

DOI: 10.3901/JME.2023.09.349

## 磨削白层特性及其与声发射信号的相关性\*

毛 聪<sup>1</sup> 孙鹏程<sup>1</sup> 唐伟东<sup>1</sup> 张明军<sup>1</sup> 罗源墙<sup>1</sup> 胡永乐<sup>1</sup>  
张德嘉<sup>1</sup> 唐 昆<sup>1</sup> 管付如<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学机械装备高性能智能制造关键技术湖南省重点实验室 长沙 410114;  
2. 湖南五新隧道智能装备股份有限公司 长沙 410100)

**摘要:** 磨削白层严重影响零件的服役性能和寿命。为了研究磨削白层的物理本质,揭示磨削白层特性与声发射信号频谱幅值的相互关联,开展了淬硬 GCr15 轴承钢磨削实验,观测了磨削白层特性,揭示了磨削机械挤压和磨削热的耦合作用下声发射信号频谱规律。研究表明,白层组织更加致密,耐腐蚀性更强,显微硬度高于暗层与基体组织;磨削白层受到磨削温度与塑性变形的协同影响,当磨削温度低于工件材料名义相变温度时,在剧烈的塑性变形诱导下,磨削表面也会出现白层,当磨削温度超过名义相变温度时,白层厚度会突增;磨削时声发射信号受机械挤压应力和热应力效应协同影响,低频段幅值主要取决于机械挤压应力,高频段幅值主要受热应力效应影响,当磨削温度超过名义相变温度时,工件材料分/原子内能显著增大,进而产生无序高频振动,从而高频段幅值急剧增大。揭示了声发射信号高频段幅值与白层厚度之间关联关系,磨削过程中根据高频段幅值是否出现突变,可以判断磨削表面和亚表面是否出现相变及产生厚的白层。为白层厚度可控的磨削提供了在线监测方法。

**关键词:** 磨削; 白层; 声发射; 频谱幅值; 微观组织

**中图分类号:** TG580

## Features of Grinding White Layer and Its Correlation with Acoustic Emission Signal

MAO Cong<sup>1</sup> SUN Pengcheng<sup>1</sup> TANG Weidong<sup>1</sup> ZHANG Mingjun<sup>1</sup> LUO Yuanqiang<sup>1</sup>  
HU Yongle<sup>1</sup> ZHANG Dejia<sup>1</sup> TANG Kun<sup>1</sup> GUAN Furu<sup>2</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology for High-performance Mechanical Equipment, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114;  
2. Hunan Wuxin Tunnel Intelligent Equipment Co., Ltd., Changsha 410100)

**Abstract:** Grinding white layer seriously affects the service performance and life of the parts. To study the physical nature of grinding white layer and reveal the correlation between features of grinding white layer and spectrum amplitude of acoustic emission (AE) signal, grinding experiments of hardened GCr15 bearing steel are carried out to observe the characteristics of grinding white layer and reveal the frequency law of acoustic emission signal under the coupling effect of grinding mechanical extrusion and grinding heat. The results show that the microstructure of white layer is denser. The corrosion resistance and microhardness of white layer are superior to those of dark layer and matrix material. The grinding white layer is synergistically affected by grinding temperature and plastic deformation. When grinding temperature is lower than the nominal phase transition temperature of the workpiece material, the grinding white layer also appears under the induction of severe plastic deformation. The thickness of white layer increases suddenly when grinding temperature exceeds the nominal phase transition temperature. During grinding, the acoustic emission signal is synergistically affected by mechanical extrusion stress and thermal stress, the amplitude in low frequency band is mainly determined by mechanical extrusion stress, and the amplitude in high frequency is mainly affected by thermal stress. When grinding temperature

\* 国家自然科学基金(51875050, 52275405)和湖南省科技计划(2021GK2021, 2022ZYC017)资助项目。20220718 收到初稿, 20230204 收到修改稿

exceeds the nominal phase transition temperature, the internal energy of molecules/atoms in workpiece increases significantly, resulting in disordered high-frequency vibration, and the high-frequency amplitude increases sharply. The correlation between the high-frequency amplitude of acoustic emission signal and the thickness of white layer is revealed. According to whether there is a mutation of high-frequency amplitude in grinding process, the appearance of phase transformation and thick white layer at surface and sub-surface can be judged. Online monitoring method is provided for grinding with controllable white layer thickness.

**Key words:** grinding; white layer; acoustic emission; spectrum amplitude; microstructure

## 0 前言

随着航空航天、轨道交通与工程机械等行业的飞速发展, 镍/钛合金、高温合金和高铬钢等高性能金属材料得到广泛应用<sup>[1]</sup>。一些金属材料在特定的加工条件下会形成一种特殊的变质层, 该类变质层难以被腐蚀, 在光学显微镜下通常呈现白色, 因此被称为“白层”。针对加工所致白层的特性, 国内外学者做了许多相关研究, 如 CARSTEN 等<sup>[2]</sup>研究了钢轨表面磨削过程中形成的白层, 揭示了白层与裂纹萌生的关系。ZHANG 等<sup>[3]</sup>研究了车削过程中白层内部金相的转变与动态再结晶机制。杜劲等<sup>[4]</sup>进行了镍基高温合金铣削实验, 研究了铣削速度对白层的影响。CHEN 等<sup>[5]</sup>研究了电火花加工白层的特性, 同时根据温度分布和金相转变的临界温度, 对工件白层厚度进行了高精度预测。SATYANARAYANAN 等<sup>[6]</sup>在不同的激光加工条件下, 对工件表面的白层进行了显微组织分析。这些研究表明, 白层一般是由残余奥氏体、未回火马氏体和碳化物等组成<sup>[7]</sup>, 具有硬度高、脆性大、晶粒细化等特点<sup>[8]</sup>。一方面, 白层的高硬度特点能够提高工件的耐磨性能<sup>[9]</sup>; 另一方面, 白层的高脆性又使得零件在服役时容易萌生微观裂纹<sup>[10]</sup>, 影响工件的服役性能。就磨削加工而言, 可以通过微切深来减少白层的产生, 但是减小切深会延长加工时间, 降低加工效率, 提高加工成本。所以研究磨削白层特性, 对优化磨削参数以提高工件的加工效率和加工质量具有重要意义。

磨削白层主要存在于工件表面及亚表面<sup>[11]</sup>, 所以对白层的研究通常需要观察工件截面。而实际磨削过程中, 不可能为了探究是否产生白层而对工件进行破坏性检测, 因此亟需寻求一种无损检测方法以监测磨削加工过程, 评估磨削加工质量<sup>[12]</sup>。对于白层特征的无损检测, 国内外学者从不同的检测原理出发, 做了相关的研究。如 ABUNABAH 和 NAGY<sup>[13]</sup>利用电涡流检测技术, 对工件表面残余应力的分布进行了研究。蒋生辉等<sup>[14]</sup>搭建了基于磁巴克豪森噪声的钢轨白层无损检测系统, 探究了信号

