



# 1Cr21Ni5Ti 难加工材料内型腔高精度 螺纹数控加工工艺研究

荣天爱 钟 磊 张兆磊 刘双进 吴雪松 刘鸿林  
(首都航天机械公司, 北京 100076)



**摘要:** 针对 1Cr21Ni5Ti 材料的难加工特性以及产品结构特点, 在开展了大量工艺试验的基础上, 设计了合理可行的高精度数控加工工艺, 从提高工艺控制要求、刀具选择、机床与刀具接口选择、优化切削参数和走刀路径等方面分析了如何提高难加工材料内型腔高精度螺纹加工的精度。

**关键词:** 难加工材料; 螺纹加工; 高精度; 数控加工

## Research on High Precision Thread Numerical Control Process for Inner Type Cavity of Difficult-to-cut Material 1Cr21Ni5Ti

Rong Tian'ai Zhong Lei Zhang Zhaolei Liu Shuangjin Wu Xuesong Liu Honglin  
(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

**Abstract:** Focusing on the characteristics of machining difficulty and the structure of 1Cr21Ni5Ti, a feasible numerical control process with high accuracy has been made out on the basis of a great deal technical tests. The paper analyzes how to improve the precision of thread machining within the cavity of difficult-to-cut materials. The methods are put forward from the following aspects: improvements of technical control requirements, selection of cutting tools, selection of interface between machine and tool, optimization of cutting parameters and tool path.

**Key words:** difficult-to-cut materials; thread machining; high precision; numerical control machining

### 1 引言

随着科学技术的飞速发展, 1Cr21Ni5Ti 不锈钢材料在航空航天及民用领域广泛应用。由于 1Cr21Ni5Ti 不锈钢材料的硬度、强度高, 导热系数低, 相对加工性和切削速度较低, 加工过程中切削热不易散出, 随着切削温度的增高, 刀具容易磨损。材料塑性较大, 而且材料中含碳化物, 加工硬化严重, 形成硬质点, 又易与刀具发生冷焊, 故刀具磨损快, 使用寿命低。车削螺纹时表面涩糙, 效果不佳, 且易产生积屑瘤。难加工性是典型奥氏体不锈钢材料显著特性之一, 在

一定程度上制约了加工精度和加工效率的提高。

某航天产品选用 1Cr21Ni5Ti 材料, 且因其特殊的使用环境要求, 产品内型腔螺纹精度要求高, 对数控加工工艺设计、刀具选择、机床与刀具接口设计、切削参数优化、刀具走刀路径优化等方面均提出了较高要求。

### 2 产品技术指标

产品外形具有一定锥角, 大端、小端各有内型腔结构, 内型腔上均加工内螺纹, 见图 1。

作者简介: 荣天爱 (1979-), 工程师, 机械制造工艺及设备专业; 研究方向: 数控加工工艺。

收稿日期: 2011-11-25

螺纹为连接配合面，使用时配合面需过盈配合，形成规定范围的自锁力矩平台。因此，螺纹加工精度要求高，其中径公差为  $G_{+0.35}^{+0.30}$ ，牙型半角公差  $H \pm 10'$ ；螺纹累计误差不超过 0.006mm。

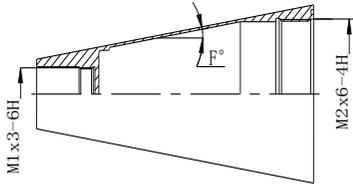


图1 产品结构图

### 3 加工工艺质量控制

#### 3.1 加严关键工序工艺控制要求

分析产品结构特点及加工工序，车大端、车小端、车外锥工序的精加工、螺纹加工等工艺控制要求直接影响到产品最终加工精度，属于加工过程中需要加严控制要求的工序和工步。经工艺试验后，最终确定了工序控制内容及控制要求，见表1。

表1 关键工序控制要求

工序名称	工序控制内容	控制要求/mm
车大端螺纹	小端、大端圆跳动	0.01
	车中心架处、大端中部、大端外侧三处基准圆跳动	0.01
车小端螺纹	大端外圆、靠近小端外圆圆跳动	0.01
车外锥	大小端工装和零件间隙	<0.01
	大、小端圆跳动	0.01

#### 3.2 刀具的选择和应用

刀具选择是影响切削加工性能重要因素之一，主要考虑切屑控制、刀片磨损、表面质量、刀具寿命和加工可靠性等因素。1Cr21Ni5Ti 不锈钢的切削加工性较差，切削刀具需选用切削效率高、抗氧化能力强、磨损小及利于切削热量散出的材料，同时，为满足刀刃强度要求，在进行切削时选择前角大的刀具，便于切屑的排出<sup>[1]</sup>。

##### 3.2.1 螺纹刀具的选择和应用

###### 3.2.1.1 刀具选择

针对 1Cr21Ni5Ti 不锈钢材料的特性，选用了具有可转位刀片的新涂层硬质合金刀具。涂层硬质合金具有极好的耐磨性和韧性特征，刀具寿命长。该新型刀具具有可转位的三个刀片，加工过程中节约了磨刀时间，极大提高了加工效率，同时，刀片结构为锋利 F 型槽型，刀片锋利，能够有效保证切削精度。该新型刀具具有较特殊的刚性结构和高稳定性导轨刀片锁定系统，限制了刀片在刀片座和刀柄中的移动，保证了刀片在切削过程中的高稳定性，有利于提高产品加工质量。刀具图见图 2、图 3。



