

齿轮磨削烧伤检测方法研究现状及发展方向*

何宝凤, 魏翠娥, 石照耀

(北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心 北京 100124)

摘要:分析了齿轮磨削烧伤的危害,总结并比较了针对齿轮磨削烧伤的多种检测方法及其特点。根据检测与烧伤发生的时间先后,分为事先预防和事后检测的方法。事先预防的方法包括临界常数法、磨削力比法、磨削温度监测法、神经网络预测磨削烧伤;事后检测的方法包括酸蚀法、表层显微硬度法、金相检测法、变质层深检测法等无损检测方法以及目测法、X射线衍射残余应力检测法、成分分析法、涡流检测法、CCD图像法、磁弹法、声发射在线监测等无损检测方法。针对每种方法的研究进展,讨论了各种方法适用的范围和局限性,并进一步指出齿轮磨削烧伤检测的发展方向。

关键词: 齿轮;磨削烧伤;检测方法

中图分类号: TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Researching status and developing direction of gear grinding burn detection methods

He Baofeng, Wei Cui'e, Shi Zhaoyao

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The harm of gear grinding burn is analyzed and a variety of detection methods and characteristics of gear grinding burn are summed up and compared in this paper. These methods can be divided into prior detection methods and post detection methods according to the chronological order of the detection and grinding burn. Prior detection methods include critical constant method, ratio method of grinding force, grinding temperature monitoring, and neural network for predicting grinding burns. Post detection methods include destructive detection methods such as acid corrosion method, the surface microhardness test, metallographic test, metamorphic layer depth and nondestructive detection methods such as visual inspection, X-ray diffraction residual stress test, component analysis, eddy current testing, CCD image, magnetoelastic method, online acoustic emission monitoring. The research also investigated the existing detection methods for gear grinding burn, discussed the scope of applications and the limitations, and furthermore revealed the developing direction of detection methods for gear burn.

Keywords: gear; grinding burn; detection methods

0 引言

齿轮及齿轮产品是机械装备的重要基础件,它的应用已有百年历史^[1]。齿轮产品门类齐全,广泛应用于航空船舶、兵器装备、机床工具、工程机械和仪器仪表等20多个领域。随着国民经济的高速发展,我国齿轮全行业年销售总额已达到两千亿元。齿轮在磨削加工过程中与

砂轮的接触区会产生瞬时高温,大部分热量直接传到工件表面,很容易使工件表层金相组织、表层硬度发生改变,同时产生残余(拉)应力,这种现象称为热损伤亦称磨削烧伤。齿轮齿面的磨削烧伤会影响齿轮使用性能和寿命^[2],是制约精密磨削质量的一个关键因素。鉴于其严重的危害性,对磨削烧伤的预测和识别以及能否实现在线检测的问题一直是磨削加工领域研究的重要课题^[3]。有些齿轮虽然出现轻微烧伤但并不影响其使用性

能,但当烧伤达到一定程度就会存在很大的安全、性能隐患,带来不可估量的经济损失。为了更好地控制磨削烧伤,对烧伤齿轮及时地进行判别和筛选,避免烧伤齿轮带来潜在危害,对齿轮的磨削烧伤进行有效的检测非常重要。目前,齿轮磨削烧伤已有的检测方法如图1所示。随着工业化和智能化程度的不断发展,国内外学者也从未停止探索能够实现在线、定量、自动检测烧伤的新方法。本文将系统地介绍国内外现有的齿轮磨削烧伤检测方法的研究现状,并比较每种检测方法的特点、适用的范围和局限性。

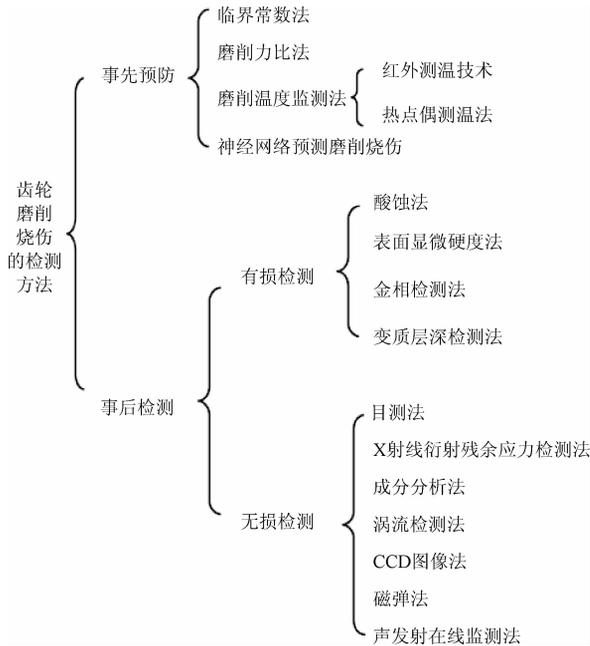


图1 现有齿轮磨削烧伤的检测方法

Fig. 1 Existing methods for gear grinding burn detection

1 事先预防

齿轮发生磨削烧伤后,其表面质量恶化,强度、塑性、硬度发生改变,如果在烧伤发生前可以进行合理的预测,将会很大程度上避免烧伤的发生。通过深入剖析烧伤发生的原理,从理论上求得烧伤发生的临界条件,然后依据临界条件采取相应措施或设定临界参数,在磨削过程中实时监测是否达到临界条件,以此来避免烧伤的发生,达到事先预防的目的。

1.1 临界常数法

临界常数法就是将工件与砂轮的参数通过一定的关系进行计算,将结果与一个确定常数进行比较,来确定这样工作条件下的工件和砂轮在磨削时会不会发生烧伤。1985年,日本的小野浩二等人^[4]就对磨削烧伤的事先预防进行研究并提出了检验是否发生烧伤的临界公式,发生烧伤的条件为:

$$vl = v \sqrt{\frac{t}{D^{-1} + d^{-1}}} \geq c_b \quad (1)$$

式中: v 表示砂轮线速度(m/min), l 表示工件与砂轮接触弧长(mm), d 是砂轮的直径(mm), D 是工件的直径(mm), t 表示切削深度(mm), C_b 是与材料传热率、密度、比热容及砂轮性质、冷却条件有关的烧伤常数(m·mm/min)。不同材料在不同热处理工艺下的临界常数 C_b 是各不相同的。 C_b 值越小,表示不发生烧伤的条件范围小,发生烧伤的条件就越容易满足,即烧伤越容易发生。

这种临界常数法针对不同工件和砂轮要求出许多 C_b 值,而无法反映出工件冷却和砂轮修整情况,接触弧长实际情况与理论值也存在差距,因此这种方法只能作为一种粗略的估算,对实际检测的指导作用不大。

1.2 磨削力比法

由于磨削时的磨削力与砂轮状态、磨削比能、磨削表面质量直接相关,因此可以将磨削力作为评定磨削状态的参数。磨削力 F 可以分解成互相垂直的3个分力—法向磨削力 F_n 、切向磨削力 F_t 、轴向磨削力 F_a ,其中 F_a 较小,基本可以忽略。