特征值与白层面积的关系。GUO 与 AMMULA<sup>[15]</sup>通过分析车削过程中的声发射信号, 发现相关信号的均方根值、频率及计数率与车削白层形成有较好的相关性。

在诸多无损检测技术中, 声发射检测技术具有响应速度快、灵敏度高、包含的特征信息多等优点<sup>[16]</sup>, 在监测砂轮磨损状态<sup>[17]</sup>、评估砂轮修整状况<sup>[18]</sup>、监测磨削表面粗糙度<sup>[19]</sup>以及预测磨削烧伤<sup>[20]</sup>等方面均有较大的应用潜能。如 ARUN 等<sup>[17]</sup>开展了外圆磨削实验, 利用决策树、人工神经网络和支持向量机等机器学习技术实时分析了声发射信号, 实现了对砂轮状态的预测。BADGER 等<sup>[18]</sup>量化了声发射强度与修整能量之间的关系, 提出了声发射修整比能的概念, 用于量化修整效率和砂轮锐度。FENG 等<sup>[19]</sup>通过研究表面粗糙度与声发射产生机理之间的理论关系, 提出了一种基于声发射信号的表面粗糙度估计方法。GAO 等<sup>[20]</sup>利用交叉小波变换和小波相干法, 揭示了金属材料激光烧伤与磨削烧伤声发射信号的相关关系。综上, 声发射技术能够监测磨削过程中的相关状态, 是极具潜力的磨削无损检测技术之一。

本文开展了淬硬 GCr15 轴承钢平面精密磨削实验, 分析磨削白层的微观组织、显微硬度及形成机理, 揭示声发射信号频谱特征与磨削白层厚度的相互关联, 为优化淬硬轴承钢磨削参数、提高磨削表面质量提供理论基础和技术支撑。

## 1 实验方案

工件材料选用淬硬 GCr15 轴承钢, 名义相变温度  $T_{Ac1}$  为 745 °C, 表面平均硬度为 62 HRC, 工件尺寸为 10 mm×10 mm×12 mm(长×宽×高)。磨削实验在精密数控平面磨床 MGK7120×6 上进行, 选用树脂结合剂 CBN 砂轮, 目数 160<sup>#</sup>, 磨削实验装置如图 1 所示(工件位于声发射信号传感器内侧)。采用瑞士公司的 Kister-9257B 测力仪测量磨削力; 采用可磨式 K 型热电偶测量磨削温度, 热电偶丝尺寸 0.2 mm×0.04 mm(宽×厚), 在工件与热电偶丝之间、两热电偶丝之间采用云母片绝缘, 磨削时两热电偶

丝顶端形成搭点, 构成回路产生电势差, 依据热电偶电压与温度的对应关系, 得到磨削温度信号; 采用美国声学公司的压电式声发射传感器采集磨削过程的声发射信号, 传感器与工件之间采用黄油作为耦合剂。每次实验开始前, 利用碳化硅修整轮对砂轮进行修整, 使得其径向跳动小于  $1\text{ }\mu\text{m}$ , 磨削方式为干式逆磨, 砂轮转速  $v_s$  和工作台进给速度  $v_w$  分别保持为  $31.4\text{ m/s}$  和  $6\text{ m/min}$ , 切深  $a_p$  为  $10\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ ; 每个切深下实验完成后, 对砂轮进行一次修整, 保证砂轮工作状态的一致性。为了研究纯热效应下白层的特性及声发射信号的频谱特征, 采用 YLS-3000 型连续波光纤激光器辐照工件表面, 开展了激光烧蚀诱致白层实验, 激光烧蚀实验装置如图 2 所示。

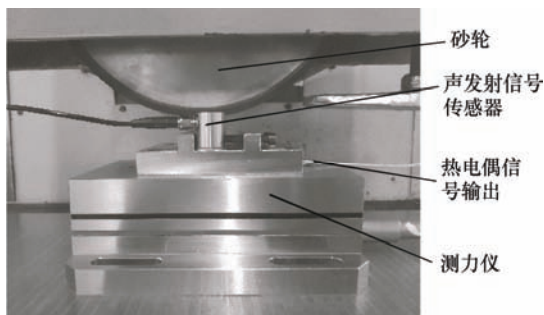


图 1 磨削实验装置

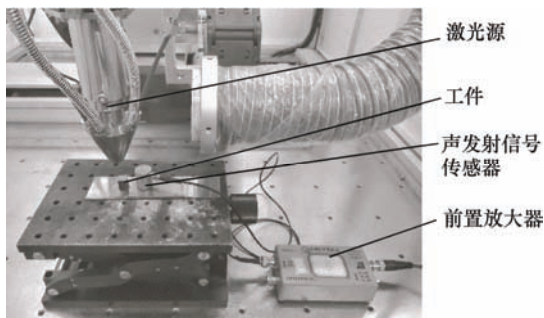


图 2 激光烧蚀实验装置

采用电火花线切割技术横向剖开工件, 依次采用  $400^\#$ 、 $800^\#$ 、 $1200^\#$ 、 $2000^\#$  粒度的砂纸对工件截面进行抛光, 再用粒径为  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  的金刚石抛光膏抛光, 直至工件截面呈现出镜面状; 随后将工件置于酒精中进行超声波清洗, 再用 4% 的硝酸腐蚀  $40\text{ s}$  左右, 立即用自来水冲洗, 用热空气干燥。采用光学金相显微镜、扫描电子显微镜观察工件截面的组织形貌。用维氏显微硬度仪测量工件截面硬度, 加载载荷为  $100\text{ g}$ , 持续时间为  $10\text{ s}$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 白层微观组织

图 3 为切深  $a_p$  为  $40\text{ }\mu\text{m}$  时磨削工件截面的显微组织, 从图 3a(放大倍数为  $1\text{ }200$  倍)可以看出工件截面的微观组织发生了较大变化, 由表及里依次为白层、暗层以及基体组织, 白层和暗层构成了磨削变质层。白层与暗层之间存在过渡区, 该过渡区内白层与暗层相互交织, 其原因是磨削时, 磨削温度与塑性形变沿着磨削深度方向呈梯度变化, 因此白层与暗层之间没有明显的分界线。图 3b 将磨削变质层放大为  $2\text{ }000$  倍, 由图可知, 与暗层以及基体组织相比, 白层组织更加致密, 晶粒尺寸更小, 不规则碳化物颗粒随机分布在白层、暗层以及基体组织中, 但是暗层和基体组织中的碳化物颗粒更加明显。对白层及暗层进一步放大(放大倍数为  $8\text{ }000$  倍), 如图 3c 所示, 可以发现白层中的碳化物颗粒的平均尺寸小于暗层, 且暗层中的碳化物颗粒明显突出, 这表明了金相制备过程中暗层比白层被腐蚀得更为严重, 即白层组织的耐腐蚀性更强。

