

文章编号 1000-5013(2005)04-0338-05

红外测温技术及其在磨削温度测量中的应用

尤芳怡 徐西鹏

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要 阐述磨削温度的基本概念及研究磨削温度的意义, 简要介绍各种红外测温仪的工作原理. 结合红外测温技术在磨削温度测量中的几个典型应用, 包括红外辐射测温法、光纤红外测温法、双色红外测温法和红外成像测温法, 分析它们的特点和适用范围.

关键词 磨削, 温度, 红外, 测量

中图分类号 TN 219; TG 580.1⁺4

文献标识码 A

磨削加工中, 砂轮切下单位体积切屑所消耗的能量可能会达到普通切削时的 10~20 倍. 研究发现磨削所消耗的能量约有 80% 以热的形式进入工件, 而只有一小部分被切屑和砂轮磨粒带走^[1]. 磨削过程中, 大量不规则离散分布在砂轮表面的磨粒对工件划擦、耕犁和切削综合作用, 其所产生的热体现为工件的温升、砂轮与工件接触面的温升、工件已磨削表层的温升、磨粒切削刃温度和切屑温度. 进入工件的热量将引起工件表层温度的显著升高, 造成局部高温和过大的温度梯度, 从而产生工件尺寸形状偏差、表面变质层, 以及表面烧伤和裂纹等加工缺陷^[2]. 过多的热量传入工具可能导致磨料过早失效, 同时在加工过程中热应力的循环作用, 可能使结合剂与磨料之间的把持力减弱, 从而导致磨粒的非正常脱落. 为了有效地控制热损害, 必须充分了解磨削加工过程的热现象.

1 磨削温度的测量与研究

1942 年, Jaeges^[3] 首先给出半无限体表面上带状恒速移动热源问题的解析. 其后, 许多学者先后推导和提出各种热源理论. 磨削时的热传导方向及工件表面层中的温度分布等温线, 如图 1 所示^[4]. 通过测量实际加工中的磨削温度, 研究磨削热现象, 探讨磨削工件表层温度分布的规律, 对于阐明产生磨削缺陷的热机理及寻求控制磨削表面质量的途径具有重要的意义. 目前, 测量和研究磨削温度主要采用热电偶法, 即有夹丝法、埋丝法和刀屑自然热电偶法^[5]等. 夹丝法可测量磨削表面的温度, 埋丝法用于测量磨削区下不同深度处工件的温度. 它们共同的缺陷是需要破坏试件的整体性. 以砂轮和工件在磨削时的接触面为热电偶节点的刀屑热电偶法, 只适合金属材料的磨削. 由于砂轮热电功率较大, 比较难准确测量热电势, 但随着非接触红外测温技术的快速发展, 红外辐射测温 and 红外成像测温逐步被应用于磨削温度的研究.

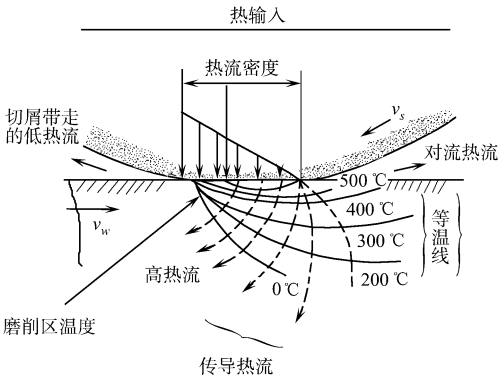


图 1 磨削时的热传导及温度分布等温线

2 红外测温技术

凡是温度高于绝对零度的物体都会产生红外辐射. 根据斯蒂芬-玻尔兹曼公式, 物体辐射能与热力学温度的 4 次方成比例, 可以通过辐射能的测量来进行测温. 红外测温仪按设计原理, 分为全辐射测温

收稿日期 2005-03-21

作者简介 尤芳怡(1971-), 女, 讲师, 主要从事加工过程仿真、优化及监控的研究. E-mail: fangyi_you@hotmail.com

基金项目 福建省自然科学基金资助项目(E0410022)