陈明等人^[5]借助八角环两向测力仪测量了镍基高温合金材料GH4169烧伤前后磨削力的变化,指出采用磨削力之比(F_n/F_t)可以排除由磨削用量的增大而引起磨削力增大的因素干扰。因此,磨削力比 F_n/F_t 可以作为磨削过程中的特征参量,可以进行烧伤的在线监测和预报。浦学锋^[6]通过Kistler三向测力平台测量表面硬化钢的磨削力,得到出现磨削烧伤的先兆及烧伤真正发生时的磨削功率与磨削力比的临界状态,从而监测这两个临界状态是否达到来实现磨削烧伤的预测。美国马萨诸塞大学Malkin S等人^[7]探究了碳钢和中低合金钢磨削烧伤阈值与磨削比能之间的关系,提出了测量磨削功率的方法,间接获取实际磨削比能,通过判断磨削比能是否超出烧伤临界值,从而判断烧伤发生与否。上述所提到的测量磨削力的方法都比较复杂,任敬心等人^[8]针对平面磨削力及外圆磨削力分别介绍了两种不同种类的电阻式测力仪原理及结构,使得磨削力容易测量和控制。

这种借助测量磨削力间接监测磨削功率是否达到临界状态的方法可以真实反映磨削烧伤发生的本质,但在实际中较难实现,临界状态均是实验所得,没有统一确定的标准,也无法进行批量检测。

1.3 磨削温度监测法

磨削温度与磨削烧伤有着直接的联系,磨削加工中有60%~95%的热量直接传给工件,这些热量聚集在表面层形成局部高温,超过临界值时就会产生工件表面热损伤^[9]。磨削区的温度可高达1500℃,而工件表面温度

能够达 900℃ 以上, 超出钢的相变温度 A_{c3} (720℃), 因而, 测量磨削温度是预测磨削烧伤发生与否较为直接的一种方法。

Wang Y 等人^[10]分类总结了磨削温度的测量方法现状、应用和工作范围。印度磨料研究中心的 Vedhavalil 等人^[11]提出了基于磨屑中的碳含量来间接监测磨削温度的方法, 为磨削烧伤的监测提供了理论依据; 刘国平等^[12]指出间接测量对于工件材料没有任何限制、无需破坏工件, 但是后续操作复杂并且难以得到准确的磨削温度及其变化情况。

对于磨削温度的监测, 国内外多采用直接测量法, 具体包括红外测温 and 热电偶测温两类。

1.3.1 红外测温技术

红外测温技术基本原理是发热物体会产生红外辐射, 这些辐射能量被光学系统聚集, 并通过光电探测器转化为电信号, 经过信号放大和处理可转换为温度值^[12]。目前主要有红外热成像法、红外辐射法、光纤红外测温法 3 类^[13]。

Hwang J 等人^[14]通过热成像系统对磨削温度进行测量找出了最高温度区; Brosse A 等人^[15]采用热像仪对磨削区温度进行测量, 分析磨削加工时的热源形状; Curry A. C. 等人^[16]将近红外光谱成像仪的探头深入工件的孔内, 通过光纤将信号传输到光谱仪中, 以得到磨削区的温度。

红外热成像法非接触、无损工件、响应速度快, 而且能够获得整个工件表面磨削区的温度场, 最适合工业上的应用。红外辐射法可以测得工件磨削表面的温度, 但只针对碗状砂轮, 此外还需在砂轮上钻孔, 因而很少应用。光纤红外测温法非接触、分辨率高、响应灵敏, 既可以测出砂轮温度也可测出工件的温度还可适用于温度变化很快的场合。

1.3.2 热电偶测温法

热电偶在磨削温度的测量中最为常见也最实用。其工作原理为: 直接将热电偶与工件接触, 采集磨削温度信号转换为电动势信号, 经过信号处理后传入计算机, 通过专用软件分析得出磨削温度值。

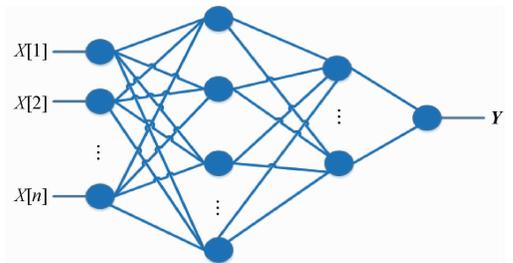
根据热电偶的位置可以分为埋丝法和夹丝法。法国梅斯国立工程师学院 Lefebvre A 等人^[17]利用夹丝热电偶测量了磨削过程的热量分布, 从而预测烧伤的发生; 德国汉诺威大学 Tonshoff H. K. 等人^[18]和 Teti P 等人^[19]研究磨削加工过程监测时将磨削温度与热损伤作为一项重要内容; Yang Z. S. 等人^[20]对比了上述夹丝法和埋丝法的优劣后指出我们需要一种非接触、无损、在线连续测量的手段-间接监测(过程监测)技术, 实现磨削温度与热损伤的监测。

热电偶测温属于接触测量, 不论是埋丝还是夹丝

的方法都会破坏工件, 影响工件内的热量分布, 对测量结果造成干扰, 且多用于实验室研究而无法实现在线测量。

1.4 神经网络预测磨削烧伤

人工神经网络(artificial neural network, ANN)是一种简单的计算处理单元-神经元为节点, 采用某种网络拓扑结构构成的活性网络, 不仅具有计算、记忆、智能处理的能力还具有很强的自学习、自适应能力^[21], 可以充分逼近任意的非线性系统, 学习适应不确定性系统的动态特性还可以快速进行大量运算, 并且有很强的容错性和鲁棒性。神经元主要的连接形式可分为前馈网络和反馈网络。最常用的误差反向传播(back propagation, BP)神经网络就是一种有隐含层的多层前馈网络^[22]。利用神经网络输入对磨削烧伤有重要影响的参量, 建立起磨削烧伤模型后即可预测磨削烧伤的发生, 如图 2 所示。



输入矢量 $X=[X[1], X[2], X[3], X[4], \dots, X[n]]$ 为影响伤的重要因素, 输出矢量 Y 为烧伤与否

图 2 预测磨削烧伤的神经网络模型

Fig. 2 Schematic illustrating the structure of an artificial neural network (ANN) for grinding burn predication

任敬心等人^[23]指出, 网络的输出层为单个神经元, 用一维矢量表征烧伤或未烧伤即可, 而输入层的神经元个数等于由磨削参数决定的输入矢量的维数。隐含层反映输入与输出复杂的映射关系。确定好神经网络后, 只需输入磨削参数即可预测磨削烧伤的发生与否。印度理工大学 Nathan N. R. 等人^[24]研究了磨削火花温度与磨削温度的关系, 并与工件直径及进给速度、磨削功率作为人工神经网络的输入实现了对烧伤的预测。Dotto F. R. L. 等人^[25]设计出了智能检测系统, 通过多层感知神经网络, 声发射和驱动电机功率为输入, 神经网络输出变量为烧伤发生与否。

这种基于神经网络实现磨削烧伤预测的方法依赖于输入的参量, 输入参量的确定对烧伤模型的建立是至关重要的, 既不能遗漏影响烧伤的重要参量, 又要结合实际使用情况。此外, 烧伤模型建立后, 必须经过大量样本训练才能使用, 训练实质是优化的过程。这个过程比较繁琐, 准确性和可靠性较差。

2 事后检测

事先预防的方法基于一定的理论基础,大多存在准确性较差的问题。一旦预防失效而发生磨削烧伤,还是需要结合事后检测的方法对工件进行判别和筛选,以便及时发现“潜藏的”烧伤工件。本文将事后检测分为有损和无损两类方法进行了阐述。

