

# TC4 合金蜂窝冰固持低温铣削研究

王凤彪, 侯博, 袁凯, 王永青

(大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 广泛应用于航天领域的低刚度薄壁钛合金蜂窝材料, 在铣削加工中面临卷曲、开焊、塌边等缺陷, 需改进其固持和加工方法。材料通过冰固持方法处理, 并进行高速深冷铣削加工; 分析了蜂窝铣削性能和加工缺陷产生原因, 提出了冰固持超低温铣削机理。结果表明, 相比于传统固持加工方式, 经冰固持低温铣削的钛合金蜂窝表面质量有很大提高, 加工缺陷被有效抑制; 切削深度对表面质量影响较大。切削参数对铣削力影响顺序: 切深最大, 可提高约 3 倍, 其次是主轴转速, 进给速度影响最小。冰固持低温方法提高了蜂窝强度, 实现了超低温切削, 改变了断屑方式。结论: 冰固持低温切削为内径向等效强度小、低刚度薄壁钛合金蜂窝材料高效加工提供了新方法。

**关键词:** 钛合金蜂窝; 缺陷; 冰固持; 铣削力; 等效强度

**中图分类号:** TH161; TG146.2<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)01-0326-07

目前具有强度高、刚性好、隔热、综合功能突出、不易变形、加工适应性好等特点的钛合金蜂窝材料, 被广泛应用于航天、航空领域的机身壁板等部位<sup>[1,2]</sup>。

通常金属合金蜂窝结构部件在铣削加工时, 需要完成定位和固持夹紧工作, 但由于蜂窝的薄壁多孔结构, 使其虽然沿孔格轴向具有较高的强度, 但内径向等效强度相对很小。采用传统压板方式夹持工件, 受径向铣削力作用时, 极易产生变形<sup>[3]</sup>。同时由于铣削力很小, 加工中极易引起工件变形, 使加工精度较低, 无法满足航空产品装配的要求, 影响了产品的实用功能<sup>[4,5]</sup>。

目前比较先进的蜂窝固持方法为电磁及真空吸附方法<sup>[6,7]</sup>。但由于钛合金蜂窝材料刚性不足, 加工中易产生变形, 以及材料导热性能差, 导致切削区温度较高, 影响加工精度。同时吸附装置的结构及工件装夹复杂, 真空度难保持的缺点, 限制了装夹长时可靠性和装夹效率。同时钛合金蜂窝机械加工主要采取高速数控加工技术, 尤其复杂型面类蜂窝材料多采用五轴坐标高速铣床加工成形<sup>[8]</sup>, 并配备专用铣刀, 文献[9]中设计了特殊蜂窝铣刀, 并根据试验结果优化了刀具结构尺寸, 使得蜂窝获得了较好铣削效果。

本实验采用冰固持超低温高速铣削方法加工航天用 TC4 钛合金蜂窝材料, 以纯冰作为固持介质, 液氮作为低温处理介质, 研究冰固持钛合金蜂窝方法和冰固持条件下蜂窝高速铣削性能和铣削机制。

## 1 实验

航天用 TC4 钛合金蜂窝, 切割成 60 mm×60 mm×30 mm 方形块, 且两相邻侧面垂直, 作为定位面。

采用 DMU700 立铣加工中心对材料进行切削试验, 主轴最高转速 24 000 r/min, 工作台行程 300 mm×300 mm×200 mm; 刀具选用日本京瓷公司硬质合金 4 刃内冷立铣刀, 铣刀直径为  $\Phi 10$  mm。利用北京天海工业公司 DPL-175MP 型自增压液氮罐提供低温液氮, 采用外转内冷式刀柄装置夹持铣刀并喷射液氮控制切削区温度, 外喷式喷管喷射液氮控制纯冰温度; 控制液氮喷口温度-196 °C; 自制金属蜂窝冰固持夹具如图 1a 中所示。

钛合金蜂窝冰固持低温加工试验平台如图 1b 所示。采用单因素分析法, 试验参数如表 1 所示, 铣削宽度恒定为 6 mm, 其中不同切深时进给速度和主轴转速取 150 mm/min 和 8000 r/min; 不同进给速度时其他两参数取 1 mm 和 8000 r/min; 不同主轴转速时, 其他两参数取 1 mm 和 150 mm/min, 即有无冰固持各 18 组实验。在加工前的冰温度由 HaierDW-50W255 255L 超低温试验箱获得, 箱内温度-20~-60 °C可调节, 由于纯冰-50 °C时性能最佳, 故试验中试验箱设定为-50 °C。

