

# 奥氏体不锈钢薄板的钻孔加工工艺改进

张胜, 袁超

中车株洲电力机车有限公司电气设备分公司 湖南株洲 412000

**摘要:** 通过对基板的技术要求进行分析, 介绍了钻孔铣圆的工艺优化过程, 制定了一套行之有效的钻头几何角度切削及修磨方法, 解决了薄壁不锈钢数控钻孔的加工难题, 通过切削液的重新配比, 保证了加工质量, 提高了生产效率。

**关键词:** 奥氏体; 不锈钢薄板; 钻孔加工; 钻头修磨; 切削用量

## 1 序言

随着我国铁路现代化的快速发展, 机车重要零部件——真空断路器的质量成为了保证机车稳定性、可靠性和安全性的重要环节。由基板为基础组焊的底板, 对真空断路器起着承上启下的装配作用, 因其安装在机车车顶上, 故对基板的平面度、各孔位置度有着关键的定位作用。受大自然复杂的环境因素和高速行驶下的运动状态影响, 需要足够的强度和刚性、足够长的机械寿命以及有力对抗风、霜、雨、雪等自然条件下的环境稳定性<sup>[1]</sup>。BVAC-N99真空断路器为单级交流真空断路器, 主要用于主电路的断开和接通, 同时还可用于过载保护和短路保护。基板的加工质量将直接影响真空断路器的正常工作, 从而影响整台机车的正常运行。

基板是BVAC-N99系列真空断路器的主要部件, 该产品安装在电力机车顶部, 由于需要满足电力牵引要求和严酷的工作条件, 因此选择厚度为3mm的1Cr18Ni9Ti冷轧钢板, 该材料属于奥氏体不锈钢, 具有环境稳定性好、寿命长等特点。鉴于薄壁不锈钢为难加工材质, 采用数控铣削方式大批量生产存在很大困难。

## 2 不锈钢钻孔加工的难点

奥氏体不锈钢含有奥氏体组织1Cr18Ni9Ti, 具有高韧性和高塑性, 为难加工材质。用于加工此种材料的钻头磨损剧烈, 熔焊烧蚀如图1所示, 工件熔



图1 钻头熔焊烧蚀

焊成黑色, 加工过程中发现如下难点。

- 1) 不锈钢加工硬化, 产生高温, 刀具易磨损烧蚀。
- 2) 不锈钢塑性大, 切屑与刀尖发生粘结, 连续加工困难, 易造成崩刃。
- 3) 奥氏体导热性差, 切削区域局部温度高, 切屑与刀具易产生粘结, 形成积屑瘤, 加快刀具磨损, 造成钻头工件烧蚀。
- 4) 薄壁件钻孔加工时, 钻尖穿过工件不能起到定心作用, 主切削刃挤压工件, 导致孔的圆度和位置度超差。

## 3 改进后解决方案

### 3.1 基板的加工难点

1) 薄壁不锈钢钻孔时, 钻头定心不稳, 钻尖已穿过3mm的薄板层, 钻头的两侧主切削刃还在切削运动中, 普通钻头钻尖穿过薄板如图2所示, 圆周 $4 \times \phi 14\text{mm}$ 的孔位置精度难以保证。

2) 不锈钢材质为高耐磨材质, 采用低转速、低

进给量的方式加工，加工工艺系统刚性不足，普通钻头装夹太长、定心不稳，易造成 $\phi 8^{+0.2}_{-0.2}$ mm钻头折断，位置尺寸难以保证<sup>[2]</sup>。

