

环形热管砂轮强化磨削弧区换热研究

苏宏华 马可 傅玉灿 徐鸿钧 赫青山

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要:磨削过程中,在超过临界值的高磨削热流密度下,即使有再多的磨削液进入弧区也无济于事,因为磨削液既已处于成膜沸腾状态,由于工件表面所覆盖的汽膜层的阻挡,磨削液很难真正起到换热作用,如不及时采取相应的措施,工件必定很快发生烧伤。本文结合热工领域的换热技术,提出一种基于热管技术强化磨削弧区换热的全新构想,并在此基础上研制了新型的环型热管砂轮,以大幅提高弧区临界热流密度。最后,分别使用环形热管砂轮和普通砂轮进行磨削测温试验,验证了环形热管砂轮高速疏导磨削热,降低磨削温度,从而提高材料去除率的巨大潜力。

关键词:热管;磨削弧区;磨削温度;强化换热

中图分类号: TG580

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)02-0233-07

Investigation of Enhancing Heat Transfer in Grinding Zone with Loop Heat Pipe Wheel

Su Honghua, Ma Ke, Fu Yucan, Xu Hongjun, He Qingshan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: During the grinding process, once the coolant comes into film boiling state, the vapor film on the work piece surface will impede the coolant to exchange heat. Consequently, more coolant will not helpful when high heat flux exceeds critical value. The workpiece surface will also burn immediately if there is no measure for this. A new conception of using heat pipe to enhance heat transfer in the grinding zone is put forward combining with the heat transfer technology of thermal engineering. A new type grinding wheel named the loop heat pipe wheel is developed for greatly increasing the critical heat flux. Finally, the measuring experiments of grinding temperature are carried out with loop heat pipe wheel and normal grinding wheel respectively to verify the great potential of the heat pipe for removing grinding heat and decreasing grinding temperature, thus increasing the material removal rate.

Key words: heat pipe; grinding zone; grinding temperature; enhancing heat transfer

磨削烧伤是限制高效磨削技术发展的关键,因此,高效磨削时的弧区换热始终是磨削研究领域的热点问题^[1-3]。在缓进给深切磨削时,弧区热流密度超过磨削液临界热流密度而导致的成膜沸腾使弧区换热效率急剧下降是工件表面突发烧伤的主要

原因^[4-5]。一直以来,磨削界都是将临界热流密度作为磨削液的一种固有不变的物性参数用以界定缓进给磨削的极限材料去除率,而对于临界热流密度是否可以提高以及如何提高这一磨削弧区换热机理中的关键问题的研究多年来却无人问津。

基金资助: 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2009CB724403)资助项目;国家自然科学基金(51175254)资助项目。

收稿日期: 2011-07-25; **修订日期:** 2012-10-17

通讯作者: 苏宏华,男,副教授,1969年生,E-mail:shh@nuaa.edu.cn。

20世纪80年代末以来,为了挖掘缓磨工艺的内在潜力,南京航空航天大学高效精密加工研究团队经过深入的理论和试验研究证明^[6-9],缓磨时磨削弧区成膜沸腾的临界热流密度并非是不可改变的物性参数。如采用沿砂轮径向的高压水射流冲击磨削弧区就可以轻而易举地突破工件表面的汽膜,从而大幅度提高临界热流密度值^[10-11],而临界热流密度的提高就意味着缓磨材料去除率的同步提高。以上理论和试验研究成果充分说明,只要能够设法强化磨削弧区换热,提高临界热流密度,就完全可以冲破弧区成膜沸腾这一高效磨削的瓶颈,大幅度提高材料去除率,甚至实现大材料去除率的干磨削。本文提出的使用环形热管强化弧区换热,防止表面烧伤,即是基于以上的研究成果。

1 环形热管砂轮的换热原理

热管是热工领域的一种高效传热元件,它依靠管内工质的相变换热可以在极小的温度下传递极大的热功率,其导热能力比铜等金属热良导体高出几个数量级,被称为热的“超导体”,同时传热过程中不需要任何附加装置^[12-13]。热管的这一特性引起了机械加工领域研究者的注意^[14-16],讨论了使用热管减小机床热变形以及采用热管换热的自冷切削刀具等方面的技术可行性。

