

先进  
制造  
技术

# 液压膨胀夹头的径向刚度分析\*

徐燕云 张伟展 王树林 王贵成  
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

Analysis on radial stiffness of hydraulic expansion chuck  
XU Yan-yun, ZHANG Wei-zhan, WANG Shu-lin, WANG Gui-cheng  
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**【摘要】** 液压膨胀式夹头刀柄是一种采用液压膨胀原理夹持刀具的超高精度刀具夹头, 夹头的径向夹持刚度对加工零件的表面质量以及夹头刀具的整体震动都有着非常重要的影响。为了充分发挥液压膨胀夹头刀柄在高速加工中的应用潜能和效用, 利用有限元分析法对静压膨胀夹头的径向夹持刚度影响因素进行了分析。分析了夹头-刀具的配合间隙、油腔凸起长度、油压以及转速对夹头径向夹持刚度的影响, 研究结果对于夹头的生产制造和合理控制加工质量提供有效的依据和参考。

**关键词:** 静压膨胀式刀具夹头; 接触分析; 刚度分析

**【Abstract】** The tool clamping chuck based on hydraulic expansion is one kind of tool clamping chuck with ultra-high precision, which radial clamping stiffness influences the surface quality of the machining parts and the overall vibration of the tool clamping chuck a lot. To give full play to the potentiality and effectiveness of hydraulic expansion chuck in high-speed machining, several different impacting factors on the radial stiffness of hydraulic expansion chuck have been analyzed in it. Meanwhile the impact of matching gaps between chuck and tool, bulge length of oil chamber as well as oil pressure and rotating speed on radial clamping stiffness of the chuck is analyzed, which results provides effective basis and reference for the chuck manufacturing and rational control of processing quality.

**Key words:** Hydraulic expansion tool chuck; Contact analysis; Stiffness analysis

中图分类号: TH16, TG759 文献标识码: A

## 1 引言

静压膨胀式刀具夹头是一种采用静压膨胀原理夹持刀具的超高精密夹头, 它具有优良技术性能, 适用于在加工中心、高精度镗铣床和柔性生产线上夹持钻头、铰刀、铣刀等。相对于弹簧夹头、收缩夹头和力膨胀夹头, 液压膨胀夹头具有极高的重复夹紧精度 ( $\leq 3\mu\text{m}$ )、稳定可靠的夹紧力、能够传递很高的扭矩、极优的阻尼减振性能。目前德国静压膨胀式刀具夹头已广泛用于汽车、机械等制造行业, 在中国也有许多机械加工企业成功地使用这种刀具夹头。刀具在实际加工中, 总是单侧刀刃收到来自于工件的斜向力, 可以分解为径向力和切向力, 由于刀具和夹头都是轴对称的, 都可以归结到夹头刀具径向夹持刚度分析上<sup>[1]</sup>。夹持刚度的分析结果, 可以对在高速加工过程中的大型、深型腔体加工以及复杂曲面模具的刀具以及夹头的配合选取、加工参数, 提供参考和理论基础<sup>[2]</sup>。

## 2 静压膨胀夹头的结构原理

静压膨胀式刀具夹头结构, 如图1所示。在夹头主体与装夹孔的膨胀壁之间有一个环形封闭油腔, 油腔内充满了专用液压油, 可以将液压油均匀地传递到密闭油腔的每个部分, 同时还增加结构阻尼, 改善夹头的动力学特性, 对减小振动、提高加工质量具有显著的效果。装夹孔的膨胀壁是经过精确计算而设定的, 具有很好的弹性, 能在油压打到设定值时产生需要的膨胀量。装夹孔内壁上制有环槽, 在夹紧时可以容纳装夹孔内壁和被夹刀具之间的残余润滑油, 保持装夹孔壁的清洁和干燥, 保证扭矩的可靠传递。当用

内六角扳手拧紧加压螺栓、提高油腔内的油压时, 封闭油腔中的每个部分都会受到相同的压力, 使油腔的内壁均匀而对称的向轴线方向膨胀而夹紧刀具; 当松开加压螺栓时, 油腔内油压回落, 装夹孔内壁在弹性回复力的作用下回复到原始直径而松开刀具。