仪、亮度测温仪和比色测温仪 3 类。全辐射测温是通过接收目标整个光谱范围的总辐射功率, 来确定目标温度。当目标尺寸小于视场, 背景辐射能量就会进入测温仪造成误差, 其灵敏度较低, 响应慢, 受物体表面发射率影响大, 精度不高, 测温范围一般较小。在全辐射测温仪前加一个带通滤光片构成的亮度测温仪(又称部分辐射测温仪), 是根据测量目标在给定波长附近一窄带光谱的辐射亮度来获取目标温度。由于其不需要环境温度补偿, 受发射率的影响较小, 测量精度高, 但也仅适于高温测量。比色测温仪是利用两个波段内单色光辐射能量的比值来确定目标温度。因此, 当被测目标很小, 不充满视场, 或者测量通道上存在烟雾、尘埃等阻碍时, 才适合选用双色测温仪。它需要保证两个波段的辐射吸收率相差不大, 对波段选择有要求严格。

红外测温仪的结构原理, 如图 2 所示。光学系统汇聚其视场内的目标红外辐射能量, 视场的大小由测温仪的光学零件及其位置确定。红外能量聚焦在光电探测器上转变为相应的电信号, 经放大器和信号处理电路转换为被测目标的温度值。红外探测器是红外测温仪的重要组成部分, 可分为热探测器和光子探测器两大类^[6]。热探测器有热电堆和热敏电阻探测器等。红外光子探测器是利用半导体材料(如硫化铅(PbS)、硒化铅(PbSe)、碲化铋(InSb)、碲镉汞(HgCdTe) 或砷化镓(InAs) 等) 在入射光的照射下, 产生光子效应, 使材料电学性质发生变化, 并通过测量电学性质的变化来获得红外辐射的强弱。

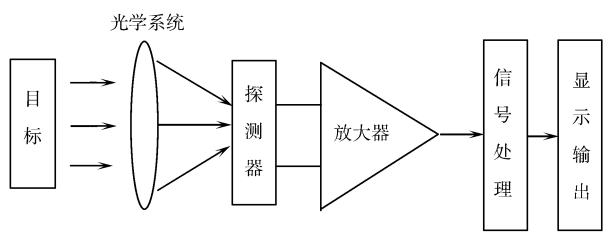


图 2 红外测温仪结构原理

光纤的应用使红外技术在恶劣环境下的测温成为可能。光纤红外温度计的构造与一般红外温度计的构造类似, 光纤仅仅作为传光的媒介, 对待测对象的调制功能仍然靠传感器来实现。上述几种红外测温技术, 只能对局部少数点进行温度探测。对于大面积的温度场测试, 则需要使用成像系统, 如光机扫描成像系统或非扫描成像系统。光机扫描成像系统采用单元或多元光电导或光生伏特红外探测器, 但非扫描成像的热像仪(如阵列式凝视成像的焦平面热像仪) 在性能上大大优于它且有逐步取代的趋势。其关键技术是, 探测器由单片集成电路组成, 被测目标的整个视野都聚焦在上面。探测器将红外辐射能转换成电信号, 经放大、转换成标准视频信号, 通过监测器显示与物体表面的热分布场相对应的红外热像图。

3 红外测温技术在磨削温度测量中的应用

3.1 红外辐射测温法

美国学者 Mayer 采用硫化铅(PbS) 半导体材料制成的光电导探测器, 测量工件磨削表面的温度^[7], 如图 3 所示。实验使用碗状白色氧化铝砂轮磨削 AISI52100 钢, 砂轮径向上钻一个小通孔, 孔的一侧用挡板遮住, 只留一个 1.59 mm 的方形开口。磨削加工时, 工件表面的辐射射线通过方孔投射到放置在砂轮内部的 PbS 传感器上。PbS 放在冰水槽中保持恒温, 在其工作范围内, PbS 的阻值随工件磨削表面的温度也就是红外辐射强度而改变。当电热器将工件加热到不同的温度时, 用标准的铂-镍铬热电偶测量工件表面的温度, 并对 PbS 测温单元进行标定。实验采用干磨削, 砂轮线速度为 $28.85\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 4 是实验所测不同磨削厚度(a_p) 对应的工件磨削区的表面温度(θ)。