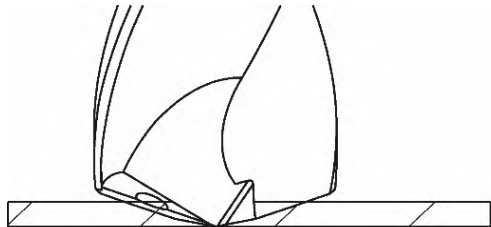


图2 普通钻头钻尖穿过薄板

3) 钻头太过锋利加工时造成剧烈磨损，易造成崩刃，使切削不顺畅。

4) 切削时切向应力、塑性变形以及切削力大，导热性差，造成切削温度升高，且高温往往集中在刀具刃口附近的狭长区域内，从而加快了刀具的磨损。

5) 加工硬化严重，奥氏体不锈钢为奥氏体组织，切削时加工硬化倾向大，通常是普通碳素钢的数倍，刀具在加工硬化区域内切削，会缩短刀具寿命。

6) 容易粘刀，奥氏体不锈钢在加工时有着切屑强韧、温度高的特性，当强韧的切屑流经至前刀面时，将产生粘结、熔焊等情况，从而影响零件的表面粗糙度<sup>[3]</sup>。钻尖烧蚀导致切屑圆中心成黄色，如图3所示。



图3 钻尖烧蚀导致切屑圆中心成黄色

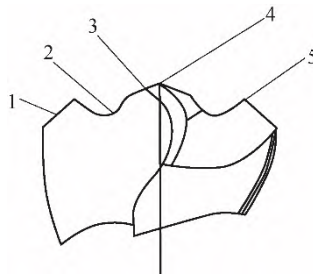
7) 钻头磨损加快。不锈钢材质含高熔点元素，塑性大、切削温度高，使切屑更容易发生粘刀，切屑缠绕在钻头上会使钻头磨损加快，若频繁更换钻头将影响生产效率，增加刀具的使用成本。切屑粘刀如图4所示。

### 3.2 $\phi 8$ mm三尖六刃薄壁钻结构

$\phi 8$ mm三尖六刃薄壁钻截面如图5所示，实物如图6所示。



图4 切屑粘刀



1—两外侧倒棱刃 2—两圆弧刃 3—两内直刃  
4—主钻尖 5—两边副钻尖

图5  $\phi 8$ mm三尖六刃薄壁钻截面

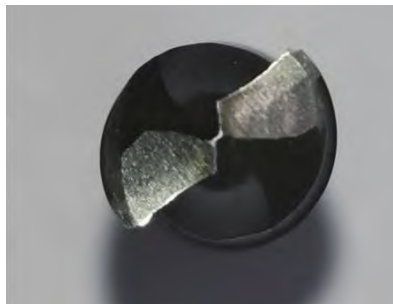


图6  $\phi 8$ mm三尖六刃薄壁钻实物

### 3.3 $\phi 8$ mm薄壁钻与普通钻头比较

1) 钻头不宜太长，加工奥氏体不锈钢的转速不宜太高， $\phi 8$ mm钻头传递刚性不足，刀柄夹持越长跳动越大，定心不稳，容易引偏，钻孔过程中极易折断。

2) 普通钻头加工薄板时，钻头的磨损形式主要为后刀面磨损，钻尖穿透工件，两主切削刃定心不稳，受力不均匀，挤压工件导致不锈钢发生塑性变形，形成挤压钻痕，造成椭圆度不达标的不规则变形孔。

3) 普通钻头钻孔过程中产生切削热，高速钢钻

头磨损的主要原因是相变磨损。不锈钢材料的散热性差，切削刃在钻尖易形成积热高温区域，形成积屑瘤，熔焊粘接刃口，最后和不锈钢熔合在一起，使钻头烧蚀<sup>[4]</sup>。