本文提出一种全新的构想——基于热管的磨削弧区强化换热,该构想结合磨加工的实际情况,研制了一种全新的环形热管砂轮,利用砂轮内的环形热管高速疏导磨削热以降低磨削温度,防止工件表面烧伤,环形热管砂轮内腔的换热原理如图1所示。在砂轮启动后,当其转速达到某一临界转速以后,液池内的液态水由于离心力的作用可以近似地均布在整个外圆内壁上,形成厚度为 δ 的液膜。磨削过程开始后,由于砂轮转速极快,而砂轮壁很薄,形成一种“热惯性”的作用,使整个砂轮外圆面上在极短的时间内形成热量和温度的均匀分布,而其内壁面积 A 都可以视为内壁面与液膜的换热面积。热量进入内壁后,与液膜对流换热,当液膜温度达到沸点后,液膜与内壁进行沸腾换热,产生的蒸汽携带大量热量在蒸汽压差的驱动下沿径向冷凝端传递,在冷凝端与外界进行热量交换释放热量并冷凝为液态,在离心力的作用下回流至砂轮外圆内壁,形成热量的循环。

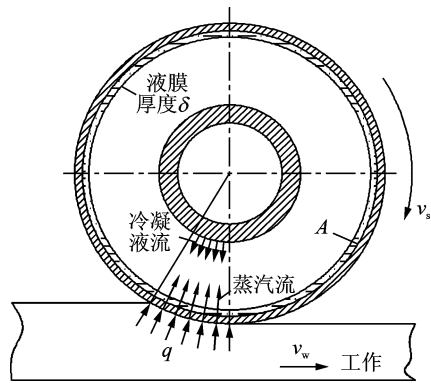


图1 环形热管内腔换热原理示意图

从以上对环形热管换热原理的描述可以看出,只要环形热管砂轮冷端的换热条件可以满足管内热量循环的需要,这环形热管砂轮就可以通过管内的热量循环将磨削弧区输入来的热量高速疏导出去,达到强化磨削弧区换热的作用。基于以上环形热管原理而研制的环形热管砂轮实物如图2所示。

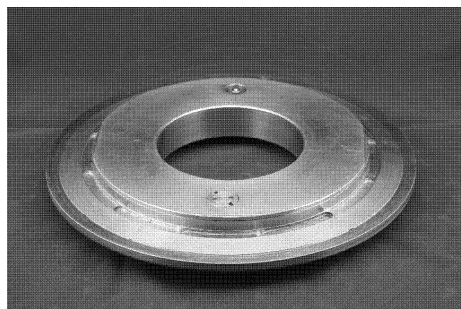


图2 环形热管砂轮实物照片

2 试验方法和试验条件

为了考察环形热管砂轮强化磨削弧区换热的实际效果,采用一个其他参数均与之相同的普通砂轮进行对比研究。磨削温度是热能输入的直接结果,因此可以通过测量磨削过程中的磨削温度来评价弧区的换热情况。为了尽可能排除其他因素对弧区换热以及磨削温度的影响,更为直观的研究环形热管的换热性能,本试验不使用磨削液,而采用缓进给干磨的磨削工艺,通过对比环形热管砂轮和普通砂轮的磨削温度来验证环形热管的换热优势。砂轮磨粒采用立方氮化硼(CBN),粒度80/100,浓度200%,工件材料为45钢。具体的试验设备和试验条件见表1。

对缓进给磨削而言,工件进给速度 v_w 和磨削深度 a_p 两个工艺参数直接决定了磨削的材料去除率,因此本试验也将分别以这两个参数为自变量进行单因素磨削测温对比试验,考察这两个参数的变

化对磨削温度的影响。具体的工艺参数及参数取值见表2。

表1 试验条件

| | |
|---------|---------------------------|
| 机床型号 | BLOHM Profimat MT408 高速磨床 |
| 砂轮 | 环形热管砂轮,无热管普通 单层电镀CBN砂轮 |
| 砂轮尺寸 | 320 mm×127 mm×7 mm |
| 热管砂轮冷凝端 | |
| 制冷设备 | Exair3925 冷却枪 |
| 磨削方式 | 切入式逆磨 |
| 工件材料及尺寸 | 45 钢,30 mm×44 mm×5 mm |
| 磨削工艺 | 缓进给干磨削 |

