

# 航空发动机钛合金叶片机器人 浮动砂带磨削技术及其试验研究\*

黄云<sup>1,2</sup>, 侯明明<sup>2</sup>, 刘阳<sup>2</sup>, 肖贵坚<sup>1,2</sup>, 张友栋<sup>1,2</sup>, 宋康康<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

**[摘要]** 压气机钛合金叶片为航空发动机关键零部件,其制造质量和加工精度对整机工作性能有至关重要的影响。由于该叶片型面结构复杂,打磨工作常由人工完成,其打磨效率低,打磨质量一致性难以保证。对航空发动机钛合金叶片机器人浮动砂带磨削技术进行分析,并进行了相关试验研究。试验结果表明钛合金叶片的机器人浮动砂带磨削技术能适应钛合金叶片的打磨要求,打磨后的叶片表面粗糙度 $R_a$ 在 $0.4\mu\text{m}$ 以内,表面三维形貌一致性较好,磨削后的进排气边的形状保持一定的圆度状态。

**关键词:** 航空发动机; 钛合金叶片; 机器人; 砂带磨削; 浮动磨削

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.05.014



黄云

教授、博士生导师,长期从事高效精密砂带磨削技术与磨床设计制造研究。主持和参与了国家自然科学基金、国家“863”、国家科技重大专项、国家科技支撑计划等30余项项目。已发表论文90余篇,获得国家专利40余项及国家与省部级奖励多项。

叶片对航空发动机性能起着至关重要的作用。正常运行情况下,航空发动机中的大量零部件需要长期工作在高温、高转速、高压力的恶劣环境下,要求各个零部件能稳定运行且具有较长的寿命。因此,航空发动机叶片通常采用钛合金、高温合金等难加工材料制造,且加工精度要求高<sup>[1-2]</sup>。钛合金叶片在铣削完成后,工件型面会留下明显的刀路凹痕(深度 $20\sim 50\mu\text{m}$ )以及表面硬化层,其加工精度与表面质量远未达到最终质量要求,叶片型面的最后加工几乎普遍依赖于表面光精加工。目前钛合金叶片多通过人工打磨的方式进行,受人工操作的影响,打磨区域表面完整性及一致性无法得到保证,打磨效率低下,周期长,无法满足产品的批量化生产需求,部分零部件还存在打伤基体或叶

片的情况,给产品质量带来隐患。可见,常规加工工艺难以满足产品加工的需求,为提升发动机零部件的寿命和可靠性,急需开展复杂型面叶片打磨技术研究,通过相关制造工艺及智能化技术的研究来提升产品质量及加工效率。本文首先分析了砂带磨削与工业机器人智能加工对钛合金叶片打磨的工艺适用性,随后在钛合金叶片机器人砂带磨削实验平台上进行了试验研究,最后对打磨后的叶片进行检测和评价。

崔海军等<sup>[3]</sup>指出航空发动机叶片抛光依靠手工抛磨仍存在一系列问题,发展叶片自动化抛光是我国航空制造业发展所必须的。机器人砂带磨削系统具有柔性好、易扩展的特点,能作为一种叶片精密磨削的有效手段,提高柔性高精度加工能力和促进国家制造业装备产业升级。张振龙<sup>[4]</sup>设计了一款储罐焊缝打磨机器

\* 基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1908232); 国家科技重大专项(2017-VII-0002-0095); 重庆市技术创新与应用示范产业类重点研发项目(cstc2018jszx-cyzdX0061)。

