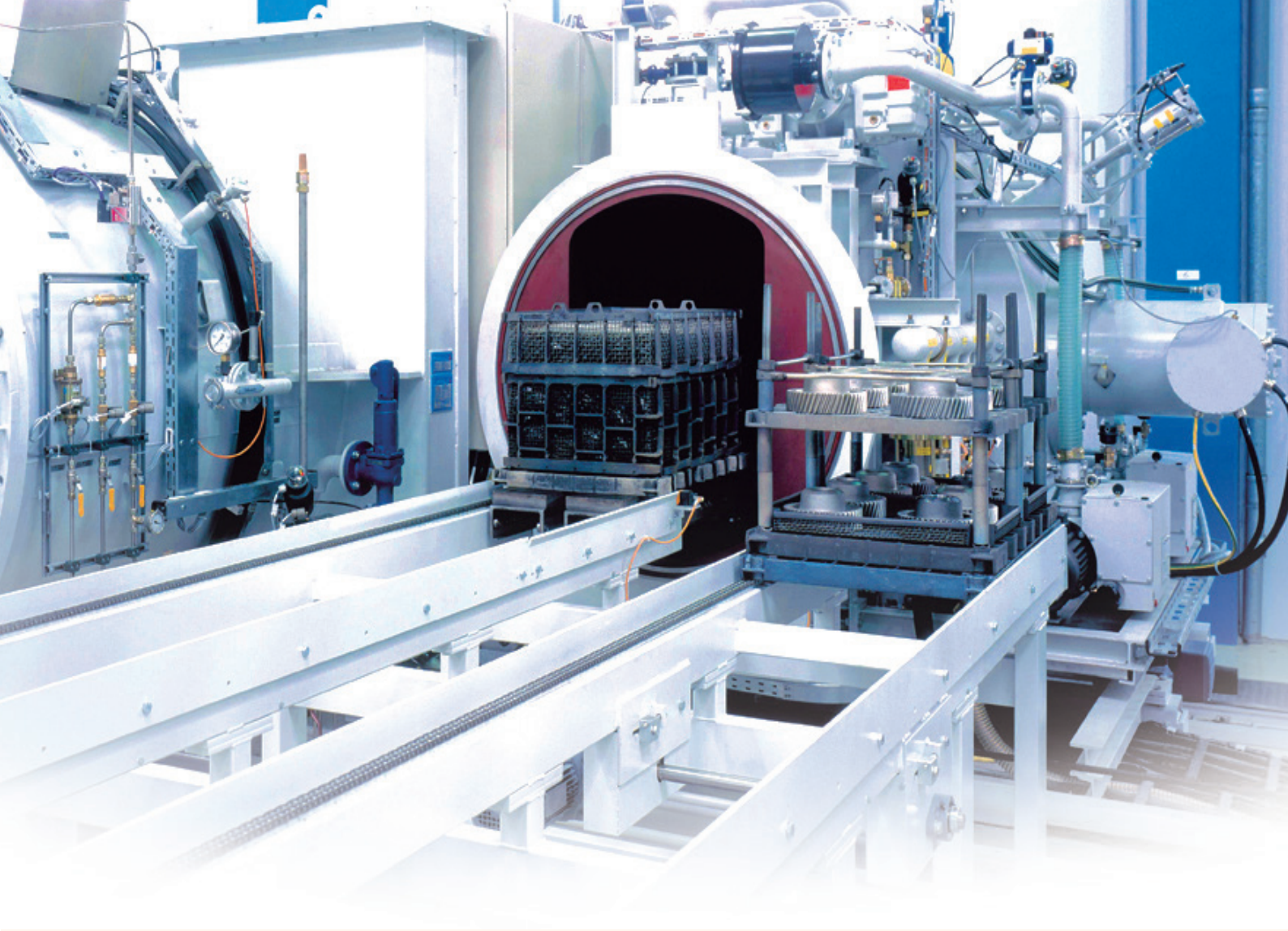




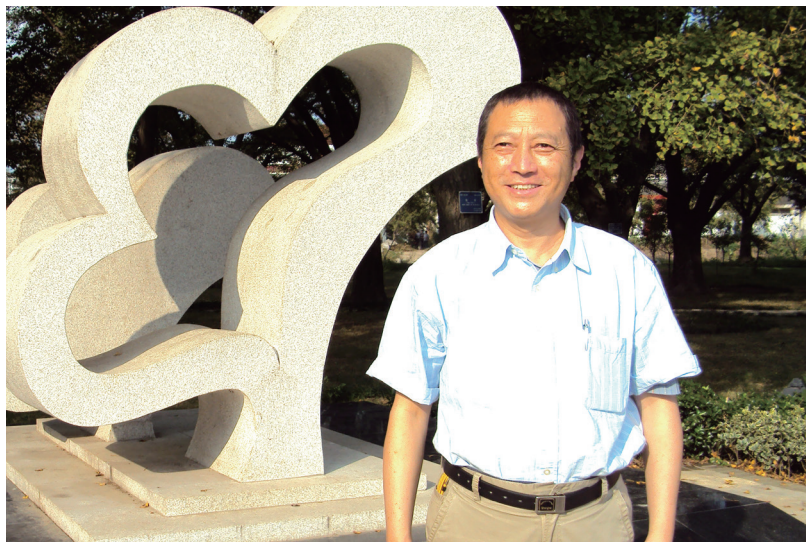
汽车零部件专题

汽车零部件的热处理最终的目的就是得到长寿命、合格的零部件，围绕这个目的展开，本期主要安排了变速齿轮表面强化的质量控制，弧齿锥齿轮压淬合格率的提升措施，后桥稳定杆螺栓、副箱加长中间轴的断裂失效分析，以及汽车零部件热处理系统评估的应用，希望对大家有所帮助。

栏目主持：朱光明

确保渗碳淬火变速器齿轮表面强化的 质量监控措施及应用

□ 上海大众动力总成有限公司 朱正德



朱正德 教授级高级工程师

变速器是汽车的一个主要部件，被称为轿车的五大总成之一，而变速器齿轮又是实现动力传递的关键零件。更由于它们长时间处于高速、高载荷和负荷不断交变的工况下，故除了会产生正常的磨损外，还会在润滑油的品质、润滑条件、齿轮装配时啮合位置偏离，以及驾驶者偶然的操作不当，都可能造成加速变速器齿轮的损伤。虽然磨损的形式有很多种，如齿面磨损、齿面胶合、齿面点蚀，乃至最严重的齿