蜂窝材料铣削力分解如图 1c 所示。分别为进给力  $F_x$ 、主切削力  $F_y$ 、背向力  $F_z$ , 此外  $a_p$  是铣削深度,  $a_e$

收稿日期: 2017-01-07

基金项目: 国家科技重大专项项目 (2014ZX04015021)

作者简介: 王凤彪, 男, 1979 年生, 博士, 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024, 电话: 0411-84708420, E-mail: wangfb@dlut.edu.cn

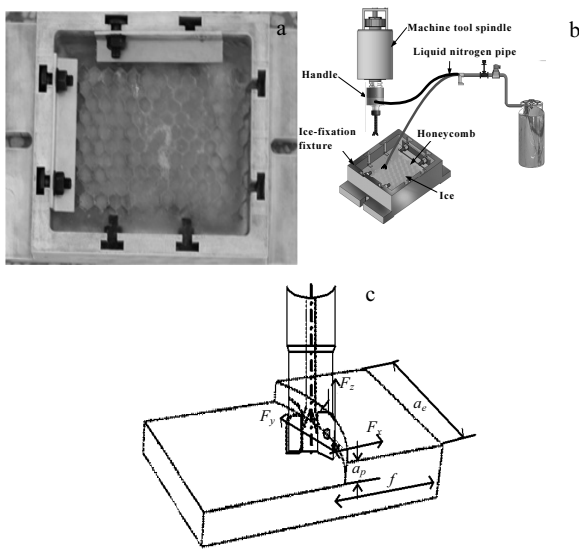


图 1 低温加工试验平台

Fig.1 Low-temperature test platform: (a) ice fixation fixture, (b) processing platform, and (c) milling force decomposition

表 1 试验参数

Table 1 Experiment parameters

No.	Cutting depth/mm	Feed speed /mm·min <sup>-1</sup>	Spindle speed/r·min <sup>-1</sup>	Ice temperature/°C
1	0.5	50	500	-50
2	1	100	1000	-50
3	1.5	150	2000	-50
4	2	200	4000	-50
5	2.5	250	8000	-50
6	3	300	12000	-50

是铣削宽度。

利用 Nikon D7100 单反相机获得蜂窝加工实景及表面形貌，焦距 16~85 mm；采用 KEYENCE 公司 VHX-600 型超大景深数码显微镜测量试样表面微观形貌，分辨率 5400 万像素；采用美国 ZYGO 公司 New view5022 型 3D 表面轮廓仪测量试样表面粗糙度，垂直分辨率 0.1 nm，横向分辨率 110 nm，扫描深度 2~150 μm；采用瑞士 Kistler9257 B 三相测力仪测量切削点切削力；采用日本 JSM-6360LV 扫描电镜，观测微结构。采用 RIGAKU 的 D/max-rB 型号 X 射线衍射仪分析表面相组成，扫描速度 0.02°。

## 2 结果及讨论

### 2.1 表面形貌分析

钛合金蜂窝冰固持加工如图 2 所示。加工中纯冰在液氮低温作用下，经长时间加工后仍旧能够保持冰冻状态，并保持稳定的固持力。

钛合金蜂窝未冰固持加工表面形貌如图 3 所示，蜂窝表面会出现塌边、开焊和变形等缺陷。主要由于蜂窝面内径向等效强度很小，刚度不足，加工时易卷曲和塌边变形，且钛合金塑性较强，不易断屑而产生毛边。同时加工中产生的内应力，易使蜂窝板钎焊面开焊，导致蜂窝性能失效；蜂窝端面分支部分出现不规则断裂现象，并伴有部分变形（图 3b）。而冰固持加工表面平整光滑，相关缺陷被很好地抑制，并随主轴转速的提高，尤其高速切削时，表面质量更好，几乎无毛刺、卷曲等缺陷，如图 4 所示。

钛合金蜂窝铣削加工微观形貌如图 5 所示，图 5a~5c 为未冰固持加工形貌，加工断面不平整（图 5a, 5b），表面粗糙，部分双层面有开焊现象（图 5c），导致蜂窝力学及机械性能失效；而冰固持表面平整光滑，刀痕均匀且钎焊面致密无开裂现象，如图 5d, 5f。