4) 普通钻头两边的刃倾角因承受的扭矩和切削力最大且钻头后角小，导致钻尖强度不易发生崩刃现象。

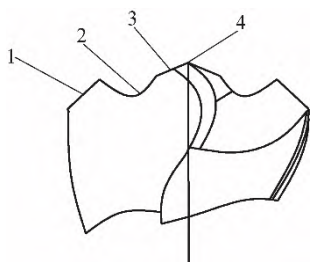
## 4 修磨三尖六刃薄壁钻头

### 4.1 $\phi 8\text{mm}$ 普通钻头的几何角度

$\phi 8\text{mm}$ 普通钻头实物如图7所示，主要几何角度如图8所示。



图7  $\phi 8\text{mm}$ 普通钻头



1—两边对称倒棱刃 2—两边对称圆弧刃 3—两边对称内直刃  
4—钻尖和钻尖顶角

图8 主要几何角度

### 4.2 不锈钢材质修磨薄壁钻的加工优势

- 1) 减小切削区域的切削面，从而减小切削力。
- 2) 切屑排出方便，带走大量切削热，防止烧刀。
- 3) 自动定心，切削力对称均匀，保证了定位孔

的位置度，保证了产品质量。

4) 选择合适的切削用量，适合大批量生产，修磨一次可加工1000件以上。

5) 主轴转速 $s$ 在350~450r/min时最合适，进给量 $f$ 在45~55 mm/r时最合适。通过计算可知每转进给量 $f_{z\max}=f_{\min}/s_{\min}=45/350=0.128\text{mm/r}$ ， $f_{z\min}=f_{\max}/s_{\max}=55/450=0.122\text{mm/r}$ ，钻孔时的每转进给量 $0.122\text{mm/r}<f_z<0.128\text{mm/r}$ 时，刀具寿命最佳、效率最好。

## 5 钻头修磨后加工效果

### 5.1 工艺方案

1) 采用三尖六刃薄壁钻对3mm薄板的 $\phi 8\text{mm}$ 孔进行加工。

薄壁钻数控程序如下。

S450 M3

G81 Z-4.2 R2 F50

普通钻数控程序如下。

S450 M3

G81 Z-7.5 R2 F45 (钻尖出头)

薄壁钻转速450r/min，进给量50mm/min；普通钻转速450r/min，进给量45mm/min。薄壁钻的钻孔深度比普通钻头的钻孔深度小3.3mm，加工效率提高近2倍，薄壁钻尖高度相对扁平，普通钻头钻尖深度较大。

2) 切削液有利于降低切削热、防止粘刀，起到冷却和润滑作用。依据这两种主要作用，乳化液油水配比为1:5。

3) 钻头的钻尖锋利，自动定心，无需引孔加工。使用圆弧过渡有效减少了切屑塑性变形形成圆锥形，粘住钻尖。

4) 钻尖有效分屑，使切屑分开，切屑宽度变窄变小后，降低切屑韧性，方便排屑，防止切屑缠绕刀具，利于散热。

5) 钻头成功修磨后，使用寿命大大提高，适合批量加工。当钻头磨损时，通过观察切屑形状和颜色辨别钻头的磨损情况，及时修磨钻头。

### 5.2 工艺改进

通过钻头磨损位置的轮廓和磨损角度，分析提高钻头寿命的修磨几何形状，不断改进创新，逐步完善修磨钻头的各个角度，钻头重新修磨后，不需

要钻引孔，可直接钻孔加工。检测发现，该方法有效保证了孔的大小、圆度以及位置精度，表面粗糙度也有效提高，符合图样要求。该钻头的优点如下所述。

- 1) 钻尖锋利，有自动定心的作用。
- 2) 钻尖排屑功能好，可降低大部分切削热，提高钻头使用寿命。
- 3) 钻尖刚性好，能有效对抗工件的塑性变形。
- 4) 钻尖两边倒棱刃，保证孔壁表面粗糙度，提高耐磨性，方便排屑。

5) 采用低转速、低进给量的方式，攻克了奥氏体薄壁不锈钢钻孔的难题，实现大批量加工的同时提高了产品质量和加工效率，破解加工难题，取得了显著成效。

### 5.3 优化效果

节约原材料，合格率从原来的95%提高到99.8%， $\phi 8\text{mm}$ 群钻修磨大大提高了加工效率，一次修磨实现加工1000个孔以上。通过 $\phi 8\text{mm}$ 钻头的重

新修磨和工艺方法改进的实施，前期存在的钻孔圆度不达标、孔位变形以及位置精度超差的现象得以明显改善，效果显著。经过对工艺改善后的加工产品抽样检测，发现最难控制的2个 $\phi 8\text{mm}$ 定位孔偏差由原来的0.2mm缩小为0.1mm。