2.1 有损检测

2.1.1 酸蚀法

酸蚀法也称酸洗法或酸浸法,即将试样浸入到一定配比的酸溶液中,由于不同显微组织对酸蚀的敏感性不同,从而呈现不同的颜色。磨削烧伤一般是回火烧伤,产生回火索氏体,酸蚀后呈黑色;偶尔产生二次淬火烧伤,为淬火马氏体与其他少量组织,经酸蚀后主要呈现白色,在白色组织周围会分布着少量黑色组织^[26]。参考齿轮磨削后的浸蚀检验国家标准^[27],可以根据回火烧伤的颜色和烧伤面积的百分比来判定磨削烧伤的程度。表面色泽越深,面积越大,表示烧伤越严重。这种方法在工厂中普遍应用,但这是一种有损且产生污染的方法,会对试件造成破坏,经过酸洗后零件表面厚度会减小 0.001 ~ 0.005 mm,即使没有烧伤的工件也必须经过处理,否则有氢脆的危险,因此,酸蚀法只能作为一种抽样检验的方法。

2.1.2 表层显微硬度法

发生回火烧伤时工件表面显微硬度明显降低;产生二次淬火烧伤时,最外表面的显微硬度会提高但次表面的硬度仍会有所降低,并且硬度降低的程度与烧伤程度成正比。根据显微硬度计测出的显微硬度与基体作比较,判断是否发生烧伤及烧伤的类别和程度的方法称为表层显微硬度法。李强等人^[28]将淬火处理后的 42CrMo 钢进行不同温度的回火处理,得到的材料表面硬度 (rockwell hardness, HRC) 随温度的升高而降低;Ito R 等人^[29]对比了不同试样酸洗后截面的硬度分布,得到回火烧伤后的那一试件硬度显著降低;芬兰的 Santa-aho S^[30]用 Anton Paar 显微硬度测试仪附在 PhilipsXL30 扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 上并施加 20 g 负载,测出了试件表面显微硬度深度分布。该方法灵敏可靠,能检测到很细微的变化,还能测出显微硬度随烧伤层深度的变化情况。但是这种方法需要制作金相试样,费时费工且有破坏性,能区分出回火烧伤与退火烧伤,却无法区别出表面硬度的提高是加工硬化还是二次淬火烧伤引起的,故而只适用于进行少量抽样检查。

2.1.3 金相检测法

正常情况下,钢材经过淬火和低温回火后的显微组织是回火马氏体和残余奥氏体,但是磨削烧伤后的显微

组织会发生变化,通过光学或电子显微镜来分析材料金相显微组织变化,从而判断是否存在磨削烧伤的方法称为金相检测法。宋亚虎等人^[31]通过金相显微镜观察 17CrNiMo 渗碳齿轮的金相组织对烧伤程度进行分级,烧伤后的金相组织由回火马氏体变为了回火屈氏体或回火索氏体,而再硬化现象则产生了淬火马氏体;Gu B. P. 等人^[32]观察到 45 钢试样在可见烧伤的区域为马氏体组织,不同于基体材料铁素体、珠光体和马氏体的 3 种组织。这种方法依赖于观测者的经验、结果可靠性不高并且制备金相试样时需要破坏工件,制备试样也很复杂,检测速率不高,在实际应用中有很大大局限性。

2.1.4 变质层深检测法

在磨削高温作用下,工件表面微观组织发生不可逆改变。烧伤层可分为 3 个部分:涂覆层、氧化层、变质层。其中,最外面的涂覆层主要是磨屑等;氧化层为纳米级,氧化膜随烧伤程度加剧而变厚;变质层厚度与烧伤程度相关,一般为几十微米^[8]。根据发生磨削烧伤后,在表层形成的变质层深度来反映烧伤的程度的方法称为变质层深度检测法。明兴祖等人^[33]针对弧齿锥齿轮进行硬度梯度检查得出当变质层厚度大于 0.2 mm 时说明发生了不同程度的烧伤。这种通过检测变质层深度来表征磨削烧伤程度的方法灵敏可靠但是操作麻烦,且一般会对工件造成破坏。

2.2 无损检测

2.2.1 目测法

目测法也称表面颜色法或观色法,就是由于磨削区的温度较高,在工件表面会产生一层氧化膜,它会随厚度的不同而在阳光下发生干涉产生不同的颜色,氧化膜越厚,颜色越深,烧伤程度越严重。烧伤程度由轻到重依次对应:浅黄色、褐色、浅蓝色、蓝色、紫色、青色,最严重为灰色^[3,34-35]。这是最简单直观的一种判别磨削烧伤的方法,但往往由于工件受热氧化后表面情况复杂,甚至没有出现颜色变化也并不能代表没有发生磨削烧伤。此外,此法对主观依赖性很强,对颜色的划分没有明确界限,肉眼只能大致判断烧伤情况,因而适用于要求不太严格的情况下,并且为使结果更准确可靠,经常与酸蚀法配合使用。

2.2.2 X 射线衍射残余应力检测法

在磨削过程中的机械作用应力、热应力、相变应力等的综合作用下产生磨削残余应力,发生烧伤后残余应力的分布发生改变^[36]。通过测定磨削后工件表面残余应力即可确定磨削烧伤程度的方法称为残余应力法。残余应力的检测方法有机械法、超声波法、X 射线法、中子衍射法等^[37],目前普遍采用 X 射线衍射法 (X-ray diffraction, XRD),它是研究最广泛、深入而且标准完善的无损检测方法,因此,这种方法也称 X 射线衍射法。这

种方法是依据布拉格定律:

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2)$$

通过测定衍射角 2θ , 就可以得到衍射晶面间距 d ^[38]。欧盟和美国分别颁布了最全面的残余应力测定标准规范 EN15305-2008 和 ASTM E915-2010^[39]。Ding W 等人^[40]综述了金属材料在磨削过程中残余应力的多种测量方法, 阐述了 XRD 残余应力的测量原理。这种测残余应力的方法应用于检测磨削烧伤时, 精确、全面, 但是成本较高且使用起来较复杂, 会对人体有辐射的危害, 并且, X 射线对金属的穿透能力有一定的限制, 一般测量范围为表面一下几微米到十几微米, 因而具有一定的局限性。

2.2.3 成分分析法

发生烧伤后会在工件表面形成一层氧化膜, 它的成分与基体金属相比已经发生改变。通过电子探针 (electron probe microanalysis, EPMA) 波谱分析、俄歇电子能谱仪 (auger electron spectroscopy, AES) 能谱分析、X 射线光电子谱 (X-ray photoelectroxy spectroscopy, XPS) 元素浓度分析同时采用氩离子溅射剥蚀可以确定烧伤表面层的成分、氧化情况以及氧化膜的厚度的方法称为成分分析法^[8-9]。印度德里理工学院的 Sinha M. K. 等人^[41]用能量色散 X 射线能谱 (energy dispersive spectroscopy, EDX) 及 SEM 确定烧伤和未烧伤铬镍铁合金 718 试件表面各元素所占百分比并用 XPS 分析了该试件的化学成分。这种判别烧伤的方法准确度虽然高, 但设备复杂, 只适合实验室研究, 并不能应用到加工过程的在线测量。