图2 新型涂层硬质合金刀具及刀杆



图3 螺纹刀片示意图

###### 3.2.1.2 刀片选择

由于产品对牙型半角及中径精度要求较高，需多次在线测量，并据数控程序编制需要，选定了 V 牙型刀片径向进给加工方式，产生的切屑均匀，表面毛刺少粗糙度好，分别见图 4、图 5。

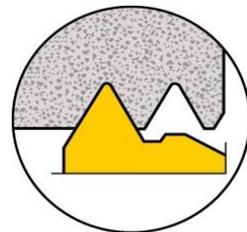


图4 v牙型刀片

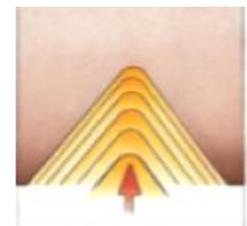


图5 直向进给切削

### 3.2.1.3 刀片的连接

在接触面上通过螺钉将刀垫可靠地锁紧在刀片座中，然后利用导轨的引导将刀片定位在正确的位置，拧紧螺钉，向定位于导轨上的刀片施加力，使刀片与刀片座上的接触面牢固定位，见图 6。

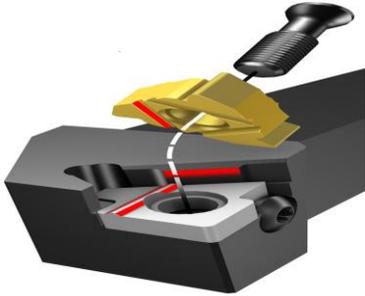


图 6 刀片定位图

### 3.2.2 内部腔槽刀具的选择和应用

内部腔槽加工刀具的选择和螺纹刀具材料相同，为涂层硬质合金材料，刀片为 2 个可转位刀片。

### 3.2.3 镗孔刀具及刀杆的选择和应用

由图 2 可知，零件的内腔较深，在加工过程中，会出现因刀杆过长而产生切削振动现象，造成产品加工表面质量不稳定。一般来讲，机械加工过程中可以采用以下几种方式达到降低加工振动的目的。

#### 3.2.3.1 降低切削力

a. 使用锋利的刀片可以降低切削力。如图 7 所示，竖线距离表示刃口的钝化半径，通常在 35~75μm 之间。减小刃口的钝化半径，要求刀片锋利。

b. 在镗削或铣削中，选择正前角和后角角度大的刀片，采用排屑效果好的断屑槽，可以降低切削强度，见图 8。加工时，按照粗加工和精加工分为不同的断屑槽槽型，并且刃口选用耐冲击的材质效果最优。

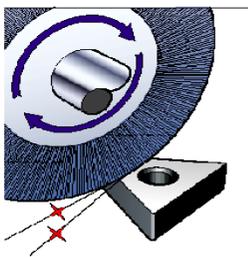


图 7 刀片加工图

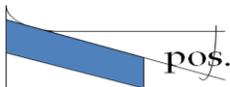


图 8 刀具角度说明图

c. 在内孔切削过程中，刀片的刃形角尽量最小，使其难以形成切削振动，出现挤屑现象的几率就会减小，见图 9。

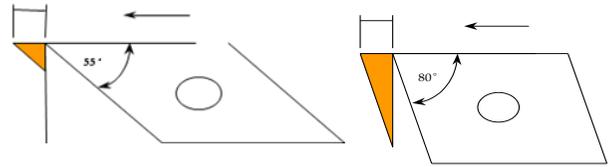


图 9 不同刃形角切削图

#### 3.2.3.2 提高应用系统刚性

用细长刀杆的镗刀镗孔时，受力情况见图 10。由此可知，采用主偏角为 90° 的刀具，承受的轴向力最大而径向切削力最小；采用主偏角为 45° 的刀具，由于承受的轴向力与径向切削力一致，容易出现振动。因此，选择主偏角为 90° 的刀具，可以有效提高刚性。

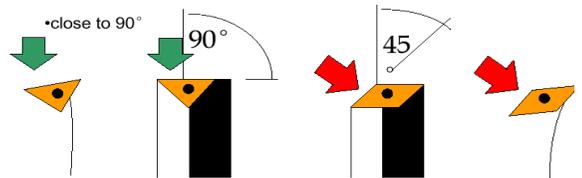


图 10 不同主偏角的刀具受力情况

#### 3.2.3.3 提高刀具系统的刚性

加工过程中的变形量示意图见图 11。

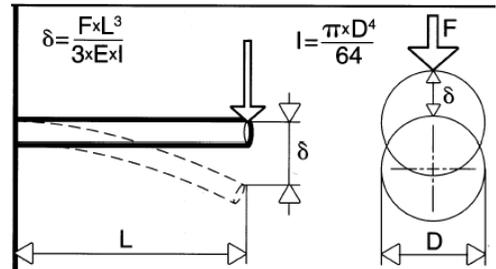


图 11 变形量  $\delta$  示意图

a. 外伸刀杆长度越长，振动强度越大<sup>[2]</sup>。由图 11 可知，加大刀杆的直径，将外伸刀杆的悬伸做到最短，变形量  $\delta$  最小。

b. 调整刀杆的夹持方式。如果刀杆与定位面连接为线接触，就容易在线接触部位产生晃动，出现断裂现象。可以选择增加接触面积，如在刀杆侧面增加顶丝的方式，使大直径刀杆在切削过程中更稳固。

