抛物面陶瓷导弹防护头内外腔的磨削技术

山东普利森集团有限公司 （德州 253076） 王晓刚 赵 霞

导弹因速度过快，弹头在长时间飞行中会与空气分子摩擦产生大量的热量，如果弹头不采取隔热措施会使导弹在飞行当中会因弹体过热而产生自爆。因此，导弹在飞行中需要一层特殊的隔热防护层，如图1所示为其中的一种防护形式，头部整流罩隔热防护层为陶瓷材料。

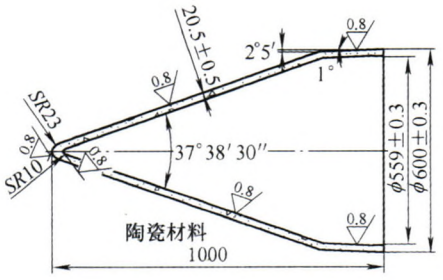


图 1

目前对此工件的加工技术是先车削内外腔，内腔顶部采用金刚石钻具加工；然后采用抛光技术，将工件整体安置在研磨机的内腔中，通过搅动研磨液和磨球对工件进行抛光处理，完成工件的最终精加工。缺点是需要一台研磨机且研磨液需经常更换，加工成本高，工序繁复需多次调整；原有的加工方法主要以车削为主，抛光工艺只是为了降低工件内外腔的表面粗糙度值。现在加工工艺为改变其磨削方法，可缩小机床占地面积，直接在CK5116数控单柱立式车床上进行车削、磨削加工。车削部分采用高速数控刀架完成，磨削装置为全新结构，这种加工工艺方法可在一台设备中完成多项工序，降低了制造成本。陶瓷是典型的硬脆性隔热材料，在对工件的加工过程中采用郑州磨料磨具磨削研究中采用亚伦斯有色金属专用切削液，该切削液能对刀具和工件进行充分冷却，使刀具和工件温度恒定在室温，消除切削热对工件的影响。

3. 夹具设计及使用

加工工件*D*面利用专用夹具，如图2所示。夹具体小端由车床卡盘夹住，大端外圆加工成外螺纹，与外压环内螺纹相配合，工件安装在夹具体上，利用工件轮毂上的ϕ6mm孔与夹具体大端端面上的ϕ6mm圆凸台配合定位，外压环拧在夹具体外螺纹上，夹住工件*D*面轮缘上（该处在工件切断时已加工完成）。夹紧力与工件轴向平行，对工件径向无影响，故径向不产生变形，从而保证工件不受夹紧力的作用而产生变形。

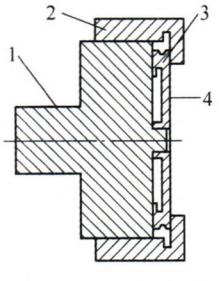


图2 夹具体加工零件*D*面

1.夹具体 2.外压环 3.工件 4.待加工*D*面

4. 测量

由于工件轮辐较簿，不但加工容易产生变形，测量也会产生变形。如采用常用的千分尺或内径千分表，因检具测量力较大，会使工件产生变形，所以我们采用海克斯康三坐标测量机激光测头进行检测。该检测机不仅精度高，测量中产生的力也非常小，不会影响工件变形。

5. 结语

通过采用上述措施和手段，首件加工五件，经检测尺寸误差和形位误差均在合格范围。实践证明，该方案可以防止工件受力和受热产生变形，保证工件加工精度，方案是合理可行的。MW

（收稿日期：20130228）

所开发的喷涂陶瓷精密磨削工艺，其尺寸精度和加工表面粗糙度均与国外水平相当，表面粗糙度值已降低到R_a=0.1～0.4μm。

CK5116数控单柱立式车磨复合机床可很好地对导弹头部陶瓷隔热防护层进行高精度终加工，该机床在研制过程中采用了多项新技术新工艺，其成功研制填补了国内空白。

1. 数控立车

CK5116数控单柱立式车磨床，如图2所示，该机床适用于加工各种黑色金属，有色金属及部分非金属材料，可以粗精车内外圆柱面、内外圆锥面、平面、曲面，钻、扩、铰孔等。本机床采用国产KND数控系统，进给采用交流伺服电动机驱动；主传动为交流主轴伺服电动机驱动，机械二挡，可以实现无级调速。