2.2.4 涡流检测法

铁磁材料组织和应力改变时, 主要引起磁导率发生变化 (电导率的变化可忽略不计)。磨削烧伤使变质层的初始磁导率增大, 并且随着烧伤程度的增加, 磁导率增大得更多^[8]。涡流法检测磨削烧伤的原理是: 当通有交变电流的线圈靠近导电试件时, 在磁场的影响下, 试件中会产生涡流, 其反作用磁场使线圈阻抗发生改变^[8, 42], 如图 3 所示。

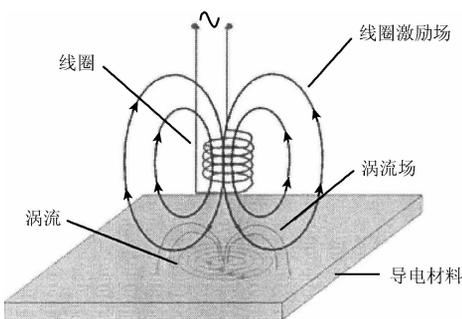


图 3 涡流检测原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of eddy current testing

涡流检测的方法对金属材料表面的电磁性能非常敏感, 通过分析涡流效应与材料性能的内在联系, 可以实现对金属表面质量的评定^[43]。涡流检测磨削烧伤是利用零件表面的结构组织、硬度和残余应力的变化等对零件表面磁导率、电导率所产生的影响。利用此原理制造的烧伤检测仪可以实现涡流对磨削烧伤程度的检测^[8]。Ito R 等人^[44]针对高碳铬轴承钢 SUJ2 磨削烧伤的检测, 提出了一种涡流检测系统, 采用高低不同频率抑制基体结构变化对检测结果的影响, 实现 100% 定量检测。

涡流检测磨削烧伤方法测量时间短、成本低、无损、无污染, 但是灵敏度不高, 结果显示不直观, 对零件几何形状、突起引起的边缘效应敏感, 很容易给出虚假显示, 对形状复杂的零件不适用, 且只能针对导电材料检测表面缺陷。

2.2.5 CCD 图像法

随着机器视觉的快速发展, 电荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD 图像法为磨削烧伤等级的定量评定及在线监测提供新思路、新手段, 是机械加工朝着智能化发展的新方向。这种基于 CCD 图像定量评价磨削烧伤程度的方法主要是南京航空航天大学左敦稳教授团队提出的。2005 年, 陈荣媛等人^[45]探究了基于 CCD 图像对工件烧伤进行定量评价这一方法的可行性, 首先利用 CCD 摄像头拍摄烧伤表面图像, 经过处理后提取出有用信号并采用 RGB 模型对彩色图像进行分析, 以此建立烧伤度指标, 如式 (3) 所示, 实现烧伤的量化分级^[46]。

$$B_d = \zeta_1 C_d + \zeta_2 D_d \quad (3)$$

其后, 莫国影等人^[47]针对高温合金表面磨削烧伤的 CCD 图像分别在空域和频域内的特征进行了研究, 指出经过 MATLAB 处理后的 CCD 图像的色度方差可以有效地表征磨削烧伤程度, 为后续定量评价烧伤程度的研究工作奠定基础。2008 年, 易茜等人^[48-49]进一步研究了用彩色 CCD 图像检测烧伤度, 以 HSV 颜色空间作为图像分析手段, 提取出颜色特征, 依据输入的参考数据计算相似度, 判断烧伤等级并结合 VC++ 与 MATLAB 开发了烧伤度分级系统, 有效地实现了对工件表面烧伤的分级, 此外, 还设计出减弱表面反射光装置, 如图 4 所示, 初步解决了反射光带来的干扰问题。

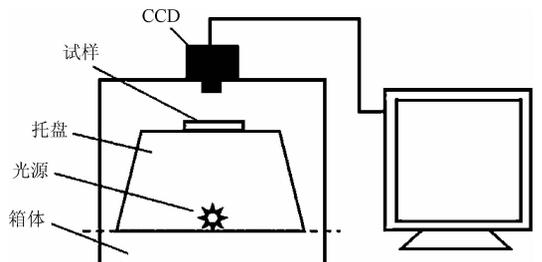


图 4 减弱表面反射光的检测装置^[48]

Fig. 4 Detection device to reduce the surface reflection^[48]

这种基于烧伤表面 CCD 图像判定烧伤程度的新方法设备简单、测量方便、无损工件。2015 年我国颁布的工业 4.0 计划对机器视觉领域发展的大力支持,这种图像法也得到推广,并逐步应用于齿轮烧伤检测、蜗轮蜗杆检测等缺陷检测领域。但是这种方法目前仍处于基础阶段,评定指标、滤波方法、表面反光及材质等的影响、可靠性分析等许多问题仍需深入研究。

2.2.6 磁弹法

磁弹法包括磁巴克豪森噪声 (magnetic Barkhausen noise, MBN) 和磁声发射 (magnetomechanical acoustic emission, MAE)。铁磁材料在磁化时,磁畴发生不可逆运动,产生磁巴克豪森噪声,同时还激发出一系列弹性波脉冲,由于其类似机械声发射,故称为磁致声发射^[50]。

由再回火造成微观组织软化和压应力降低使得 MBN 信号幅值提高,在工件温度低于相变温度的情况下,提高量与磨削烧伤程度成正比;再硬化型磨削烧伤使得 MBN 信号幅值局部降低。目前,以 Barkhausen 效应为原理研制的磨削烧伤检测系统已经应用到磨削烧伤的检测中,检测系统原理如图 5 所示。激励电路包括信号发生器和功率放大器,作用是提供频率和激励电压给磁化线圈,在材料中激发所需磁场,产生巴克豪森噪声 (Barkhausen noise, BN) 信号。

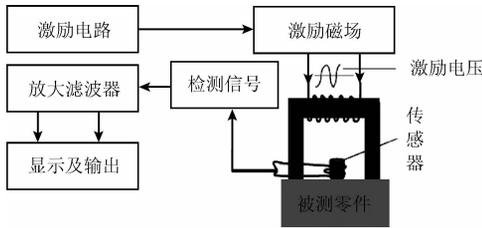


图 5 MBN 检测系统

Fig. 5 Detection system of MBN

在国外,芬兰^[51-52]和德国弗劳恩霍夫无损检测研究所^[53]在 Barkhausen 效应的利用方面研究得比较深入。Stresstech 公司研制的磨削烧伤检测仪 Rollscan 及 Roboscan 系列已经越来越多地应用于生产检测和和研究^[54]。Santa-aho S^[55]指出由于 BN 信号对铁磁材料性能的改变如微观结构、应力状态的变化等很敏感,因此通过激光加工产生的高温可以导致结构改变来模拟磨削烧伤,并将加工参数与 MBN 特征值建立联系。此外,还与奥卢大学的 Sorsa A 等人^[56-59]研究了基于巴克豪森效应的硬化钢渗碳层深度检测及参与应力预测。Ceurter J. S. 等人^[60]研究了利用巴克豪森效应评价磨削烧伤程度,并通过与酸蚀法对比,得出磁弹值 (magnetoelastic parameter, MP) 与磨削烧伤程度的对应关系,证明了此法是可行的。在去除其他因素对巴克豪森信号的干扰方面,墨西哥的 Perez-benitez 等人^[61]研究了含碳量、塑性变