人代替人工打磨,能在一定程度上代替人工打磨,提高作业效率,减轻劳动强度。经该打磨机器人打磨后的工件表面能露出金属光泽,表面粗糙度  $R_a$  小于  $25\mu\text{m}$ ,但此打磨精度不能满足航空发动机关键零部件打磨要求。董吉顺等<sup>[5]</sup>搭建了应用于轮辋焊缝打磨的机器人自动打磨系统,相对人工打磨,该系统在保证轮辋加工质量的同时大幅提升工作效率。吴斌等<sup>[6]</sup>剖析了铝合金不同位置的打磨工具和打磨方法的选择,指出正确选择打磨工具和打磨方法能有效提高铝合金打磨质量和打磨效率。张宏之等<sup>[7]</sup>通过三坐标测量仪最佳拟合法检测模锻叶片,确定叶片型面加工余量,再采用自适应砂带磨削方式对航发模锻叶片材料定量去除,虽然该技术在数控机床上已经发展成熟,但数控磨削相比机器人磨削来说成本更高且灵活性更低,因此不能广泛使用于航空发动机钛合金叶片的打磨。甘中学等<sup>[8]</sup>研制了一套针对复杂型面洁具的机器人自动磨削抛光系统,该系统能有效实现洁具的抛光,满足洁具产品抛光的生产品要求。洪云飞等<sup>[9]</sup>开发了基于 ABB 机器人的复杂空间曲面砂带磨削系统,用于加工汽轮机叶片,并取得了优良的加工效果,其打磨后的叶片型面在法线方向最大误差为  $0.3\text{mm}$ ,表面质量优于人工磨削质量,但根据相关文献可知,目前航空发动机零部件打磨后表面粗糙度  $R_a$  应在  $0.4\mu\text{m}$  以内,航发叶片进排气叶边轮廓度在  $0.08\text{mm}$  以内<sup>[1]</sup>,故该精度已不适用于航空发动机零部件打磨要求。

综上所述,目前在叶片自动打磨方面已经有不少相关研究,能在一定程度上满足叶片的自动化加工要求,提高打磨效率。但是上述研究多针对铝合金等常用材料所制成的零部件,对钛合金和航空发动机零部件打磨的研究相对较少。又由于数控磨削相比机器人砂带磨削存在成本更

高和灵活性更低的劣势,因此常用数控打磨机构也不利于进行叶片型面自动打磨的全面性推广。所以本文对航空发动机钛合金叶片的机器人自动化打磨系统的试验研究是十分必要的。

## 钛合金叶片机器人砂带磨削工艺性分析

### 1 压气机钛合金叶片工艺性分析

航空发动机中的压气机叶片属于典型的薄壁构件,其叶身表面曲率变化较大,加工精度要求高。叶片叶身曲面由多个截面构成,每个截面由叶盆、叶背两条样条曲线和进、排气边两段圆弧光滑拼接,如图 1 所示。发动机正常工作时,叶盆承载压缩空气的正向压力而叶背则承载压缩空气的负向压力。零件为钛合金难加工材料、表面材料加工去除困难。叶片结构和加工工艺特点如下:

(1) 该叶片的总长约  $183\text{mm}$ ,其中叶身长度约为  $171\text{mm}$ ,叶宽范围为  $84\sim 86\text{mm}$ ,进排气边处的圆弧半径范围为  $0.2\sim 0.35\text{mm}$ ;

(2) 未磨削之前  $R_a$  约为  $1.6\mu\text{m}$ ,叶片表面纹理一致性较差,影响气动性能,需要打磨。

### 2 砂带磨削工艺性分析

由于压气机钛合金叶片复杂曲面的加工特点以及薄壁型工件的复杂架构,目前多采用手工打磨,但表面一致性差,加工效率低。采用机器人智能打磨技术能有效改善钛合金

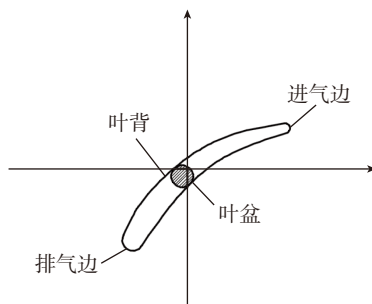


图1 叶片结构及结构型线  
Fig.1 Blade structure and structural profile

叶片的表面质量,能提高加工一致性与加工效率,降低工人劳动强度,实现钛合金叶片表面磨削由“手工技艺”到“自动磨削”的技术提升。

对于砂带磨削,由于砂带基材通常采用布基等柔性材料,其接触轮为弹性的橡胶接触轮,加之磨削速度稳定,对磨削过程中的振动敏感性较低,易于实现高效稳定,且加工质量较好的工件表面具有高效、冷态及弹性磨削的特点,因而用于航发叶片的打磨具有独特的优势。同时,砂带磨削可将接触轮做得很小,能够很好地应对叶片类复杂型面在打磨过程中易产生干涉的问题。

