

# 贮箱壁板材料高速铣削加工表面质量试验分析

穆英娟<sup>1</sup>, 郭国强<sup>1</sup>, 胡蒙<sup>2</sup>, 明伟伟<sup>2</sup>, 陈明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海航天精密机械研究所; <sup>2</sup>上海交通大学

**摘要:** 对火箭箭体壁板材料在高速铣削条件下的加工表面质量进行试验分析, 测量了不同转速下刀具最大径向位移跳动量, 分析对比了干式切削和微量润滑切削条件下的加工表面粗糙度变化规律。结果显示, 主轴转速 16000r/min, 每齿进给量 0.20mm/z, 轴向切深 4mm 时能够获得综合性能较好的加工表面质量和加工效率; 在供液距离为 50mm 时, 选用微量润滑高速铣削能够获得更加良好的加工表面粗糙度。

**关键词:** 壁板; 高速铣削; 表面质量; 微量润滑

**中图分类号:** TG543; TH161; TH142.2

**文献标志码:** A

## Analysis of Surface Quality for Tank Panel Material under High-Speed Milling

Mu Yingjuan, Guo Guoqiang, Hu Meng, Ming Weiwei, Chen Ming

**Abstract:** The test and analysis of surface quality of panel material under high-speed milling is conducted, the maximum radial displacement of the tool under different speeds is measured, and the variation of surface roughness in dry machining and micro lubrication cutting is analyzed and compared. The results show that the better comprehensive performance of the machined surface and machining efficiency can be obtained when the spindle speed is 16000r/min, the feed per tooth is 0.20mm/z, and the axial cutting depth is 4mm. At the same time, when the distance of lubrication is 50mm, better surface roughness can be obtained through high speed milling with micro lubrication.

**Keywords:** tank panel; high-speed milling; surface quality; micro lubrication

## 1 引言

贮箱作为箭体结构中最大与最关键的结构部件, 占火箭总质量的 60%、全箭长度的 2/3。推进剂贮箱属于薄壁网格蒙皮结构, 主要由大尺寸、薄壁的高强铝合金壁板经数控铣削加工和焊接而成, 因此壁板的铣削加工质量直接影响运载火箭的安全性与可靠性。

高速铣削加工因能够获得较高的材料去除率、优秀的加工尺寸精度和良好的加工表面质量, 在航空航天大型薄壁复杂结构件加工中获得了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。高速切削参数的选择直接影响零件加工精度、加工表面质量、材料去除效率以及加工过程中的切削力、切削温度等<sup>[2,3]</sup>。在高速切削铝合金中, 刀具的主要磨损机理为粘结磨损和扩散磨损, 这与普通切削有本质的不同<sup>[4]</sup>, 因此对刀具基体材料、涂层类型和微量润滑冷却方式都提出了更高的要求。在优化加工路径、加工方式和柔性装夹系统后, 针对铝合金薄壁零件可以获得良好的加工质量和变形控制<sup>[5]</sup>。

壁板零件材料为高强度铝合金(2219), 直径 3350mm 的内圆弧面上分布有 300 余个大小不均的菱形或三角形腔槽, 加工过程中 80% 以上的材料被去除, 加工后壁厚 2.3 - 2.5mm, 表面粗糙度要求  $R_a 1.6\mu\text{m}$ , 因此壁板具有大尺寸、薄壁、结构复杂和精度要求高等典型特征。壁板年生产量达 400 余件, 因此对零件加工效率也提出了高要求。目前生产仍主要依靠试切方法来确定切削用量, 往往无法得到最优的切削参数, 同时过于保守的切削参数也限制了高速机床性能的充分发挥。

本文以壁板零件为对象, 通过高速铣削试验, 研究壁板材料在高速加工条件下的加工表面粗糙度变化规律, 对比了在干式切削和微量润滑(MQL)切削条件下的加工表面粗糙度, 为壁板零件高速铣削参数的合理选择以及微量润滑在壁板零件高速加工中的应用提供了重要的参考依据。

## 2 试验条件与方案

### 2.1 试验设备与仪器

试验材料为经过固溶处理和人工时效的强化铝合金 2219, 其化学成分和主要机械性能见表 1。试验机床为 GMC50100u 大型龙门五轴高速加工中心, 主轴最高转速 24000r/min。试验刀具选用肯纳

F2AA 系列 TiAlN 涂层整体硬质合金平头立铣刀,铣刀参数:2 刃,前角  $15^\circ$ ,后角  $15^\circ$ ,刃部直径 14mm,螺旋角  $45^\circ$ 。

表 1 强化铝合金 2219 的化学成分与主要机械性能

(wt%)							
Cu	Mn	Ti	Fe	Si	Zn	V	Al
5.8-6.8	0.2-0.4	0.02-0.10	$\leq 0.3$	$\leq 0.3$	0.1	0.05-0.15	其余
抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)						423.7	
屈服强度 $\sigma_s$ (MPa)						283.5	
延伸率 $\varepsilon$						15.65	

