

深切缓进给磨削烧伤实验研究

毕雪峰¹, 杨承三¹, 景璐璐²

(1. 上海理工大学 上海汉堡国际工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 在磨削难加工材料的型面和沟槽中, 较大的磨削深度导致磨削区温度较高, 使工件表面发生烧伤. 研究开展了一系列的深切缓进给磨削实验, 分析不同磨削参数下工件的烧伤情况. 同时, 通过分析磨削时所消耗的磨削功率和磨削能, 分析烧伤的原因, 并提出判断工件烧伤的依据.

关键词: 磨削; 烧伤; 缓进给; 难加工材料
中图分类号: TG 580 **文献标志码:** A

Experimental Research on Grinding Burn in Creep Feed Grinding

BI Xue-feng¹, YANG Cheng-san¹, JING Lu-lu²

(1. Shanghai-Hamburg College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Creep feed grinding is widely used to grind complex profile and groove of difficult-to-cut material. However, burn on workpiece surface is easy to happen due to high temperature on grinding zone caused by higher depth of cut. A number of creep feed grinding tests were carried out to analyze the burn with different grinding parameters. Furthermore, the reason and criterion of workpiece burn were proposed according to the power and energy in grinding process recorded in the tests.

Key words: grinding; burn; creep feed; difficult-to-cut material

深切缓进给磨削通常是指磨削深度较大, 进给速度较低的一种高效磨削方法. 深切缓进给磨削的优势在于较短的磨削时间, 更高的表面质量和尺寸精度以及更好的曲面轮廓^[1-2]. 然而, 深切缓进给磨削中较大的磨削深度和较长的砂轮工件接触长度使得磨削过程中产生了较大的磨削力, 并在磨削区产生了大量的热. 由于工件的进给速度较低, 产生的热量更容易聚集在磨削区而难于消散, 这就导致了砂

轮和工件的温度快速升高. 特别是磨削难加工材料, 工件的表面温度非常高. 较高的温度使得工件表面产生各种热损伤并使工件表面材料性质发生变化^[3-4]. 烧伤是深切缓进给磨削中常见的热损伤形式. 磨削烧伤不仅改变了烧伤表面的材料特性, 也使得工件表面层材料产生残余应力和微裂纹, 降低了工件的使用性能, 因此研究深切缓进给磨削中的工件烧伤是十分重要的. 研究针对难加工材料的深切

收稿日期: 2013-06-18

基金项目: 上海高校青年教师培养资助计划(slg11039)

第一作者: 毕雪峰(1983-), 女, 讲师. 研究方向: 金属切削机理、刀具磨损和磨削技术. E-mail: xfb1983@126.com

缓进给磨削过程,分析了磨削功率、磨削能、比磨削能、比磨削功率和工件烧伤随磨削参数的变化情况,并确定了工件烧伤的判断依据.

1 实验研究

1.1 实验参数设置

深切缓进给实验在一台平面磨床上进行,磨床主轴功率 45 kW. 实验使用陶瓷结合剂氧化铝砂轮磨削两种难加工材料镍合金和钛合金. 砂轮直径为 400 mm,砂轮宽度为 20 mm,砂轮转速为 28 m/s. 为了研究磨削深度 D_{oc} 和进给速度 V_w 对烧伤的影响,本研究变换不同的磨削参数进行了一系列的磨削实验. 对于钛合金而言, D_{oc} 的变化范围是 0.05~0.2 mm, V_w 的变化范围是 100~400 mm/min. 对于镍合金, D_{oc} 的变化范围是 0.2~1.5 mm, V_w 的变化范围是 100~5 000 mm/min. 在磨削过程中,采集磨削功率和磨削能,在磨削完成后观察磨削表面来检查工件是否发生烧伤.

