

# 减小化学铣切圆角工艺方法研究

沈爱华 高中辉

(南京晨光集团有限责任公司, 南京 210006)



**摘要:** 通过分析化学铣切圆角对减重的影响, 表明减小化铣圆角有利于化铣减重。将一个化铣深度分成二次化铣, 化铣到规定深度一半时, 对化铣网格的肋条顶部和侧面进行保护, 肋条侧面在逐步铣切作用下, 其侧面趋于垂直, 形成的化铣圆角只有原工艺的一半, 化铣圆角部分的重量也只有原工艺的 25%。采用新工艺方法后可大大减小化铣圆角, 同时也能提高肋条精度, 满足化铣减重要求。

**关键词:** 化铣; 圆角; 减重; 侧切率

## Research on Processing Method of Decreasing Chemical Milling Fillet

Shen Aihua Gao Zhonghui

(Nanjing Chengguang Group Co. Ltd, Nanjing 210006)

**Abstract:** Analyzing the influence of chemical milling fillet on weight loss indicated that lessening chemical milling fillet is conducive to weight loss. Separating one chemical milling depth course into twice chemical milling process was studied, that when half of designated chemical milling depth was finished, protecting the top and side of chemical milling rib, the side of rib tended to be vertical after another chemical milling process, the new chemical milling fillet was only a half than the usual, also weigh of chemical milling fillet is almost 25% of the previous. New processing method could deeply decrease chemical milling fillet, and is benefit to improve accuracy of chemical milling rib, then satisfies more weight loss of chemical milling process.

**Key words:** chemical milling; fillet; reducing weight; undercut ratio

### 1 引言

化学铣切作为一种特种加工工艺, 在航天航空领域有着一定的应用, 薄壁结构件生产中往往采用化铣工艺以达到保证强度, 减轻重量的目的。由于化铣工艺的特殊性, 在化铣网格形成的同时, 网格底部和肋条侧面交界处自然形成一个圆角, 这部分圆角增加了零件的重量。随着产品精度要求的提高, 对零件减重要求更严。通过分析和开展化铣工艺试验, 找到减小化铣圆角的新工艺方法, 达到多减轻零件重量的目的。

### 2 技术难度分析

#### 2.1 技术标准对化铣圆角的要求

化学铣切是宇航工业专用加工工艺, 随着电子和制造技术的飞速发展, 数控加工有逐步替代传统化铣工艺的趋势, 但化铣工艺也有优势, 如设备简单、成本低、加工中零件不易变形等, 和数控加工相比最大不足是肋条尺寸精度比较差, 并存在化铣圆角, 从而影响减重效果。因此, 一些尺寸小精度高的零件已采用数控机加来代替化铣工艺, 但大型结构件采用化学铣切工艺比较多。

化铣技术标准中对化铣圆角不作规定要求, 与化铣深度相当就可以。如 QJ2911—97《铝合金化学铣切工艺规范》, 化学铣切圆角是指化铣在厚度转变处自然形成过渡圆角  $R$ , 圆角  $R$  值近似于铣切深度。国外

作者简介: 沈爱华 (1967-), 高工, 金属腐蚀与防护专业; 研究方向: 表面处理研究。

收稿日期: 2014-01-09

标准中对化铣圆角也有说明,如美国军标说明书 MIL-C-81769《金属化铣生产说明书》中,化铣中倒圆不是特别加工的,而是在化铣中自然形成的。在材料、热处理状态确定的前提下,化铣圆角大小与化铣深度有关,化铣深度浅化铣圆角  $R$  就相对小。

在现有工艺条件下,用  $R$  规测量了零件化铣网格的圆角,其化铣圆角半径  $R$  范围为化铣深度  $H \sim H+1$ ,与标准规定基本相当。

## 2.2 化铣圆角与减重关系

化铣网格的理想情况是在化铣网格底部形成直角型网格,但实际网格为自然形成的化铣圆角,其半径近似等于化铣深度,化铣圆角和肋条侧面、网格底部基本相切,化铣网格示意图见图 1,图 2 为实际化铣网格。



图 1 化铣网格示意图



图 2 实际化铣网格

与网格底部为  $90^\circ$  直角相比,化铣圆角约占网格的比例为:

$$\left(\frac{H^2}{4} - \frac{H^2}{4} \times \frac{3.1416}{4}\right) \times \frac{4}{L \times H} = 0.8584 \frac{H}{L}$$

