

零部件的磨削烧伤检测及应用分析

近期在汽车行业内进行的一次调研表明，多数企业虽然对磨削烧伤这一工艺现象的成因及其可能引起产品质量的影响有所了解，但总体来讲，无论在认识上还是在检测、评定等具体事宜的处理上都需要改进、完善和提升。

磨削烧伤的成因与危害

不同于其他的切削加工，广泛用于零件精密加工的磨削，由于被切金属层较薄，产生的切屑也少，加之砂轮的导热性差，因此仅有不到10%的热量能被切屑带走，而大约60%~90%的热量会传入工件。这些在很短时间内聚集在表层的热量形成局部高温，以致磨削区温度可达800~1000℃甚至更高，从而在表面形成极大的温度梯度。在磨削热、磨削力两者的综合作用下，引起了零件表层的金相组织变化并产生了残余应力，而这就是磨削烧伤的成因。鉴于由铁磁性材料制成的工件一般在磨削加工前都需经过热处理这道工序，借助在工件表面形成的马氏体组织，将能够提供足够的硬度。而磨削区很高的温升和很大的温度梯度会使金相组织发生变化，主要是因为只要当温度超过马氏体转变的温度，就将由于所产生的回火或退火现象引起金相组织的转变，而这会直接导致工件表面硬度不同程度的下降。另一方面，磨削过程中工件表面温度的急剧上升，以及之后的冷却直至最后冷却，会引起零件表层的热胀冷缩，这就造成了自工件表面至内部的各层产生各异的残余应力。若表面的残余应力呈现为拉应力的态势，且幅值又较大，那就埋下了质

量隐患。

若磨削烧伤发生于处在交变载荷工作环境下的旋转类零件，如发动机中的凸轮轴、曲轴、气门等，由于它们对工件的表面质量都有很高的要求，如凸轮轴工作表面硬度的下降就会直接影响其使用性能。而若经磨削后的工件表层存在较大的残余（拉）应力，虽然在它的幅值小于材料的强度极限时并不会致使表面开裂，但在交变载荷作用下，这一隐患很容易扩大，从表面的少数细纹发展为网状裂纹的扩张以至于相互连接，最终造成工件表面的剥落，从而使凸轮轴失去功能，直接危及运行中的发动机。

磨削烧伤的检测与评定

目前，企业一般选择和采用的磨削烧伤检测方法有以下几种：

(1) 目视法 也称观色法。由于零件表面存在磨削烧伤，会形成氧化膜，且氧化膜的颜色和厚度与烧伤的程度相关。随着因切削热而引起的温度升高，无论工件的材质是铸铁还是钢，氧化膜的颜色都会经历黄色、褐色、紫色、青色，最严重时为灰色。因此，检查人员只需通过仔细观察、识别零件磨削表面的色泽，就能对磨削烧伤的程度做出大致判断。

(2) 酸洗法 也称酸蚀法。即在被检零部件表面涂上酸液或将其浸入盛有按规定配制的酸液（典型配比为5mL浓硝酸配100mL乙醇）槽中。根据表面呈现颜色深浅的变化，对磨削烧伤的程度作出相应的判断。一般随着色泽变得越来越深，表示工件表面因温



度更高等原因，引起的磨削烧伤更为严重。

(3) 金相测试法 前面已对由于磨削区很高的温升和很大的温度梯度，从而导致零件表面金相组织发生变化的情况做了说明。就此也可理解为什么通过实验室里的精密仪器——金相显微镜进行金相组织测试，其实也是一种磨削烧伤的检测手段，且能对烧伤的程度作出判别。

(4) 硬度测试法 前面曾提到，当发生磨削烧伤时，工件表面可能会出现硬度的下降，因此通过硬度测试来验证确实是一种十分有效的方法。事实上，很多企业的图样对这项参数也都有明确的要求，甚至还被分解到不同的功能段（见图1）。但对这项指标的测试频次不高，且对这项抽检客观上所体现的监测磨削烧伤的功能也缺乏足够认识。