在叶片砂带磨削中,由于砂带具有一定的宽度,导致其与工件接触为线接触,故要求取最贴合磨削过程的角度。通过控制接触轮轴线方向即可实现最佳贴合角度控制,以此减少接触轮与叶片之间的磨削干涉。为了展示浮动限位磨头的原理和关键性,下面对工件打磨曲面的空间几何特性进行说明<sup>[10]</sup>。

任意空间曲面的参数方程可表示为:

$$\vec{s} = \vec{s}(u, v) \quad (1)$$

式中,  $(u, v) \in R$ , 表示曲面上的点位矢量。在曲面上取一点  $P(u_0, v_0)$ , 则曲面上经过该点的曲线  $T$  的参数方程为:

$$\begin{cases} u = u(t) \\ v = v(t) \end{cases} \quad (2)$$

曲线在  $P$  点的切线矢量可表示为:

$$\frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{s}_u \frac{du}{dt} + \vec{s}_v \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

设  $k_n$  为曲面在点  $P$  处的法曲率, 并设  $n$  为曲面在  $P$  处的法矢。则曲面在  $P$  点的法曲率公式为:

$$k_n = \frac{Ldu^2 + 2Mdu dv + Ndv^2}{Edu^2 + 2Fdu dv + Gdv^2} \quad (4)$$

其中,

$$E = \vec{s}_u \cdot \vec{s}_u, F = \vec{s}_u \cdot \vec{s}_v, G = \vec{s}_v \cdot \vec{s}_v$$



机器人磨削加工时,浮动砂带磨头的接触轮轴线与叶片曲面接触点最大曲率方向一致,最终实现钛合金叶片打磨的机器人自动打磨工作。

## 试验装置与方法

### 1 试验装置

(1)本试验采用 FANUC 公司生产的机器人,该型号机器人六自由度的关节臂机器人,最大负载 60kg,工作区域 2050mm,重复定位精度为  $\pm 0.03\text{mm}$ ,其附加轴的最大转速为 4000r/min,能够应用于装配、焊接、加工、测量等领域,可以很好地满足此试验钛合金叶片加工的要求。

(2)磨头采用自行设计制造的浮动砂带磨头,该磨头可通过电机控制实现速度调节,其调速范围为 0~50m/s;同时该磨头还具备压力控制功能,可根据工件被加工表面曲率变化情况自行进行浮动调节,实现精确的恒压力磨削;该机构采用  $\phi 15\text{mm} \times 5\text{mm}$  的小尺寸接触轮,能有效避免磨削过程中接触轮与叶片产生的过磨、干涉等现象,如图 5 所示。

(3)压气机叶片所用钛合金材料为 TC4,其组成为 Ti-6Al-4V,属于  $(\alpha+\beta)$  型钛合金,其耐蚀性优良、密度小、比强度高,还具有较好的韧性、机械性能和焊接性等。

(4)为保证被磨削表面的磨削质量,试验的磨削方式为逆磨,同时考虑加工环境的影响以及砂带本身磨削温度较低的特点,试验采用干磨方式,砂带选用红色尼龙砂带。

### 2 试验方法

(1)由图 5 可知,浮动砂带磨头通过电机和变频器调节实现砂带线速度调整和磨削压力的调节,钛合金叶片通过专用夹具固定在六自由度关节臂机器人上,通过机器人各个轴的坐标转换来控制叶片的运动轨迹,从而进行钛合金叶片的磨削。

(2)将砂带驱动轮的伺服电机设置为恒转速运转 (1000r/min),提供恒定的砂带线速度,磨削压力控制在 8N 以内。试验采用尼龙砂带,其转速为 1000r/min,磨削压力为 5~8N。

(3)将磨削完成的叶片拆除,进行三维形貌检测和表面粗糙度测量。

## 试验结果与讨论

钛合金叶片的制造质量和加工精度对航空发动机的性能起着至关重要的作用,为了直观详细地说明压气机钛合金叶片经机器人浮动砂带磨削后的加工质量和表面精度,选择表面质量、三维形貌、局部轮廓以及表面粗糙度等对钛合金叶片试验进行分析。

