

文章编号:1000-582X(2010)09-019-05

## 玻璃钢复合材料砂带磨削实验分析

黄云<sup>1,2</sup>, 刘瑞杰<sup>1,2</sup>, 黄智<sup>1,2</sup>, 靳星星<sup>3</sup>

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆市材料表面精密加工及成套装备工程技术研究中心, 重庆 400021; 3. 河北大学工商学院, 河北保定 071000)

**摘要:**采用 3 种磨料不同粒度的砂带对玻璃钢复合材料进行砂带磨削实验, 分析了磨料与工件间的交互作用机理。通过大量试验以及试验数据获得了玻璃钢复合材料砂带磨削过程中材料去除率以及砂带寿命的主要影响因素, 并首次采用专业图像分析软件 Image-Pro Plus 分析了砂带堵塞程度及堵塞的主要原因。实验结果表明: 玻璃钢复合材料砂带磨削过程中, 材料去除率受磨削压力、砂带线速度、磨料种类及粒度的影响很大, 其中陶瓷磨料磨削时获得的材料去除率最高; 影响砂带堵塞程度的最主要因素是磨削压力; 磨平磨钝是砂带磨粒最主要的磨损形式, 其中堆积磨料砂带的寿命最长, 陶瓷磨料砂带次之。

**关键词:**砂带; 磨削; 玻璃纤维增强塑料; 材料实验; 材料去除率; 砂带堵塞程度; 砂带寿命  
**中图分类号:** TH145.4 **文献标志码:** A

## Experimental analysis of abrasive belt grinding of glass fiber reinforced plastic composite material

HUANG Yun<sup>1,2</sup>, LIU Rui-jie<sup>1,2</sup>, HUANG Zhi<sup>1,2</sup>, JIN Xing-xing<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;  
2. Chongqing Engineering Research Center for Material Surface Precision Machining and Whole Set Equipments, Chongqing 400021, P. R. China;  
3. College of Business, Hebei University, Baoding, Hebei 071000, P. R. China)

**Abstract:** Abrasive belt grinding experiments of glass fiber reinforced plastics composite material are carried out by using three different abrasive belts with different sizes, and the interaction principle between the abrasive and the workpiece is analyzed. The main factors of material removal rate and belt life of glass fiber reinforced plastics composite material are obtained through a large number of tests and test data. The extent and the main reason of belt plug are analyzed through the professional image analysis software (Image-Pro Plus) for the first time. The results show that in the process of abrasive belt grinding, the material removal rate are affected by the factors for grinding pressure, belt speed, abrasive type and size, and the ceramic abrasive belt has the highest removal rate. The main factor for belt plug extent is grinding pressure. The most important wear form of abrasive belt is blunt, and the accumulation abrasive belt has the longest life, followed by ceramic abrasive belt.

**Key words:** abrasive belts; grinding; glass fiber reinforced plastics; material testing; material removal rate; the extent of belt plug; belt life

收稿日期: 2010-04-20

基金项目: 重庆市科委科技计划攻关项目(CSTC2006AC4021)

作者简介: 黄云(1962-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事机械制造及砂带磨削应用技术研究,  
(E-mail)yunhuang@samhida.com。

玻璃钢(玻璃纤维增强塑料)是以玻璃纤维及其制品(玻璃布、带、毡、纱等)作为增强材料,以合成树脂作基体材料的一种复合材料。玻璃钢的密度一般介于  $1.4 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$  之间,具有质轻高强、防腐防渗、隔热吸音等优点<sup>[1-3]</sup>。因此,在航空、火箭、宇宙飞行器、高压容器等需要减轻自重的行业都获得了十分广泛的应用。但由于玻璃钢切削热高、纤维硬度大和非均质的组织结构等特点,使得玻璃钢的切削加工性要比金属材料差,在玻璃钢的切削加工中,磨削是主要加工方法之一<sup>[4-6]</sup>。