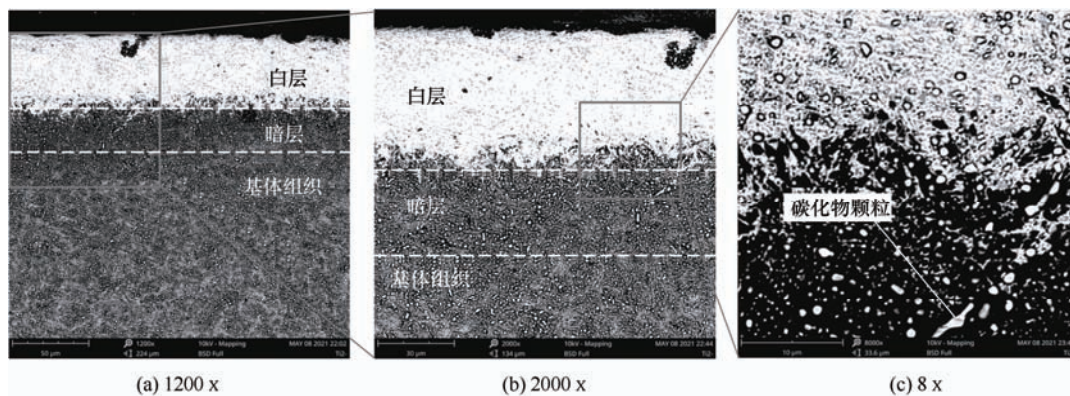


图 3 磨削工件截面在 SEM 下的微观组

图 4 显示了放大  $8\text{ }000$  倍下的磨削白层组织, 显然白层组织主要包含隐晶马氏体、残余奥氏体、

随机分布的碳化物颗粒, 晶粒尺寸远小于暗层及基体组织。其原因是磨削过程中, 砂轮磨粒对工件进

行滑擦、耕犁与切削,使得工件表面温度升高当磨削温度达到工件名义相变温度时,工件表面材料快速奥氏体化;同时磨削加工还使得工件表面发生了严重塑性变形,形成的奥氏体晶粒在磨粒挤压过程中也会被细化。图5显示了该磨削条件下的磨削温度变化规律,在0.72 s至0.8 s这一极短时间内磨削温度急剧上升到1 102 °C,升温速率高达了 $1.4 \times 10^4$  °C/s;在0.8 s至0.9 s之间磨削温度急剧下降至约500 °C,降温速率也达 $0.6 \times 10^4$  °C/s,温度变化速率比常规淬火更高,所以在工件表面形成了细小晶粒的隐晶马氏体。



图4 高倍率(8 000×)下的磨削白层组织结构组织

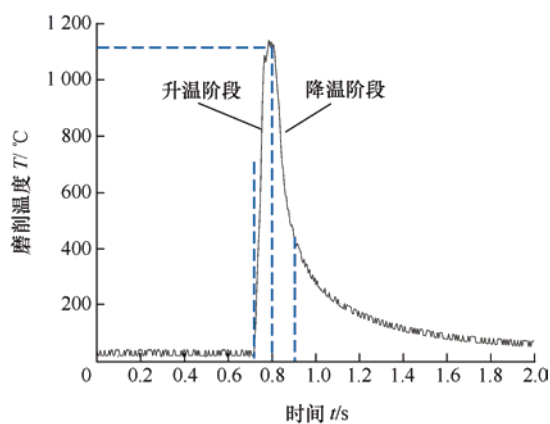


图5 切深 $a_p$ 为40  $\mu\text{m}$ 时的磨削温度变化规律

## 2.2 显微硬度

为了揭示距磨削表面不同深度处工件材料显微硬度的变化规律,每隔5  $\mu\text{m}$ 测量一次工件截面的显微硬度。受显微硬度仪压头大小的限制,为了使压痕之间不发生相互干涉,采用了交错测量的方法,如图6所示。图7为距磨削表面不同深度处显微硬度的变化曲线,由图可知,白层组织的最高硬度值达到956 HV,显著高于暗层组织及基体,位于磨削表面附近;白层/暗层过渡区内,硬度快速下降,暗层最低硬度值仅为553 HV;随后硬度值逐渐回升,

最后稳定在基体组织的原始硬度730 HV左右。由硬度值的变化可知,白层组织出现了明显的硬化现象,而暗层组织则出现了软化。

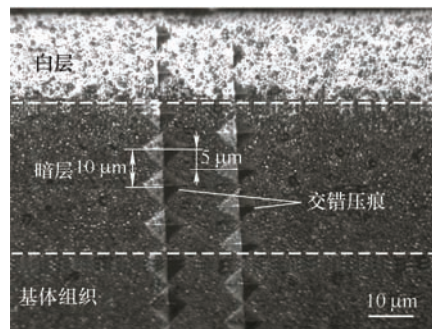


图6 光学金相显微镜下的压痕图

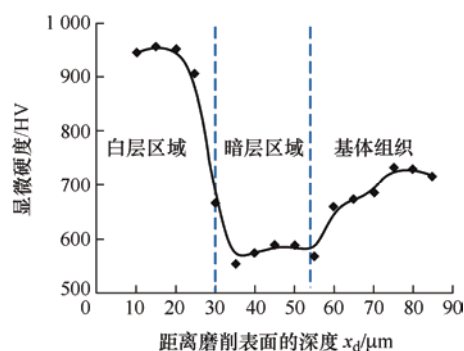


图7 距磨削表面不同深度处的显微硬度

由上述磨削工件微观组织可知,由于受磨削热的影响,工件表面组织发生了相变,形成奥氏体,随后的急剧冷却使得奥氏体来不及重结晶,最终形成了残余奥氏体。同时,由于严重塑性形变的作用,使得白层组织晶粒破碎细化,形成了致密的组织结构。而暗层主要是由磨削温度引发的回火效应形成的。所以靠近磨削表面的白层组织硬度高于基体组织,而暗层组织的硬度反而下降了,工件截面硬度值的变化规律与变质层的组织结构相对应。

## 2.3 磨削力与磨削温度对白层厚度的影响规律

图8显示了切深 $a_p$ 对磨削力及磨削温度的影响规律,显然磨削力和磨削温度均随切深的增大而增大。图9为切深对磨削白层厚度的影响,由图可知,当 $a_p$ 为5  $\mu\text{m}$ 时,磨削温度仅为334 °C,远低于材料的名义相变温度,此时工件表面没有出现白层;当 $a_p$ 为10  $\mu\text{m}$ 及15  $\mu\text{m}$ 时,磨削温度分别为445 °C和629 °C,即均低于工件材料的名义相变温度,而此时磨削表面竟然出现了白层,白层最大厚度为4  $\mu\text{m}$ ,这表明磨削白层能够在名义相变温度以下产