轮断齿等失效形式，然而即使是最易引起的齿面磨损，随着运行时间的增加也会导致变速器的工作异常，一旦达到严重的程度，也会造成车辆在瞬间失去动力，从而发生安全事故。

一、渗碳淬火工艺在变速器齿轮生产中的应用

1. 渗碳淬火工艺及其应用概况

现今，渗碳淬火工艺已成为

摘要：汽车变速器齿轮是实现动力传递的关键基础件，而渗碳淬火作为零件表面强化的主流工艺，也已在企业获得了广泛应用。为确保其表面的强化质量，这些年来通过各类途径已推出了多种相应的标准，以规范对这些零件经渗碳后的质量控制。以几个不同类型的企业为例，详尽又具体地介绍了如何在正确执行表面强化工艺的前提下，通过规范的测试和评价方法，以对表面强化质量实施有效的监控。

关键词：变速器齿轮；渗碳淬火；显微组织；硬度梯度

包括汽车变速器齿轮在内的众多重要零部件表面硬化的主流工艺，其使生产出的零件具备了高硬度的表面以及与之匹配的强韧性的心部，因而有效地提高了零件的承载能力和使用寿命。简单地说，这种工艺方法是通过将处于渗碳介质中的工件，如齿轮加热到单相奥氏体温度区950℃附近，在保温一段时间后，使活性碳原子渗入钢件表层，从而获得表层高碳、高硬层，使齿轮的工作表面获得很高的硬度，大幅提