表2 缓进给干磨45钢工艺参数

| 工艺参数 | 参数值 |
|---------------------------------|---------------------|
| 砂轮线速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$ | 25.50 |
| 工件进给速度 $v_w/(m \cdot min^{-1})$ | 0.03,0.045,0.06 |
| 磨削深度 a_p/mm | 0.2,0.3,0.4,0.5,0.6 |

试验过程中的磨削温度测量采用半人工夹丝热电偶法,工件装夹及热电偶布置如图3所示。安装好试件和测温热电偶实物照片如图4所示。工件1和2之间夹有压成扁平的康铜丝,在装夹时需注意热电偶丝要与工件绝缘,为此在工件与康铜丝间加入厚度为0.02 mm的云母片。随后工件和中间的夹丝部分安装在绝缘胶木制成的夹具上(夹具上开有与工件厚度相当的槽),以上部分安放在虎钳上,并通过虎钳的夹紧力使工件1和2之间的夹丝部分夹持紧密。在胶木块上打有两个通孔,通孔中分别从工件和康铜丝引出铜导线,导线再与采集热电势信号的采集卡Ni-6211相连,当砂轮磨削弧区经过康铜丝顶端时,康铜丝顶端两侧的云母片被切碎,康铜丝搭在工件上,这样康铜丝就与工件形成

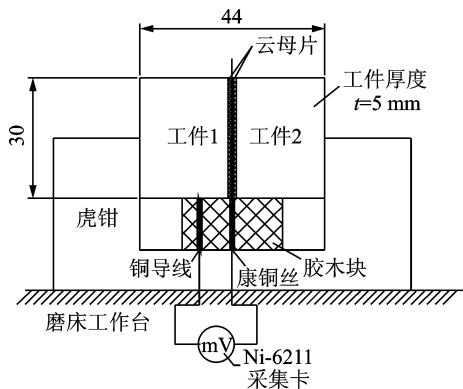


图3 测温试件结构示意图

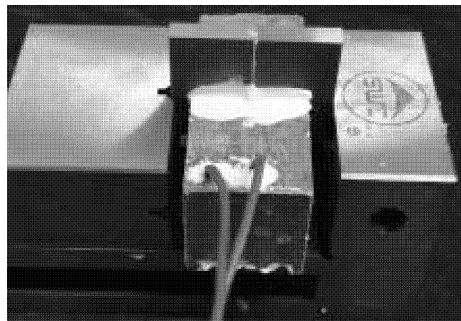


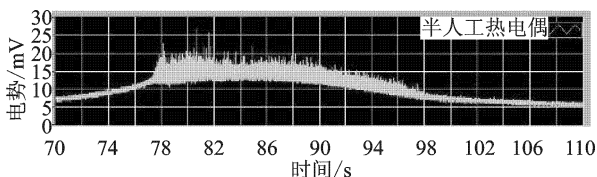
图4 测温试件安装后实物照片

了一个半人工热电偶回路,康铜丝与工件的搭接点形成热电偶测温节点。每一块测温工件的尺寸为22 mm×30 mm×5 mm,注意各个接缝处用硅胶密封,以防磨削液对测温信号造成干扰(干磨削可以不做此项密封),试验完成后,将试验记录的热电偶热电势通过康铜-45钢标定曲线转换为温度值即可得到磨削温度。

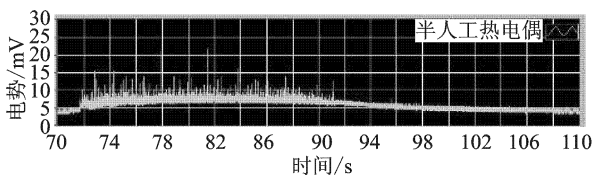
3 试验结果分析

3.1 干磨削原始信号

图5所示为砂轮线速度 $v_s=50$ m/s,工件进给速度 $v_w=30$ mm/min,磨削深度 $a_p=0.3$ mm的工艺参数条件下,干磨削45钢,测温系统采集的热电势原始信号图。从图中的热电势曲线的走势来看,容易发现使用环形热管砂轮换热时的弧区工件表面温度变化特征与常规的有冷却液参与的磨削是有差异的,主要表现在热电势曲线底部在砂轮经过测温点过程中有一个明显的温升,这主要是由于本试验采用的干磨削工艺,没有冷却液对工件表面进行“冲洗”,这样在夹丝的两块试件的结合面处可能存在一定的切屑堵塞,使测点处有一个累积的表面温升。