### 2.2 表面粗糙度分析

由于无冰固持加工蜂窝表面质量很差，不需粗糙度分析，只分析工艺参数对冰固持低温加工表面粗糙度影响，如图 6 所示。随主轴转速增加，表面质量明显改善，但高速时质量提高趋缓；随切削深度增加，表面粗糙度值明显升高，且切深对表面质量影响更大。

### 2.3 铣削力分析

钛合金蜂窝有、无冰固持的三方向铣削力测试结

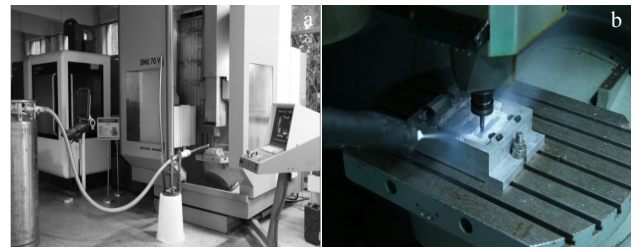


图 2 加工实景

Fig.2 Machine scenery: (a) processing equipment and (b) cryogenic cutting with ice fixation

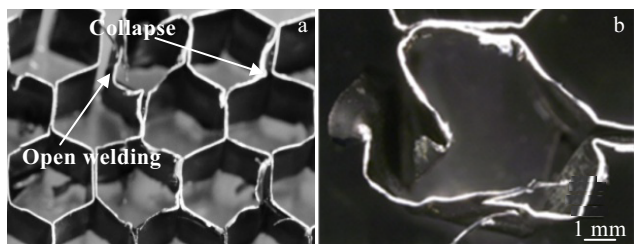


图 3 未冰固持加工

Fig.3 No ice fixation processing: (a) collapse and open welding and (b) deformation

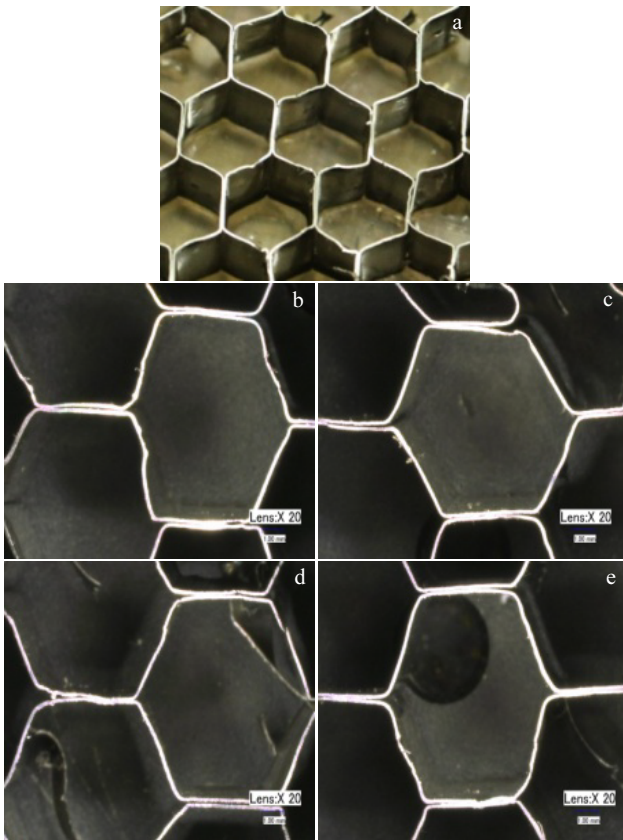


图 4 冰固持加工形貌

Fig.4 Ice fixation processing morphology (a) and at different spindle speeds: (b) 1000 r/min, (c) 4000 r/min, (d) 8000 r/min, and (e) 12000 r/min

果如图 7~9 所示。

首先，铣削力在冰固持条件下几乎都大于无冰固持，随切削参数增加有规律性的增大，说明此时有更大体积的脆硬相参与了切削，增加了切削阻力。

其次，水平方向力  $F_x$ 、 $F_y$  随主轴转速的增加而减小(图 7)，而无冰固持背向力  $F_z$  在高速时有增加趋势，主要是高速铣削振动加剧及温升增加引起刀具和工件膨胀，导致轴向受阻增强；随着进给速度的增加，铣削力变化不大，如图 8 所示；而随切深增加，如图 9 所示，铣削力都呈增大趋势，且变化更加明显，尤其大切深时，轴向有更大的切削力。