高其耐磨程度。事实上，动力机械中的那些关键零部件所必须具有的适应高负荷、良好的耐冲击性能、抵抗接触状态下的弯曲疲劳能力，以及由于很高的表面硬度而拥有很好的耐磨性等一系列特点，借助贯彻合理的渗碳淬火工艺过程都能实现。

当然，由于在产品的用途和技术要求上差别较大，即使都是汽车变速器，由不同企业（包括同一个工厂）生产的各类产品中的齿轮，所制订的渗碳淬火工艺往往是不一样的。甚至与同一款变速器产品里几种不同齿轮相对应的热处理工艺，相互之间也会有所差别。然而，所执行的渗碳淬火工艺的基本要素是相同的，主要反映在一些工艺参数，如设置的温度、（淬火持续）时间等，以及是否在可控气氛的环境下完成热处理过程。此外，在实施“渗碳”方面，不少企业还采用了碳氮共渗工艺，而要求达到的目的显然是一样的。下面，通过几个典型案例来进一步了解这种热处理工艺的概况，它们均来自国内的一些主流变速器生产企业。

2. 渗碳淬火工艺在变速器“一档从动齿轮”生产中的应用

一档从动齿轮（见图1）是汽车变速器中很重要的一种零件，而图1是某外资企业的一款轿车变速器产品中的这种齿轮示意。

该齿轮采用的材料为27MnCr5JV，所执行的热处理工艺为碳氮共渗淬火。具体来说，就是将齿轮置于 Aichelin公司的

可控气氛连续炉中，在870℃左右的温度进行碳氮共渗淬火。通过采用好富顿生产的MT2565等温淬火油（160℃热油）来淬火。在运行上述热处理工艺过程时，碳氮共渗乃是以N₂、甲醇为基础可控气氛，再以丙烷作为富化气，同时加入少量氨气提供N原子。碳势控制：其中的强渗区为0.78%，而扩散区则为0.76%。

此外，往往还会为经强化工艺后的齿轮安排了后处理工序，一般为“清理抛丸”，目的是为了清除零件表面的淬火油、氧化皮和机加工产生的毛刺，同时附加少量的抛丸残余应力。具体的做法是：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（一般要求的深度为30 μm）处残余压应力能达到一定的要求值。通过强化抛丸或喷丸能够提升零件表面的疲劳性能。而实际上，根据炉内设置的温度，以及零件在炉内保温时间的不同，齿轮将可能获得不同深度的硬化层和相应的硬度值。

3. 用于变速器输入轴的热处理工艺

汽车变速器中的输入轴也是变速器的一个关键零件，在

该厂的设计中所选用的材料为20CrMo低合金钢。而其加工工艺路线为：锻造→等温退火→粗、精机加工→渗碳淬火、回火→清理抛丸→校直工序→精磨轴颈→装机。

类似地，变速器中的这一重要零件也是被置于一台VKES5/1型多用途可控气氛热处理炉中，用以进行渗碳淬火和低温回火，淬火冷却介质为好富顿生产的MT355分级淬火油。要求其表面硬度为（82±2）HRA，心部的硬度为30~45HRC，有效硬化层深度0.5~0.7mm。该零件呈长轴状，各段的直径差别较大，然而在对接上述（热处理）工艺运行后的工件检查中发现，其中部比较粗的部位的硬化层深度和表面硬度均低于规定的要求。根据输入轴的结构特点，工厂的专业部门认为，渗碳温度和碳势给定相对较低乃是关键的影响因素，正因为淬火温度偏低，使溶入奥氏体的碳量不高，从而导致工件表面硬度不足，工件表面容易出现硬度软带，以及硬化层深度不合格。