形等多重参数对 MBN 信号的影响,提出了用自组织映射的方法分离其他参数对 MBN 原始信号的干扰。

在国内,南京航空航天大学^[62-66]及北京化工大学^[67-70]等对 Barkhausen 效应的研究比较成熟,主要是应用于钢轨应力的检测,针对齿轮的齿面磨削烧伤检测的研究很少。宋亚虎等人^[31]根据实践经验介绍了齿轮磁弹法在工厂中检测烧伤的过程,建立了 MP 与表层显微硬度及残余应力的线性关系曲线,得到了 17CrNiMo6 钢渗碳齿轮烧伤临界特征值;朱正德^[71]一直致力于磁弹法在企业中的实际应用,并介绍了企业标定的方法。任敬心等人^[8]阐述了巴克豪森检测烧伤的固有缺点,即被测件的应力、硬度、材料组织结构、晶粒取向等因素伴随烧伤随机发生,去除干扰、正确识别烧伤是关键。

在磁致声发射的研究方面,其基本检测系统如图 6 所示,与 MBN 检测系统类似,主要组成部分为传感器、激励电路、前置放大器、滤波器、主放大器、信号处理和显示系统^[50]。与 MBN 检测系统的唯一不同之处在于传感器的构造,MAE 系统的传感器包括铁芯、磁化线圈及压电传感器 (piezo-lectric transducer, PZT)。检测参数有峰值、峰位、均方根 (root mean square, RMS)、包络线、能量、频谱和计数等。Ono K^[72]研究了钢的化学成分、应力状态和显微组织等对磁声发射的影响,指出磁声发射技术可以检测工件残余应力。国外应用 MAE 进行炮壳、炮车、枪筒、焊接以及热处理后的应力检测^[73]。国内的北方交通大学^[74]、武汉大学^[75]、华中科技大学^[76]、北京科技大学^[77-78]也相继开展了 MAE 在钢铁微观损伤、残余应力、硬度及疲劳寿命检测的应用研究^[72]。

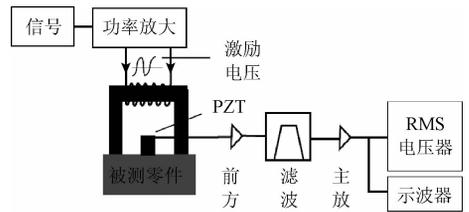


图 6 MAE 检测系统

Fig. 6 Detection system of MAE

鉴于 MBN 与 MAE 均来源于巴克豪森效应,故将二者结合取各自所长可能会更有利。北京科技大学穆向荣等人^[77-78]一直致力于这方面的研究,将 MAE 与 MBN 检测系统融为一体研制出具有综合特色的磁弹性仪,可以用于残余应力、硬度计硬化层深度、热处理与机械加工缺陷的检测。这种方法检测速度快、灵敏度高、操作简便、可直接读出结果、无损工件,适合表面及近表面缺陷的检测,但是 BN 信号依赖于操作者的经验和技能,检测深度仅限于表面及近表面。此外,迄今为止,用磁弹法检测齿轮磨削烧伤国内外还没有统一的标准作为依据,仍有待

于进一步完善。

2.2.7 声发射在线监测法

声发射(acoustic emission, AE)是因材料的局部结构变化快速释放应变能而产生瞬态弹性波的物理现象。自1984年以后,AE技术逐渐应用于磨削加工领域,检测装置如图7所示。加工过程中材料和砂轮之间产生的微弱AE信号被安置在机床工作台上的传感器接收,并进行放大和滤波处理,然后经过A/D转换由示波器输出,还可以借助快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析仪得到AE信号的功率谱并由X-Y记录仪记录结果^[8]。

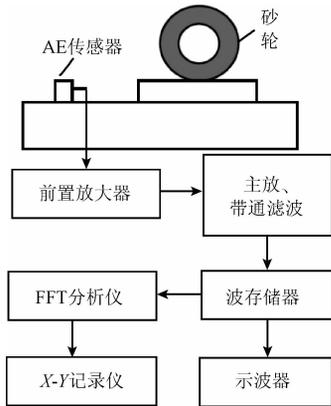


图7 声发射检测磨削烧伤装置简图^[8]

Fig.7 Diagram of acoustic emission detection of grinding burn^[8]

在信号提取方面,日本学者Eda H. K.等人^[79]论述了运用声发射技术监测磨削烧伤的可行性,将声发射信号分为两路,它们的比值与烧伤程度存在良好的对应关系;Aguiar P. R.等人^[80]以氧化铝砂轮和45号钢为试件材料,探究了声发射检测磨削烧伤时信号处理的有效性,发现恒虚警率、功率比、峰度和AE的相关性比均方根更敏感。磨削烧伤中常用声发射信号的特征值包括峰值均方根、FFT峰值、AE振铃计数及声发射信号的标准差;美国康涅狄格大学Wang Z等人^[81]提出了基于声发射传感器的磨削烧伤监测方法,指出声发射信号的偏度、峰度和自回归系数等经神经网络的训练、学习,在烧伤监测中表现出了良好的准确性。

在信号采集方面,由于磨削参数和电网波动的影响,单纯依靠声发射传感器的研究很少,大多采用功率传感器与声发射传感器或其他相结合,进行烧伤的监测。韩国釜庆国立大学Kwak J. S.等人^[82]基于声发射传感器和功率传感器验证了磨削功耗与磨削烧伤之间存在相关关系,为磨削烧伤的在线监测提供了理论依据;林家春等人^[83-84]设计了基于MBN原理的锥齿轮齿面磨削烧伤自动检测装置,在信号处理方面,由于声发射信号的非线性时变特征,小波分析和小波包分析等时频域信号处理

方法在声发射信号的处理中也得到了部分应用。Liu Q等人^[85]认为9级分解后的小波包系数能够较好的表征磨削烧伤,并将分解后的小波包能量进行基于模糊算法的识别,取得了良好的效果;Yang Z. S.等人^[20]将希尔伯特-黄变换引入磨削烧伤的声发射信号和加速度信号的处理中,成功提取出磨削烧伤发生时声发射信号的不变性特征,实现了烧伤预测和诊断的自动化和智能化。

鉴于上述声发射技术和神经网络的诸多优势,很多研究均将二者结合,采用声发射传感器采集信号,经过处理作为神经网络的输入,很好地解决了磨削过程中磨削烧伤的在线检测问题。AE传感器适应性广、体积小、安装方便,而且具有很高的灵敏度和抗干扰能力,能检测到很微小的信号。因此,声发射技术凭借其独特的优点,在磨削加工领域有广泛的应用前景。但是,声发射信号源复杂,如工件材料弹塑性变形、断裂及内部组织变化,砂轮磨粒的磨损、磨粒和结合剂破碎,机床传动机构的摩擦等^[6]都会被AE传感器捕捉,对我们想要的信号造成干扰。

3 结论与展望

尽管磨削烧伤对齿轮产品的影响很大,然而对于这种隐性的缺陷,在如何进行有效的磨削烧伤检测与对烧伤程度充分认知这方面,齿轮业内的调研表明,多数企业的认识依然是比较欠缺的。本文综述了现有的齿轮磨削烧伤的多种检测方法,通过分析和对比可以发现这些方法都有各自适用的范围和局限性。目前,存在的主要问题如下。