### 1 表面质量

由于采用自适应浮动磨头,当所磨削工件不圆或者与理论线型有差异时,该机构可根据被加工工件实际线型进行自动补偿,以达到最佳的磨削效果。磨削后叶片表面光滑,进排气边的形状保持一定的圆度状态,与叶身型面过渡平滑,无磨削烧伤。磨削后效果图如图 6 所示。

### 2 三维形貌

该浮动砂带磨头能通过压力控

制使磨头紧密贴合被加工工件表面,随加工表面的形变产生相应的弹性变形,实现被磨削工件型面的自动跟踪,对叶片磨削前后的三维形貌进行了超景深测量,其测量结果如图 7 所示。可知,磨削后叶片表面条纹结构趋于一致,表面质量比磨削前明显升高,符合航发叶片打磨要求。

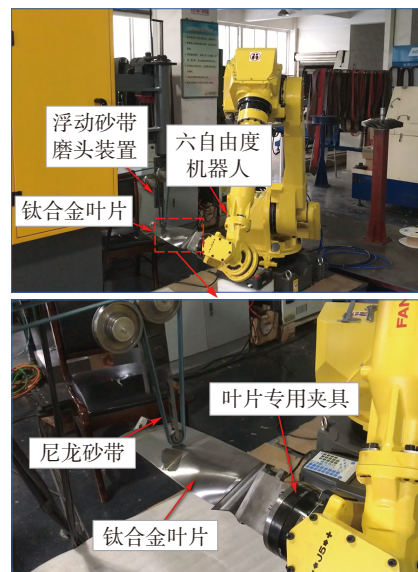


图5 机器人浮动砂带磨削平台  
Fig.5 Robotic abrasive belt grinding platform



图6 机器人砂带磨削后的叶片表面  
Fig.6 Blade surface after robotic abrasive belt grinding

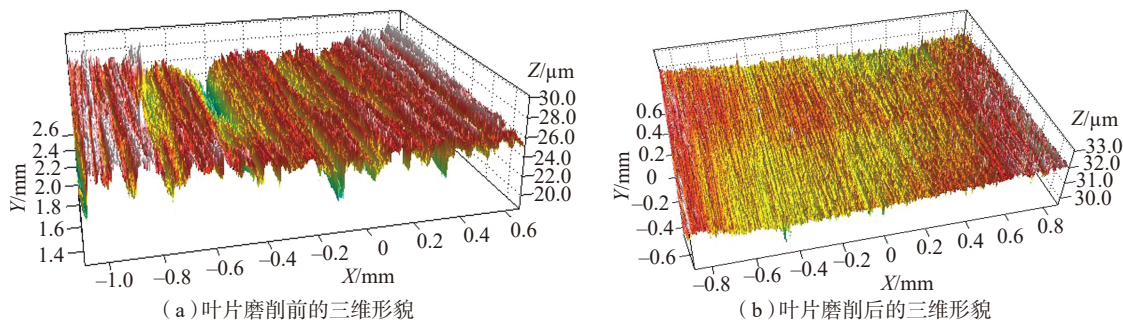


图7 叶片磨削前后的三维形貌对比  
Fig.7 Three-dimensional topography of blade before and after grinding

### 3 局部轮廓图

从图8可以看出,与磨削前相比,磨削后钛合金叶片的局部轮廓得到明显改善。由于该浮动磨头可通过电机控制实现速度调节,同时该磨头具备压力控制功能,可根据工件被加工表面曲率变化情况自行进行浮动调节,通过精准控制叶片表面的加工余量,避免磨削过程中接触轮与叶片产生的过磨、干涉,能够得到局部轮廓较好的航发叶片。