砂带磨削是一种高效、经济、用途广泛并被称为“万能磨削”的新型磨削工艺。作为与砂轮磨削同等重要的一种现代精密加工方法,在很多重大装备的一些关键零部件加工过程中发挥着日益巨大的作用<sup>[7-11]</sup>。笔者通过 3 种磨料砂带不同粒度采用不同工艺对玻璃钢材料进行磨削实验,分析磨料与工件间的交互作用机理,讨论材料切除率、砂带堵塞及砂带寿命的影响因素,旨在为玻璃钢复合材料寻求高效、高质磨削加工工艺理论和实验依据。

## 1 实验装置及实验条件

本试验是在重庆市表面材料精密加工及成套装备工程技术研究中心开发的双头变频砂带磨床上完成的,笔者对工作台进行了改造,采用恒压力磨削,其结构原理如图 1 所示。

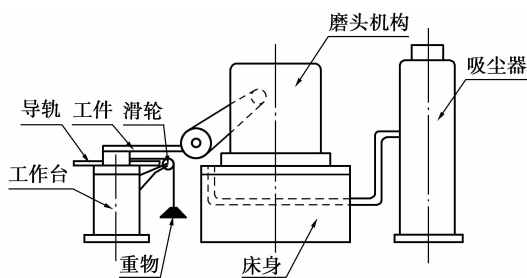


图 1 恒压力砂带磨削基本原理示意图

本实验采用如下的实验条件:工件材料为玻璃纤维增强塑料( $\rho = 2.06 \text{ g/cm}^3$ , 玻璃纤维长度大于  $15 \text{ mm}$ , 层厚约  $5 \text{ mm}$ ); 工件规格为  $250 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚); 砂带规格为  $30 \text{ mm} \times 1240 \text{ mm}$ (宽 $\times$ 周长); 采用的磨料有陶瓷磨料(粒度 P36、P40、P60、P80), 氧化铝磨料(粒度 P36、P60)及堆积磨料(粒度 P36、P60、P120); 并采用恒压力斜切入顺磨<sup>[12]</sup>, 干磨的方式。

## 2 实验方法

在具体磨削试验时,首先通过单因素试验,测试磨削过程中影响磨削率、砂带堵塞程度及砂带寿命

的主要因素,然后分析不同条件下砂带的磨损情况。

1) 改变砂带线速度:法向磨削力不变的情况下,采取  $v_s = (10 \sim 50) \text{ m/s}$ , 对工件进行磨削。测量工件磨削前后质量的变化,计算材料切除率。

2) 改变法向压力  $F_n$ :在砂带线速度不变的情况下,采取恒压力磨削方式,采取  $F_n = (2 \sim 15) \text{ N}$ , 对工件进行磨削加工,测量工件磨削前后的质量变化,计算材料切除率。

3) 改变磨料种类:采用陶瓷磨料砂带、氧化铝磨料砂带及堆积磨料砂带作对比进行磨削试验,测量工件磨削前后的质量变化,计算材料切除率,对比不同磨料的材料去除能力。

4) 采用多因素正交试验方法综合研究砂带粒度、砂带线速度、磨削压力、接触轮槽齿比在磨削过程中对砂带堵塞程度的影响规律。

5) 砂带寿命:在一定的磨削条件下,对玻璃钢进行砂带寿命(耐用度)试验,观察和分析砂带随时间变化的磨损情况。

## 3 磨削率实验分析

砂带线速度对材料切除率有很大影响,如图 2 所示:1)在一定范围内,材料切除率  $Z$  随砂带线速度  $v_s$  增加而增加,但  $v_s$  增加到一定的限度, $Z$  随即减小。这是由于随着  $v_s$  的增加,单位时间内经过磨削区的磨粒数目增加,即有效切削刃数目增加,但是随着  $v_s$  增加到一定程度,单颗磨粒切刃在磨削区的驻留时间缩短,如果  $v_s$  过高,会导致磨粒不足以切入工件表面,只产生滑擦、耕犁作用<sup>[13]</sup>,从而影响材料切除率的继续提高,材料切除率下降。2)对应较好的磨削效果存在最佳的线速度值。因此,对不同的砂带可以找到一个最佳的磨削速度范围,然后选择在此范围内将保证较高的材料切除率,如图 2 所示,玻璃钢砂带磨削最佳  $v_s$  值为  $35 \text{ m/s}$  左右。