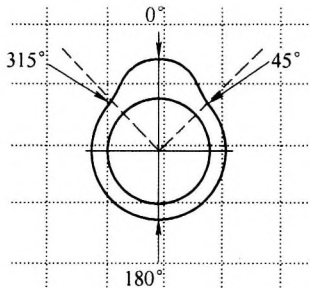


图1 凸轮表面硬度测试

以上几种方法中，前两种虽然直观且简单易行，但有很大的局限性，主要是两者均属于定性检查，无法对烧伤程度做出定量说明，更难以较精确地确定一个界限，用以对工件作出合格与否的区分。而在应用酸洗法时，工件表面经酸液浸蚀，即使为无问题的零件，之后也不能再加以使用，实际上执行的是一种破坏性检查，还会给企业带来一些必须处理的环保问题。金相测试虽然较精确，可必须在实验室利用专门的仪器，在进行检测前还需经过繁复的制样，故不可能成为一种常规监测方法。

依据前面关于磨削烧伤的成因表述，真正能确切且定量地反映烧伤程度的参数应该是工件表面的硬度和残余应力这两项。但行业调研表明，鉴于极大多数企业的产品图样上既未标注残余应力这项指标，也不具备在实验室利用X射线衍射的方法检测工件表面残余应力的能力，而面对工件表面的硬度检测也会碰到与金相测试类似的问题。以占很大比例的轴类零件为

例，多数情况下需要事先进行制样，这就会在较大程度上制约实际的抽检频次。综上所述，随着对产品制造质量的日趋关注和重视，企业很期盼有一种实用检测手段，能快速、有效地对磨损烧伤的程度进行定量的判断。

基于磁弹法的磨削烧伤检测及评定特征值 mp

能用于批量生产工件磨削烧伤测试的“磁弹法”是基于物理学Barkhausen效应的一种测试方法。图2是在此基础上开发的检测仪器的的工作原理示意图。

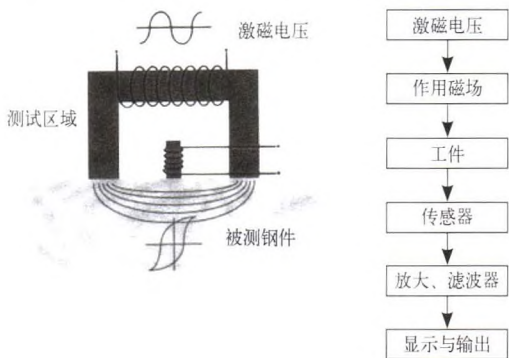


图2 BN法检测仪器工作原理示意图

磨削烧伤的物理表现主要为工件表面硬度的明显下降和在表面形成的较大拉应力，即残余应力。而图2所示的检测仪器对它们都能作出敏感的反应。图3a中的横坐标表示硬度值HRC，而纵坐标表示输出的Barkhausen检测信号幅值。随着被检工件表面硬度值由高向低变化，检测仪器输出的相应的信号幅值将由小到大，即硬度低对应的检测信号高，硬度高对应的检测信号低。仪器对表面残余应力的反应见图3b，从中可见当残余应力由小到到大，即由负压应力向正拉应力变化时，检测仪器输出的相应的检测信号幅值将由低向高变化。

上述仪器所产生的Barkhausen检测信号，如图3a和图3b的纵坐标所示，乃是Barkhausen磁弹法效应的一种量化表达，可以用评定指标、即特征值 mp 来标识。 mp 与被检测工件表面的变异状态，如硬度的下降量和形成的残余应力大小成比例，其数值能在仪器的屏幕上显示、输出。磁弹法本质上属于比较测量，为了能有效进行有效监控，就必须解决定标问题，即在磨削烧