1) 大多数企业仍然采用目测法、酸洗法等传统检查方法,这些方法属于定性评价手段,规范化可靠性水平较低,更难以制定可操作性强的评定标准。

2) 表层显微硬度试验法、残余应力测定法、金相检测法、磨削表面温度法、成分分析法和X射线检测法由于操作过程复杂,基本适用于实验室的研究,无法用于工厂的检测。

3) 近年来发展的声发射技术和巴克豪森噪声检测法等检测方法,由于检测设备价格昂贵,现阶段国内齿轮行业的应用还不多见。

随着传感器、信息、先进制造等技术在齿轮测量领域中的应用,不仅在齿轮测量新原理新方法和量值溯源等方面呈现出新的发展态势,而且在其他机械工程研究中常用的物理量,如力学性能参数、功能参数等也会有重要的发展方向。随着工业4.0和中国制造2025的出台,智能化已经成为制造业的发展大方向,检测技术也必将紧随时代的发展。因此,低成本、定量无损、智能在线检测技术将成为齿轮磨削烧伤检测的研究热点。

参考文献

- [1] 石照耀. 齿轮测量技术100年:回顾与展望[J]. 机电产品市场-产品与技术, 2003, 5(12):48-50.
SHI ZH Y. Retrospect and prospect of gear measurement technology in the past 100 years [J]. Machinery & Electronic Products Market-Products & Technology, 2003, 5(12):48-50.
- [2] CHEN M, SUN F H, LEE Y M, et al. Surface quality studies with respect to grinding burn of new typical nickel-based superalloy[J]. Key Engineering Materials, 2004, 259-260(1):233-238.
- [3] 宋亚虎,刘铁山,史向阳,等. 齿轮磨削烧伤检测技术现状及发展趋势[J]. 理化检验:物理分册, 2014, 50(10):714-717.
SONG Y H, LIU T SH, SHI X Y, et al. The present situation and development trend of gear grinding burn detection technology [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2014, 50(10):714-717.
- [4] 小野浩二,河村末久,北野昌则,等. 理论切削学[M]. 北京:国防工业出版社,1985:201-202.
XIAOYE H E, HECUN M J, BEIYE CH Z, et al. Cutting theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985:201-202.
- [5] 陈明,浦学锋. GH4169 磨削烧伤机理研究[J]. 南京理工大学学报:自然科学版,1995, 19(2):152-155.
CHEN M, PU X F. Research of grinding burn mechanism of GH4169 [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology : Nature Science, 1995, 19(2):152-155.
- [6] 浦学锋. 表面硬化钢磨削烧伤的监测和预报[J]. 磨料磨具与磨削,1993, 5(77):11-19.
PU X F. Monitoring and prediction of surface hardening steel for grinding burn [J]. Abrasives and Grinding, 1993, 5(77):11-19.
- [7] MALKIN S, GUO C. Thermal analysis of grinding [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(2):760-782.
- [8] 任敬心,华定安. 磨削原理[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
REN J X, HUA D AN. Principle of grinding [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [9] 李伯民,赵波,李清. 磨料、磨具与磨削技术[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
LI B M, ZHAO B, LI Q. Abrasives and grinding technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [10] WANG Y, LI C H, LI B K, et al. Advances and recent patents in the field of grinding temperature measurement methods [J]. Recent Patents on Materials Science, 2015, 8(1):55-68.
- [11] VEDHAVALLI L, LAVANYA T D, ANNAMALAI V E. The presence of carbon content in chips as an indicator of grinding temperature [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2007, 22(7-8):830-832.
- [12] 刘国平,郑声德,林正英. 磨削温度测量方法综述[J]. 工具技术,2014, 48(5):7-11.
LIU G P, ZHENG SH D, LIN ZH Y. Review of grinding temperature measurement [J]. Tool Engineering, 2014, 48(5):7-11.
- [13] 尤芳怡,徐西鹏. 红外测温技术及其在磨削温度测量中的应用[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2005, 4(26):228 - 342.
YOU F Y, XU X P. Infrared temperature measurement technology and its application in grinding temperature measurement [J]. Journal of Huaqiao University : Natural Science, 2005, 4(26):228 - 342.
- [14] HWANG J, KOMPPELLA S, CHANDRASEKAR S. Measurement of temperature field in surface grinding using infrared (IR) imaging system [J]. ASME Transactions. Journal of Tribology, 2003, 125(2):377-383.
- [15] BROSSE A, NAISSON P, HAMDY H, et al. Temperature measurement and heat flux characterization in grinding using thermography [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1-3):590-595.
- [16] CURRY A C, SHIH A J, KONG J, et al. Grinding temperature measurements in magnesia-partially-stabilized zirconia using infrared spectrometry [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2003, 86(2):333-341.
- [17] LEFEBVRE A, LANZETTA F, LIPINSKI P, et al. Measurement of grinding temperatures using a foil/workpiece thermocouple [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 58(10):1-10.
- [18] TONSHOFF H K, FRIEMUTH T, BECKER J C. Process monitoring in grinding [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2002, 51(2):551-571.
- [19] TETI R, JEMIELNIAK K, O'DONNELL G, et al. Advanced monitoring of machining operations [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010, 59(2):717-739.
- [20] YANG Z S, YU Z H, XIE C, et al. Application of Hilbert - Huang Transform to acoustic emission signal for burn feature extraction in surface grinding process [J]. Measurement 2014, (47):14-21.
- [21] 曲川. 神经网络在计算机中的应用前景分析[J].