式中:  $H$ ——化铣深度;  $L$ ——化铣网格宽度。如网格不是正方形则需分别计算。

从公式看出,化铣网格越小,化铣深度越深,化铣圆角所占的比例越大。因此小网格、深铣切量对化铣减重不利。以  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、深度  $10\text{mm}$  网格为例,不考虑尺寸公差,化铣圆角占化铣网格比例理论值为  $8.584\%$ 。

## 2.3 减小化铣圆角工艺方法

根据上述分析,化铣圆角大小和化铣深度有关,如化铣深度减小,化铣圆角自然变小。因此考虑将一个化铣深度分成二次化铣,化铣到规定深度一半左右时对肋条顶部和侧面进行保护,二次涂胶刻型后化铣到规定深度。这样在网格底部形成新的化铣圆角,由

于第二次化铣深度只有规定深度的一半,最后形成的化铣圆角也只有原工艺方法的一半。网格肋条顶部和上半部进行了保护,因此化铣肋条尺寸可以基本保持不变,且由于化铣对肋条侧面的逐步铣切作用,使原化铣网格底部的圆角部分变小,肋条侧面趋于垂直。

按上述工艺方法,保持原有的化铣网格要求不变,第二次化铣形成的化铣深度为规定深度的一半,那么化铣圆角所占化铣网格的比例为:

$$\left(\frac{H^2}{4} - \frac{H^2}{4} \times \frac{3.1416}{4}\right) \times \frac{4}{L \times H} = 0.2146 \frac{H}{L}$$

按上述工艺方法,化铣圆角占化铣网格比例为  $2.146\%$ 。理论上只有原化铣圆角重量的  $25\%$ ,减少量达  $75\%$ 。理论状态二次化铣后形成的网格示意图见图 3。



图 3 采用二次化铣工艺网格示意图

## 3 试验

### 3.1 试验方法

通过上述分析,将一个化铣深度  $H$  分成二次化铣,第一次化铣深度为  $H1$ ,第二次化铣深度为  $H2$ ,理论上可以做到减小化铣圆角从而达到多减重的目的。工艺流程为:涂胶前清洗出光→涂胶→硫化→刻型→化铣→化铣网格揭去保护胶→清洗出光→第二次涂胶→第二次硫化→第二次刻型→第二次化铣。

化铣过程中网格的底部和肋条侧面同时受到腐蚀,在第二次化铣前对第一次化铣形成的化铣网格肋条侧面进行保护。试验要点确定在第二次化铣的保护范围  $W$ ,以保证化铣到规定深度时肋条尺寸不变。因此实施的难度在于二次化铣时保护范围以及第一次、第二次化铣深度的分配,通过工艺试验找出相互之间的关系,在网格化铣到规定深度时,在肋条侧面第一和第二次化铣形成的交界面正好处于肋条的顶部边缘,达到比较理想的化铣效果。在试验中先固定一个因素,考察另一个因素变化对最终形成化铣的影响,通过多组试验后,找到规律得出结论。图 4 为第二次化铣保护示意图。

$H1/H2$  值大于  $1.05$  时,在肋条的侧面上部形成交界面,并形成一个内  $R$ ,肋条宽度不变,化铣网格形状见图 5。比值越大,交界面离肋条顶部距离越大。

由于第二次化铣深度不到规定深度的一半，其形成的化铣圆角是最小的。

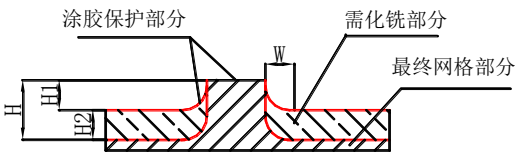


图 4 第二次化铣网格保护示意图



图 5  $H1/H2$  值为 1.1 实际化铣网格

3.2 不同  $H2$  值化铣网格结果

试验中取化铣深度  $H=10\text{mm}$ ，肋条侧面的保护宽度  $W=5\text{mm}$ ，在  $H1$  相同  $H2$  值不同时化铣网格结果见表 1。