1.2 实验结果分析

工件材料的磨除率表征磨削的效率,定义为 $Q' = V_w D_{oc} / 60$. 即获得较高的材料磨除率,工件表面又不发生烧伤,是高效深磨的最佳效果. 增加 V_w 和 D_{oc} 都可以提高工件的磨除率,实验中分别通过提高 V_w 和 D_{oc} 来不断提高磨除率,同时记录烧伤的发生情况,结果如图 1 和图 2 所示. 对于镍合金而言,当 D_{oc} 很小(0.4 mm)时,即使 V_w 增加到 5 000 mm/min,工件也没有发生烧伤. 同时, $D_{oc} = 1.2$ mm 似乎是个烧伤临界点,即使此时 Q' 很低,烧伤也将发生. 对于钛合金,当 $D_{oc} = 0.05$ mm, $Q' > 0.25$ mm²/s 时,工件才发生烧伤. 从两种工件材料的磨削实验结果对比也可以看出,钛合金比镍合金更容易发生烧伤. 当 $Q' = 0.25$ mm²/s 时,钛合金就容易发生烧伤;而只要适当控制 D_{oc} ,镍合金可以在很高的 Q' 下也不会烧伤.

图 2 为使用不同 D_{oc} 和 V_w 磨削时所消耗的能量 E . 对于钛合金磨削而言,当保持 D_{oc} 不变,通过增加 V_w 来增加 Q' 时,当 $Q' = 0.4$ mm²/s 时,工件发生烧伤,而当 V_w 不变,通过增加 D_{oc} 来增大 Q' 时,当 $Q' = 0.3$ mm²/s 时,工件就发生烧伤. 对于镍合金而言这种现象更加明显. 当保持 D_{oc} 不变,通过增加 V_w 来增加 Q' 时,当 $Q' = 33$ mm²/s 时,工件也未发生烧伤,而当 V_w 不变,通过增加 D_{oc} 来增大 Q' 时,当 $Q' = 2$ mm²/s 时,工件就已发生烧伤.

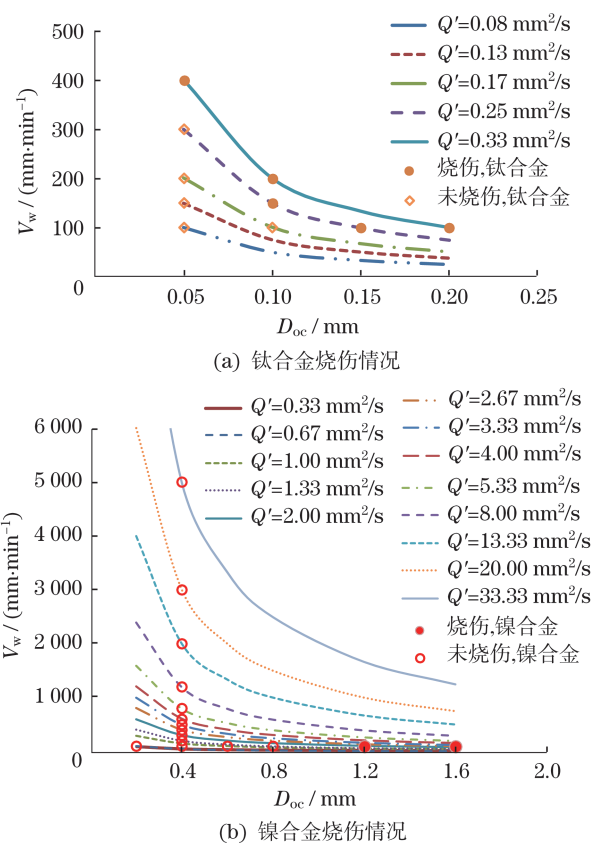


图 1 不同磨除率下的烧伤情况

Fig. 1 Workpiece burn results with different Q'