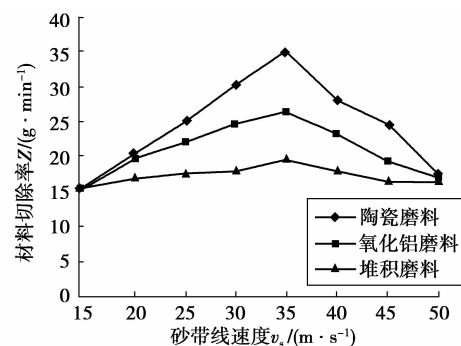


图 2 砂带线速度对玻璃钢磨削率的影响

随着时间的变化砂带磨损对材料切除率的影响也很明显,如图 3 所示。

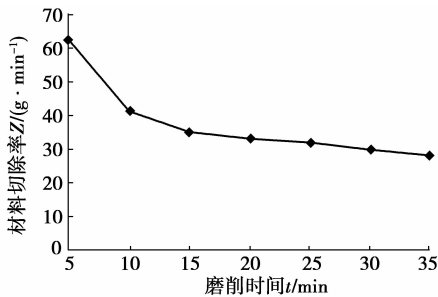
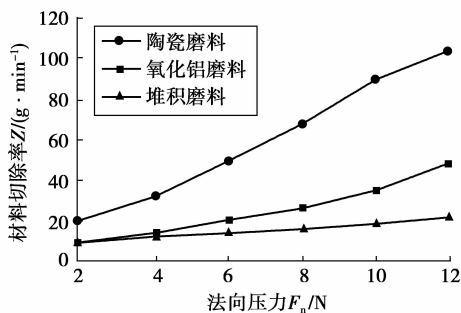


图 3 砂带磨削时材料切除率与磨削时间的关系

由图 3 可知,在砂带磨削初期,磨粒因破碎而磨损较快,以后进入以磨耗磨损为主的稳定磨损阶段。在磨削初期,砂带刃形锋利,参加切削的磨粒数目较多,虽然磨损率较大,但磨粒磨损问题不是很大,因而这个阶段砂带切削能力、材料切除效率最大。随着磨削过程的进行,砂带进入稳定的磨损阶段,此时磨粒在经过初期的顶尖破碎、折断或部分脱落以后,锋利性降低,切削能力相对减弱,材料切除效率也减小,但减少不多,曲线比较平缓。

需要注意的是,当砂带的磨损超过一定限度时,材料切除效率就会低于某个预期值。若继续使用砂带,不仅有可能出现工件磨削表面烧伤,而且效率太低也会使加工成本上升。

法向压力也是影响材料切除率极为重要的因素之一,如图 4 所示。



(砂带线速度  $v_s$  均为 22 m/s,干磨,顺磨)

图 4 法向压力对玻璃钢材料切除率的影响

由图 4 可以看出,对玻璃钢材料进行变压力磨削时,材料切除率随法向磨削压力近似线性增长,其中陶瓷磨料砂带材料切除率增长速度最快,其次是氧化铝磨料砂带,堆积磨料砂带材料切除率增长速度最慢。

采用较大的法向压力  $F_n$  可提高磨削效率,但压力过大会引起砂带打滑、拉断、脱落等,会影响砂带的使用寿命。

#### 4 砂带磨削堵塞及分析

在玻璃钢磨削过程中发现砂带在某些工况下发生了严重堵塞现象<sup>[14]</sup>。为了研究分析砂带堵塞现

象,笔者采用砂带堵塞面积占整条砂带的百分比来衡量砂带堵塞程度<sup>[15]</sup>,并使用 Image-Pro Plus 专业图像分析软件处理由相机采集到的砂带堵塞图片。

如图 5 所示,实验用砂带是德国 VSM 公司生产的陶瓷磨料砂带 XK760X(粒度号为 P36)。图片中白色的亮点为粘附堵塞在砂带上的玻璃钢磨屑,黑色部分为砂带磨粒。白色部分是笔者最感兴趣的地方,叫做 AOI(area of interest),在 Image-Pro Plus 程序里使用 segmentation 工具,来选择不同亮度及深浅的同种颜色。