由于刀具一刀柄、刀柄—机床主轴配合接口存在间隙,铣刀在旋转时会产生偏心,因此在高速铣削加工试验前要用激光位移传感器 CD5-L25 检测刀具端高速旋转时的径向跳动(见图 1)。为保证高速铣削加工的安全,试验刀具与刀柄经检测需满足 G2.5 动平衡精度要求。试验后采用日本三丰 SJ210 便携式表面粗糙度仪测量已加工表面粗糙度。

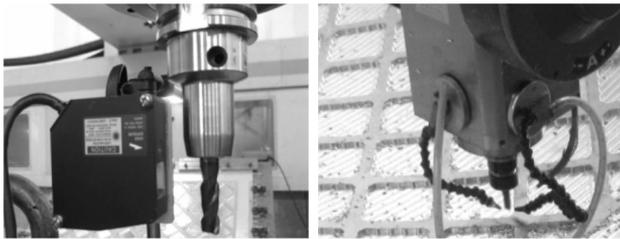


图 1 刀具径向跳动测量 图 2 壁板微量润滑切削试验

## 2.2 试验方案

### (1) 干式切削加工试验

采用单因素实验法进行壁板材料的高速铣削试验。铣削参数:主轴转速 16000r/min,为对比加工表面粗糙度,每齿进给量  $f_z$  选取 0.15mm/z、0.20mm/z 和 0.25mm/z 三个水平,轴向切深  $a_p$  选取 2mm 和 4mm 两个水平,径向切宽  $a_e$  为 12mm。

### (2) 微量润滑切削加工试验

在微量润滑加工中,采用外置式双喷嘴设计,如图 2 所示,喷射方向分别对准刀具前刀面和后刀面,喷射距离 50mm,气源压力 0.6MPa,油雾流量 10ml/h。铣削参数:主轴转速选取两个水平 16000r/min 和 18000r/min,每齿进给量  $f_z$  选取两个水平 0.15mm/z 和 0.20mm/z,轴向切深  $a_p$  为 4mm,径向切宽  $a_e$  为 12mm。

在高速铣削试验过程中,结合壁板内圆弧面菱形深腔网格结构,刀具的加工路径选择平行于壁板圆弧边的走刀方式。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 不同转速下刀具最大径向位移跳动量

图 3 为在不同转速下刀具的最大径向位移跳动量。在主轴转速达到 20000r/min 时,刀具的最大径向位移跳动量达到  $10\mu\text{m}$  左右,但仍满足高速精密加工中刀具径向跳动要求。对比图中不同转速下刀具的最大径向位移跳动量可以发现,随着转速的增大,径向位移跳动量呈增加趋势;在主轴转速小于 12000r/min 时,随着主轴转速增加,径向位移跳动量的增幅较小;当主轴转速大于 12000r/min 时,刀具径向位移跳动量的增长速度较快,且跳动量值较大。

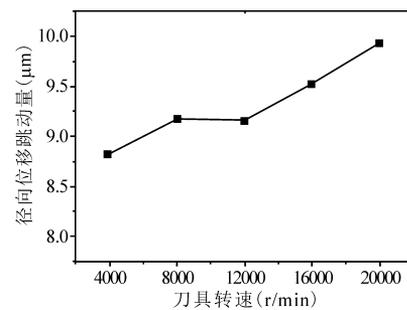


图 3 不同转速下刀具最大径向位移跳动量

### 3.2 干式切削表面粗糙度的变化规律

干式切削且主轴转速 16000r/min 时,不同每齿进给量和轴向切深条件下的加工表面粗糙度变化曲线见图 4。随着每齿进给量的逐渐增大,加工表面粗糙度逐渐增大,这表明每齿进给量对表面粗糙度有很大影响;在每齿进给量较小时,切削力较小,切削过程稳定,加工振动较小,已加工表面层材料的塑性变形较小<sup>[3,4]</sup>,因此可以获得较低的表面粗糙度。

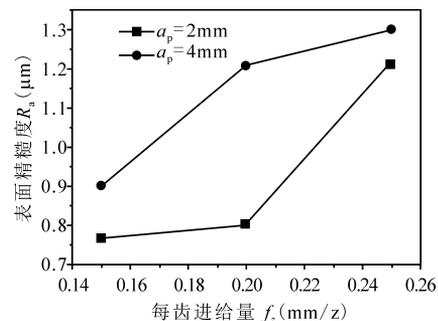


图 4 干式切削条件下表面粗糙度变化曲线

随着切削深度的增大,加工表面的粗糙度也随之增大。切削深度是影响切削力大小的重要因素,切削深度的成倍增大,将大幅增加加工过程中的切削力,增加刀具前刀面和切屑之间的摩擦,刀具磨损加快。在切削力增长和刀具磨损加快的影响下,已