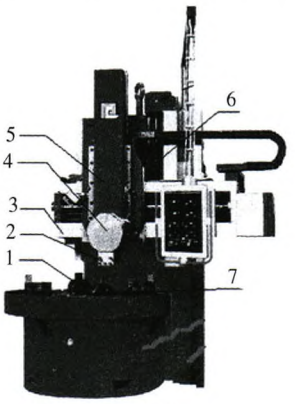


图 2

1.卡爪 2.刀夹 3.横梁 4.刀台
5.滑枕 6.横梁滑座 7.工作台

2. 磨削装置

（1）总体布局　数控立式车磨床，车削刀架为高精度数控刀架，磨削装置安装在方滑枕上，工件安装在工作台上，如图3所示为磨削内外腔的总体布局。显然，水平*X*轴、垂直*Z*轴行程均满足使用要求。

在磨削工件内腔时，操作者站在走台上，能方便地观察到工件的内腔加工过程，可以适时调整磨头与工件的相对位置；在磨削内孔时，在方滑枕的另一侧安放一根铜管插入陶瓷工件内腔的底部，随时将多余的磨削液吸走。磨削时从工件的下部开始向上端进行，随着磨削液的冲刷，磨粒不会堵塞加工表面从而保证了磨削正常进行。

在磨削前，每一个工件内径尺寸的不同和磨削刀具直径的磨损，无法保证内腔插补的*Z*轴终点位置在同一高度，起点可通过对刀保证；终点需采用电气安全保护，需在垂直方枕上安装限位行程开关，防止磨头越行程，可有效避免工件的报废。

值得一提的是，该数控立车*X*、*Z*两轴必须采用高精度的滚珠丝杠和高性能的交流伺服电动机，再配备高档数控系统，实现微量的直线、圆弧和抛物线插补运动，最小进给单位、定位精度在0.005mm以内，只有这样，磨削出来的各种锥面或抛物面才更理想。

（2）磨削装置　CK5116数控单柱立式车磨床采用的是方滑枕，当横梁升到立柱导轨的最高位置时，方滑枕的下端面到工作台面的最大距离是1 600mm。工件的大孔直径为559mm，方滑枕的截面尺寸为200mm×200mm，方滑枕可以深入到工件的大孔中磨削，磨削外圆时方滑枕只要不与工件干涉即可。所以，将电主轴安置在方滑枕的下部，通过一个联接盘将电主轴与方滑枕联接起来，实现磨头的旋转。这种结构与上海善能珩磨机械有限公司的立式珩磨机有些类似，结构可靠实用。

对于外圆磨床和平面磨床，一般采用砂轮与静动压主轴箱联接，然后由电动机带动磨削；对于内孔磨床，一般采用砂轮与高速机械主轴（滚动轴承）联接，然后由电动机通过带轮传动进行磨削；对于立式车磨床，由于立车结构已经成熟，以车削为主，磨头装置做为一个附件，用时装上，不用时拆下；磨削装置采用了高频电动磨头的结构，采用陶瓷轴承传动结构，主轴转速在3 000r/min以内，输出功率可达5.5kW，瞬时过载能力强，速度特性硬，振动小。这种电主轴磨头的结构安装空间小，特别适合在立式车磨机床上使用。原理是利用电主轴的转子做为磨轴，根据实际需要由电动机控制砂轮的磨削速度，电主轴的外壳固定在立式方滑枕上。为了降低表面粗糙度值，磨削时采用逆磨方法，即工件与砂轮旋转的方向相反；为了防止磨轴