最后，切削力影响顺序：切深影响最大，其次是主轴转速，进给速度影响最小；大切深时，无冰固持的  $z$  向切削力首次超过冰固持，主要是大切深时，切削力增大导致蜂窝受水平向压应力增大，由于普通固持方式固持力太小，导致蜂窝变形加剧，部分蜂窝得不到有效切削，切削面成为斜面；同时刀具和加工面振动加剧，引起  $z$  向阻力增加，而  $y$ 、 $x$  向出现些许下降趋势。

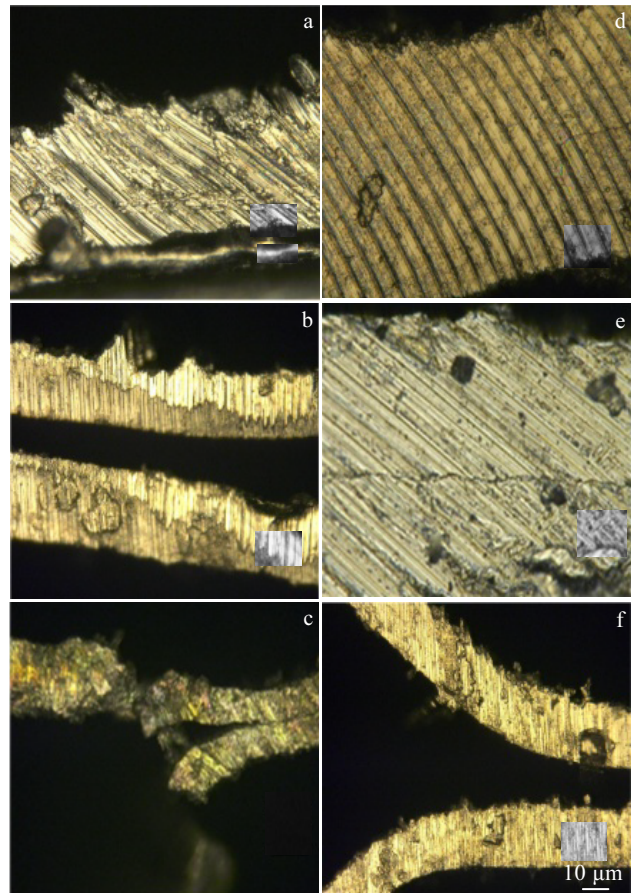


图 5 表面形貌

Fig.5 Surface microstructure without ice fixation: (a) single layer surface, (b) double layer surface, (c) honeycomb branch; with ice fixation: (d) single layer surface, (e) double layer surface, and (f) honeycomb branch

## 2.4 冰固持有效切削性分析

### (1) 无冰固持加工缺陷分析

钛合金蜂窝常规加工的卷曲塌边、开焊及变形缺陷，主要与蜂窝结构有关，如图 10 所示，并基于文献 [9]对正六边形蜂窝芯力学性能的分析结果，可得钛合金蜂窝面内弹性力学性能参数计算公式

$$E_1 = 2E_2 = \frac{4}{\sqrt{3}} E \left(\frac{h}{l}\right)^2 \quad (1)$$

其中， $E$  为 TC4 合金模量， $E_1$  为双层蜂窝模量， $E_2$  为单层蜂窝模量。由于蜂窝壁厚  $h$  只有 0.02 mm，边长  $l$  为 10 mm，蜂窝面内径向模量降为钛基体的约  $10^{-5}$ ，故面内径向强度非常低，常规加工缺陷不可避免。分析铣削加工各缺陷产生的原因：