生, 李会鹏等<sup>[21]</sup>在研究应变速率对不锈钢微观组织影响规律时也得到类似结果。RAMESH<sup>[22]</sup>采用 Clausius-Clayperson 方程建立了 AISI 52100 轴承钢 (其成分及性能接近我国的 GCr15 轴承钢) 在高接触应力状态下的自由能差数学模型, 发现接触应力能够促使工件材料自由能差增大, 进而导致结晶驱动力增大, 诱使材料由  $\alpha$  相向  $\gamma$  相转变。磨削时, 塑性变形逐渐增大, 材料内部变形程度也随之增大, 储存能增加, 再结晶驱动力增大, 使得再结晶温度降低<sup>[23]</sup>, 进而促使工件材料在低温下发生相变, 从而在名义相变温度以下也出现了白层组织, 所以切深为 15  $\mu\text{m}$ 、磨削温度低于材料的名义相变温度时, 磨削表面也出现了图 9 所示的白层。当切深增大到 20  $\mu\text{m}$  时, 磨削温度上升到 754  $^{\circ}\text{C}$ , 大于工件材料的名义相变温度, 此时磨削白层厚度出现了突变, 迅速达到 19.4  $\mu\text{m}$ 。随着切深进一步增大, 磨削温度继续升高, 白层厚度也稳步增大, 但没再出现突变。

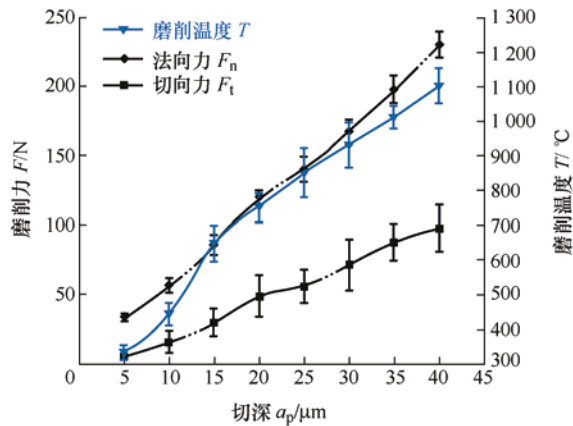


图 8 切深对磨削力和磨削温度的影响规律

这表明磨削温度是否超过工件材料的名义相变温度, 是影响白层厚度的重要因素。

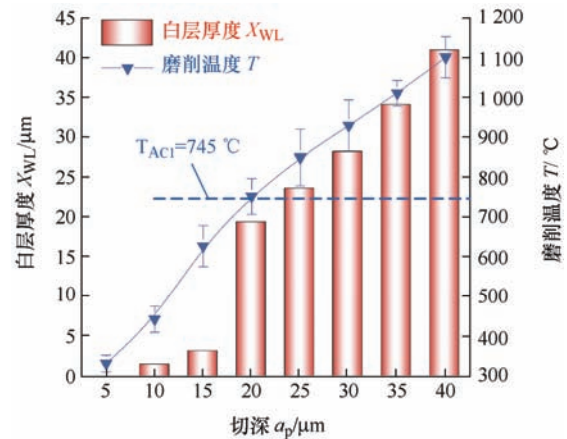
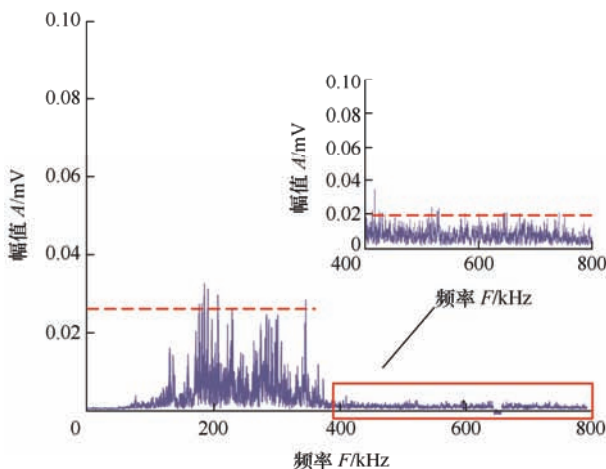


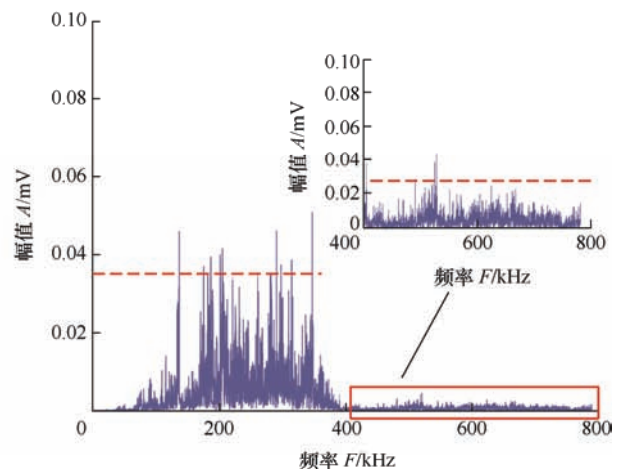
图 9 切深对磨削白层厚度的影响规律

## 2.4 声发射信号频谱分析

图 10 显示了不同切深下的声发射信号频谱特征, 可以看出随着切深及与之对应的磨削温度和磨削力的增大, 声发射信号的低频段(0~400 kHz)和高频段(400~800 kHz)幅值均相应增大。当切深为 10、15、20、30 和 40  $\mu\text{m}$  时, 低频段幅值依次为 0.026、0.034、0.041、0.053 和 0.064 mV, 即低频段幅值随切深增大而逐渐增大。图 10 还可以看出, 高频段增幅更加明显, 在切深为 10  $\mu\text{m}$ 、磨削温度为 445  $^{\circ}\text{C}$  时, 高频段信号的幅值仅为 0.002 mV 左右; 而当切深为 40  $\mu\text{m}$ 、磨削温度达到 1102  $^{\circ}\text{C}$  时, 高频段幅值显著增大到 0.019 mV, 是切深为 10  $\mu\text{m}$ 、磨削温度为 445  $^{\circ}\text{C}$  时的 9.5 倍。



(a)  $a_p=10 \mu\text{m}$ ,  $F_n=57 \text{ N}$ ,  $F_t=16 \text{ N}$ ,  $T=455 ^{\circ}\text{C}$



(b)  $a_p=15 \mu\text{m}$ ,  $F_n=86 \text{ N}$ ,  $F_t=30 \text{ N}$ ,  $T=649 ^{\circ}\text{C}$