## 6 钻头的修磨

### 6.1 $\phi 8\text{mm}$ 钻头修磨的形状及角度

$\phi 8\text{mm}$ 孔的基本尺寸见表1。

表1  $\phi 8\text{mm}$ 孔的基本尺寸 (单位: mm)

| 序号 | 基本尺寸          | 实测值        | 位置度 | 圆度          |
|----|---------------|------------|-----|-------------|
| 1  | $\phi 8$      | $\phi 8.1$ | 0.1 | $\phi 0.02$ |
| 2  | $100 \pm 0.2$ | 100.1      | 0.1 | —           |
| 3  | $160 \pm 0.2$ | 160.1      | 0.1 | —           |

真空断路器中的主要零部件基板如图9所示，该基板用于3mm厚奥氏体不锈钢薄板钻削 $\phi 8\text{mm}$ 工艺定位孔的加工。

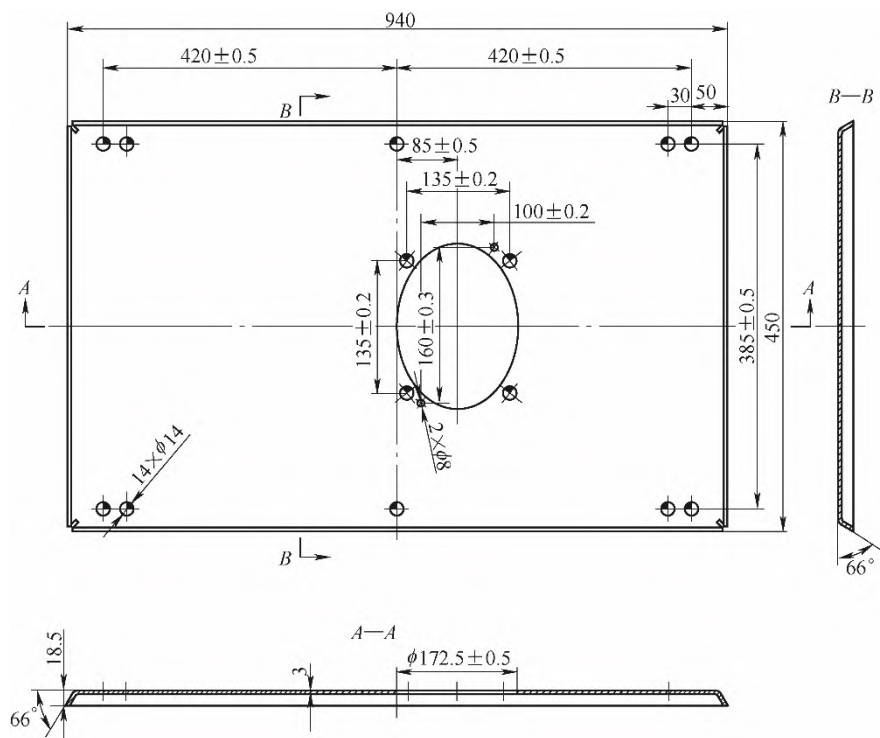


图9 真空断路器中的主要零部件基板

钻头的实际加工示意如图10所示，具体步骤如下。

- (1) 修磨横刃 将钻尖修磨出新的内直刃，缩短横刃长度，增大横刃前角，同时加大钻尖处的容屑空间，保持钻尖强度的同时降低切削进给力，对

修磨的砂轮圆角无严格要求。 $\phi 8\text{mm}$ 的刃尖长度为0.15~0.25mm，内刃斜角为 $60^\circ$ ，横刃斜角 $0^\circ$ 。