(a) 普通砂轮



(b) 环形热管砂轮

$v_s=50$ m/s, $v_w=30$ mm/min, $a_p=0.3$ mm

图5 磨削热电势原始信号

图中曲线的尖脉冲电势值代表单颗磨粒切过热电偶节点时的热电势,对应磨粒磨削点温度 θ_{dot} ,内包络线的电势值代表磨削区工件表面平均温度的热电势,对应磨削区温度 θ_{Λ} 。图中有几个时间点的尖峰脉冲峰电势值明显高出其他尖峰很多,这是由于本文研制的CBN砂轮属于单层电镀CBN砂轮,可能出现有少量磨粒高出其他磨粒,在实际磨削时,这些磨粒进入弧区后,其单颗磨粒切厚相对其他磨粒过大,造成其对应的磨削点温度很高。从图中很容易发现,环形热管砂轮的热电势值较小,且曲线要比普通砂轮整体上平缓许多,这从直观上已经说明此参数条件下,环形热管砂轮的磨削温度要低于普通砂轮。

3.2 不同工件进给速度下磨削温度对比

图6显示了在砂轮线速度 $v_s=25\text{ m/s}$,磨削深度 $a_p=0.2\text{ mm}$ 时,分别使用环形热管砂轮和普通砂轮进行磨削时,工件进给速度 v_w 对磨削温度的影响。

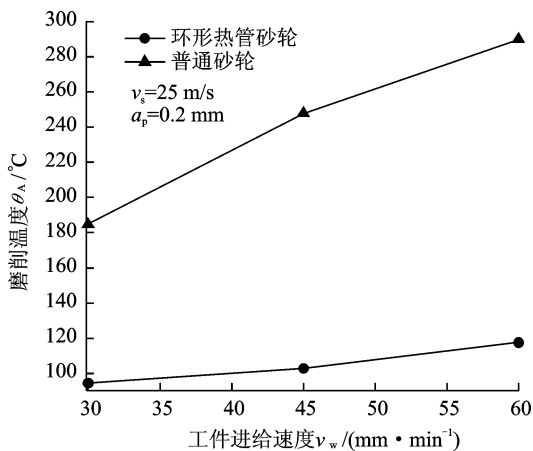


图6 工件进给速度对磨削温度的影响

从图中可以看出,无论使用哪种砂轮,工件进给速度 v_w 的提高都会造成磨削温度的升高。这是由于在缓进给磨削加工中,在磨削深度 a_p 一定的前提下, v_w 的提高意味着单位时间内砂轮切除的材料体积增大,即磨削消耗的能量增加,能量的增加又引起磨削弧区热量的增加,最终导致磨削温度升高。从磨削温度的对比也可以看出,环形热管砂轮的温度曲线的斜率要远小于普通砂轮,这说明进给速度 v_w 的增加对环型热管砂轮磨削温度的影响要远小于普通砂轮,这个现象可以用环形热管的工作状态来解释。一般来讲,热管的传热能力会有一个极限值,这个极限值主要由热管本身的性质决定,如沸腾极限、携带极限以及冷端换热能力等,而与磨削工艺参数本身没有关系。热管在充分工作且

未达到换热极限时,可以认为传入热管蒸发端的热量全部被热管快速传送到冷凝端。因此,虽然工件进给速度 v_w 的增大使磨削弧区产生的热流密度增大,但产生的热量可以被处于充分工作状态的热管快速“吸收”并传递出去,这就使磨削接触区的平均温度相对普通砂轮保持在一个比较低且稳定的水平上。换句话说,就是进给速度的增大对环形热管砂轮磨削温度的影响不大,这就意味着,在保证热管充分工作在其换热极限以下时,可以大幅度提高工件进给速度,这无疑对提高磨削的金属去除率有重要意义。