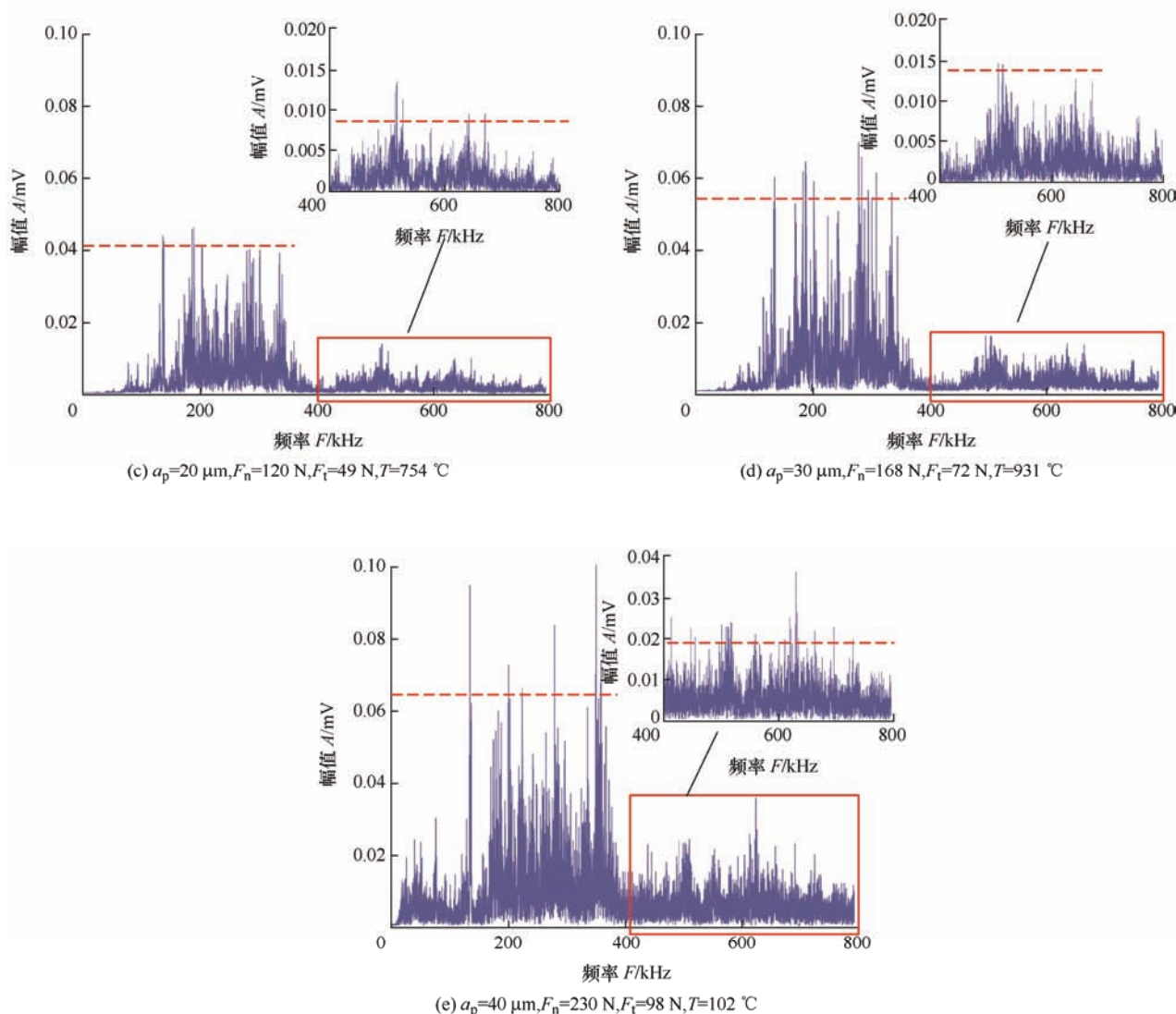


图 10 不同切深下的声发射信号频谱图

图 11 为磨削加工过程中声发射信号的形成原理,磨削时声发射信号的来源主要有两个方面:一方面,砂轮磨粒与工件材料相互机械挤压,材料发生塑性变形,产生了弹性波<sup>[24]</sup>。另一方面,在磨削区内,工件表面温度急剧升高,而亚表面的升温速度相对较慢,即工件表面材料的热膨胀量大于亚表面材料,从而工件表面材料出现的压应力大于后者,在不同热应力的作用下,工件表面与亚表面材料会相互挤压,产生弹性波,进而出现声发射信号<sup>[25]</sup>;磨削后,工件表面材料受外界直接冷却导致温度急剧下降,而亚表面材料散热性能差进而引起其温度下降速度慢,即工件表面材料的收缩速度大于亚表面材料,从而前者出现的拉应力大于后者,因此工件表面与亚表面材料也会出现相互挤压,进而产生弹性波。在磨削过程中,机械挤压应力和热应力共同决定着材料内部弹性波的强弱,其中,机械挤压应力引起的弹性波与磨削力相关,热应力诱导的弹

性波取决于磨削温变。基于本文 2.3 节所述磨削温度对白层厚度的影响规律,可以利用声发射信号频谱幅值监测磨削白层厚度。

磨削过程中机械挤压应力和热应力均会对声发射信号频谱幅值产生影响,为了解耦两种影响因素,开展了激光烧蚀实验,探究单一热应力作用下的白层厚度及声发射信号频谱幅值的关系。图 12a 显示了功率为 50 W 激光烧蚀后的工件截面金相组织,显然工件表面没有出现白层,这是因为在该功率下工件表面温度没有达到材料名义相变温度,工件表面只发生回火效应,所以只产生了暗层。图 13a 为 400 W 激光烧蚀后工件截面的金相组织,显然工件表面出现了较厚的白层,究其原因,高功率激光引起的工件表面温升更大,工件材料发生相变,进而形成白层。图 12b 显示了激光烧蚀过程中的声发射信号频谱,可以看出声发射信号整个频段的幅值均处于较低水平,高频段信号的幅值基本处在

0.01 mV 以下。由图 13b 可知, 声发射信号低频段幅值为 0.011 mV, 与功率为 50 W 激光的接近; 而高频段信号幅值显著增大, 高达 0.04 mV。对比图 12 与图 13 中的金相组织及声发射信号高频段幅值, 可以看出在单一热作用下, 白层厚度与声发射信号高频段幅值存在相互关联, 当出现白层时, 与之对应的高频段信号幅值也急剧增大。众所周知, 激光烧蚀属于非接触式加工, 在烧蚀过程中无论采用多

大功率的激光器, 工件表面均不会出现机械挤压应力; 同时, 激光烧蚀又属于高能束加工, 工件表面会出现大的热应力, 且激光功率越大产生的热应力越大。因此, 结合图 12 和图 13 的声发射信号频谱特征, 可以发现, 声发射信号的低频段幅值能够体现出机械挤压应力的作用效能, 而高频段幅值则主要体现出热应力作用效能, 从而实现了磨削时机械应力和热应力对白层厚度影响规律的解耦。