在选择好 AOI 后,选择相应的计算模块 obi/total 计算白色区域占整个砂带面积的百分比。图 5 上的砂带堵塞程度经计算后为 69%。

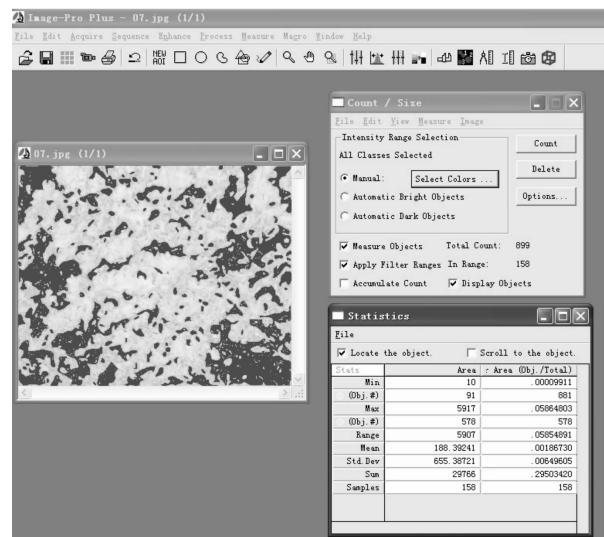
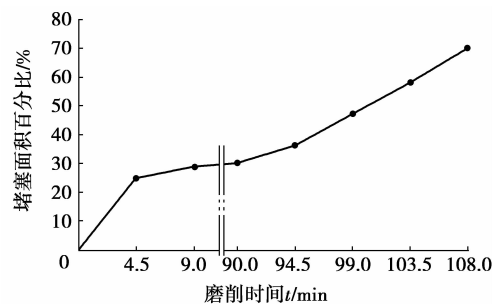


图 5 砂带(XK760X)堵塞面积的计算

通过试验数据分析,得到了砂带堵塞程度随时间的变化规律(如图 6 所示)。



(陶瓷磨料砂带, P36,  $v_s = 20$  m/s, 干磨)

图 6 砂带堵塞程度随时间变化规律

从图 6 可以看出,在砂带磨削初期(0 ~ 4.5 min),堵塞程度迅速加剧,从 4.5 min 后开始进入堵塞稳定期,砂带堵塞面积稳定在 30% 左右,在试验磨削到 108.0 min 后由于堵塞砂带寿命完结。

造成此现象的原因是:在磨削初期,大量的磨粒

发生顶尖破碎或整体破碎,附着在磨粒表面的玻璃钢磨屑随着磨粒的破碎而掉落,因此不会在砂带表面构成稳定的堵塞层,随着砂带进入稳定磨损期,玻璃钢在砂带磨粒表面顶尖附近形成稳定的粘附层,这层粘附层随着磨粒的稳定磨损而随之磨掉,新的粘附层附着在新露出的磨粒上,因此因这层粘附层而构成的砂带堵塞面积是基本稳定的。当砂带工作一定时间后,只有最后一层磨粒,没有新的磨粒露出,粘附物迅速被挤入砂带容屑空间内构成整个砂带的堵塞,使之无法继续工作,此时玻璃钢表面温度急剧上升,表面质量恶化,砂带寿命终结。

在磨削过程中,笔者采用多因素正交试验方法综合研究砂带粒度、砂带线速度、磨削压力、接触轮槽齿比在磨削过程中对砂带堵塞程度的影响规律,选择陶瓷磨料砂带进行磨削,试验结果如图7-10所示。