3.3 不同磨削深度下磨削温度对比

图7显示的是砂轮线速度 $v_s=50\text{ m/s}$,工件进给速度 $v_w=30\text{ mm/min}$ 条件下,以磨削深度 a_p 为变量的单因素试验磨削温度测量结果。从试验结果可以看出,磨削深度 a_p 对两种砂轮的磨削温度影响都很显著。环形热管砂轮的磨削温度从 $a_p=0.2\text{ mm}$ 时的约 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 上升至 $a_p=0.6\text{ mm}$ 时的 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,而相应的普通砂轮的磨削温度上升幅度更大,从约 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $420\text{ }^\circ\text{C}$ 以上。磨削温度随磨削深度增大而上升是磨削过程中的一个正常现象,因为当磨削深度增大,无论是弧区内同时参与磨削的磨粒数量,还是材料去除率、消耗的动力能以及弧区的热流密度都会相应增加,从而引起弧区温升;另一方面,磨削弧长的增加也使磨削弧区密闭性更高,弧区内接触面向周围环境散热变得更加困难,这也造成了热量积聚更加严重,温升更加剧烈。从两条温度曲线的对比可以明显看出,相同条件下环型热管砂轮的磨削温度都要远低于普通砂轮。尤其在磨削深度增加至 $a_p=0.6\text{ mm}$ 时,两者温差达 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,相当于使用环形热管砂轮的磨削温度降低了50%以上。

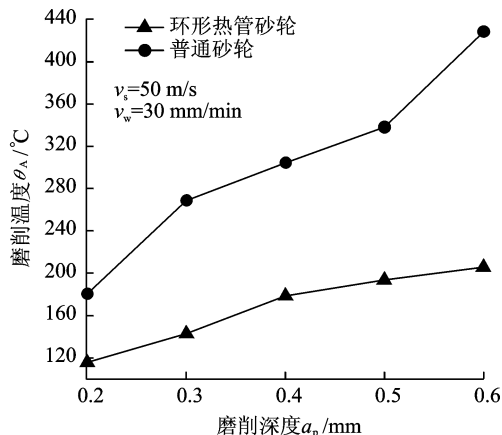


图7 磨削深度对磨削温度的影响

从图中还可以发现,当磨削深度增加至0.4 mm以后,普通砂轮的磨削温度增幅明显加大。从实际磨削过程中对工件表面的观察也可以看到,当磨削深度达到0.4 mm时,普通砂轮磨削的工件表面已经出现轻微的烧伤,在磨削深度达0.6 mm时,烧伤已经十分严重。对比之下,环形热管砂轮的磨削温度曲线在磨削深度超过0.4 mm以后反而趋于平缓,实际磨削过程中的观测也没有发现此时工件表面有烧伤发生。这个现象可以用热管蒸发端换热面积增大,使环形热管换热性能得到提升来解释。其实对于环型热管而言,经过前面的理论和试验分析,其换热能力是毋庸置疑的,更为关键的问题却集中在磨削弧区的热量是否能顺利、迅速地传输至热管内部,而对砂轮而言,热管蒸发端与磨削弧区最直接的热量“通道”便是分布于磨削弧区的一个个磨粒点。在其他条件不变的前提下,磨削深度增加引起的磨削弧区面积增大,相当于使外部热源与热管的表面接触更加充分,这就使作为弧区向热管传热途径的磨粒点数大大增加,由于CBN磨粒本身导热性极好,这就使接触弧区的热量可以更多、更快地通过这个“通道”进入热管。因此,从理论上讲,在环形热管正常工作的前提下,磨削深度越大,环型热管砂轮的换热优势越明显,而试验结果也很好地印证了这一点。

4 环形热管砂轮用于难加工材料缓磨的初步试验

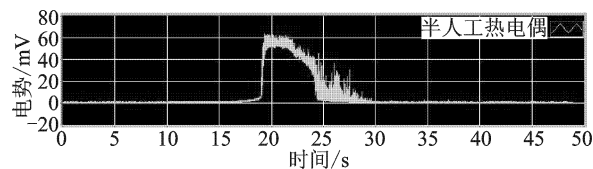
前文以45钢为工件材料对环形热管砂轮强化磨削弧区换热的性能进行了试验研究,取得了不错的试验结果。为了进一步探讨热管砂轮在难加工材料高效磨削中的应用前景,本文也使用环形热管砂轮对TC4钛合金进行了初步的缓磨试验。