### 4 表面粗糙度

在磨削后叶片的表面选择8个

点,其点的布局如图9所示,采用英国 Taylor-Hobson 公司生产的型号为 Form Talysurf Series 表面轮廓仪进行表面粗糙度测量。其测量结果如图10所示,可见叶片表面粗糙度得到了很大改善,磨削后叶片的表面粗糙度  $R_a$  都在  $0.4\mu\text{m}$  以下,最小粗糙度  $R_a$  值为  $0.377\mu\text{m}$ ,与叶片磨削前相比,由于采用浮动磨头,可以实现磨削过程中的恒压力磨削,保证磨削过程中精确的磨削量控制,其表面粗糙度显著减小,能够达到航发叶片打磨表面粗糙度要求。

## 结论

本试验结果表明,机器人砂带磨削系统对航空发动机钛合金叶片的打磨具有很强的适用性,由于浮动砂带磨头的恒压力控制和自动补偿与跟踪,与磨削前相比,打磨后的叶片表面粗糙度  $R_a$  都在  $0.4\mu\text{m}$  以下,表面纹理一致性较高,叶片型面精度得到显著提高,轮廓叶片表面质量较好,能满足航发叶片的加工要求。该系统已在重庆某公司投入使用,运行良好,此研究为实现航空航天精密复杂构建的高效智能打磨奠定了技术基础。

## 参考文献

[1] 任旭. 机器人砂带磨削航发叶片关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.

REN Xu. Research on the key technology of robotic abrasive belt grinding aerial launching blades[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.

[2] 黄云, 肖贵坚, 邹莱. 航空发动机叶片机器人精密砂带磨削研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 53-72.

HUANG Yun, XIAO Guijian, ZOU Lai. Current situation and development trend of robot precise belt grinding for aero-engine blade[J].

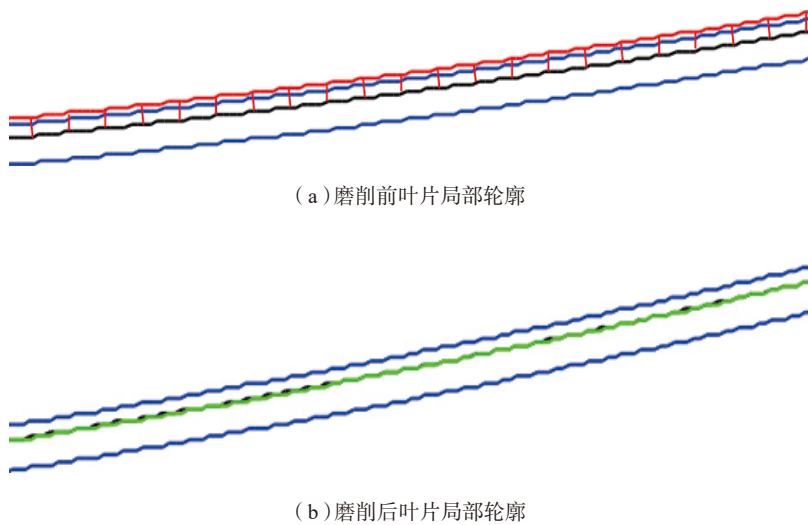


图8 磨削前后叶片局部轮廓

Fig.8 Local contour of blade before and after grinding



图9 叶片表面粗糙度检测选点位置

Fig.9 Location of selected points for blade surface roughness detection

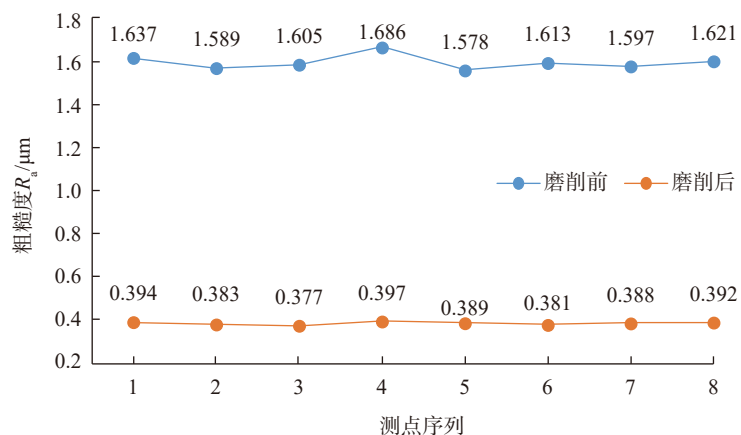


图10 叶片表面磨削前后粗糙度对比

Fig.10 Roughness comparison before and after blade surface grinding

Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(3): 53–72.