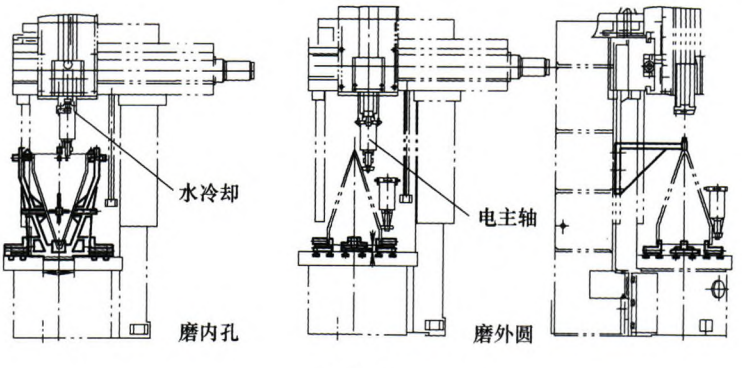


图 3

的弯曲，采用了小磨削量、多走刀的磨削方法；为了实现圆弧部分的磨削，采用了仿形磨削，即磨头的外形与工件圆弧相同。

如图4所示，为磨削装置的结构图，方滑枕5下面有定位和螺纹接口，只需按照车刀架的结构和尺寸匹配即可，采用了两种方案的电主轴。

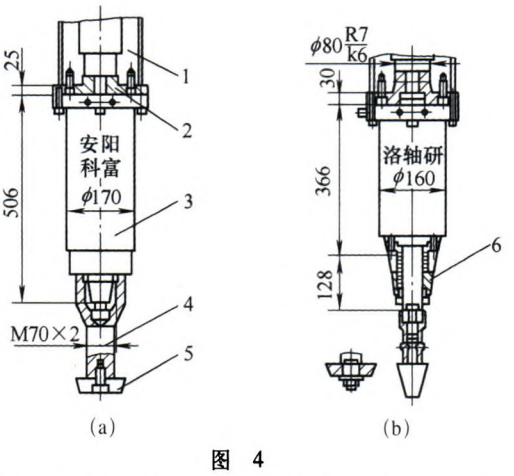


图 4

1.方滑枕 2.联接盘 3.电主轴 4.磨头杆 5.磨头 6.支承套

（3）电主轴 图4a电主轴3用安阳市科富机械有限公司生产的立车用电主轴，型号KFD 170－1.5－3/3，最高转速1 500～3 000r/min，功率5.5kW。电主轴3通过螺纹套与磨头杆4联接，磨头5安装在磨头杆4上。这样，电主轴旋转时就带动磨头5旋转，可以对工件进行磨削。由于磨头杆4的长径比不大，保证了磨头5不会产生影响精度的颤动。为了保证电主轴的正常工作，需要对电主轴进行冷却，用自来水进行冷却。

图4b电主轴采用洛阳轴承研究所生产的磨削用电主轴，最高转速200～3 000r/min，功率2.5kW。考虑到工件的形状和可行行程，增加了支承套6用来固定磨头杆，滑套材料采用耐磨巴氏合金为油润滑，提高了磨头组件的刚性，保证了磨头不会因悬臂过长产生影响精度的摆动，同样需要用水进行冷却。

上述两种结构均可。进行反复比较，对比上海善能机械有限公司的立式珩磨机样本，适合于陶瓷加工，图4a电主轴功率和转速基本吻合；图4b电主轴长度短小，方便工件拆卸；重新计算功率，功率也能满足精密磨削磨削深度0.005mm的要求，实际磨削经验也可证明，最后选定图4b洛轴研电主轴方案。

进行切削速度校核：砂轮的直径100mm，电主轴转速2 600r/min，工作台转速100r/min，磨削直径在280～550mm，对应的切削速度$v=\pi d_n/1\,000$，计算得：对于280mm直径，v=15.1m/s；对于550mm直径，v=16.5m/s。切削速度满足使用要求。

对于磨削装置各部分的工作精度，磨轴的回转精度为0.01mm，垂直刀架滑枕移动对工作台面的垂直度为0.02mm，工作台台面的径向、端面跳动均为0.02mm。

3. 磨头结构的布置和磨削用量

为了实现对陶瓷工件的全部内外腔表面的磨削，只要表面粗糙度能达到$R_a \leqslant 0.8\ \mu$m即可满足用户要求。从工艺上来说，对于陶瓷工件的磨削有两种方法，一种是采用绿碳化硅砂轮，可由磨料磨具公司提供；另一种是采用金刚石砂轮，可以由超硬材料制品公司提供。前者砂轮使用寿命低，磨削时间相对较短，但成本低；后者砂轮寿命高，磨削时间相对较长，刀具种类少，但成本高。