3.2 光纤红外辐射测温法

日本学者 Ueda 用光纤和砷化镓(InAs) 红外光子探测器, 测量了研磨砂轮表面磨粒的温度^[8]。图 5 为磨削实验用的红外辐射温度测量系统示意图。砂轮上磨粒向外发射的红外辐射能, 发射到达光纤可以接受的区域, 由光纤传输到 InAs 检测器。红外能量被转换成电信号, 经放大后送到计算机显示出来。这个测温装置可以观察砂轮表面磨粒的温度变化。Ueda 在后来的实验和研究中比较了红外测温 and 热电偶测温的区别, 认为热电偶的焊点式结构响应速度和瞬时准确性较差^[9]。采用与上面相似的测温原理, Ueda 用 InSb 红外检测单元, 设计了另外一个红外高温计^[10], 测量了金刚石砂轮磨削硬质合金时的工件表面温度。InSb 的时间常数大约为 $1\text{ }\mu\text{s}$ 。高温计用氟化物光纤和硫化物光纤传输辐射信号, 采用这两种光纤相对于石英光纤可以测量更低的温度, 因为它们可以传输波长较长的射线。这种高温计适合于测量小物体快速变化的温度。图 6 为 InSb 红外光纤测温实验。实验中光纤的采集头对准工件的下表面, 其

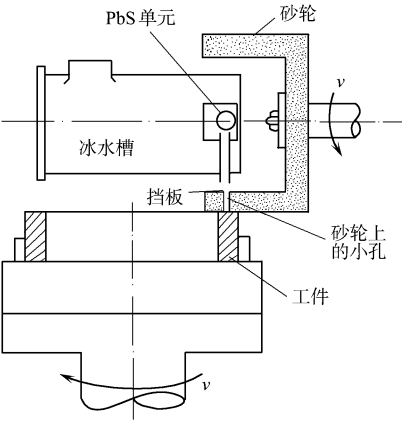


图 3 红外辐射测温

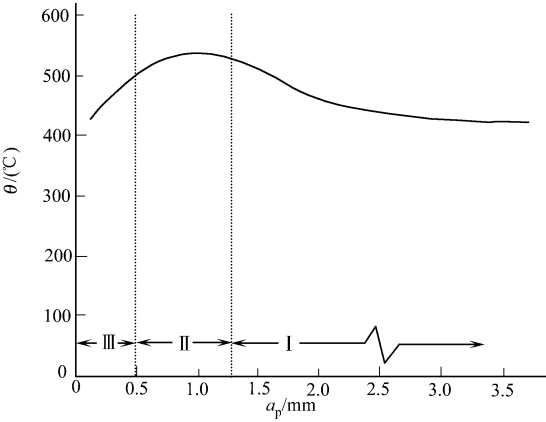
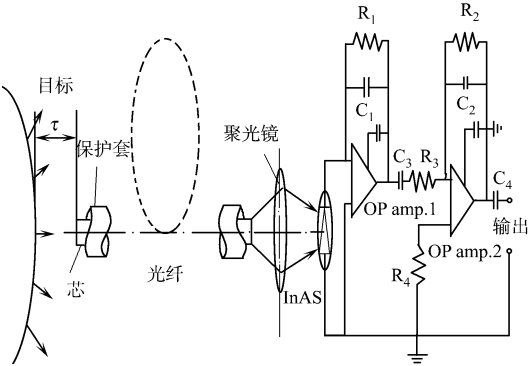
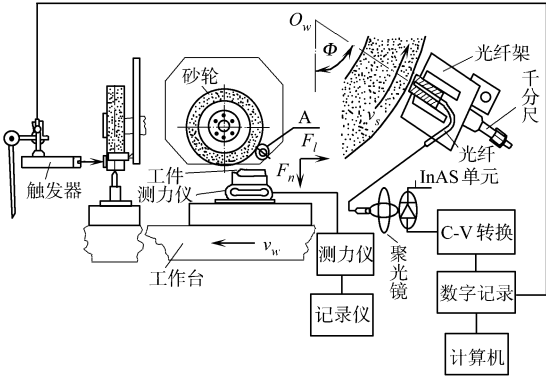