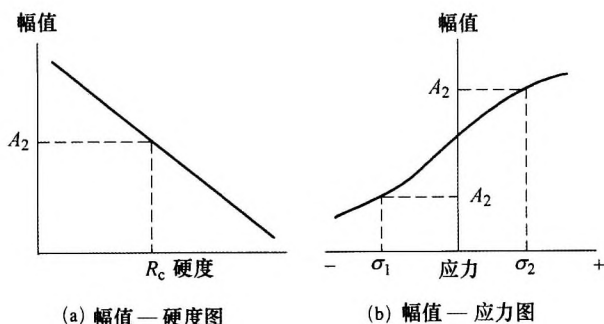


图3 BN法对磨削烧伤后硬度及残余应力变化的反映

伤严重程度表述已量化的基础上，准确确定合格的边界值。否则利用磁弹法就只能区分工件烧伤的严重程度，而无法对其合格与否作出判断。图4中，两个被测件显示在在 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 间的区域有超差情况，其依据即是由 $mp=60$ 这条合格品线决定的界限。

目前，根据磁弹法原理研制的检测仪器已产品化，但厂商在向用户说明上述问题的处理方法时，还是建议采用传统的酸洗法。为此，之前需先准备一批样品，尽量覆盖磨削烧伤程度不同的工件。在积累了一定样本的测得结果后，再按用户的评定标准对其作出不同评价，将介于合格/不合格临界状态的若干工件通过仪器求得相应的 mp 值，然后取其平均值作为合格与否的边界值。很显然，这种将定性检测结果经处理转换为定量评价的做法存在着不够严谨、准确性欠缺的问题，但相对而言，在业界现有条件下，这也确实还是一种既为企业比较熟悉，也在技术上较易于实现的途径。

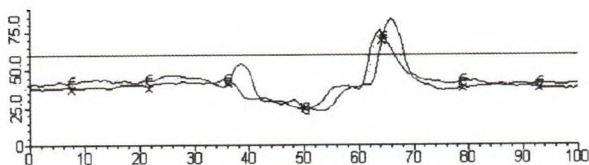


图4 检测结果(报告)示例

表面硬度和残余应力对磨削烧伤特征量定标的影响

正常情况下，工件表面、即磨削区域的残余应力表现为压应力，而其下的次表层、即非磨削区域则表现为拉应力。来自某大学基础实验室的相应测试结果

表明，前者的最大绝对值约为800MPa左右，而后者在900MPa左右。之所以存在着残余应力呈现为拉应力的隐患，原因主要是由冷却不当等因素造成的。众所周知，磨削过程中的冷却有三种形式：一是风冷，即采用干磨时的自然冷却；二是水基磨削液；三是油基磨削液。当采取第一和第三种冷却方式时，表面将呈现为压应力，此时可能存在着硬度下降的风险。而由于水基的冷却效果明显地优于油基，环保处理也简单，使用成本也低得多，因此应用十分普遍。但这时也隐含着另一种风险：鉴于采用水基磨削液后的冷却速度快，表面产生的二次淬火马氏体会增多，晶格变化、体积缩小，而它的下层则因冷却缓慢成为硬度较低的回火组织，从而增大了工件表面产生残余拉应力的倾向。当形成的拉应力超过了材料的强度极限，表面就会出现裂纹。

然而随着越来越多企业在凸轮轴、曲轴等零件的加工中采用CBN磨削技术，上述隐患正在不断减小。CBN磨料与其他磨料相比，有着更高的硬度和强度，切削刃更锋利且耐磨，因而具备了优化各种磨削参数的条件。砂轮线速度提升后，不但提高了磨削效率，还可明显地降低磨削力，随之磨削热也减小，从而工件表面的温度必然会相应下降。另一方面，自21世纪起，一些主流发动机企业在进行轴类零件的磨削加工时已出现了由油基磨削液逐渐取代水基磨削液的趋势，而执行干磨工艺的企业也在增多。这一切都表明，相比之下工件表面磨削烧伤表现为硬度下降的风险远远大于残余拉应力带来的风险。

结语

即使现今不少企业在对工件表面进行磨削烧伤监测时并未考虑到残余应力这一因素，暂时也尚无配备专业检测仪器，但只要实际运行的工艺是稳定的，并能认真履行所制定的其他日常检测、监控措施，尤其是需按图样上的要求进一步重视和加强对工件表面的硬度测试，也还是能较有效地实现相应质量目标的。

关键词：

磨削烧伤 检测手段 工艺因素

(收稿日期20130910)