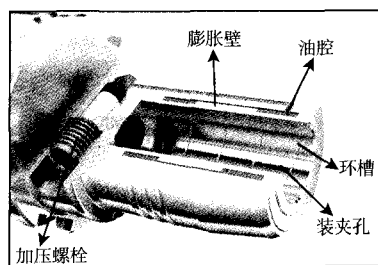


图1 静压膨胀夹头结构图

Fig.1 The static pressure expansion chuck structure

## 3 径向夹持刚度有限元模型

在有限模型分析过程中, 夹头刀具模型可以简化为轴对称模型, 但是由于径向刚度分析是所加载的力不是轴对称载荷, 故不能采用轴对称模型。在 ANSYS 中对于轴对称模型非轴对称载荷, 采用谐单元进行分析<sup>[3]</sup>。在这里, 考虑到读取结果的方便以及模型加载的方便, 采用了整体模型进行分析, 选用 8mm 的内径夹头进行分析。主要分析对所夹持的刀具弯曲变形, 根据圣维南原理<sup>[4]</sup>, 远端的影响对接触部分影响很小, 故在建立有限元模型时, 忽略了 HSK 刀柄与机床相连接的部分。在刀具与夹头夹持的部分中, 刀具根部有 10mm 与夹头内壁之间有 0.5mm 的间隙, 故

\* 来稿日期: 2011-06-14 \* 基金项目: 国家自然科学基金(50675088, 510751927), 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项“高速数控机床用新型工具系统”(2009ZX04012-012)

在建立有限元模型时考虑到此处间隙会对夹头的径向刚度有影响,故有限元建模时的间隙被考虑在其中。有限元模型的验证已在文献[9]中得到验证。

在有限分析软件 ANSYS 中所建立的实体模型,如图 2、图 3 所示。刀具、夹头参数设置,如表 1 所示。由于刀具与夹头之间为间隙配合[7],分析重点部分在于设置接触参数,当接触处的两个圆面划分网格后,原来圆周上的弧线被比小段直线所代替,所以不可避免的倒置两个圆面之间的节点以及单元出现穿透或者间隙。夹头刀具之间初始间隙设置为 16μm。

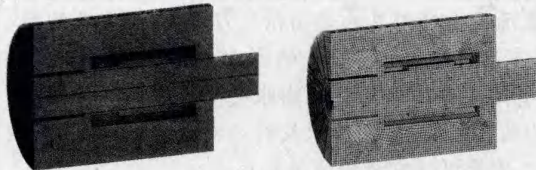


图2 夹头刀具半模型  
Fig.2 Chuck tool model

图3 夹头刀具有限元模型  
Fig.3 The finite element model of cutter chuck

表 1 刀具与夹头的基本属性

Tab.1 Basic properties of the tool and chuck

材料	密度	弹性模量	屈服强度	泊松比	摩擦系数
刀柄	7.8×10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	210GPa	530MPa	0.28	0.2
刀具	15×10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	640GPa	5460MPa	0.22	

在设置间隙配合时,第一步就是保证接触面处的节点恰好相互接触,两个接触面上的节点没有初始穿透也没有间隙,接着在移动接触面时间隙或者过盈量。通过设置 KEYOPT(5)=1 来关闭间隙,并设置 KEYOPT(9)=3 用来包括定义的接触面偏移(CONF),但忽略由于几何模型引起的初始穿透,由于间隙为 16μm 设置接触面 CONF=-16μm 设置间隙。在整个过程中,通过关闭间隙以及忽略初始穿透保证接触面的单元和节点恰好接触,接着保证接触面的偏移设置了刀具和夹头的间隙配合。其余约束设置中,夹头 Z=0 端面处这是固定所有位移,刀具 Z=0 处节点的固定 z 方向约束。刀具夹头接触部分的径向夹持刚度可定义为[8]:

$$K_R = F_R / U_Y \quad (1)$$

式中:  $F_R$ —刀具切削工件时受到的径向切削力;  $U_Y$ —施加切削力后选取的测试点的径向位移,对于选定的静压膨胀夹头和刀具,径向夹持刚度主要取决于接触间隙的大小、油腔中油压的大小、刀具的接触长度以及高速加工时的转速。