首先，卷曲和塌边缺陷主要出现在单层蜂窝加工断面，基于单层蜂窝特点，该断面处蜂窝壁面内径向强度和刚度较低，同时由于切削力较低且均匀，导致

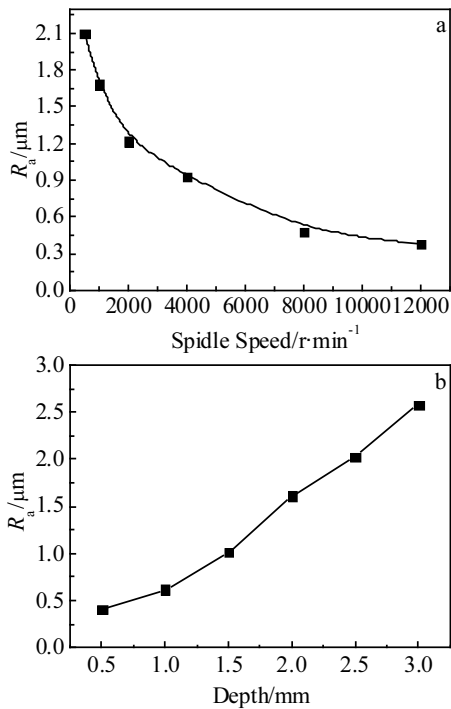


图 6 冰固持加工表面粗糙度

Fig.6 Ice fixation processing surface roughness: (a) cutting speed influence and (b) cutting depth influence

径向剪切强度较低, 甚至不足以切断钛合金, 而是将被加工面大面积压弯或压塌, 引起该处断屑不足, 出现卷曲和塌边缺陷。

其次, 试样边缘的蜂窝上会发现有变形缺陷, 主要考虑蜂窝材料面内受力特性, 相比于中央区域蜂窝, 试样边缘面内强度最低, 前者在切削力作用下, 只有加工面出现较小变形, 切削力由周围多个蜂窝承担, 而在边缘区域切削力完全作用于单个或部分蜂窝上, 又由于蜂窝底面固定, 导致蜂窝上部出现较大变形, 正六边形形态遭到部分破坏, 出现变形缺陷。

最后, 基于蜂窝试验结果, 当加工钎焊面(双层蜂窝)的头、尾部时, 由于铣削面处于单、双层蜂窝过渡部位, 铣削力变化梯度较大, 如双层变单层时, 铣削力将减小接近一半, 又由于蜂窝材料韧性及强度都很大, 以及切削力不足和分布不均, 引起切削振动增大, 切断面受拉严重(断屑方式主要是塑性拉断), 同时钎焊面两端粘接强度较中间弱, 引起开焊缺陷。

综上, 钛合金蜂窝常规加工缺陷主要由切削力不均和蜂窝面内径向刚度、强度低引起的。

(2) 冰固持超低温冷却铣削钛合金机理

首先, 由图 11 蜂窝加工表面 SEM 微观形貌可知,

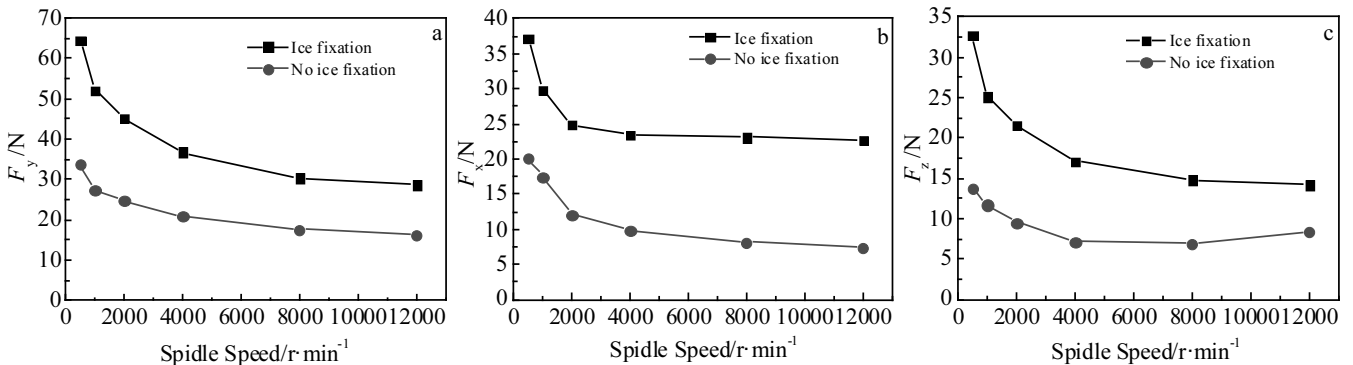


图 7 主轴转速对铣削力影响

Fig.7 Effect of spindle speed on milling force: (a) main cutting force, (b) feed force, and (c) back force