试验条件和试验方法与45钢磨削试验基本相同,但考虑到干磨钛合金有一定风险,故采用带磨削液的缓进给磨削工艺。在一定冷却条件下,先以普通电镀CBN砂轮为磨削工具,在一定工艺条件下,逐次加大磨削深度,直到出现烧伤为止。随后以电镀CBN环形热管砂轮为工具,在普通电镀砂轮出现烧伤的磨削深度条件下进行磨削,观测工件是否出现烧伤,通过两者试验结果的对比,考察环形热管砂轮在防止难加工材料工件表面烧伤,提高材料去除率方面的潜力。具体试验条件和工艺参数选取见表3。

表3 难加工材料缓磨试验条件和工艺参数

| | |
|---------------------------------|------------------------------|
| 机床型号 | BLOHM Profimat MT408 高速磨床 |
| 砂轮 | 环形热管砂轮,无热管普通 单层电镀CBN砂轮 |
| 砂轮尺寸 | 320 mm×127 mm×7 mm |
| 热管砂轮冷凝端制冷设备 | Exair3925冷却枪 |
| 磨削方式 | 切入式逆磨 |
| 工件材料及尺寸 | TC4,30 mm×44 mm×5 mm |
| 磨削工艺 | 缓进给磨削 |
| 砂轮线速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$ | 35 |
| 工件进给速度 $v_w/(m \cdot min^{-1})$ | 0.12 |
| 磨削深度 a_p/mm | 0.5,1.0,1.5,2 |
| 磨削液出口压力 p_1/MPa | 1.5 |

其中,磨削深度从 $a_p = 0.5$ mm开始,以0.5 mm为步长逐次递增,考察普通电镀CBN砂轮的磨削深度极限。试验过程中,当磨削深度达到1.5 mm时,普通电镀CBN砂轮的磨削热电势曲线出现了显著变化,如图8所示。



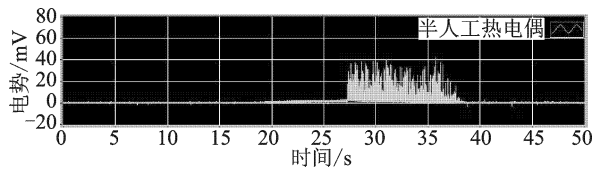
$$a_p = 1.5 \text{ mm}, v_s = 35 \text{ m/s},$$

$$v_w = 120 \text{ mm/min}, p_1 = 1.5 \text{ MPa}$$

图8 普通电镀CBN砂轮磨削TC4的热电势原始信号图

从图中可以看出,在磨削弧区的高端上出现了明显高于正常缓进给磨削低温的高温区,且高低温区截然分开,几乎不存在中间过渡区。由于连续分布热源条件下不可能出现类似的阶跃式温度分布,因此这种现象的合理解释就是磨削弧区部分区段的磨削液出现成膜沸腾,造成边界换热条件突变即换热系数突然大幅下降,使磨削热的绝大部分快速进入工件,导致工件表面平均温度急剧上升。同时,在磨削弧区的低端,却并未出现成膜沸腾的迹象,磨削液仍可以工作在最佳换热状态,而此区段对应的工件表面温度也维持在正常缓磨的低温水平上。图中高温区对应的热电势信号下包络线最高点已经超过50 mV,根据康铜-TC4的标定曲线可以换算出此时的磨削温度已在1 500 °C以上,远远超过了TC4钛合金的烧伤温度。因此,可以认为此时的工艺参数条件下,普通CBN砂轮磨削钛合金已经出现了工件表面烧伤的情况。图9所示为在普通电镀CBN砂轮磨削TC4出现烧伤的参数条件下(a_p