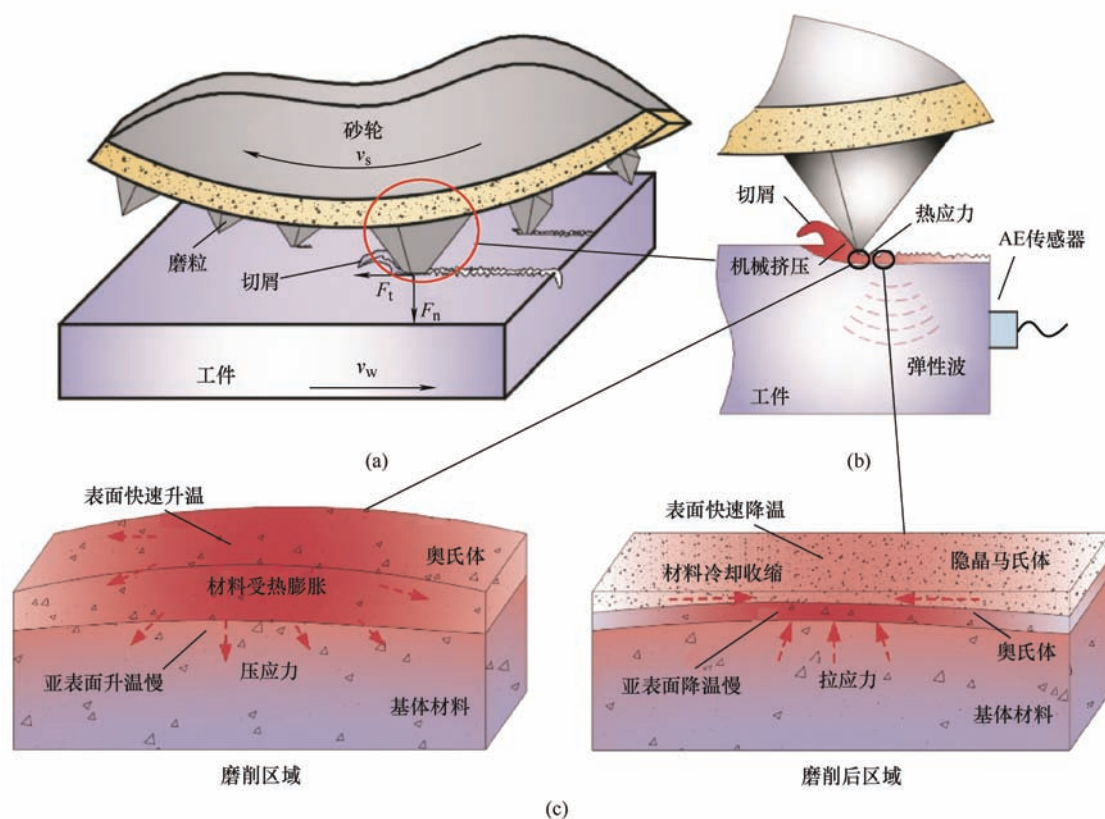


图 11 磨削加工时声发射信号形成原理

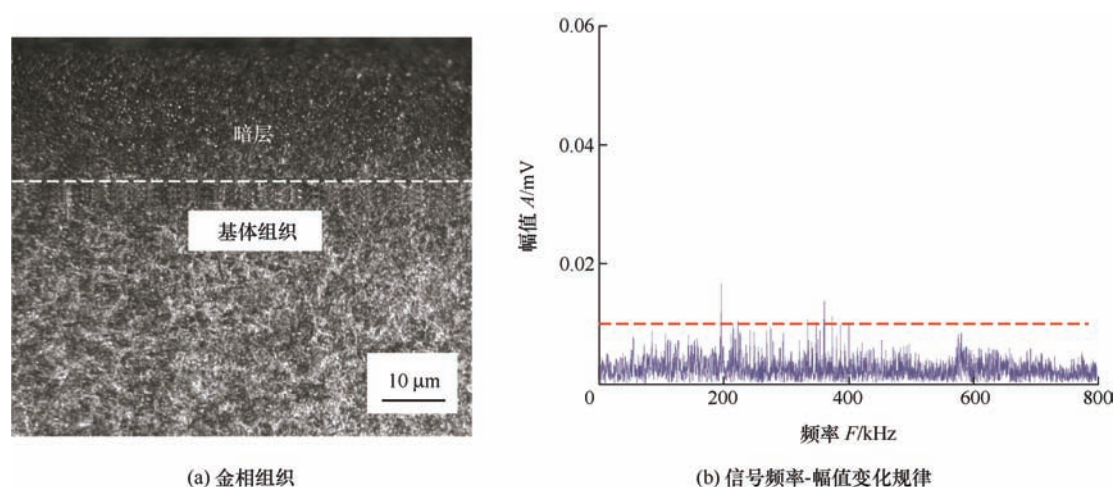


图 12 激光功率 50 W 时的金相组织与声发射信号频谱图

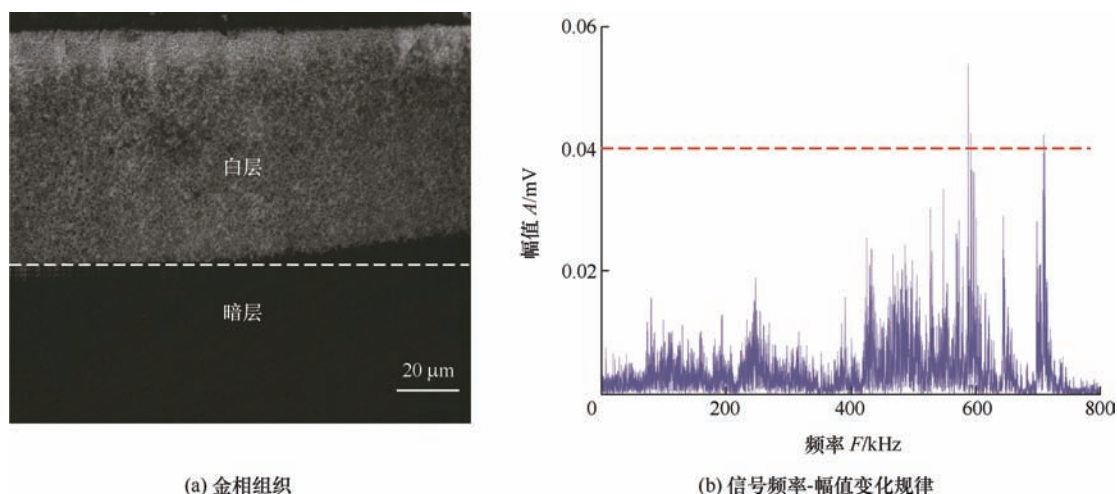


图 13 激光功率 400 W 时的金相组织与声发射信号频谱图

由图 8 可知,当磨削深度由 10 μm 增大到 40 μm 时,法向磨削力和切向磨削力分别由 57 N 和 16 N 增大至 230 N 和 98 N,切深增大使得工件表面受机械挤压应力增大,从而对应的声发射信号低频段幅值由 0.026 mV 增大到 0.064 mV,如图 10a 和图 10e 所示。由图 9 可知,切深为 10 μm 时,磨削温度为 445 °C,切深增大至 40 μm 时,磨削温度上升为 1 102 °C,对应的声发射信号高频段幅值由 0.002 mV 显著增大到 0.019 mV,如图 10a 和 e 所示。这进一步证实了磨削温度会对声发射信号高频段幅值产生显著影响。基于磨削温度超过材料名义相变温度时会引起白层厚度出现突变,根据图 9 中不同切深下的白层厚度和图 10 中对应切深的声发射信号频谱特征,可以得到磨削白层厚度随声发射信号高频段幅值的变化规律,图 14 显示了磨削白层厚度与高频段幅值的相互关联。显然,当切深  $a_p$  为 10 μm 和 15 μm 时,磨削温度分别为 445 °C 与 649 °C,小于工件材料的名义相变温度,此时白层厚度分别为 1.45 μm 和 3.12 μm,高频段幅值也较小,分别为 0.002 mV 和 0.003 6 mV;当切深  $a_p$  增大到 20 μm 时,磨削温度升高至 754 °C,略高于工件材料的名义相变温度,此时白层厚度急剧增大到 19.4 μm,高频段幅值出现突变,迅速增大到 0.008 6 mV;当切深  $a_p$  为 30 μm 和 40 μm 时,磨削温度为 931 °C 与 1 102 °C,白层厚度逐步增大到 28.18 μm 和 40.95 μm,高频段幅值也稳步增大,分别达到 0.014 mV 和 0.019 mV。即通过声发射信号高频段幅值是否出现突变,可以判断磨削白层厚度是否出现突变,进而评估磨削表面和亚表面是否出现相变及产生厚的变质层。

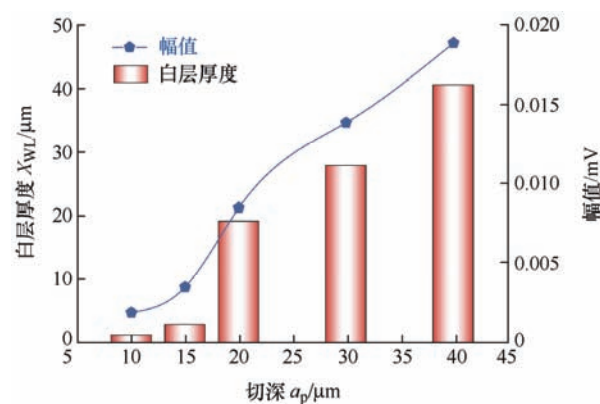


图 14 磨削白层厚度与高频段信号幅值的相互关联