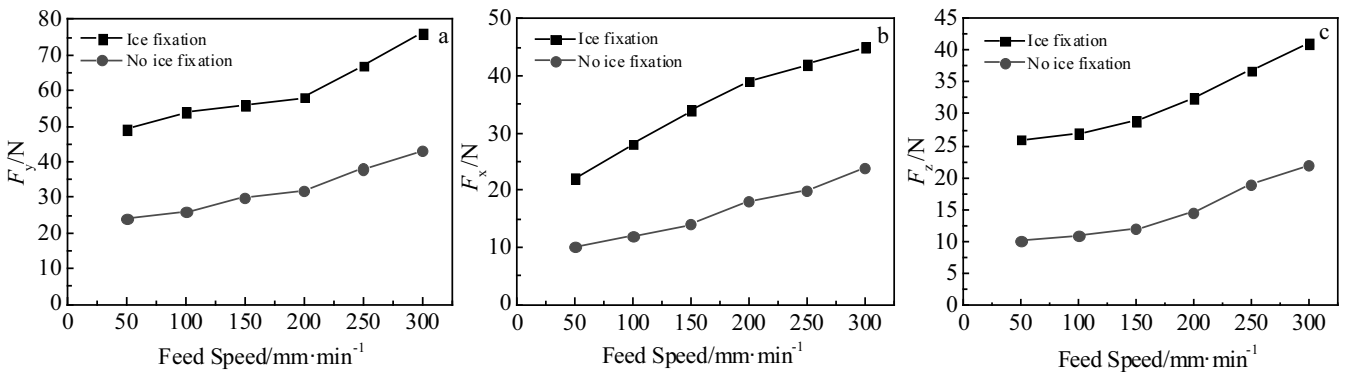


图 8 进给速度对铣削力影响

Fig.8 Effect of feed speed on milling force: (a) main cutting force, (b) feed force, and (c) back force

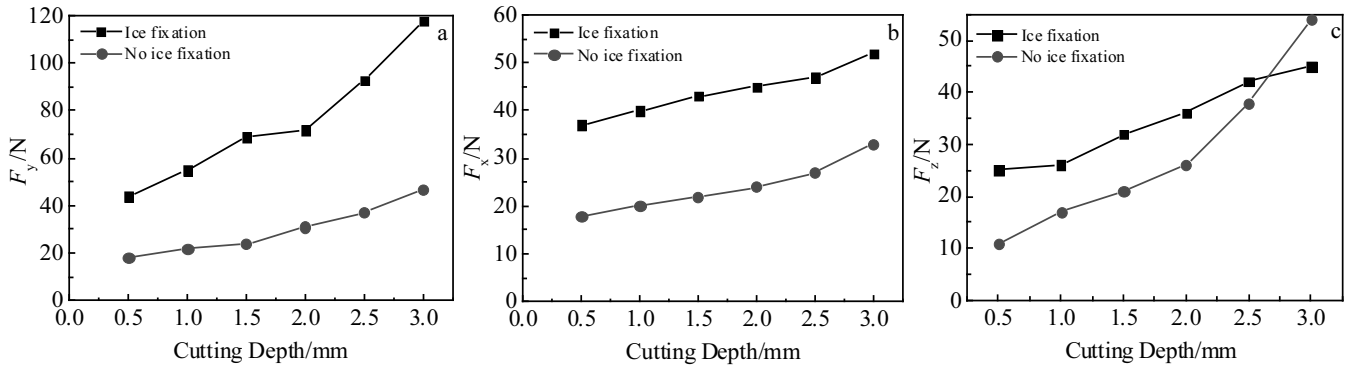


图 9 切削深度对铣削力影响

Fig.9 Effect of cutting depth on milling force: (a) main cutting force, (b) feed force, and (c) back force

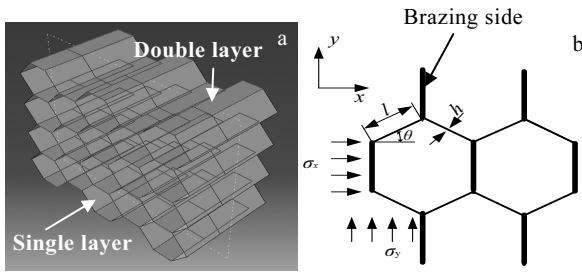


图 10 蜂窝结构模型

Fig.10 Model of honeycomb: (a) 3D structure and (b) plane structure

未冰固持加工表面粗糙和边缘有拉伸裂缝出现。根据切削断裂方式不同，断裂微区可划分为 3 个区域。最外层相对平整，主要是钛合金最外层存在有几微米厚的氧化脆性相  $TiO_2$ ，如图 12 所示，导致其呈现出剪切断裂性能，而在第 2 区即过渡区可看到部分拉伸断裂裂纹，呈现部分拉伸断裂特性。由于蜂窝的弱刚性和合金的高强度性能，尤其低导热性<sup>[10]</sup>，导致切削区散热很慢，温升较快，因此第 3 区合金塑性升高，可推断该区域断屑方式为拉伸断裂，表面呈现不规则卷曲形貌，又由于前两区域厚度很小，故蜂窝表面主要表现为拉伸断裂。