为此采取了以下的针对性措施：

（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

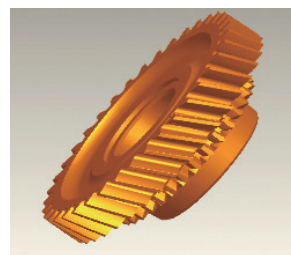


图1 变速器一档从动齿轮示意

使其表面残油被清除的同时，形成一层很薄的氧化膜。在渗碳时，气氛中的碳优先将氧化膜还原成具有很强表面活性的新生态铁，其可以促使碳在工件表面的吸附，实现了“催渗”。

(2) 通常情况下，渗碳温度为880~930℃，温度的提高可使碳在钢中的扩散速度加快，有利于碳的吸收和扩散。另外，还可以增加碳在奥氏体中的溶解能力，确保了渗碳淬火后工件有效硬化层的深度及均匀性。据此，渗碳温度从原来的890℃提高到930℃，而碳势设定由 $C_p=1.05\%$ 提高至 $C_p=1.08\%$ 。

(3) 确定合适的淬火温度，兼顾了心部的硬度指标，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℃，碳势设定则仍按原设定值给定的 $C_p=0.85\%$ 。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均得到了有效的控制。

二、判断渗碳淬火变速器齿轮表面强化质量的依据和方法

1. 相关标准及其在评定变速器齿轮表面强化质量中的重要性

那么又该如何对变速器齿轮等关键零件，在经过渗碳淬火、碳氮共渗等热处理工艺后，其表面的强化状态满足要求呢？为了能适应批量生产的汽车工业为标志的现代制造业的需要，就必须



以标准的形式，确立规范的技术指标和检测方法。这样就可统一的基础上，对工件表面经过强化处理后的状态和质量，做出较为客观和一致的评价。

现今，企业遵循的标准大致分为两类：①覆盖经过表面硬化处理的所有零件的通用标准。②针对某些具体的零件，如变速器齿轮等而制定的专业标准。前者均由国家或国际标准化组织（ISO）推出，像德国工业标准DIN 50190-1-1978（即“热处理零件硬化层深度的检测”）和英国国家标准BS 6479：1984即是其中有代表性的两个。事实上，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》，也正是参照了BS 6479：1984之后才制定出来的。而我国2005年发布的国标GB/T 9450—2005则是对ISO 2639—2002稍做修改形成的。相比之下，后者中的那些指向性、针对性很强的专业标准，基本上都是由欧美的一些大企业集团，如德国大众、法国雪铁龙、美国通用等所制定，且推出

时间较前者晚不少。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1999.06颁布1.0版后，最新版为2011.06推出的第5版，充分反映了自21世纪初以来，随着汽车制造业的产品必须满足市场和不断提升的安全性、节能、减排的需求，而对这个问题重视程度的提高。

国内大多数有外资背景的汽车主机厂或总成厂，在实施上述监控时，都是执行其母公司的相应规定，并要求配套件的供货商也必须遵照原厂的标准进行生产。譬如，“上海通用汽车”虽然也生产变速器，可其中的齿轮均外购自某国营企业，为此主机厂就会对该配套厂提出明确的生产、供货（验收）的技术要求。而大部分国企和民企中的主机厂、总成厂，则往往都是选用国标GB/T 9450—2005作为变速器生产及监控产品质量的重要依据。不过，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齿轮

厂，对于他们生产的产品需要达到的技术指标和验收方法，则完全取决于其所配套的主机厂或总成厂所提出的要求了。

2. 标准内容具体化及示例

经对国标GB/T 9450—2005审读后发现，就如其题目所言，该标准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。显然，从一个企业对于产品中的关键零件进行有效监控的角度看，这是不够的，故不少工厂已明确地以“技术要求”的形式增添了相关项，并事实上在整个行业中取得了共识。下面就以本文上一节中的第二个案例来做个说明，如表1所示。

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、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。