图 4 实验结果

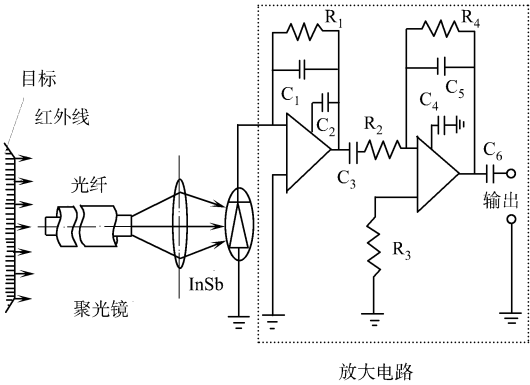


(a) InAs 红外光纤测温原理

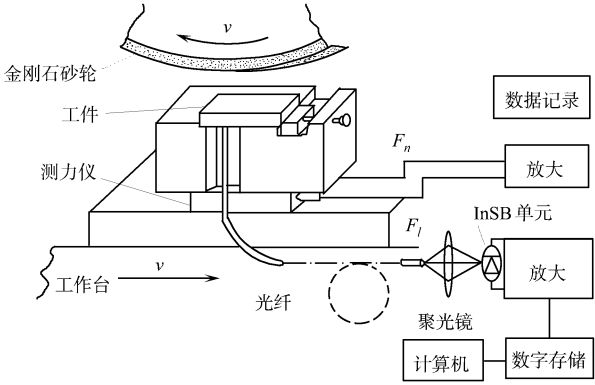


(b) 磨削实验装置

图 5 InAs 测砂轮磨粒温度实验



(a) InSb 系统原理图



(b) 实验装置图

图 6 InSb 红外光纤测温实验

测量的是工件下表面的温度. 文[11]利用红外探测器采集磨屑热流辐射信号, 进行磨削工况在线检测; 通过检测磨屑的温度, 间接判断磨削区的温度. 这种方法检测结果受外界因素干扰的影响较大. 文[12]利用光纤红外测温仪检测了磨削火花温度. 同样, 这种方法测量的并不是真正的磨削温度, 且只适合有火花产生的磨削过程.

3.3 双色光纤红外测温法

文[13]用双色红外系统测量了脆性材料的磨削温度, 图 7 为其实验装置简图. 测温系统有两个红外辐射感应单元, 即 InSb 和 MCT. 它由安装在磨削区以下一定深度的硫化物光纤, 将待测部位的红外辐射传送给这两个感应元件, 转化成微电压信号, 再经放大和模数转换输送到计算机. 通过这两个感应元件所测信号的比值, 可得出被测物体的温度和发射率. 通过实验测量了磨削弧区的温度, 研究金刚石砂轮磨削花岗岩和陶瓷过程中的温度特性. 实验和理论数据的拟合, 证明了实验结果的准确性. 在上面实

验的基础上, 文 [14] 采用埋装热电偶法、夹丝热电偶法和双色红外测温法同时测量 CBN 砂轮磨削 AI-Si1010 碳钢时的温度. 实验在 CNC 磨床上完成, 磨削过程为干磨削. 实验表明, 3 种方法同时测量得出的磨削温度比较吻合. 同时, 通过移动热源理论分析和曲线拟合, 得出磨削能量的分配比均为 60%.

3.4 红外成像测温法

文 [15] 采用带有扫描成像系统的 AGA782 热像仪, 测量工件表面的二维温度场. 磨削过程中, 扫描头对被测表面实时跟踪, 所测红外热像图自动记录到录像带中, 由计算机进行后续处理, 实验装置如图 8 所示. 由于磨削过程中磨削区被砂轮遮挡, 因此这种方法测到的不是磨削区内工件表面温度分布, 而是离开磨削区一段时间后工件表面的温度. 其测量精度受被测物体表面质量、被测物体表面与扫描头的距离, 以及环境干扰的影响比较大.