如图 4 所示。在图 4 中, A 点为径向位移分析点, A 点的选择既要充分反映配合对径向夹持刚度的影响,又要尽量消除因刀具自身受力变形所产生的测量误差且方便验证测量,故 A 点的位置为远离夹头外端面 6mm 处; F 为所施加径向向外载荷,其位置在距离夹头外端面 38mm 处,如图 4 所示。此过程在一步载荷中即可一步加完,所以接触设置、端面固定以及力 F 的加载都是在一步中完成的。

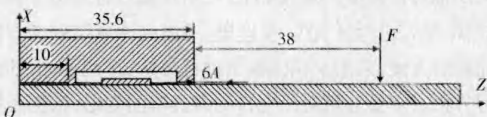


图 4 力 F 施加位置及 A 点选择

Fig.4.The force exerted by A and F location choice

根据文献[9]中,在利用小直径铣刀对模具进行半精加工或者精

加工时,刀具受的径向力通常不超过 250N,在分析中去  $F=240N$ 。施加载荷后的夹头刀具受力结果分析图,如图 5 所示。由于力 F 是单面施加到刀具上边的,施加力 F 的半个圆柱体的等效应力,如图 5 所示。两幅图从不同方向显示刀具夹头的受力变形。在左图中很明显看到力 F 导致了刀具的弯曲,刀具从夹持孔处到远端施加力 F 处的等效应力逐渐变小,最大的等效应力出现在刀具与刀柄的夹持孔。由文献[9]的分析知道静压膨胀夹头在夹紧刀具后,夹持孔的末端是翘起的并没有与刀具相接触,所以弯曲最先发生在液压腔与刀具的接触处。在刀具夹头 Y 方向的应力变化,如图 6 所示。由于弯曲应力的存在致使刀具刚伸出夹持孔处的应力变大。

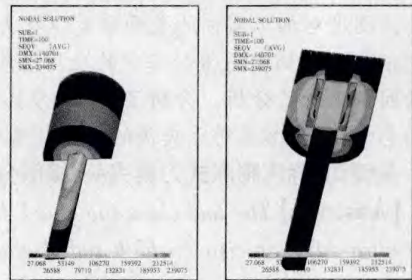


图 5 力 F 施加后分析结果图

Fig.5 F force exerted after the analysis result

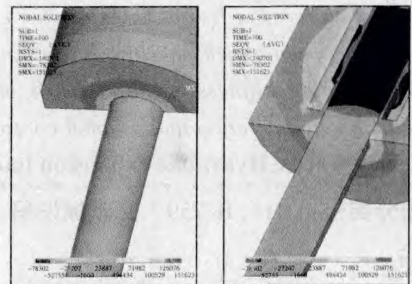


图 6 力 F 施加后径向应力图

Fig.6 F after applying the radial stress

### 4 径向夹持刚度分析

#### 4.1 配合间隙的影响

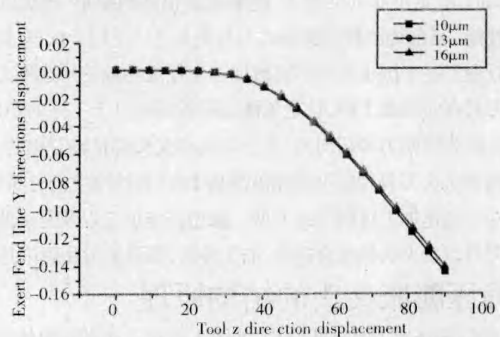


图 7 施加力 F 后刀具端面线 Y 方向位移(不同间隙)

Fig.7 The force exerted by the F tool end line Y direction displacement(different clearance)

刀具夹头的间隙不仅影响到夹持长度变化,同时也影响到刀具夹头接触应力大小的变化。随着接触配合间隙的变小,夹持长度和接触应力都相应的减小。在液压油的压强为 65MPa 下,中间液压油腔的凸起长度为 9.9mm 的情况下,刀具施加力 F 表面的直线 Y 方向位移。被测点 A 的 Y 向位移为 -0.0129, -0.0128, 0.0116 (分别对