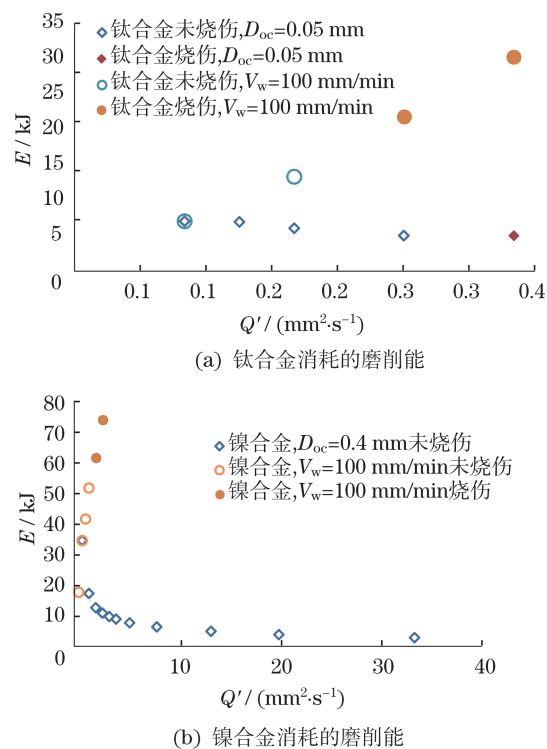
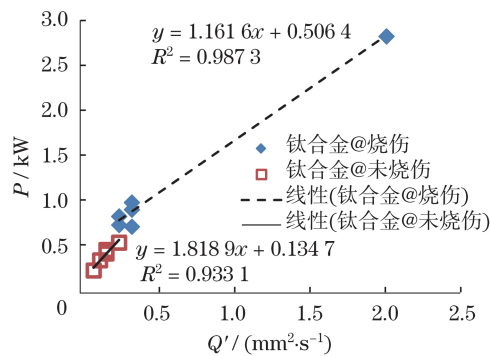


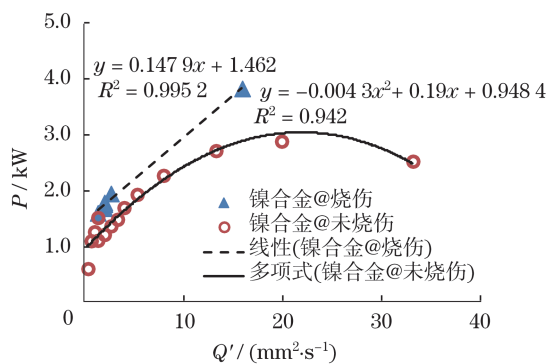
图 2 不同磨削参数磨削时所消耗能量

Fig. 2 Consumed grinding energy under different grinding parameter

人们通常用功率 P - 磨除率图表来分析磨削过程,它们之间的线性关系已被研究者证实^[6]. 功率与磨除率可以用线性关系来拟合. 当 Q' 很小时,磨削能主要用于克服磨料和工件之间的相互作用(即摩擦和耕犁). 工件和结合剂之间相互作用,切屑和工件间的相互作用. 因此图 3 中斜线的截距代表了以上相互作用所消耗的功率. 当 Q' 增加时,磨削能主要用于克服磨粒对工件的切削,所以斜线的斜率 $\tan \alpha$ 代表了磨粒的比切削功率,即是去除单位体积材料所消耗的切削功率,其中只包含了磨粒对工件的切削作用. 而 $\tan \beta$ 代表了比磨削功率,即除了磨粒对工件的切削作用之外,还包含了各种相互作用中摩擦所消耗的功率.