- (2) 修磨主切削刃 利用普通薄壁钻钻磨出内凹的圆弧刃，再利用凹槽的圆弧深度高出薄壁件的特点，使外刃与钻心的圆环套料。不锈钢材质具备

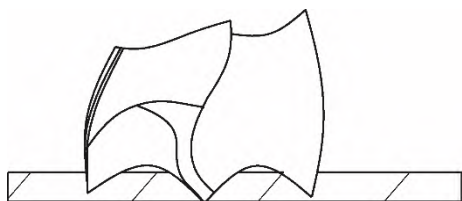


图10 钻头的实际加工示意

高韧性、断屑难的特点，套料的薄片易产生塑性变形，形成薄片卡在内凹圆弧内不易脱落，再钻下一个孔时，因为由切削刃挤压造成的引偏容易折断钻头，所以在修磨钻头时，应在主切削刃靠刃带转角处增加 $45^\circ$ 倒棱边刃，其作用为：①方便排屑和断屑。②使加工的孔壁表面质量提升。③倒棱边形成两对称峰角，有利于钻头定心，可提高几何精度，降低表面粗糙度。

(3) 钻尖修磨 将钻尖磨出新的内直刃，既能缩短横刃的长度，又能增大前角，同时加大钻尖处的容屑空间。横刃斜角为 $0^\circ$ 时，钻尖横刃与两边倒棱尖角形成直线，切削力降低，使钻尖更锋利。钻尖内刃斜角为 $60^\circ$ 时，刃口强度增加，适用于加工韧性强度高的不锈钢材质。

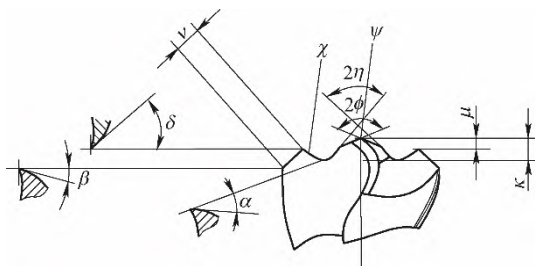
(4) 修磨圆弧刃 圆弧凹槽平滑过渡到两边刃带，方便排屑，使用砂轮的边缘来修磨 $R2.5\text{mm}$ 的圆弧面。再修磨两边刃带倒棱。加工韧性大的不锈钢时，首先要考虑增加倒棱刃的强度，防止崩刃现象发生，再适当减小后角，使钻头变得锋利，倒棱刃和圆弧刃钻孔时方便转出带状切屑，有利于排屑和散热。

(5) 修磨刃带 修磨刃带 $45^\circ$ 倒棱刃，使倒棱刃更锋利，以减少刃带与孔壁的摩擦，来提高孔的几何精度，降低表面粗糙度。使塑性变形的圆环薄片切屑不再镶嵌在钻尖圆弧刃内，切屑脱落不再粘刀。倒棱后角为 $7^\circ$ ，倒棱宽度为 $0.4\text{mm}$ 。

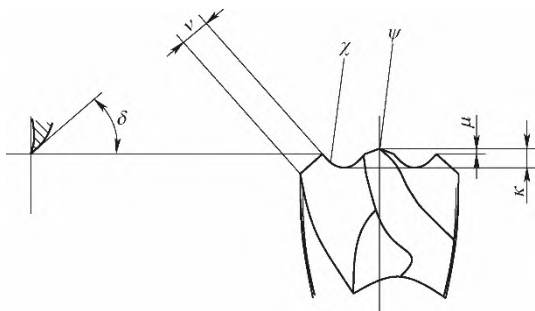
## 6.2 钻头具体修磨方式及几何角度

三尖六刃薄壁钻的几何角度如图11所示。

包括横刃以及关于钻尖轴线对称设置且从径向外侧向内依次相连的倒棱刃、内凹圆弧刃和内直刃，两个内直刃分别与横刃的两端连接。所述倒棱刃的倒棱刃角度 $\delta$ 为 $40^\circ \sim 45^\circ$ ；钻尖到内凹圆弧刃底部的高度 $\kappa$ 为 $1.3 \sim 1.5\text{mm}$ ；钻尖到倒棱刃尖的高度 $\mu$ 为 $0.8 \sim 1\text{mm}$ ；横刃斜角 $\psi$ 为 $0^\circ$ ；内直刃斜角 $\tau$ 为