三、典型案例的深入解读及其启示

1. 监控内容从提升齿轮抗失效和稳定强化工艺的目标出发

众所周知，变速器齿轮的失效模式主要有齿面磨损（齿面胶合、齿面点蚀本质上属此范围）和齿轮断齿这两类，后者主

要发生在齿根，据此来确定齿轮硬化层检测的位置。在上文中的那家外（法）资的汽车主机厂，按照某种产品图样即可确定碳氮共渗后齿轮硬化层的检测应主要为齿侧和齿根，他们的定义详见图2。如图2所示，齿轮单齿高度定义为 H ，齿侧定义为齿面上距离齿顶 $H/2$ 位置；从齿顶中心区域画垂线，与齿两端齿根圆切线的交点，即垂足，定义为齿轮心部齿顶中心点与齿根画切线，切点定义为齿根。

至于硬化层深度的检测方法如图3、图4所示，从齿轮0表面开始，垂直于0表面每隔 $50\mu\text{m}$ 打一个维氏显微硬度（载荷 $\text{HV}0.5\text{N}$ ），至维氏显微硬度值

为 650HV 处，该位置距0表面的距离即为硬化层深度 $\text{EC}650$ 。事实上，就这个定义而言，与GB/T 9450—2005、即ISO 2639—2002中的表述是一致的，只是该通用标准中的边界值规定值为 450HV ，而打点的间隔，也就是相邻两硬度值间的距离应 $\leq 100\mu\text{m}$ 。载荷范围则控制在 $\text{HV}0.1\text{N}\sim 1\text{N}$ 之间。由这家法资

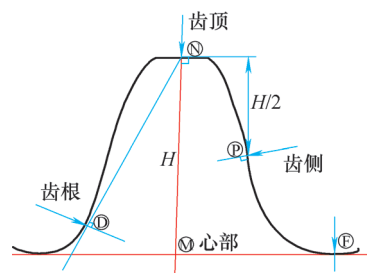


图2 典型齿轮关键受检部位示意

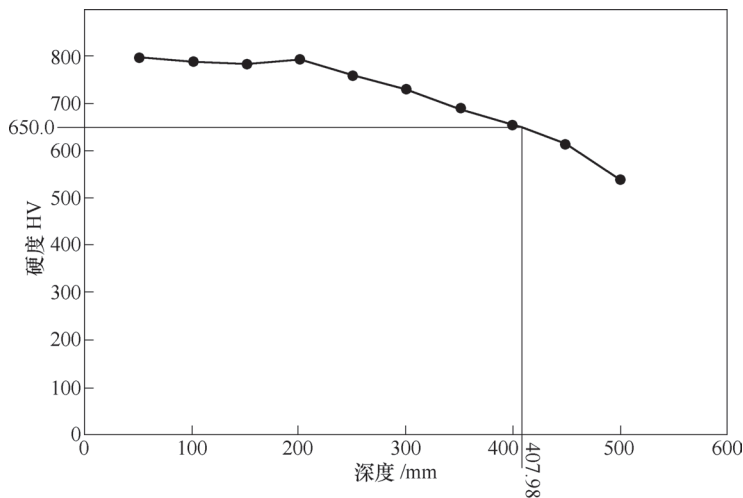


图3 硬化层深度梯度曲线

表1 两种工艺状态下对输入轴硬化层的测试结果

项目	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+残留奥氏体	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+少量残留奥氏体	低碳马氏体+极少量游离铁素体	78.0	77.5	32.0	31.0
				76.0	80.5	35.0	30.0
改进后工艺	0.625~0.641	高碳马氏体+碳化物+残留奥氏体	低碳马氏体+少量游离铁素体	83.5	81.5	34.0	36.5
				82.5	83.5	35.5	38.5

汽车工厂的母公司制定的专业标准中还进一步对齿轮硬化层区域的金相组织提出了明确要求,与表1相似,也包括表面和心部,前者为M或M+A',而后者则为M或M+B。

另一个值得称道之处是为了提高执行强化工艺时的稳定性,制订了科学的检测、监控项目和频次。

由于变速器产品齿轮的碳氮共渗是采用推盘式连续炉进行大批量生产,这种连续生产的方式决定了无法对进炉的每个批次进行跟踪检查。对于一台连续炉,检测、监控的要求如下:①每2h取出1个零件,进行表面硬度抽检。②每天取1个零件,对其金相组织、硬化层深度和心部硬度进行抽检。③对工艺过程参数的监控,每2h需记录一次炉温、气体流量、碳势等关键参数。④需要定期对淬火油进行标注特性分析。