(a) 钛合金功率-磨除率曲线



(b) 镍合金功率-磨除率曲线

图 3 磨削功率与磨除率之间的关系

Fig.3 Relationship between grinding power and Q'

图 3(a)分别对钛合金磨削中烧伤和未烧伤的功率-磨除率进行线性拟合. 结果表明,发生烧伤的工件拟合直线的截距大于未烧伤的工件,而且所消耗的功率也都大于未烧伤工件所消耗的功率. 这可能是由于磨粒磨钝之后,磨粒和工件表面的摩擦和耕犁增强,砂轮堵塞后切屑和工件之间的摩擦也会增强. 这些摩擦导致工件表面热量积聚,并发生烧伤. 同时,工件烧伤时的比切削功率小于未烧伤时的比切削功率,这意味着工件发生烧伤后工件材料性

能发生变化,此时可能更容易被切削.

图 3(b)展示了镍合金工件发生烧伤和未烧伤时功率与磨除率之间的关系. 对发生烧伤的工件,获得了较好的线性拟合,而对未发生烧伤的工件,当磨除率超过 $20 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($V_w = 3000 \text{ mm/min}$, $D_{oc} = 0.4 \text{ mm}$) 继续增加时,比切削功率发生了变化,这样的现象可用一个二次曲线来拟合. 这表明当磨除率不断增大时,由于磨削参数选择合理,工件表面并未发生烧伤. 但由于增大的磨除率提高了工件表面的热量,可能使工件变软,所消耗的功率也略有减小.

从磨削微观角度来看,磨粒切刃的最大切削深度(未变形切屑厚度) h_c (如图 4 所示)是评价工件烧伤的重要参数,因为它决定了单个切刃的切削力,可由式(1)来表达. 其中, D_e 是砂轮的当量直径,平面磨削中为砂轮直径, C 是单位砂轮面积上的切刃数, r 是切屑宽度与厚度的比^[6].

$$h_c = \sqrt{\left(\frac{V_w}{V_s}\right) \left(\frac{D_{oc}}{D_e}\right)^{1/2} \frac{4}{Cr}} \quad (1)$$

图 4 平面磨削中未变形切屑厚度

Fig.4 Uncut chip thickness for surface grinding

分析比磨削能 u 随 h_c 的变化情况,如图 5 所示. u 是去除单位体积材料所消耗的能量,通常被作为评价磨削过程好坏的一个标准. 对于镍合金,当 h_c 较小时,消耗的磨削能主要用于磨料、工件、结合剂和切屑之间的相互摩擦和耕犁. 受尺寸效应的影响,此时 u 很大. 随着 h_c 的增加,摩擦逐渐转变为切削,消耗的能量主要用于切削, u 也趋于平稳. 而对于钛合金, h_c 较小时就已发生烧伤.

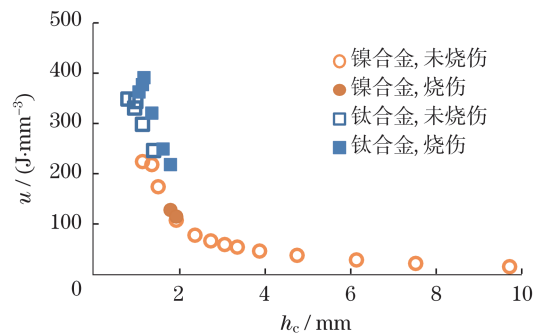


图 5 比磨削能随磨粒切深的变化情况

Fig.5 Variation of u with h_c

从图 5 并未看到烧伤和未烧伤的明显界限,这

是因为比磨削能未能反映出加工时间对烧伤的影响.如图6所示,如果曲线A和B两个磨削过程所磨除的工件材料相同,所消耗的能量也相同,但磨削时间不同,B磨削过程比A磨削过程更容易发生烧伤.这可能是因为A磨削行程时间较短,传导到工件里的磨削热还未来得及在工件中扩散,就已经被下一个磨削行程磨除掉,工件内部未形成热量的累积.因此相对于B磨削过程,A发生烧伤的可能较小.这也即是在磨削测试中,当 D_{oc} 较小时,不断增加 V_w 工件并未发生烧伤的原因.