a) 钻头正面侧截面



b) 钻头后面侧截面

图11 三尖六刃薄壁钻的几何角度

$60^\circ \sim 65^\circ$ ；钻头的内刃顶角 $2\phi$ 为 $130^\circ \sim 132^\circ$ ；外刃顶角 $2\eta$ 为 $123^\circ \sim 125^\circ$ ；钻头横刃倾角 $\gamma$ 为 $89^\circ \sim 90^\circ$ ；横刃长 $\omega$ 为 $0.15 \sim 0.2\text{mm}$ ；圆弧刃后角 $\alpha$ 为 $11^\circ \sim 12^\circ$ ，圆弧刃半径 $\chi$ 为 $2 \sim 3\text{mm}$ ；倒棱刃后角 $\beta$ 为 $6^\circ \sim 7^\circ$ ；倒棱刃宽度 $\nu$ 为 $0.3 \sim 0.45\text{mm}$ 。

使用钻头来钻薄壁基板孔的方法，钻头的工作状态设置主轴转速为 $350 \sim 450\text{r/min}$ ，钻孔时的进给量为 $0.122 \sim 0.128\text{mm/r}$ ，钻头在该工作状态下通过单次操作的方法直接在基板上钻孔。

不同直径的薄壁钻头，加工不同材料的工件时，修磨角度、形状和切削用量都随之变化，本文用 $\phi 8\text{mm}$ 钻头的修磨角度和切削刃形状为奥氏体不锈钢的钻孔加工提供了参考和借鉴。

## 7 结束语

通过钻头磨损位置的轮廓和磨损角度，分析了提高钻头寿命的几何形状修磨方法，在实际加工中不断改进创新，逐步完善修磨钻头的各个角度，当钻头重新修磨后，不需要再次钻引孔，可直接采用该钻头加工，有效保证了孔的大小、圆度、位置度及表面粗糙度。配合 $1:5$ 的乳化切削液，采用合适的切削用量，实现了一次修磨可加工近1000个孔，攻克了奥氏体薄壁不锈钢钻孔的难题，实现了大批

(下转第57页)