综上所述，在前体加工过程中，为减小切削力选用了抗震性和精度更高的防振刀杆，并对选用的涂层硬质合金刀片的角度值进行适应性调整。为提高刀具

系统刚性，采用 90° 主偏角的刀具，优化了刀杆的夹持方法。实践证明，采用上述方法，降低了加工过程中的机械振动，提高了产品的加工精度。镗孔刀具系统见图 12。



图 12 镗孔刀杆图示

### 3.3 机床-刀具接口的选择和应用

主轴接口不仅要求保证快速换刀，而且必须在进行切削加工时保持接口的连接极其牢固可靠。通过试验对比，在同样的受力情况下，capto 接口的变形量最小。同时，capto 接口的加工表面质量较好。因此，在前体加工过程中，选择 capto 形式接口，满足了低振动、高加工质量的接口性能要求。见图 13。

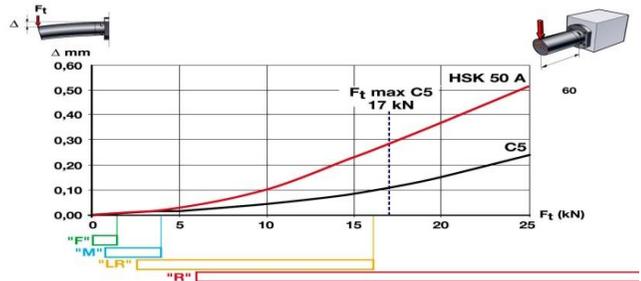


图 13 受力-变形量对比图(C5 曲线为 capto 接口)

### 3.4 优化切削参数

由于 1Cr21Ni5Ti 不锈钢材料的硬度、强度高，导热系数低，相对加工性和切削速度较低，使加工过程中切削热不易散出，随着切削温度的增高，刀具容易磨损。采用低转速、快速进给、小切削深度，使材料快速分离，不会产生高热及大应力，刀具磨损也较小<sup>[3]</sup>，可以有效提高工件的表面加工质量和精度。为验证不同的切削参数对产品加工精度和表面质量的影响，进行了工艺试验，试验切削参数见表 2。

表 2 切削参数对比表

工序名称	工艺试验 1		工艺试验 2	
	切削深度 $a_p$ /mm	切削速度 $v$ /m·s <sup>-1</sup>	切削深度 $a_p$ /mm	切削速度 $v$ /m·s <sup>-1</sup>
外形粗加工	2.0	85	2.5~3.0	80
外形精加工	0.3	90	0.5	85
内形粗加工	1.2	85	0.8	55
内形精加工	1.2	95	0.8	55
螺纹加工(粗加工)	0.4	95	<0.2	65
螺纹加工(精加工)	0.2	95	0.1	65

采用工艺试验 1 的切削参数的加工效果较优。试验结果表明，在相同工况条件下，在一定范围内适当提高进给速度和切削深度，不仅可以获得良好的加工精度和表面质量，同时也可大大提高加工效率。

### 3.5 优化走刀路径及数控加工程序

在内型腔加工螺纹时，刀具直径较小，走刀轨迹不合理，会出现刀具与内型腔相碰和刀具破损现象，造成产品质量问题，也会直接影响到机床主轴等零部件及刀具的工作寿命<sup>[4]</sup>。确定新型刀具后，根据产品结构特点及刀具系统特点，编制数控程序，优化走刀路径，保证螺纹加工精度和质量。

采用西门子系统编制的螺纹数控程序如下：

```
DEF REAL MPIT=P, SPL=0, FPL=-35,
DM1= M2, DM2=M2, APP=8, ROP=2,
TDEP=E, FAL=0.05, IANG=0, NSP=0
```

```
DEF INT NRC=16, NID=1, VARI=2, NUMT=0
; 参数定义，赋值
N00 G54
N10 G0 G53 X700 Z1200 D0 ; 选择起始位置
N20 T1 D3
N30 S150 M3 ; 确定工艺数值
N40 CYCLE97 ( , MPIT, SPL, FPL, DM1, ->
-> DM2, APP, ROP, TDEP, FAL, IANG, ->
-> NSP, NRC, NID, VARI, NUMT)
; 循环调用
N50 G0 X170
N60 G0 Z20
N70 G0 X700 Z1200; 返回到起始位置
N80 M30 ; 程序结束
```

(下转第 12 页)