图 15 为声发射信号形成的微观原理示意图,微观视野下弹性波可以视为材料内部分/原子的相互作用。在切深较小时,磨削温度低于工件材料的名义相变温度,材料组织变化可以分为三种情况:未发生明显变化;形成暗层;在磨削热及塑性形变协同作用下形成少量白层。在上述三种情况中,材料内部组织表现出较强的稳定性,内部分/原子之间具有较强的相互约束作用,所以材料分/原子难以自由运动<sup>[26]</sup>,而是在宏观塑性变形作用下发生相互挤压。众所周知,随着磨粒逐渐切入材料,磨削力逐步增大,塑性变形也持续增大,且沿着磨削深度方向呈梯度递减趋势,所以该种作用机制之下产生的弹性波也表现为持续且逐渐减弱的特征,弹性波振荡频率也位于低频区间,BHUIYAN 等<sup>[27]</sup>在研究刀具磨损时也证实了该现象。随着切深增大,磨削力及工件材料塑性变形增大,进而导致机械挤压作用增强,从而声发射信号低频段幅值稳步增大(如图 10 所示);同时,切深增大导致磨削温度升高,这为工件材料相变提供了更多的热能,当材料超过名义相

变温度时会快速奥氏体化, 内部组织结构发生巨大转变, 分/原子之间的约束作用减弱<sup>[28]</sup>, 分/原子的内能增加, 进而在一定空间内进行无序且高频振动, 所以产生的弹性波主要集中在高频区间, 从而声发射信号高频段幅值出现了急剧增大, 如图 10 所示。LIU 等<sup>[29]</sup>在研究 CMSX4 镍基合金的声发射信号频谱时也发现类似现象。

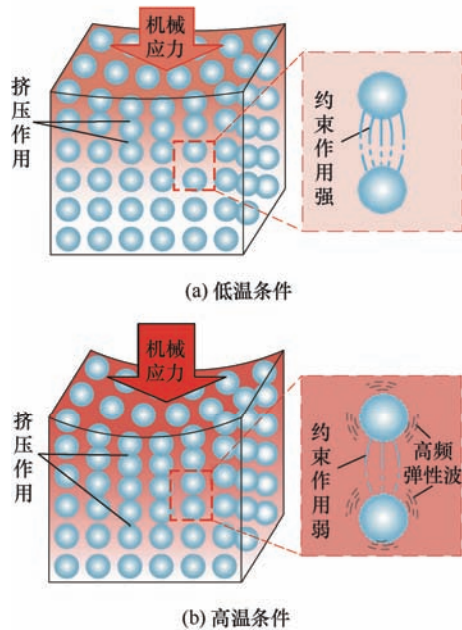


图 15 声发射信号形成的微观原理

### 3 结论

(1) 白层组织更加致密, 耐腐蚀性更强, 显微硬度值高达 956 HV, 显著高于暗层与基体组织; 磨削白层受到磨削温度与塑性形变的协同影响, 当磨削温度低于工件材料的名义相变温度时, 在剧烈的塑性变形诱导下, 磨削表面也会出现白层; 当磨削温度超过名义相变温度时, 白层厚度会突增。

(2) 磨削时声发射信号受机械挤压应力和热应力效应协同影响, 低频段幅值主要取决于机械挤压应力; 高频段幅值主要受热应力效应影响, 当磨削温度超过名义相变温度时, 工件材料分/原子内能显著增大, 进而产生无序高频振动, 从而高频段幅值急剧增大。

(3) 声发射信号高频段幅值与白层厚度之间存在关联关系, 当磨削温度超过工件材料名义相变温度时, 磨削白层厚度急剧增大, 声发射信号高频段幅值出现突变, 因此, 根据磨削过程中高频段幅值是否出现突变, 可以判断磨削表面和亚表面是否出