$=1.5 \text{ mm}$, $v_s = 35 \text{ m/s}$, $v_w = 0.12 \text{ m/min}$, 磨削液出口压力 $p_1 = 1.5 \text{ MPa}$), 使用电镀 CBN 环形热管砂轮磨削钛合金 TC4 的热电势原始信号图。从图中曲线可以看出, 此组工艺参数组合条件下, 使用环形热管砂轮磨削 TC4, 工件表面的热电势信号显然是正常的缓磨热电势信号, 即出现大量对应磨粒点热电势的尖脉冲, 其对应工件表面热电势的这些脉冲的下包络线热电势值很低且非常平缓。这个现象说明, 在与普通砂轮相同的工艺参数条件下, 即相同热流密度下, 环形热管砂轮的磨削弧区并未出现成膜沸腾以致引起工件表面烧伤。这个结果表明, 环形热管砂轮内的环形热管的换热作用, 提高了磨削弧区的临界热流密度, 避免了弧区的成膜沸腾造成的急剧温升, 将弧区温度控制在一个很低的水平上。



$$a_p = 1.5 \text{ mm}, v_s = 35 \text{ m/s},$$

$$v_w = 120 \text{ mm/min}, p_1 = 1.5 \text{ MPa}$$

图9 电镀 CBN 环形热管砂轮磨削 TC4 热电势原始信号图

图 10 所示为将热电势转换为温度后两种砂轮的磨削温度对比。从图中可以更直观地看出, 环形热管砂轮在磨削深度达到 $a_p = 2 \text{ mm}$ 时, 其磨削温度仍然保持在 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下的缓磨正常水平, 而普通砂轮的磨削温度在 $a_p = 1.5 \text{ mm}$ 时已经出现了阶跃式的剧烈上升, 其温度值远超过正常缓磨的温度, 甚至接近钛合金材料的熔点, 此时工件表面烧伤已不可避免。

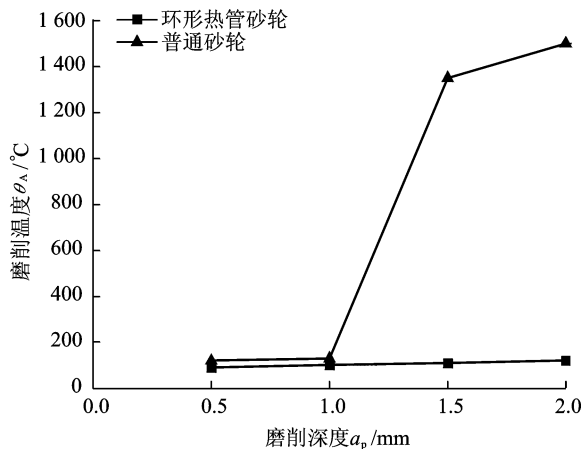


图 10 环形热管砂轮和普通砂轮缓磨 TC4 磨削温度对比

5 结束语

本文提出了使用热管强化磨削弧区换热的全新构想, 并研制了环形热管砂轮。分别使用普通电镀 CBN 砂轮和电镀 CBN 环形热管砂轮对 45 钢进行了干磨削试验。试验结果表明, 工件进给速度 v_w 的提高对环形热管砂轮的磨削温度影响较小, v_w 提高 1 倍, 磨削温度仅上升了 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 这对提高磨削加工的材料去除率有着重要意义。磨削深度 a_p 对磨削温度有显著影响, 环形热管砂轮不但可以大幅度降低磨削温度, 而且可以降低磨削温度随磨削深度增加的幅度, 在磨削深度增加至 $a_p = 0.6 \text{ mm}$ 时, 使用环形热管砂轮的磨削温度对比普通砂轮降低 50% 以上。以上结论说明, 使用环形热管砂轮可以高速疏导磨削热, 大幅降低磨削温度, 这对强化磨削弧区换热、提高磨削的材料去除率有着重要意义。

而对钛合金 TC4 的试验结果表明, 在其他工艺参数相同的条件下, 当磨削深度 $a_p = 1.5 \text{ mm}$ 时, 普通电镀 CBN 砂轮的磨削热电势曲线出现了极其明显的高温区, 其对应的磨削温度远远超过了 TC4 的烧伤温度, 而同样磨削深度条件下, 使用环形热管砂轮的磨削热电势曲线却未出现阶跃式的温度分布, 整个磨削弧区的温度都被控制在正常缓磨的很低的水平上。这说明, 环形热管砂轮在难加工材料的高效磨削过程中同样体现了优异的换热性能, 展示出可观的应用前景。