- 现代商贸工业, 2009(20):286-287.
- QU CH. Application prospects analysis of artificial neural network in computers [J]. Modern Business Trade Industry, 2009(20):286-287.
- [22] 史金飞, 张晓玲, 钟秉, 等. BP神经网络在磨削烧伤诊断中的应用[J]. 东南大学学报:自然科学版, 1996, 26(4):52-55.
- SHI J F, ZHANG X L, ZHONG B, et al. An application of BP neural network for grinding burn diagnosis [J]. Journal of Southeast University :Natural Science, 1996, 26(4):52-55.
- [23] 任敬心, 刘红星, 李雅卿, 等. 用神经网络预测300M超高强度钢磨削烧伤[J]. 航空制造技术, 1996(5):3-5.
- REN J X, LIU H X, LI Y Q, et al. The prediction of grinding burn of 300M ultra-high strength steel via artificial neural networks [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1996(5):3-5.
- [24] DEIVA N R, VIJAYARAGHAVAN L, KRISHNAMURTHY R. In-process monitoring of grinding burn in the cylindrical grinding of steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 91(1-3):37-42.
- [25] DOTTO F R L, AGUIAR P R, BIANCHI E C, et al. Automatic detection of thermal damage in grinding process by artificial neural network [J]. Rem: Revista Escola de Minas, 2003, 56(4):295.
- [26] 朱正德. 磨削烧伤检测及其评定方法[J]. 汽车工艺与材料, 2013(8):37-39.
- ZHU ZH D. Grinding burn detection and evaluation methods [J]. Automobile Technology & Material, 2013(8):37-39.
- [27] 全国齿轮标准化技术委员会. GB/T17879-1999 齿轮磨削后表面回火的浸蚀检验[S]. 北京:中国标准出版社, 1999:4-5.
- National Technical Committee 52 on Gear of Standardization Administration of China. GB/T17879-1999 Gears-Surface temper etch inspection after grinding [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999:4-5.
- [28] 李强, 刘学文. 铁磁材料表面硬度无损测量方法的研究[J]. 无损检测, 2001, 23(3):93-95.
- LI Q, LIU X W. Research on nondestructive testing of the surface hardness of ferromagnetic material [J]. NDT, 2001, 23(3):93-95.
- [29] ITO R, MUKAIDE N, AZUMA T, et al. Development of non-destructive inspection system for grinding burn-in-process detection of grinding burn [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1017(9):135-140.
- [30] SANTA-AHO S, VIPPOLA M, SORSA A, et al. Optimized laser processing of calibration blocks for grinding burn detection with Barkhausen noise [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11):2282-2293.
- [31] 宋亚虎, 孙胜伟, 刘铁山, 等. 磁弹法在线检测渗碳齿轮的磨削烧伤[J]. 理化检验:物理分册, 2015, 51(12):853-857.
- SONG Y H, SUN SH W, LIU T SH, et al. On-line detection of carburizing gear grinding burns using magnetic method [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2015, 51(12):853-857.
- [32] GU B P, YANG Z S, PAN L, et al. Evolution of the microstructure, mechanical properties, and high-order modal characteristics of AISI 1045 steel subjected to a simulative environment of surface grinding burn [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1):253-263.
- [33] 明兴祖, 李飞, 周静. 弧齿锥齿轮磨削表面烧伤建模仿真与实验验证[J]. 机械传动, 2014, 38(5):15-20.
- MING X Z, LI F, ZHOU J. Simulation and experimental validation of spiral bevel gear grinding burn modeling [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(5):15-20.
- [34] 李伯民, 赵波. 现代磨削技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- LI B M, ZHAO B. Modern grinding technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [35] 吕红明, 王琪, 范能胜, 等. 汽车渗碳淬火齿轮磨削烧伤的研究[J]. 机械传动, 2009, 33(3):108-110.
- LV H M, WANG Q, FAN N SH. Study on grinding burn of case hardened gear for automobile [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2009, 33(3):108-110.
- [36] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components[J]. Materials & Design, 2012, 35(119):572-588.
- [37] 王海斗, 朱丽娜, 邢志国. 表面残余应力检测技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- WANG H D, ZHU L N, XING ZH G. Residual stress detection technologies [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [38] 于康, 孙亚非, 陈晓江. X射线衍射残余应力测试方法及应用[J]. 火箭推进, 2015, 41(2):102-107.
- YU K, SUN Y F, CHEN X J. Residual stress measurement with X-ray diffraction [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(2):102-107.
- [39] 施新华, 武立宏, 栗春. 欧美最新X射线衍射残余应

- 力测定标准介绍[J]. 理化检验:物理分册, 2011, 47(10):623-628.
- SHI X H, WU L H, LI CH. Introduction to the latest European and American standard test methods for residual stress measurement by X-ray diffraction [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2011, 47(10):623-628.
- [40] DING W, ZHANG L, LI Z, et al. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9-12):2939-2968.
- [41] SINHA M K, SETTI D, GHOSH S, et al. An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718 [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 21(1):124-133.
- [42] 宋倩, 张思全, 徐浩军, 等. 涡流无损检测技术研究进展[J]. 中国科技博览, 2015(20):208-208.
- SONG Q, ZHANG S Q, XU H J, et al. Development of eddy current nondestructive testing [J]. China Science and Technology Review, 2015(20):208-208.
- [43] 任吉林. 涡流检测技术近 20 年的进展[J]. 无损检测, 1998, 20(5):121-125.
- REN J L. Development of eddy current testing in recent twenty years [J]. NDT, 1998, 20(5):121-125.
- [44] ITO R, AZUMA T. Development of non-destructive grinding burn detection technology [J]. Jtekt Engineering Journal, 2014, 1012:27-31.
- [45] 陈荣媛, 左敦稳. 采用 CCD 图像评价工件加工表面烧伤的可行性研究[J]. 苏州大学学报:工科版, 2005, 25(4):48-52.
- CHEN R Y, ZUO D W. Feasibility of evaluation for machining burn on work surface based on CCD image [J]. Journal of Soochow University :Engineering Science Edition, 2005, 25(4):48-52.
- [46] 陈荣媛. 面向定量评价的加工表面烧伤图像特征基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.
- CHEN R Y. Basic research for quantitative evaluation of the image characteristics on the processed surface with burning [D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [47] 莫国影, 左敦稳, 马浩, 等. 高温合金磨削烧伤表面的 CCD 图像特征研究[J]. 机械制造与自动化, 2006, 35(6):99-102.
- MO G Y, ZUO D W, MA H, et al. Characterization of CCD image of burned surface of ground high temperature alloy [J]. Machine Building & Automation, 2006, 35(6):99-102.
- [48] 易茜, 左敦稳, 莫国影. 基于彩色 CCD 图像的表面烧伤检测方法研究[J]. 三峡大学学报:自然科学版, 2008, 30(2):61-64.
- YI Q, ZUO D W, MO G Y. Study on burn detection of work surface based on color CCD image [J]. Journal of China Three Gorges University :Natural Sciences, 2008, 30(2):61-64.
- [49] 易茜. 基于彩色 CCD 图像的加工表面烧伤度研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
- YI Q. Study on burn degree of processed surface based on color CCD image [D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [50] 宋天民. 无损检测新技术[M]. 北京:中国石化出版社, 2012.
- SONG T M. New technologies of nondestructive testing [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012.
- [51] SANTA AHO S, VIPPOLA M, LEPIST T, et al. Characterisation of case-hardened gear steel by multiparameter Barkhausen noise measurements [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2009, 51(4):212-216.
- [52] SORSA A, ISOKANGAS A, SANTA-AHO S, et al. Prediction of residual stresses using partial least squares regression on barkhausen noise signals [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(1):43-50.
- [53] RABUNG M, ALTPETER I, DOBMANN G, et al. Micro-magnetic evaluation of micro-residual stresses of the II nd and III nd orders [J]. NDT & E International, 2009, 42(4):283-290.
- [54] 沈功田, 郑阳, 蒋政培, 等. 磁巴克豪森噪声技术的发展现状[J]. 无损检测, 2016, 38(7):66-74.
- SHEN G T, ZHENG Y, JIANG ZH P, et al. The development status of magnetic Barkhausen noise technology [J]. NDT, 2016, 38(7):66-74.
- [55] SANTA-AHO S. Barkhausen noise method for hardened steel surface characterization-the effect of heat treatments, thermal damages and stresses [D]. Tampere:Tampere University of Technology, 2012.
- [56] SORSA A, LEIVISKA K, SANTA-AHO S, et al. An efficient procedure for identifying the prediction model between residual stress and barkhausen noise [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(4):341-349.
- [57] SANTA-AHO S, SORSA A, HAKANEN M, et al. Barkhausen noise-magnetizing voltage sweep measurement in evaluation of residual stress in hardened components [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(8):1-6.
- [58] SORSA A, ISOKANGAS A, SANTA-AHO S, et al.