表 1 不同  $H2$  值化铣网格结果

| 序号 | $H1$<br>/mm | $H2$<br>/mm | 化铣圆角<br>$R/\text{mm}$ | 肋条侧面情况                         | 肋条宽度<br>变化    |
|----|-------------|-------------|-----------------------|--------------------------------|---------------|
| 1  | 5           | 4           | 4                     | 有明显交界面，处于肋条中上部                 | 不变            |
| 2  | 5           | 4.5         | 4.5                   | 有明显交界面，处于肋条中上部                 | 不变            |
| 3  | 5           | 4.7         | 5                     | 交界面靠近肋条顶部，不明显                  | 不变            |
| 4  | 5           | 5           | 5                     | 交界面处于肋条顶部，无交界面                 | 不变            |
| 5  | 5           | 5.2         | 5                     | 交界面处于肋条顶部，内 $R$ 不明显            | 基本不变          |
| 6  | 5           | 5.5         | 5.5                   | 肋条顶部形成内 $R$ ， $R=0.5\text{mm}$ | 变小<br>1mm     |
| 7  | 5           | 6           | 6                     | 肋条顶部形成内 $R$ ， $R=1.5\text{mm}$ | 变小<br>1.5~2mm |

$H1/H2$  值在 0.95~1.05 之间，网格形状比较接近于理想状态的化铣网格，化铣圆角约为整体化铣深度的一半，化铣网格形状接近于图 3，图 6 为实际化铣网格。



图 6  $H1/H2$  值为 1 实际化铣网格

$H1/H2$  值小于 0.95，交界面在肋条顶部，肋条宽度也会减小。比值越小，减小的宽度越多，底部的化铣圆角也比较大，不是希望的情况。

因此，肋条外观接近于一次化铣形成的肋条， $H1/H2$  值取 0.95~1.05 比较合适。如考虑需要进一步减小化铣圆角不考虑肋条外观， $H1/H2$  值 1.05~1.1，形成的肋条类似于工字钢，对强度有一定好处。

3.3 不同  $W$  值对化铣网格的影响

试验中化铣深度  $H=10\text{mm}$ ， $H1=H2=5\text{mm}$ ，比较  $W$  值不同化铣网格结果，肋条侧面的保护宽度  $W$  对网格形状的影响是不同的。第一次和第二次化铣深度  $H1$ 、 $H2$  值不变，向网格深度方向腐蚀过程中，肋条的侧面同时也在腐蚀，其腐蚀量称为化铣侧切量。肋条侧面的保护宽度  $W$  应与第二次化铣深度侧切量一致，这样形成的交界面在肋条的顶部，化铣出来的网格接近于理想化铣网格。

如果肋条侧面的保护宽度  $W$  值小于第二次化铣侧切量，最后形成的交界面虽然也在肋条的顶部，但会减少肋条尺寸。

如果肋条侧面的保护宽度  $W$  值大于第二次化铣侧切量，最后形成的交界面在肋条的顶部以下，如图 5。不同  $W$  值化铣网格结果见表 2。

表 2 不同  $W$  值化铣网格结果

| 序号 | $W/\text{mm}$ | 网格圆角<br>$R/\text{mm}$ | 肋条侧面情况                       | 肋条宽度<br>变化  |
|----|---------------|-----------------------|------------------------------|-------------|
| 1  | 3             | 5                     | 肋条顶部形成内 $R$ ， $R=2\text{mm}$ | 变小<br>3~4mm |
| 2  | 4             | 5                     | 肋条底部形成内 $R$ ， $R=1\text{mm}$ | 变小<br>1~2mm |
| 3  | 5             | 5                     | 交界面处于肋条顶部，无交界面               | 基本无变化       |
| 4  | 6             | 5                     | 交界面接近于肋条顶部，较明显               | 不变          |
| 5  | 7             | 5                     | 交界面处于肋条中上部，有明显交界面            | 不变          |

3.4 二次化铣工艺对肋条尺寸精度的影响

在上述工艺方法中，为保证化铣尺寸，肋条保护宽度  $W$  是根据侧切率和第二次化铣深度  $H2$  确定的，这样第二次化铣后不改变肋条尺寸，对肋条尺寸无影响。最终交验的肋条尺寸即为第一次化铣时的肋条尺寸，第一次化铣深度只有规定化铣深度的一半，从理论上化铣深度越浅肋条的精度越高。分别对相同化铣深度的肋条尺寸进行了统计分析，共化铣 10 组试块，每组试块取 10 个轴向肋条和环向肋条尺寸进行统计，统计结果见表 3。