现相变及产生厚的白层, 这为磨削白层厚度的评估提供了一种无损检测方法。

### 参 考 文 献

- [1] 丁文锋, 苗情, 李本凯, 等. 面向航空发动机的镍基合金磨削技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 189-215.  
DING Wenfeng, MIAO Qing, LI Benkai, et al. Review on grinding technology of nickel-based superalloys used for aero-engine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 189-215.
- [2] CARSTEN J R, SØREN F, SOMRITA D, et al. Surface crack formation on rails at grinding induced martensite white etching layers [J]. Wear, 2017, 384: 8-14.
- [3] ZHANG S B, LIU Z Q, WANG B, et al. Phase transition and dynamic recrystallization mechanisms of white layer formation during turning superalloy Inconel 718[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 5288-5296.
- [4] 杜劲, 刘战强, 张入仁, 等. 镍基高温合金高速铣削加工表面完整性[J]. 中南大学学报, 2012, 43(7): 2593-2600.  
DU Jin, LIU Zhanqiang, ZHANG Ruren, et al. Surface integrity on high-speed milling Ni-based superalloy[J]. Journal of Central South University, 2012, 43(7): 2593-2600.
- [5] CHEN Z. Study on the white layer in wire electrical discharge trim cutting of bearing steel GCr15[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102: 2375-2386.
- [6] SATYANARAYANAN R, SHREYES N M, JUNG I H. Modeling of laser-tempering process for hyper-eutectoid steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45: 2612-2625.
- [7] 谢兴杰, 张小俭. 激光加热辅助车削淬硬钢的白层形成临界切削速度预测与实验研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(1): 15-23.  
XIE Xingjie, ZHANG Xiaojian. Prediction and experimental study of critical cutting speed of white layers formation in LAT hardened steels[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(1): 15-23.
- [8] 潘睿, 任瑞铭, 陈春焕, 等. 钢轨踏面马氏体白层组织分析[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(7): 167-171.  
PAN Rui, REN Ruiming, CHEN Chunhuan, et al. Microstructure analysis of martensite white etching layers on rails[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,

- 2016, 37(7): 167-171.
- [9] 辛悦, 赵秀娟, 潘金芝, 等. D2 车轮钢原始组织对滑动磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(4): 479-488. XIN Yue, ZHAO Xiujuan, PAN Jinzhi, et al. Influences of microstructure on sliding wear performance of D2 wheel steel[J]. Tribology, 2019, 39(4): 479-488.
- [10] 张涛, 陈浩, 田峰, 等. 大规模 1.5MW 风力发电机变桨轴承开裂行为分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6344-6351. ZHANG Tao, CHEN Hao, TIAN Feng, et al. Analysis on large scale cracking damage for pitch bearings of 1.5MW wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6344-6351.
- [11] GUO Y B, SAHNI J. A comparative study of hard turned and cylindrically ground white layers[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44: 135-145.
- [12] 耿荣生, 景鹏. 蓬勃发展的我国无损检测技术[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 1-7. GENG Rongsheng, JING Peng. On the flourishing development of NDT techniques in China[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 1-7.
- [13] ABUNABAH B A, NAGY P B. High-frequency eddy current conductivity spectroscopy for residual stress profiling in surface-treated nickel-base superalloys[J]. NDT&E International, 2007, 40: 405-418.
- [14] 蒋生辉, 丁昊昊, 张翔, 等. 基于磁巴克豪森噪声的钢轨白层无损检测研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 49-56. JIANG Shenghui, DING Haohao, ZHANG Xiang, et al. Research on non-destructive testing of rail white etching layer based on magnetic Barkhausen noise[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 49-56.
- [15] GUO Y B, AMMULA S C. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(14): 1622-1627.
- [16] 姜晨, 李郝林. 基于声发射信号的精密外圆切入磨削时间评估算法及试验研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 194-200. JIANG Chen, LI Haolin. Algorithm and experiment of estimation of time of precision cylindrical plunge grinding based on acoustic emission signal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 194-200.
- [17] ARUNA A, RAMESHKUMAR K, UNNIKRISHNAN D, et al. Tool condition monitoring of cylindrical grinding process using acoustic emission sensor[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5: 11888-11899.
- [18] BADGER J, MURPHY S, DONNELL G E. Acoustic emission in dressing of grinding wheels: AE intensity, dressing energy, and quantification of dressing sharpness and increase in diamond wear-flat size[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 125: 11-19.
- [19] FENG P, BORGHESANI P, SMITH W A, et al. Model-based surface roughness estimation using acoustic emission signals[J]. Tribology International, 2020, 144: 106101.
- [20] GAO Zheyu, LIN Jing, WANG Xinfeng, et al. Grinding burn detection based on cross wavelet and wavelet coherence analysis by acoustic emission signal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 68.
- [21] 李会鹏, 熊毅, 路妍, 等. 应变速率对低温拉伸 316LN 奥氏体不锈钢微观组织和力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2018, 32(2): 105-111. LI Huipeng, XIONG Yi, LU Yan, et al. Effect of strain rate on microstructure evolution and mechanical property of 316LN austenitic stainless steel at cryogenic temperature[J]. Journal of Materials Research, 2018, 32(2): 105-111.
- [22] RAMESH A. Prediction of process — induced microstructural changes and residual stresses in orthogonal hard machining[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2002.
- [23] 刘宗昌. 材料组织结构转变原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009. LIU Zongchang. Transformation principle of material organization structure [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [24] WANG L H, ROBERT X G. Condition monitoring and control for intelligent manufacturing[M]. London: Springer, 2006.
- [25] YANG Z S, YU Z H, WU H X, et al. Laser-induced thermal damage detection in metallic materials via acoustic emission and ensemble empirical mode decomposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 1617-1626.
- [26] BOHEMEN S, SIETSMA J, HERMANS M, et al. Kinetics of the martensitic transformation in low-alloy steel studied by means of acoustic emission[J]. Acta Materialia, 2003, 51: 4183-4196.

- [27] BHUIYAN M, CHOUDHURY I, DAHARI M, et al. Application of acoustic emission sensor to investigate the frequency of tool wear and plastic deformation in tool condition monitoring[J]. *Measurement*, 2016, 92: 208-217.
- [28] BARAM J, ROSEN M. On the nature of the thermoelastic martensitic phase transformation in Au-47.5 at.% Cd determined by acoustic emission[J]. *Acta Metallurgica*, 1982, 30: 655-662.
- [29] LIU Q, CHEN X, GINDY N. Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46: 284-292.

作者简介：毛聪(通信作者)，男，1975 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为磨削加工理论与装备、超硬磨料工具制备。

E-mail: maocong315@aliyun.com

孙鹏程，男，1994 年出生，硕士研究生。主要研究方向为精密加工。

E-mail: 1606380076@qq.com