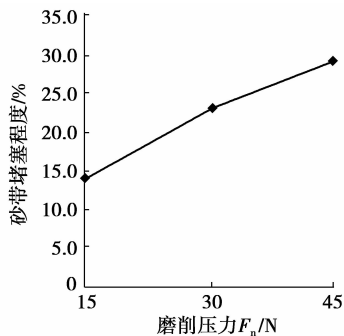


图7 砂带堵塞程度与磨削压力的关系

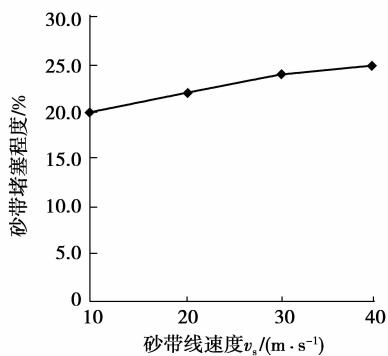
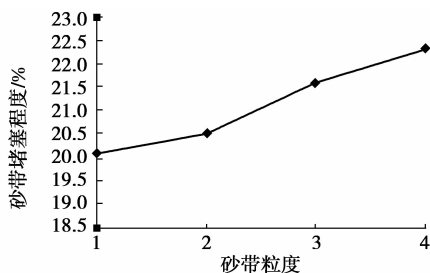


图8 砂带堵塞程度与砂带线速度的关系



(1,2,3,4 对应的粒度分别为 P36,P40,P60,P80)

图9 砂带堵塞程度与砂带粒度的关系

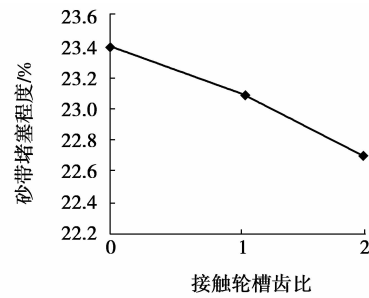
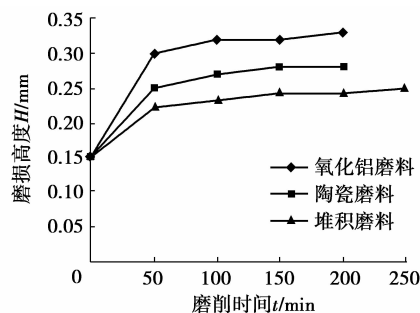


图10 砂带堵塞程度与接触轮槽齿比的关系

从图7-10可以看出,对玻璃钢材料磨削过程中砂带堵塞程度影响最大的是磨削压力,然后依次是砂带线速度、砂带粒度以及接触轮槽齿比。其影响规律为:随着磨削压力的增大,砂带线速度的提高,砂带粒度的增大,堵塞程度随之增大;随着槽齿比<sup>[16]</sup>的增大,砂带堵塞面积变小。当砂带堵塞面积为70%时,砂带基本失去去除表面材料的能力,砂带仅在工件表面滑擦,磨削温度急剧升高,此时应更换砂带。

## 5 砂带寿命分析

通过试验,可绘出图11。由图11可知:寿命期内砂带的磨损过程有2个阶段,以磨粒破碎磨损为主的初期快速磨损阶段和以磨粒磨耗磨损为主的稳定磨损阶段,磨平磨钝为磨损的主要形式。砂带采用的静电植砂工艺是造成砂带初期磨损的主要原因,因为它使磨粒沿自身长轴方向竖直植入基材表面,新砂带切刃尖而锋利,参与切削的磨粒较少,单颗磨粒承受法向压力和切向压力大,切刃发生破碎现象频繁,单个磨粒顶端将快速形成磨损小平或由单一切刃向近似等高的多切刃转变,一方面它表现出以磨粒破碎为主的快速磨损,另一方面磨粒顶端扩展变大,为砂带进入稳定磨损阶段做准备。进入稳定磨损阶段的砂带由于前期快速磨损已经使磨粒高度均匀,参与切削的磨粒增多且数量相对稳定。因此砂带在稳定磨损期间内磨损主要形式是磨耗磨损和部分的破碎磨损,其变化率相对较慢,近似成斜率很小的直线。并且由图8可知陶瓷磨料砂带相对氧化铝磨料砂带磨损较轻微,又有较高的材料切除率,适合磨削硬度较高的玻璃钢复合材料。堆积磨料砂带磨损最小,砂带比较耐磨,寿命长,但材料切除率很低,适合磨削硬度较低且不易更换砂带的材料。



( $v_s = 20$  m/s,  $F_n = 12$  N, P36, 干磨)

图 11 砂带累积磨削时间与砂带磨损高度的关系

## 6 结论

1) 砂带磨削玻璃钢复合材料时,材料切除率受磨削压力、砂带线速度、磨料种类及粒度等的影响较大。其中法向磨削压力越大,材料切除率越大;随着砂带线速度增大,材料切除率先增大后减小;磨料粒度号越低,材料的切除率越高。