应的间隙为  $10\mu\text{m}$ ,  $13\mu\text{m}$ ,  $16\mu\text{m}$ ), 由图 7 所示上的曲线可以看出间隙为  $10\mu\text{m}$  和  $13\mu\text{m}$  的  $Y$  向位移变化很小。但是  $16\mu\text{m}$  和  $13\mu\text{m}$  的比较还是很大的, 在力  $F$  所施加的地方偏移相差为  $0.00407\text{mm}$ ,  $13\mu\text{m}$  与  $10\mu\text{m}$  相比仅为  $0.0002\text{mm}$ 。可以得出在间隙小到一定程度时, 对夹持刚度的影响就会变得很小, 在设置夹头间隙配合时不但要从传递的扭矩来考虑同时也要考虑径向夹持刚度。

#### 4.2 不同的油腔凸起长度的影响

结合静态分析<sup>[6]</sup>所得到的结果, 油腔中凸起长度的变化对夹持长度没有影响, 但是影响了接触部分的接触应力大小的变化, 夹头传递的扭矩随着凸起长度的增大而减小。油压为  $65\text{MPa}$ , 配合间隙为  $16\mu\text{m}$  时, 刀具施加力  $F$  表面的直线  $Y$  方向位移, 如图 8 所示。被测点  $A$  的  $Y$  向位移为  $-0.0132\text{mm}$ ,  $-0.0128\text{mm}$ ,  $0.0129\text{mm}$ (分别对应的间隙为  $8.9\mu\text{m}$ ,  $9.9\mu\text{m}$ ,  $10.9\mu\text{m}$ )。曲线同时可以看出在  $9.9\text{mm}$  的凸起长度时  $A$  点的径向位移最小, 如图 8 所示。当夹头油腔部分凸体长度变大或者变小时, 夹头的夹持径向刚度都会相应的减小, 合适的凸起长度对夹头的径向夹持刚度有着重要的影响。

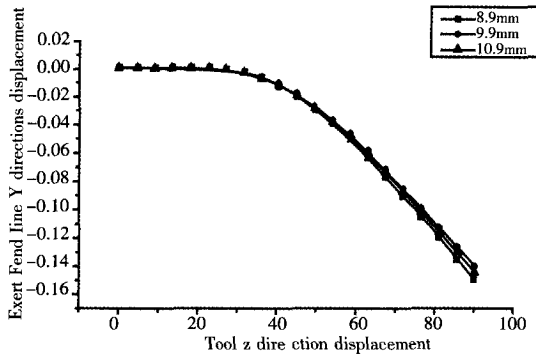


图 8 施加力  $F$  后刀具端面线  $Y$  方向位移(不同的凸起长度)  
Fig.8 The force exerted by the  $F$  tool end line  $Y$  direction displacement(different projection length)

#### 4.3 不同油压的影响

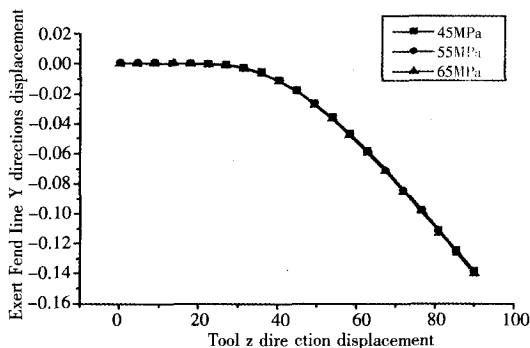


图 9 施加力  $F$  后刀具端面线  $Y$  方向位移(不同油压)  
Fig.9 The force exerted by the  $F$  tool end line  $Y$  direction displacement(different hydraulic)

油压首先影响到接触应力的变化, 随着油压的增大接触应力以及所传递的扭矩都会相应的变大。被测点  $A$  的  $Y$  向位移为  $-0.012273\text{mm}$ ,  $-0.012555\text{mm}$ ,  $-0.0129\text{mm}$ ( $45\text{MPa}$ ,  $55\text{MPa}$ ,  $65\text{MPa}$ ), 径向夹持刚度相应的减小, 而且接触刚度随着油压的增大变化很小。在静态分析<sup>[6]</sup>知道: 当夹头夹紧刀具后, 出口处夹头的部分由于油压的作用会出现膨胀, 从而导致夹头和刀具之间出现更大的间隙。所以当油压减小时, 刀具  $Z=0$  的部分会想上轻微翘起再加