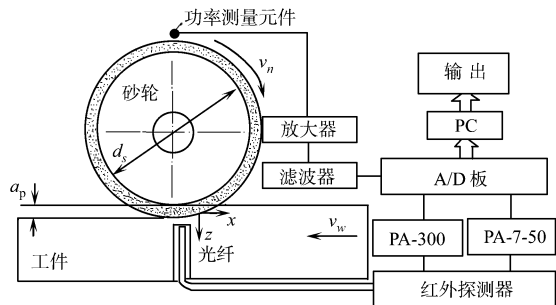


图 7 双色光纤红外测温法

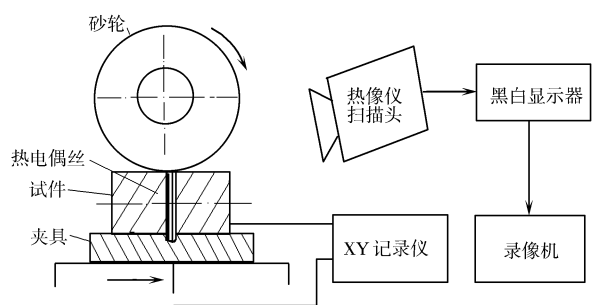


图 8 磨削温度测试系统框图

文 [16] 采用红外成像的电荷偶合装置 (CCD) 测量平面磨削中工件的温度场分布, 实验装置如图 9 所示. 试验前, 在工件的侧面涂上一层高辐射系数的黑漆, 以提高表面发射率. 磨削过程中, 阵列式探头红外电荷偶合系统和 IR 显微镜构成的中波高速成像系统始终对准工件侧面待测区域, 工作台带着工件来回进给. 显微镜将来自测区域的红外热辐射聚焦于摄像机内, 由 256×256 探测点构成的二维聚焦屏上构成图像. 焦平面对中波范围的红外热辐射强度很敏感, 在黑体上能分辨出 $0.025\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化. 每一单独像素为 $30\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$, 整个视野为 $7.68\text{ mm} \times 7.68\text{ mm}$. 焦平面像素的保持时间短, 摄像机的快门可在小于 2 ms 的速度下工作. 因此, 可以观察到瞬间的温度变化. 此成像装置采用高达 $1500\text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度拍摄, 测量的最高温度达 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. 标定系统时, 将红外成像装置聚焦到一块被加热的、与磨削实验涂有相同黑漆的 4340 钢板 (标样) 上, 捕捉其热辐射强度图像. 将 K 型热电偶靠在试件的待测定区旁边, 用条形加热器加热该标样件, 辐射强度和温度值被热成像装置和热电偶同步测量. 标定温度范围为 $30\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. 通过这个实验装置, 他们测量了恒深磨削和锥度磨削下, 工件侧面的温度场分布, 获得了温度梯度的详细资料. 另外, 还从温度场里获得瞬时和稳定温度, 从而可确定磨削区最高温度值和最高温度所处的位置.

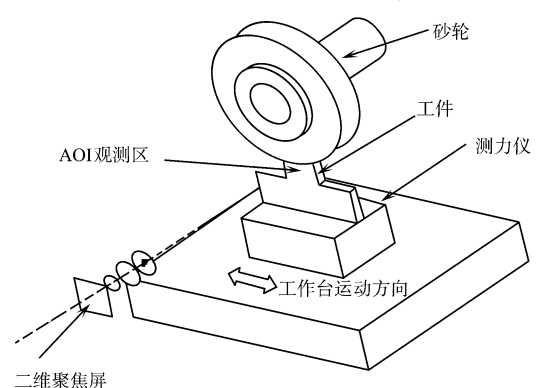


图 9 CCD 测量平面磨削温度

4 结束语

红外辐射实验方法可以直接测出磨削接触区的温度, 但是它必须使用特制形状 (碗状) 的砂轮, 且要在砂轮上面钻一个小孔作为辐射通路. 在磨削温度的辐射测温中引入光纤, 较好解决了红外测温单元放置的问题. 将光纤采集头对准砂轮上特定的位置, 可测量砂轮上的磨粒在离开磨削区一定时间后的温度, 通过理论推导便可以确定实际磨削区的温度. 同时, 将光纤对准工件磨削接触区下方工件表面, 还可测得距离磨削接触区一定深度处的工件温度. 通过改变工件的厚度, 可获得磨削区下不同深度的工件温度. 光纤红外测温法测量磨屑热流辐射或磨削火花的方法, 在一定程度上可间接判断磨削温度的高低, 但实验结果受外界干扰因素的影响大. 双色红外测温法可以测量离磨削区表面一定深度的工件温度, 同

时利用红外双色系统,可以直接得出实际操作条件下所对应的被测物体的发射率.

