因为受到周围未发生塑性变形材料的约束，处于受挤压状态，一旦当外力撤除后，就会在圆角表层塑性变形区域形成一个残余压应力场。据此，有时还作为一项额定的技术指标。

欧美的一些大企业集团推出的专业标准中，对于实施喷丸工艺后，通过残余应力分析方法，对进一步强化的表面状态均提出了要求。国内一家外资主机厂就明确规定，变速器主动齿轮在齿根处的压应力在800MPa以上，从动齿轮400MPa以上。当然，多数专业标准会要求以更形象的方式，即残余应力沿深度方向的变化曲线（见图4），同时辅以对应的以表格形式呈现的应力检测报告。

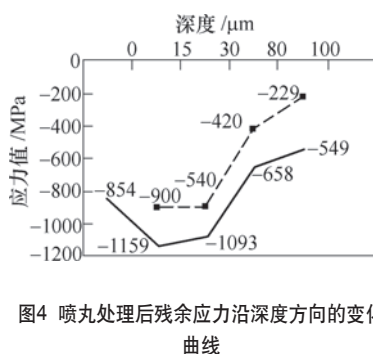


图4 喷丸处理后残余应力沿深度方向的变化曲线

对产品质量严格而著称的德国大众汽车在这方面更完善，除了

上述曾提到过的面向变速器传动件的有关特性的标准VW50019外，还有一个专门表述残余内应力测量的标准PV1005-2005，具体介绍了包括取样、测试在内的各个步骤。如今大众集团在中国的所有变速器主机厂和总成厂，无论是独资还是合资，均已被要求在工厂的实验室中配置残余内应力测试设备，除了在新产品开发和产品认可，以及在零部件失效分析时发挥作用外，更多的还是用于批量生产中的质量监控。

例如，在一个专业的变速器总成制造厂，抽检就是根据喷丸工序而定的，一般是每个班次抽取1件送实验室。相比之下，残余应力分析方法在曲轴、连杆等关键件中，主要还是用于产品和质量分析，很少作为生产中的监控手段使用。究其原因，近年来，即使在大众集团，在同样的投入下，企业都会添置直接反映产品性能和适应性的专用疲劳试验机，以抽检方式实施对那些工件的质量监控。

结语

感应淬火和碳氮共渗，以及滚压、喷丸等虽是成熟的表面强化工艺，但为了能够规范地确认零件表面的强化质量能否真正满足零件的使用要求，还是必须以某个由厂方所规定的标准作为检测和评价的依据，然后严格地执行。只是在具体操作中，对于按照国标行使的国企、民企来说，还需要按自身产品的情况增添些测试内容，从而形成最终被实际使用的产品所验证了的、且行之有效的监控措施。

AUTO1950

表2 曲轴表面硬化层的测试结果（部分）

（单位：/mm）

序号	目标值	轴颈面实测值	圆角实测值	评价
HL2OT	1.8~5.2	3.2	5.1/1.9	i.O.
HL2UT	1.8~5.2	2.9	3.7/2.4	i.O.
HL3OT	1.8~5.2	3.2	2.2/2.7	i.O.
HL3UT	1.8~5.2	3.3	2.9/2.4	i.O.
PL2OT	1.8~5.2	2.9	2.6/2.8	i.O.
PL2UT	1.8~5.2	3.4	1.7/1.7	n.i.O.
ZA	0.5~2.5	2.5	—	i.O.
PO	0.5~3.5	1.9	—	i.O.
FL	0.5~2.5	2.4	—	i.O.