[3] 崔海军, 张明岐. 航空发动机叶片抛光技术现状及发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 128–131.

CUI Haijun, ZHANG Mingqi. Present situation and development trend of polishing technology for aeroengine blades [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 128–131.

[4] 张振龙. 储罐焊缝打磨机器人的结构设计 [J]. 当代化工研究, 2018(4): 175–176.

ZHANG Zhenlong. Structural design of weld grinding robot for storage tanks [J]. Contemporary Chemical Research, 2018(4): 175–176.

[5] 董吉顺, 李博, 赵森, 等. 机器人在轮辋焊缝打磨工艺中的应用 [J]. 制造业自动化, 2017, 39(2): 75–76, 103.

DONG Jishun, LI Bo, ZHAO Sen, et al.

The robot application in rim weld polishing process [J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(2): 75–76, 103.

[6] 吴斌, 孙景南, 伍云翔. 铝合金焊缝外观的打磨处理 [J]. 金属加工 (冷加工), 2016(S1): 693–694.

WU Bin, SUN Jingnan, WU Yunxiang. Grinding treatment of aluminum alloy weld appearance [J]. Metal Working (Metal Cutting), 2016(S1): 693–694.

[7] 张宏之, 梁巧云, 陈盛天, 等. 航空钛合金风扇叶片自适应砂带磨削实验研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(5): 67–72.

ZHANG Hongzhi, LIANG Qiaoyun, CHEN Shengtian, et al. Experimental research on self-adaptive belt grinding for aircraft titanium fan blades [J]. Diamond and Abrasive Engineering, 2018, 38(5): 67–72.

[8] 甘中学, 孙云权, 汤青, 等. 复杂型面洁具机器人抛光系统 [J]. 机械设计, 2011, 28(5): 38–41.

2011, 28(5): 38–41.

GAN Zhongxue, SUN Yunquan, TANG Qing, et al. Robot polishing system for complex surface sanitary ware [J]. Machine Design, 2011, 28(5): 38–41.

[9] 洪云飞, 李成群, 贡超. 用于复杂空间曲面加工的机器人磨削系统 [J]. 中国机械工程, 2006(S2): 150–153.

HONG Yunfei, LI Chengqun, YUN Chao. Robot grinding system for 3D complex surface processing [J]. China Mechanical Engineering, 2006(S2): 150–153.

[10] 梅向明. 微分几何 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.

MEI Xiangming. Differential geometry [M]. Beijing: China Machine Press, 1981.

通讯作者: 肖贵坚, 博士、副教授, 研究方向为高性能表面完整性加工及其服役性能, E-mail: Xiaoguijian@cqu.edu.cn.

## Robotic Floating Belt Grinding Technology and Experimental Study on Aero-Engine Titanium Alloy Blade

HUANG Yun<sup>1,2</sup>, HOU Mingming<sup>2</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, XIAO Guijian<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Youdong<sup>1,2</sup>, SONG Kangkang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**[ABSTRACT]** Compressor titanium alloy blade is a key part of aero-engine, and its manufacturing quality and processing accuracy have a crucial impact on the overall performance. Due to the complicated structure of the blade profile, the grinding work is often done manually, the grinding efficiency is low, and the consistency of the grinding quality is difficult to guarantee. Therefore, this paper analyzes the floating belt grinding technology for robotic belt grinding of aero-engine titanium alloy blades, and conducts relevant experimental research. The experimental results show that the robotic floating belt grinding technology of titanium alloy blades can meet the grinding requirements of titanium alloy blades. The surface roughness  $R_a$  of the blades after grinding is within  $0.4\mu\text{m}$ , and the three-dimensional topography of the surface is consistent. The shape of the exhaust side maintains a certain roundness.

**Keywords:** Aero-engine; Titanium alloy blade; Robot; Abrasive belt grinding; Floating grinding

(责编 逸飞)