前面的几种测温方法只能评价工件上少数选定点的温度,而采用红外成像法可以测量工件表面上的温度场分布,并从中得出最高温度和出现最高温度的位置.但它测量的是工件侧面或者离开磨削区一段时间后的工件表面温度分布,而不是磨削区的温度场.由于红外测温技术的快速发展,使之在磨削加工中实时测量磨削温度成为可能,为进行磨削加工的基础理论研究提供了技术保证.但上述各种测温方法都有其应用范围和适用特点.在实际应用中应根据具体情况,选用最适当的方法进行测试.随着科学研究水平和检测技术的不断提高,相信会有更先进的测温技术应用于磨削温度的检测与研究.

参 考 文 献

- 1 Komanduri R, Hou Z B. A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generate in some manufacturing processes and tribology[J]. Tribology International, 2001, 34(10): 653~ 682
- 2 张幼桢. 金属切削理论[M]. 北京: 航空工业出版社, 1988. 386~ 398
- 3 Jaeger J C. Moving source of heat and temperature at sliding contacts[J]. Proc Roy Soc New South Wales, 1942, 76: 203~ 204
- 4 李伯民, 赵 波. 实用磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 54~ 55
- 5 Outwater J O, Shaw M C. Surface temperatures in grinding[J]. Trans ASME, 1952, (74): 73~ 86
- 6 陈继述, 胡变荣, 徐平茂, 等. 红外探测器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986. 6~ 143
- 7 Mayer J E, Shaw M C. Grinding temperatures[J]. Lubrication Engineering of ASLE, 1957, (1): 1~ 4
- 8 Ueda T, Hosokawa A, Yamamoto A. Studies on temperature of abrasive grains in grinding application of infrared radiation pyrometer[J]. Trans ASME J of Engg for Ind, 1985, 107: 127~ 33
- 9 Ueda T, Hosokawa A, Yamamoto A. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber[J]. Trans ASME J of Engg for Ind, 1986, 108: 247~ 51
- 10 Ueda T, Yamada K, Sugita T. Measurement of grinding temperature of ceramics using infrared radiation pyrometer with optical fiber[J]. Trans ASME J of Engg for Ind, 1992, 114: 317~ 22
- 11 史金飞, 钟秉林. 基于粗糙集理论的磨削烧伤与砂轮磨钝在线监测[J]. 中国机械工程, 2001, 12(10): 1 151~ 1 153
- 12 曾盛绰. 光纤红外测温仪的研制及其在磨削区温度测量中的应用研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2001, 5(125): 47~ 49
- 13 Xu Xipeng. Experimental study on temperatures and energy partition at the diamond-granite interface in grinding[J]. Tribology International, 2001, 34(6): 419~ 426
- 14 Xu Xipeng, Malkin Stephen. Comparison of methods to measure grinding temperatures[J]. ASME Transactions, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123: 191~ 195
- 15 高 航, 宋利明, 郑焕文, 等. 应用红外热象仪测量磨削温度场的探讨[J]. 红外技术, 1991, 13(1): 21~ 24
- 16 Hwang Jihong, Kompella Sridhar, Chandrasekar Srinivassan. Measurement of temperature field in surface grinding using infrared(IR) imaging system[J]. ASME Transactions, Journal of Tribology, 2003, 125: 377~ 383

Applications of Infrared Technique in the Measurement of Grinding Temperatures

You Fangyi Xu Xipeng

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract The concept of temperatures generated in grinding and the importance of studying grinding temperatures are introduced. Some techniques which are used for the measurement of grinding temperatures, such as infrared radiation pyrometers, optical fiber infrared radiation pyrometer, two color infrared system and infrared imaging system, are summarized, compared and discussed.

Keywords grinding, temperature, infrared, measurement