加工表面层材料的塑性变形严重,从而增大了加工表面粗糙度。

在干式切削条件下,不同水平的每齿进给量和轴向切削深度加工获得的加工表面粗糙度均能满足设计要求。同时,采用较大的切削深度能够显著提高切削效率,结合加工表面粗糙度要求和加工效率要求,选择每齿进给量 $0.20\text{mm/z}$ 、轴向切深 $4\text{mm}$ 能够获得综合性能较为良好的加工表面质量和加工效率。

### 3.3 微量润滑切削表面粗糙度的变化规律

图5为在干式切削和微量润滑切削条件下的表面粗糙度对比数据。在相同的切削用量下,微量润滑切削获得的加工表面粗糙度值明显小于干式切削条件。

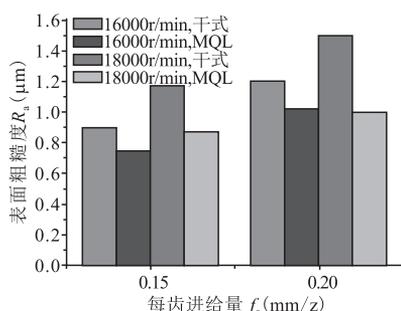


图5 干式切削和微量润滑切削条件下表面粗糙度对比

微量润滑铣削试验中,供液距离为 $50\text{mm}$ ,此时润滑油雾滴的速度最大,且最大雾滴速度分布在雾炬中心,能够保证较大数量的雾滴能够进入切削区域,起到良好的润滑作用。进入切削区的微小油雾滴一方面会因为切削热产生高温汽化,从而带走大量的热量,降低切削区域温度;另一方面可以有效改善切屑与前刀面、已加工表面与后刀面的润滑条件,降低切屑与前刀面、已加工表面与后刀面的摩擦,从而改善刀具的磨损状况,改善加工表面质量,获得良好的加工表面粗糙度。

从图5可以看出,随着主轴转速的提高,加工表面粗糙度有小幅增长。在利用平底立铣刀加工壁板内圆弧面时,铣刀底刃也参与切削加工,形成已加工表面的底平面。在铣刀底刃上有呈线性的切削速度分布带,虽然随着主轴转速的提高,铣刀周刃的切削速度增大,但底刃切削速度增长并不明显,其加工获得的表面粗糙度也不会取得良好的改善<sup>[4]</sup>。随着主轴转速的提高,刀具高速旋转时的径向跳动量也逐渐增大,这也会增大加工表面的粗糙度。

## 4 结语

(1)在主轴转速小于 $12000\text{r/min}$ 时,随着主轴转速增加刀具径向位移跳动量的增幅较小;当主轴转速大于 $12000\text{r/min}$ 时,刀具径向位移跳动量的增长速度较快;在主轴转速达到 $20000\text{r/min}$ 时,刀具的最大径向位移跳动量达到 $10\mu\text{m}$ 左右。

(2)在干式切削、主轴转速为 $16000\text{r/min}$ 时,不同水平的每齿进给量和轴向切削深度加工获得的加工表面粗糙度均能满足设计要求。当每齿进给量为 $0.20\text{mm/z}$ 、轴向切深 $4\text{mm}$ 时能够获得综合性能较为良好的加工表面质量和加工效率。

(3)随着主轴转速的提高,加工表面粗糙度小幅增长。同时,在供液距离为 $50\text{mm}$ 时,微量润滑切削获得的加工表面粗糙度值明显小于干式切削条件。

## 参考文献

- [1]曹宏瑞,陈雪峰,何正嘉. 主轴一切削交互过程建模与高速铣削参数优化[J]. 机械工程学报,2013,49(5):161-166.
- [2]陈明,袁人炜,凡孝勇,等. 三维有限元分析在高速铣削温度研究中的应用[C]. 国际机械工程学术会议,2000.
- [3]李亮,何宁,何磊,等. 高速铣削铝合金时切削力和表面质量影响因素的试验研究[J]. 工具技术,2002,36(12):16-19.
- [4]何光荣,杨叶,成群森,等. 铝合金铣削过程表面粗糙度分析与建模[J]. 航天制造技术,2010,6(3):168.
- [5]万熠,艾兴,刘战强,等. 高速铣削航空铝合金7050-T7451时刀具的磨损破损[J]. 机械工程学报,2007,43(4):103-108.
- [6]蹇悦,杨叶,郭国强. 航天铝合金薄壁零件高效加工策略[J]. 航空制造技术,2015,475(6):54-58.

第一作者:穆英娟,高级工程师,上海航天精密机械研究所,201600上海市

First Author:Mu Yingjuan, Senior Engineer, Shanghai Institute of Space Precision Machinery, Shanghai 201600, China

通信作者:郭国强,博士,高级工程师,上海航天精密机械研究所,201600上海市

Corresponding Author:Guo Guoqiang, Doctor, Senior Engineer, Shanghai Institute of Space Precision Machinery, Shanghai 201600, China