- Prediction of residual stresses using partial least squares regression on barkhausen noise signals [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, 33(1):43-50.
- [59] SORSA A, LEIVISKA K, SANTA-AHO S, et al. Quantitative prediction of residual stress and hardness in case-hardened steel based on the Barkhausen noise measurement [J]. *NDT&E International*, 2012, 46(1):100-106.
- [60] CEURTER J S, SMITH C, OTT R. Barkhausen noise inspection [J]. *Advanced Materials and Processes*, 2002, 160(4):29-31.
- [61] PEREZ-BENITEZ J A, ESPINA-HERNANDEZ J H, MARTINEZ-ORTIZ P. Unwrapping the influence of multiple parameters on the Magnetic Barkhausen Noise signal using self-organizing maps [J]. *NDT&E International*, 2016, 37(1):75-78.
- [62] DING S, TIAN G Y, DOBMAN G, et al. Analysis of domain wall dynamics based on skewness of magnetic Barkhausen noise for applied stress determination [J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2017, 421(1):225-229.
- [63] SONG D, TIAN G Y, MOORTHY V, et al. New feature extraction for applied stress detection on ferromagnetic material using magnetic Barkhausen noise [J]. *Measurement*, 2015, 73(9):515-519.
- [64] WANG P, ZHU L, ZHU Q, et al. An application of back propagation neural network for the steel stress detection based on Barkhausen noise theory [J]. *NDT & E International*, 2013, 55(3):9-14.
- [65] WANG P, JI X, ZHU L, et al. Stratified analysis of the magnetic Barkhausen noise signal based on wavelet decomposition and back propagation neural network [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2012, 201(5):421-427.
- [66] 林洋,王平,吴杰,等. 巴克豪森噪声应力检测设备的开发与研究[J]. *中国测试*, 2013, 39(增刊2):118-122.
- LIN Y, WANG P, WU J, et al. Development and research of stress test equipment based on Barkhausen noise [J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2013, 39(Suppl. 2):118-122.
- [67] 祁欣,刘明翠. 巴克豪森效应和磁滞曲线的测定[J]. *实验技术与管理*, 2007, 24(6):25-27.
- QI X, LIU M C. The detecting of Barkhausen effect and magnetization curves [J]. *Experimental Technology and Management*, 2007, 24(6):25-27.
- [68] 田建龙,祁欣,刘竞业. 磁弹硬度检测仪的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2002, 23(增刊2):639-640.
- TIAN J L, QI X, LIU J Y. Development of testing hardness instrument by means of magneto-elasticity noise technique [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(Suppl. 2):639-640.
- [69] 祁欣,刘明翠. 巴克豪森效应和磁滞曲线的测定[J]. *实验技术与管理*, 2007, 24(6):25-27.
- QI X, LIU M C. The detecting of Barkhausen effect and magnetization curves [J]. *Experimental Technology and Management*, 2007, 24(6):25-27.
- [70] GUO L, SHU D, YIN L, et al. The effect of temperature on the average volume of Barkhausen jump on Q235 carbon steel [J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2016, 407(6):262-265.
- [71] 朱正德. 基于磁弹法的磨削烧伤检测及定标在企业中的应用[J]. *上海计量测试*, 2013(6):27-29.
- ZHU ZH D. The application of grinding burn detection in the enterprises based on magnetic method [J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2013(6):27-29.
- [72] ONO K. Magnetomechanical acoustic emission-A review [J]. *Process in Acoustic Emission. The Japanese Society of NDI*, 1986:200-212.
- [73] 王金凤,樊建春,全钢,等. 磁声发射无损检测方法研究进展[J]. *石油矿场机械*, 2008, 37(5):72-75.
- WANG J F, FAN J CH, TONG G, et al. The advance of magnetic acoustic emission as a nondestructive testing method [J]. *Oil Field Equipment*, 2008, 37(5):72-75.
- [74] 侯炳麟,周建平,彭湘,等. 磁声发射在钢轨性能无损检测中的应用研究[J]. *实验力学*, 1998, 13(1):98-104.
- HOU B L, ZHOU J P, PENG X, et al. Application of MAE technique in the nondestructive test of rail performance [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998, 13(1):98-104.
- [75] 徐约黄,沈功田. 磁声发射现象及其影响因素的探测[J]. *武汉大学学报:理学版*, 1985, (4):121-122.
- XU Y H, SHEN G T. The tests of magneto-mechanical acoustic emission behavior and affecting factors [J]. *Journal of Wuhan University: Natural Science Edition*, 1985, (4):121-122.
- [76] 马咸尧,孙大千. 拉应力对磁畴壁运动及磁声发射行为的影响[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 1992, 20(6):25-29.
- MA X Y, SUN D Q. The influence of tensile stress on the motion of magnetic domain walls and magneto-acoustic emission [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 1992, 20(6):25-29.
- [77] 穆向荣,王绍纯,姜志高. 关于多功能磁弹仪的研

制[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(2):161-167.

MU X R, WANG SH CH, JIANG ZH G. The design of multifunctional instrument based on magnetic methods [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1995, 16(2):161-167.

- [78] 穆向荣, 何敬礼, 姜志高, 等. 多功能磁弹仪及其应用[J]. 无损检测, 1996, 18(12):339-342.
 MU X R, HE J L, JIANG ZH G, et al. Multifunctional instrument based on magnetic methods and its application [J]. Nondestructive Testing, 1996, 18(12):339-342.
- [79] EDA H K, KISHI K, USUI N, et al. In process detection of grinding burn by means of utilizing acoustic emission [J]. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 1984, 49(12):1257-1262.
- [80] AGUIAR P R, SERNI P J A, DOTTO F R L, et al. In-process grinding monitoring through acoustic emission [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2006, 28(1):118-124.
- [81] WANG Z, WILLETT P, AGUIAR P R, et al. Neural network detection of grinding burn from acoustic emission [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(2):283-309.
- [82] KWAK J S, HA M K. Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 147(1):65-71.
- [83] 林家春, 张凌浩, 石照耀. 锥齿轮齿面磨削烧伤自动检测装置设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5):1176-1183.
 LIN J CH, ZHANG L H, SHI ZH Y. Design of automatic detection device for grinding burn of bevel gear tooth surface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5):1176-1183.
- [84] 林家春, 黄绍宇. 齿轮磨削烧伤自动检测系统的设计与实现[J]. 机械传动, 2015(11):145-149.
 LIN J CH, HUANG SH Y. Design and implementation of automatic detection system of gear grinding burn [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015(11):145-149.
- [85] LIU Q, CHEN X, GINDY N. Investigation of acoustic

emission signals under a simulative environment of grinding burn [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(3-4):284-292.

作者简介



何宝凤, 分别在 2006 年和 2009 年于哈尔滨工业大学获得学士学位和硕士学位, 2012 年于英国拉夫堡大学获得博士学位, 现为北京工业大学讲师, 主要研究方向为精密测试技术与仪器。

E-mail: baofenghe@bjut.edu.cn.

He Baofeng received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Harbin Institute of Technology in 2006 and 2009 respectively, and her Ph. D. degree from Loughborough University in UK in 2012. Currently, she is a lecturer in Beijing University of Technology. Her main research interest is precision measurement technology and instruments.



魏翠娥, 2015 年于北华航天工业学院获得学士学位, 现为北京工业大学在读硕士研究生, 主要研究方向为精密测试技术与仪器。

E-mail: 1551064131@qq.com

Wei Cui'e received her B. Sc. degree from North China Institute of Aerospace Engineering in 2015. Now she is a graduate student in Beijing University of Technology. Her main research interest is precision measurement technology and instruments.



石照耀, 1984 年于合肥工业大学获得学士学位, 1988 年于陕西机械学院获得硕士学位, 2001 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为北京工业大学博士生导师、教育部长江学者特聘教授, 主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

Shi Zhaoyao received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, and M. Sc. degree from Shanxi Institute of Mechanical Engineering in 1988, and Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2001. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Beijing University of Technology, and a "Yangtze River Scholar" special professor awarded by the Ministry of Education. His main research interest is precision measurement technology and instruments.