保证尺寸精度。

工艺方案如下所述。

- 1) 钻 $\phi 10\text{mm}$ 孔, 深度 $50\text{mm}$ 。
  - 2) 镗孔至 $\phi 12^{+0.03}_{-0.01}\text{mm}$ , 长度 $50\text{mm}$ 。
  - 3) 钻孔至 $\phi 12\text{mm}$ , 推荐参数: 转速 $n=70\text{r/min}$ , 进给量 $f=0.09\sim 0.11\text{mm/r}$ , 进给速度 $v_f=420\sim 560\text{mm/min}$ 。
  - 4) 镗孔至 $\phi 15.67^{+0.02}_0\text{mm}$ , 长度 $50\text{mm}$ 。
  - 5) 扩孔至 $\phi 15.67\text{mm}$ , 推荐参数: 转速 $n=70\text{r/min}$ , 进给量 $f=0.09\sim 0.11\text{mm/r}$ 。
  - 6) 镗孔至 $(\phi 15.77+0.02)\text{mm}$ , 长度 $50\text{mm}$ 。
  - 7) 扩孔至 $\phi 15.77\text{mm}$ , 推荐参数: 转速 $n=70\text{r/min}$ , 进给量 $f=0.09\sim 0.11\text{mm/r}$ 。
  - 8) 镗孔至 $\phi 15.89^{+0.02}_0\text{mm}$ , 长度 $80\text{mm}$ 。
  - 9) 钳工配合手工铰刀, 配上润滑油。由于铰刀的总刃长为 $80\text{mm}$ , 长度较长, 需打磨去除后端 $30\text{mm}$ 刃长, 径向深度选择 $2\text{mm}$ , 圆滑过渡。
  - 10) 手工铰孔时采用 $1.5^\circ$ 切削锥铰刀, 再用 $120^\circ$ 倒角铰刀进行孔底末端铰削, 将铰刀刃长改短至 $50\text{mm}$ 长, 每 $1\text{mm}$ 一进、每半圈一进。
  - 11) 手工铰孔时不得反转, 退出时要注意尽量不倒屑, 减小进给次数, 争取一次铰孔到位, 不允许中途退刀再次铰削。如遇卡顿, 应反转少许后再次正转。
  - 12) 初始孔的椭圆度约 $0.1\text{mm}$ , 最大处达到了 $15.94\text{mm}$ , 铰孔过程中较费劲, 在孔内还会阻碍刀具加工, 减小铰刀刃长、加大顶紧力后方可解决。
  - 13) 利用机床顶尖配合手工铰孔, 随着顶尖 $1\text{mm}$ 的步进进给铰削。必须跟紧, 否则容易发生偏斜。
  - 14) 手工铰削时先采用 $1.5^\circ$ 切削锥铰刀切削, 再采用 $120^\circ$ 倒角铰刀进行孔底末端铰削。
  - 15) 采用 $\phi 5.8\text{mm}$ 专用钻头钻孔, 钻头参数为: 转速 $n=250\text{r/min}$ , 进给量 $f=0.024\text{mm/r}$ 。
  - 16)  $\phi 6\text{mm}$ 铰刀手工铰孔。在加工至 $\phi 8\text{mm}$ 插接孔时, 进给量降低至 $0.012\sim 0.02\text{mm/r}$ , 转速不变。
- 根据试验件及工件的最终尺寸校验, 该孔表面粗糙度值符合 $Ra\leq 3.2\mu\text{m}$ 要求, 孔的直径为 $15.91\text{mm}$ , 符合图样要求。

## 5 结束语

根据以上分析及实际加工, 可以得出以下结论。

- 1) 在异形接管加工中, 镗削用深孔钻及普通钻头均可加工, 但传统钻 $\rightarrow$ 扩 $\rightarrow$ 铰工艺方法更可靠。
- 2)  $120^\circ$ 双刃扩孔钻、 $\phi 5.8\text{mm}$ 特长钻头和 $\phi 6\text{mm}$ 特长铰刀等成形刀具更适合加工阶梯孔。
- 3) 钻头过长时, 可以将主切削刃上切割 $1\text{mm}$ 深口, 以此降低刀具的切削抗力, 提高断屑效率。
- 4) 在加工过程中扩孔钻参数为: 切削速度 $v_c=3\sim 5\text{m/min}$ , 进给量 $f=0.09\sim 0.11\text{mm/r}$ 。
- 5) 利用铰孔方式, 可以控制尺寸精度在 $0.02\sim 0.03\text{mm}$ 。

### 参考文献:

- [1] 郑文虎, 张明杰. 不锈钢的切削加工[J]. 金属加工(冷加工), 2017(19): 45-48.
- [2] 张鹏飞. 304不锈钢铣削残余应力预测研究[D]. 江苏: 江南大学, 2024.
- [3] 李志杰, 王铮. 批量化高精度细长孔加工技术研究[J]. 一重技术, 2021(6): 46-47, 56, 59.
- [4] 吴平. 枪钻机床的特点和设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2002(8): 2.
- [5] 牟信虎, 李鑫. 枪钻技术在普通镗床深孔加工中的应用[J]. 科学技术创新, 2021(5): 195-196.

MW 20240904

(上接第53页)

量加工, 提高了产品质量和加工效率, 为同类型薄壁的难加工材质提供了有效借鉴, 取得了显著成效。

### 参考文献:

- [1] 陆剑中, 孙家宁. 金属切削原理与刀具[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] 卢秉恒. 机械制造技术基础[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [3] 赵如福. 金属机械加工工艺人员手册[M]. 3版. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- [4] 沈建峰, 虞俊. 数控铣工/加工中心操作工(高级)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

MW 20240914