表3 不同化铣工艺肋条尺寸统计结果

| 统计项目    | 一次化铣工艺 |       | 二次化铣工艺 |       |
|---------|--------|-------|--------|-------|
|         | 轴向     | 环向    | 轴向     | 环向    |
| 极差/mm   | 0.63   | 0.82  | 0.35   | 0.51  |
| 标准偏差/mm | 0.195  | 0.325 | 0.123  | 0.211 |

从表中统计计算看出,采用二次化铣工艺肋条极差和标准偏差均小于一次化铣,说明采用二次化铣工艺不仅可以减小化铣圆角,还能提高肋条精度。

#### 4 产品化铈工艺措施

以上试验数据和结果均为试块化铣结果，在产品化铣中还需要结合零件实际化铣情况调整相应的工艺和方法，以达到产品化铣要求。

#### 4.1 涂胶方法

目前试验涂胶均采用手工刷涂,二次化铣前需要进行二次涂胶,由于化铣网格的存在,手工涂胶难度大且质量差。由于化铣网格多且凹凸不平,手工涂胶易出现厚度不均匀、起泡、流痕等问题,因此在零件生产中采用喷涂工艺来解决这个问题。

## 4.2 刻型方法

目前试验刻型操作方法比较简单,第一次刻型采用试块化铣样板,第一次化铣完成后根据计算的肋条保护宽度进行第二次刻型,没有使用专用刻型工装。在产品上需采用化铣样板和专用工装配合保

证, 每个不同尺寸的网格刻型工装需要单独设计和定位, 才能达到刻型要求, 保证二次化铣后无明显的交接面。

采用上述措施后，可以生产合格的产品。二次化铣工艺的实际网格见图 6，可以看到采用二次化铣工艺后的化铣网格圆角明显小于一次化铣网格，肋条外观也好于一次化铣工艺。不足就是刻型效率相对较低，且由于二次涂胶二次刻型，生产周期增加 20%。

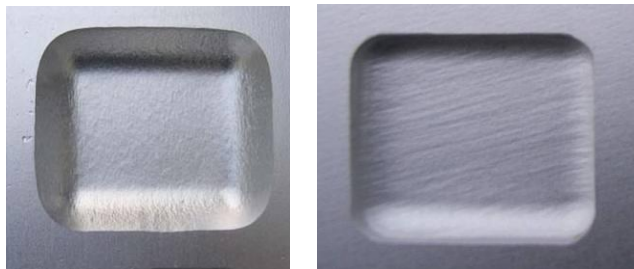


图 6 二种化铣工艺实际化铣网格

## 5 结束语

a. 采用二次化铣的工艺方法可以减小化铣圆角，由原来与化铣深度相当减小为化铣深度的一半，同时也提高了肋条的化铣精度。

b. 采用二次化铣工艺方法, 化铣圆角部分的重量只有原工艺的 25%, 但会增加生产周期。

[illegible]

图 5 拉伸试验

## 4 结束语

a. 选区激光熔化成形制备 TC4 钛合金具有良好的电子束焊接性, 焊缝形貌与板材焊接类似。

b. 焊缝区的显微硬度硬度要低于母材及热影响区的显微硬度, 接头的抗拉强度为 1278MPa, 达到母材 90%以上。

## 参考文献

- 1 王向明, 刘文斌, 等. 飞机钛合金结构设计与应用. 北京: 国防工业出版社, 2010
- 2 Qiu C N, Adkins N J E, Attallah M M. Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V. Materials Science & Engineering A. 2013, 578: 230~239
- 3 Krauss H, Zaeh M F. Investigations on manufacturability and process reliability of selective laser melting. Physics Procedia. 2013, 41: 808~815
- 4 Gua Dongdong, Hagedorn Y C N, Meiners W, et al. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium. Acta Materialia, 2012, 60: 3849~3860
- 5 张庆云, 李晋炜, 陆业航. TA15 钛合金电子束焊平行焊缝形貌及显微组织研究. 航空制造技术, 2011, 16: 105~106
- 6 芦伟, 史耀武, 雷永平, 等. 厚壁 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的微观组织特征. 稀有金属材料与工程. 2013, 42(1): 54~57