2. 完整、详尽的检测和分析对改进产品和工艺的推动作用

如前所述,虽然大多数汽车主机厂、总成厂中的国企和民企,都是在遵循GB/T 9450—2005和其他的一些相应标准,如GB/T 4340.1《金属维氏硬度试验 第一部分 试验方法》和JB/T 9204—2008《钢件感应淬火金相试验》等的基础上,并结合自身产品的特点,进而再拟定出完整的检测要求。通过国内一家知名民营企业的汽车主机厂在这方面所做的工作,充分表明了在经过完整、详尽的检测和分析后,在推动产品和工艺的改进方面能发挥出积极作用。案例的对象是一款新能

源混合动力轿车所配变速器中的经感应渗碳淬火的行星齿轮,其材料为20CrMnTiH,所检测的内容、结果和结论可参见表2。

可见,表面硬化层深度低于标准,这一指标为不合格。但鉴于该齿轮的尺寸和齿形较小,故建议在技术条件不影响耐磨情况下降低有效硬化层深度,以防崩齿。至于渗碳崩齿原因,必须排

除氢脆沿晶断裂,但无相关设备验证。可以考虑在工艺中增加喷丸处理,以提高齿根部强度。

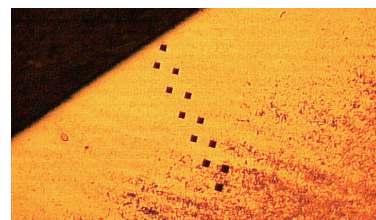


图4 维氏硬度金相显微照片

表2 对行星齿轮硬化层的测试结果

序号	检测项目	规定要求	检验结果HRC	结论
1	硬度试验	心部硬度30~45HRC	35.8、35.6、35.7	合格
2	硬度试验	表面渗碳层硬度56~62HRC	56.0、56.2、56.5	合格
3	有效硬化层深度	有效硬化层深度:用维氏硬度法,选择100g力负荷,测至硬度550处测量深度,要求 $\geq 0.3\text{mm}$ (仲裁法)	硬度法测试:有效硬化层深度 $D_c=0.18\text{mm}$	不合格,有效硬化层深度小于标准,齿轮有效硬化层仅0.2~0.3mm
4	金相分析	渗碳部位碳化物最好呈颗粒状或小块状分布,不允许呈网状连接。高碳马氏体针叶细小,残留奥氏体含量 $< 30\%$	渗层组织:碳化物呈颗粒状弥散分布,马氏体针叶细小(4级),残留奥氏体含量 $< 5\%$	合格

四、结语

渗碳淬火虽是一种成熟的表面强化工艺,但只有当其主要的工艺参数与被加工件的实际状况,如尺寸、形状和材料等相匹配时,才能取得预期效果。至于现今在实际生产中已较普遍应用的碳氮共渗工艺,也同样需要注意这一点。而为了能够规范地确认渗碳淬火后零件表面的强化质量,能够满足零件的使用要求,就必须以某个由厂方所选定的标准作为依据,然后严格地执行。只是在具体执行中,企业将会根据产品自身的实际情况增添些测试内容,从而形成了最终被实际使用的产品所验证了的一套行之有效的监控措施。

参考文献

- [1] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 9450—2005 钢件渗碳淬火硬化层深度的测定和校核[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [2] 宋德仁.球笼式等速万向节的感应热处理工艺[J].机械工程师,2013(11):163-165.
- [3] 胡本洋,等.变速器输入轴表面渗碳淬火工艺改进[J].汽车制造业,2014(8):50-51.
- [4] 殷铭,李俊男.汽车变速器齿轮渗碳质量测定[J].装备制造技术,2015(10):208-209.
- [5] 黄俊杰,等.某变速箱齿轮断齿分析[J].机械传动,2015(12):175-178.

MW 20160427