2) 陶瓷磨料砂带磨削玻璃钢复合材料可以获得较高的材料切除率。

3) 砂带磨削玻璃钢材料时堵塞程度受多个因素的影响,较为复杂,其中影响砂带堵塞程度最大的是磨削压力,然后依次是砂带线速度、砂带粒度以及接触轮槽齿比。

4) 砂带磨削玻璃钢时磨平磨钝是砂带磨料最主要的磨损形式,陶瓷磨料砂带相对氧化铝磨料砂带磨损较缓慢,又有较高的材料切除率,适合磨削硬度较高的玻璃钢复合材料。堆积磨料砂带的寿命较长,但材料切除率较低,适宜在不易更换砂带的场合使用。

### 参考文献:

- [1] 常世峰,王涛,张杰. 玻璃钢的特点及在建筑领域的应用[J]. 河南建材, 2009(1):30-33.  
CHANG SHI-FENG, WANG TAO, ZHANG JIE. FRP features and its application in construction field[J]. Henan Building Materials, 2009(1):30-33.
- [2] PALANIKUMAR K. Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics using response surface methodology [J]. Materials and Design, 2007, 28(10):2611-2618.
- [3] WONG P M H, WANG Y C. An experimental study of pultruded glass fibre reinforced plastics channel columns at elevated temperatures[J]. Composite Structures, 2007, 81(1):84-95.
- [4] 徐哲. 玻璃钢零件的磨削加工[J]. 纤维复合材料, 2000, 17(2):28-29.

XU ZHE. Grinding of FRP parts[J]. Fiber Composites, 2000, 17(2):28-29.

- [5] HU N S, ZHANG L C. A study on the grindability of multidirectional carbon fibre-reinforced plastics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(3):152-156.
- [6] MOHAN N S, KULKARNI S M, RAMACHANDRA A. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1/3):265-271.
- [7] 黄云,黄智. 现代砂带磨削技术及工程应用[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2009.
- [8] HUANG Y, HUANG Z, XU Q S, et al. The grinding force measure and analysis on the abrasive belt grinding to magnesium alloy [J]. Key Engineering Materials, 2007, 353(1):726-729.
- [9] 黄云,黄智. 砂带磨削技术的发展及关键技术[J]. 中国机械工程, 2007, 18(18):2263-2267.  
HUANG YUN, HUANG ZHI. Development and key technologies of abrasive belt grinding [J]. China Mechanical Engineering, 18(18):2263-2267.
- [10] HUANG Z, HUANG Y, WU Y Y, et al. Finishing advanced surface of magnesium alloy tube based on abrasive belt grinding technology [J]. Materials Science Forum, 2009, 610/613(1):975-978.
- [11] HUANG Y, HUANG Z. Research on the heavy abrasive belt grinding machine to reduce thickness of engine connecting rod head[J]. Key Engineering Materials, 2006, 4(2):436-440.
- [12] 许世良,秦玉忠,刘禄祥,等. 强力砂带磨削试验[J]. 机械工艺师, 1994(1):16-17.  
XU SHI-LIANG, QIN YU-ZHONG, LIU LU-XIANG, et al. The experiment of heavy belt-grinding[J]. Mechanical Technologist, 1994(1):16-17.
- [13] 李虹,丁爱玲,李伯民. 砂带磨削技术的应用与发展[J]. 华北工学院学报, 1999, 20(4):330-333.  
LI HONG, DING AI-LING, LI BO-MIN. The application and development of abrasive belt grinding[J]. Journal of North University of China, 1999, 20(4):330-333.
- [14] 穆惠民,袁海荣,穆泽华. 玻璃钢机械加工[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.
- [15] 李鑫,黄云. 镁合金产品表面砂带磨削基础技术[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
- [16] SI L N, HUANG Y, HUANG Z, et al. The key technologies of belt grinding of glass fiber reinforced plastic composite [J]. Key Engineering Materials, 2009, 416(1):149-153.

(编辑 张 苹)