冰固持低温切削时，由于液氮作用于切削区，瞬间温度可降至  $-190\text{ }^\circ\text{C}$  左右，相对于无冰固持常温切削，切削点蜂窝强度增加，尤其屈服强度增大，而抗拉强度更增加了超过 20%，导致薄壁蜂窝脆性增强，如表 2 所示。因此，更多的蜂窝由加工时具有产生裂纹、裂纹扩展的拉伸断裂转变为脆性材料的剪切断裂，切削表面较无冰固持平整。

其次，蜂窝固持力类似于夹紧力，常规粘接固持的三方向固持力分别为 98, 98, 42 N<sup>[6]</sup>，且仅作用于粘接面上，而远离粘接面的加工面固持力非常小，甚至可以忽略，并远小于切削力，故切削时易出现切削不足现象；通过冰固持处理后冰固持力达到 287, 287, 245 N，且分布均匀，远大于切削力；此外无固持时薄壁件的蜂窝径向抗压强度非常低，甚至仅有几十 Pa，而经冰固持处理的钛薄壁蜂窝材料类似于树脂基芳纶增强纤维材料，由于纯冰在  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  以下时抗压强度保持在 6.5 MPa<sup>[7]</sup>，故蜂窝径向抗压强度被迅速提高。蜂窝固持力增大，抑制了加工时受力变形原因，同时冰固持力分布均匀，各切削区切削力波动较小，故蜂窝各区域加工均匀，且无变形。

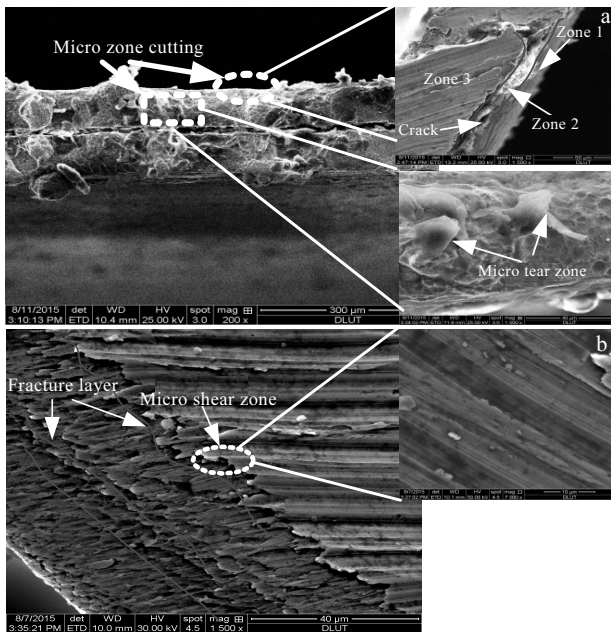


图 11 SEM 表面形貌

Fig.11 SEM surface microstructure: (a) without ice fixation and (b) with ice fixation

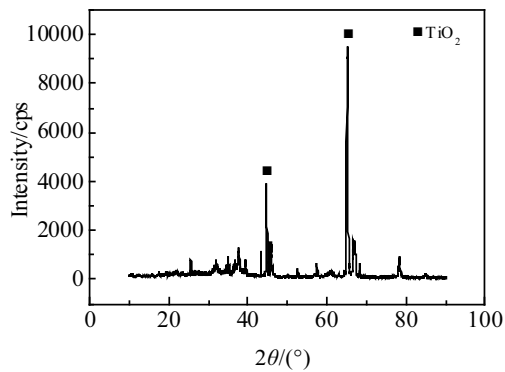


图 12 无冰固持表面相组成

Fig.12 Phases on the surface without ice fixation

表 2 TC4 不同温度力学性能

Table 2 Properties of TC4 at different temperature

Temperature/ ℃	Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa	Elastic modulus/ GPa	Shear strength/ GPa	Elongation/ %
20	890	960	107	56.7	12
-196	1420	1500	133	63.2	10