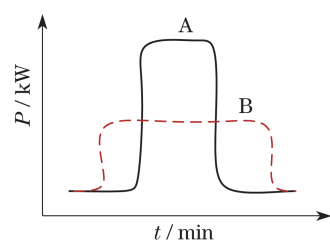


图6 不同磨削时间烧伤对比分析

Fig.6 Contrast burn analysis under different grinding time

提出比磨削功率 P_0 的概念,即比磨削能除以磨削过程时间. P_0 即能表征磨削过程产生热量的大小,又能表征热量的持续时间,因此能够作为烧伤和未烧伤的依据.图7展示了两种合金磨削时 P_0 随 D_{oc} 的变化情况.

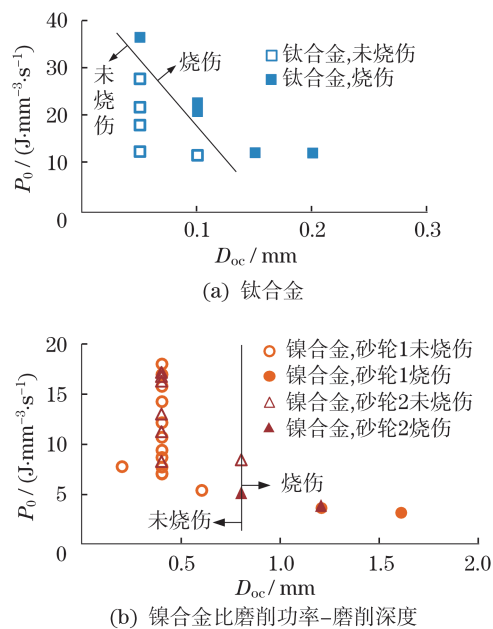


图7 不同磨削深度时的比磨削功率

Fig.7 P_0 under different D_{oc}

对于钛合金而言,可以用一条斜线明显地区分

出烧伤和未烧伤区域;而对于镍合金,可以用一条竖直的直线来区分出烧伤和未烧伤区域.对于不同的砂轮和工件,用来区分烧伤的直线不同,需要更进一步的研究来获取.

2 结论

a. 在深切缓进给磨削中,通过增加工件进给速度来增大磨除率时,工件不易发生烧伤.

b. 对于钛合金而言,砂轮磨钝之后,磨粒和工件表面的摩擦和耕犁增强,切屑和工件之间的摩擦也会增强,这些可能是导致工件烧伤的主要原因;而对于镍合金来说,当磨除率超过 $20 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($V_w = 3000 \text{ mm/min}$, $D_{oc} = 0.4 \text{ mm}$)继续增加时,功率随磨除率的增加而减小,这样的现象可以用一个二次曲线来拟合,这可能是由于增大的磨除率提高了工件表面的热量,使工件变软更易磨削.

c. 提出使用比磨削能除以磨削过程时间来表征磨削过程产生热量的大小和持续时间,实验数据表明,这可作为判别工件烧伤和未烧伤的依据.

参考文献:

- [1] Jin T, Stephenson D J. Investigation of the heat partitioning in high efficiency deep grinding [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003(11):1129-1134.
- [2] Marinescu I D, Hitchiner M P, Uhlmann E, et al. Handbook of machining with grinding wheels[M]. New York: CRC Press, 2006.
- [3] Wang S B, Kou H S. Selections of working conditions for creep feed grinding. Part (I)-thermal partition ratios [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004(9/10):700-706.
- [4] Wang S B, Kou H S. Selections of working conditions for creep feed grinding. Part (II): workpiece temperature and critical grinding energy for burning [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004(1/2):38-44.
- [5] Subramanian K, Ramanath S, Tricard M. Mechanisms of material removal in the precision production grinding of ceramics[J]. ASME J Manuf Sci Eng, 2008, 119(4A): 509-519.
- [6] 马尔金 S. 磨削技术理论与应用[M]. 蔡光起, 巩亚东, 宋贵亮, 译. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.

(编辑:金虹)