参考文献:

- [1] Kopac J, Krajnik P. High-performance grinding—a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 175(1/3): 278-284.
 - [2] Oliveira J F G, Silva E J, Guo C, et al. Industrial challenges in grinding[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(2): 663-680.
 - [3] Bell A, Jin T, Stephenson D J. Burn threshold prediction for high efficiency deep grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(6): 433-438.
 - [4] Andrew C, Howes T D, Pearce T R A. Creep-feed grinding[M]. London: Holt, Rinehart and Winston, 1985.
 - [5] 傅玉灿. 关于进一步开发高效磨削潜力的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1999.
- Fu Yucan. Fundamental studies on further developed potentiality of high efficiency grinding [D].

- Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999.
- [6] Xu Hongjun, Pu Xuefeng, Hu Xiefang, et al. The workpiece temperature distribution in contact zone and burn mechanism during creep feed grinding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1990, 3(1): 58-63.
- [7] 徐鸿钧, 徐西鹏, 许洪昌, 等. 缓磨时工件烧伤过程计算机仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1994, 26(5): 642-650.
- Xu Hongjun, Xu Xipeng, Xu Hongchang, et al. A study on workpiece burn process during creep feed grinding by computer simulation technique [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1994, 26(5): 642-650.
- [8] 徐鸿钧, 徐西鹏, 许洪昌, 等. 缓磨时工件表层温度分布的计算机仿真研究[J]. 应用科学学报, 1996, 14(2): 199-207.
- Xu Hongjun, Xu Xipeng, Xu Hongchang, et al. A study on temperature distribution in workpiece surface layer during creep feed grinding by computer simulation technique [J]. Journal of Applied Sciences, 1996, 14(2): 199-207.
- [9] 徐鸿钧, 李迎, 徐西鹏, 等. 缓磨烧伤过程的计算机仿真研究[J]. 航空学报, 1996, 17(4): 503-507
- Xu Hongjun, Li Ying, Xu Xipeng, et al. Study on burn process during creep feed grinding by computer simulation technique [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996, 17(4): 503-507.
- [10] 孙方宏, 傅玉灿, 徐鸿钧, 等. 断续缓磨射流冲击强化磨削弧区换热的实验研究[J]. 航空精密制造技术, 1999, 35(1): 25-27.
- Sun Fanghong, Fu Yucan, Xu Hongjun, et al. Experiment research on enhancing heat transfer of grinding contact zone through jet impinging during intermittent creep feed grinding[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1999, 35(1): 25-27.
- [11] H. J. Xu, Y. C. Fu, F. H. Sun. Fundamental studies on enhancing heat transfer in grinding zone during high efficiency grinding[J], Science in China. 2002, 45(3): 261-272.
- [12] 马同泽, 侯增祺, 吴文铎. 热管[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- Ma Tongze, Hou Zengqi, Wu Wenxi. Heat pipe [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [13] 李亭寒, 华诚生. 热管设计与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1987.
- Li Tinghan, Hua Chengsheng. Design and usage of heat pipe [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1987.
- [14] 张伯霖, 宋文佛, 庄有土, 等. 用环形热管减少机床的热变形[J]. 机械工程学报, 1995, 31(3): 32-38.
- Zhang Bolin, Song Wenfo, Zhuang Youtu, et al. Reducing the thermal deformation of machine tools by circular heat pipe[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1995, 31(3): 32-38.
- [15] 叶伟昌. 干切削刀具及其应用[J]. 机械工程师, 2006(6): 5-7.
- Ye Weichang. Dry cutting tool and its usage [J]. Mechanical Engineer, 2006(6): 5-7.
- [16] 邓定瀛, 陈世平. 干式切削加工技术的现状与未来[J]. 机械设计与制造工程, 2002, 31(4): 30-31.
- Deng Dingying, Chen Shiping. The current situation and the future of dry cutting technology [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2002, 31(4): 30-31.