最后, 由于蜂窝切削点承受铣刀刀刃压力不足, 蜂窝未被有效切断现象, 以及蜂窝本身径向低刚度且在瞬间高温受力后合金出现自动避让和伸长的特性, 也将引起毛刺、卷曲缺陷。又由于冰固持后合金低温下强度增加, 以及在纯冰高硬度环境下, 冰包合金复合材料总体强度增加, 导致切削力大幅增大, 如图 9 所示, 相同切削参数下最大可增加接近 3 倍。切削力的提高也从很大程度上解决了蜂窝切削力不足的问题, 毛刺缺陷得到有效抑制。

### 3 结 论

1) 相比于传统固持加工方式, 经冰固持低温铣削蜂窝表面质量有很大提高, 切削深度对表面质量影响

较大, 冰固持铣削力较传统方式有较大提高, 最高可达 3 倍, 各参数影响顺序: 切深最大, 其次是主轴转速, 进给速度影响最小。

2) 冰固持低温铣削可有效提高蜂窝固持力, 实现了超低温切削, 并使切削断屑方式由强韧的拉伸断裂转变为脆硬的剪切断裂方式。

3) 冰固持提高了薄壁钛合金蜂窝面内强度, 抑制了加工缺陷, 该方法为面内径向等效强度小、低刚度薄壁钛合金蜂窝材料高效加工提供了新方法。

### 参考文献 References

- [1] Gao Wu(高 雾), Liu Qingyang(刘庆扬). *ACTA Armamentarii* (兵工学报)[J], 2013, 34 (11): 1437
- [2] Zhang Jie(张 杰), Zhang Qingwei(张青蔚), Jia Liwei(贾莉伟). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(7): 1158
- [3] Zhang Yancang(张延昌), Gu Jinlan(顾金兰). *ACTA Armamentarii*(兵工学报)[J], 2010, 31(S1): 279
- [4] Ciliberto A, Cavaccini G, Salvetti O. *Infrared Physics & Technology*[J], 2002, 43(3): 139
- [5] Master I G, Evans K E. *Compos Struct*[J], 1996, 35: 403
- [6] Jin Chengzhu(金成柱). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 56
- [7] Kennedy B. *Competently Cutting Composites*[J], 2008, 60(7): 45
- [8] Bilim A V, Farhan G. *AIAA 30URNA*[J], 2010, 48(2): 466
- [9] Gibson, Lorna J. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 68
- [10] Jeyakrishnan P R, Chockalingam K S K, Narayanasamy R. *Int J Adv Manuf Tech*[J], 2013, 65(5-8): 803
- [11] Yoshimitsu M. *R&D Kobe Steel Engineering Reports*[J], 1984, 34(3): 67
- [12] Sohn K S. *Scripta Metallurgica et Materialis*[J], 1995, 32(8): 1255

## Cryogenic Milling of TC4 Alloy Honeycomb in Ice Fixation

Wang Fengbiao, Hou Bo, Yuan Kai, Wang Yongqing

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Ti alloy honeycomb material with low stiffness and thin-wall is widely used in aerospace; however, its processing defects such as burr and collapse edge often occur, so the fixation and processing methods should be improved. In this paper, the material was treated by ice fixation and CNC milling machine was used for the cryogenic processing. The honeycomb properties and reasons of machining defects were analyzed. Low-temperature milling mechanism of ice fixation was established. Results show that compared to the traditional

processing way, the ice fixation milling surfaces improve greatly, and the processing defects are effectively suppressed. Moreover, the cutting depth has more significant influence on surface quality than spindle speed. The new method can improve the strength of honeycomb. The influence order of cutting parameters on the milling force is as follows: cutting depth is the largest, about 3 times improvement; the second is the spindle speed, while the feed speed has minimal impact. It is concluded that the ice fixation provides a new processing method for efficient processing of Ti alloy honeycomb material with small in-plane radial equivalent strength, low rigidity, and thin-wall.

**Key words:** Ti alloy honeycomb; defect; ice fixation; milling force; equivalent strength

---

Corresponding author: Wang Fengbiao, Ph. D., School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China, Tel: 0086-411-84708420, E-mail: wangfb@dlut.edu.cn