上夹头出口处膨胀的位移减小, 从而导致被测点  $A$  的径向位移变小; 反之油压增大时夹头的刀具伸在夹头内部的部分发生很少的偏移, 而且夹头出口处的膨胀幅度增大, 这些原因都会导致夹头径向加持刚度略微减小, 如图 9 所示。相对上面两个因素, 油压对刀具的径向夹持刚度影响很小。

#### 4.4 高速旋转下不同转速的影响

高速旋转状态下的夹头径向刚度分析, 与高速旋转状态下的夹头夹紧性能分析<sup>[6]</sup>相似, 将液压油高速旋转状态下的油压导入到夹头油腔的壁面进行分析, 如图 10 所示。被测点  $A$  的  $Y$  向位移为  $-0.012986\text{mm}$ ,  $-0.013484\text{mm}$ ,  $-0.014364\text{mm}$ ,  $-0.015711\text{mm}$  (相对应的转速为  $10000\text{r/min}$ ,  $20000\text{r/min}$ ,  $30000\text{r/min}$ ,  $40000\text{r/min}$ ), 从图 10 中可以看出随着转速的增加夹头的径向夹持刚度减小。由于离心力的作用以及在高速状态下液压油对油腔内壁面的油压压力也相对减小, 从而导致这种结果的出现。同时从图中也可以得到在  $Z=0$  处的节点  $Y$  向位移由  $10000\text{r/min}$  时的  $5.72\text{E}-4$  变成  $40000\text{r/min}$  时的  $0.00103\text{mm}$ , 增加了一个数量级。同时在夹头的末端也会出现  $Y$  向位移的大幅摆动, 所以在高速加工时夹头的径向夹持刚度会大幅度减小从而导致加工表面的粗糙度增大。

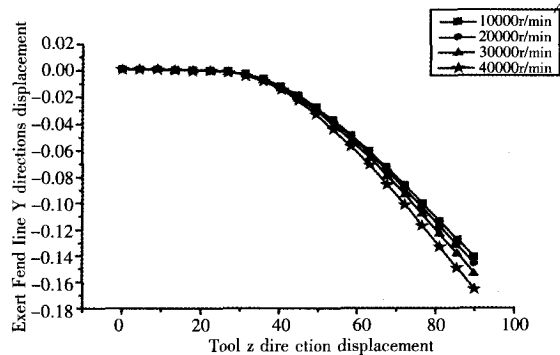


图 10 施加力  $F$  后刀具端面线  $Y$  方向位移(不同转速)  
Fig.10 The force exerted by the  $F$  tool end line  $Y$  direction displacement(speed)

### 5 结论

(1)在四个因素中, 转速对夹头的加持刚度影响最为明显, 而且转速会导致刀具端部摆动幅度变大, 影响到加工表面质量。(2)由于油压增大会增加夹头出口处膨胀量的增大, 所以径向夹持刚度会相应的变小, 但是油压对径向夹持刚度的影响很小。(3)当夹头油腔部分凸起长度变大或者变小时, 夹头的夹持径向刚度都会相应的减小, 合适的凸起长度对夹头的径向夹持刚度有着重要的影响。

#### 参考文献

- [1] 周后明. 高速铣削热缩加长刀杆与刀具配合特性及应用研究[C]. 博士学位论文集. 广州: 广东工业大学, 2008: 4-5.
- [2] 宋志鹏, HSK 热装刀柄及其工具系统性能的研究[C]. 硕士学位论文集. 镇江: 江苏大学, 2010: 7-8.
- [3] Information on <http://www.schunk.com>.
- [4] 徐芝纶. 弹性力学(第 2 版)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982: 25-28.
- [5] Robert D.Cook, David S.Malkus, Michael E.Plesha, Robert J.Witt: Concepts and Applications Of Finite Element Analysis, 2000.
- [6] S.L Wang, Static performance parameters and analysis of the Hydraulic Expansion Toolholder[C]. IEEE 电气工程与自动控制国际学术会议, 2010.
- [7] 沈建. 采用静压膨胀原理的精密刀具夹头[J]. 工具技术, 2005(3): 55-57.
- [8] S.L Wang, The performance of the Hydraulic Expansion Toolholder in high-speed rotation[J]. Advanced Materials Research, 2010(5).