如图5所示，为砂轮的全部结构布局图，可以磨削内外腔的各个表面。①对于绿碳化硅砂轮，首先，砂轮修整器是固定在工作台上，依靠横梁滑板的X向伺服和垂直刀架上方滑枕的Z向伺服两轴联动，通过数控系统实现任意斜面和圆弧的锥度砂轮修整。其次，修整好的锥度砂轮对陶瓷工件进行两轴联动插补，实现陶瓷工件锥面和圆弧的磨削。再次，磨削加工需要现场适时调整，磨头与工件的接触依靠手脉微调，使磨头能随时接触陶瓷工件进行磨削。②对于金刚石砂轮，砂轮的形状是成形的，要求车削工件的形状与金刚石砂轮的形状相吻合，在磨削上部的圆弧尖和抛物面时，由于金刚石砂轮的短时不磨损性使之与工件为线接触是允许的。为了保证图7中的圆弧尖与外锥面没有接刀痕迹，可以用磨削外锥面的锥度金刚石砂轮圆弧插补实现。陶瓷工件内孔和外圆37° 38′ 30″的大斜面有两种结构，一种是直面，另一种是抛物面。

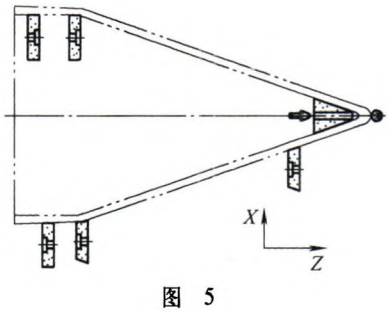


图 5

对于采用绿碳化硅砂轮，只适合于磨削直斜面，砂轮的粒度为150，硬度为中软，组织号为2，采用陶瓷结合剂，直径为80～125mm；磨削深度取0.005mm，线速度为25m/s，这种数据适合于磨削陶瓷材料。通过与山东升华磨料磨具有限公司联系，绿碳化硅砂轮能够满足这种工件的切削要求，每次磨削工件时只需对砂轮修整一次即可。

对于金刚石砂轮，适合于磨削直斜面或抛物面，采用人造金刚石，金刚石砂轮的粒度为100～150，硬度为中硬，浓度为100%，直径125mm；磨削深度取0.005mm，线速度为15～20m/s，这种数据适合于磨削陶瓷材料。通过与郑州宏拓超硬材料制品有限公司联系，金刚石砂轮可以作为金刚刀使用来磨削工件，磨削时尽可能采用切削液，可提高表面加工质量。在使用过程中一般不需要进行修整，但是使用一段时间后，工作表面也会被磨屑堵塞，修整时用碳化硅油石轻轻接触高速旋转的金刚石砂轮“去渣”。

由于陶瓷工件内孔底部的尖点处在工作台的回转中心上，线速度为零，球头式磨头中心的线速度也为零，应如何磨削尖点呢？由于陶瓷工件内孔和外圆37° 38′ 30″的大斜面有两种结构，一种是直面，另一种是抛物面，那又如何磨削呢？

（1）底部尖点磨削　为了解决内孔底部尖点磨削，专门设计了一种30° 砂布磨头，砂布磨头底部半径为R6mm，陶瓷工件内孔底部半径为R10mm，这样就保证了电主轴带动砂布磨头旋转时能在尖点处摆动，使粒度120的砂布能磨削尖点，对于金刚石砂轮形状相同，加工过程亦是如此。

（2）大锥面的磨削　为了解决内外大锥面的磨削，当磨削直锥面时，可用直锥面的磨头进行直线插补磨削；当磨削抛物线面时，可用锥度式或球头式的金刚石磨头进行抛物线插补磨削，此时为线接触；考虑到用户提出可进行表面抛光处理，也可用砂布叶轮来磨削抛物线面。由于砂布叶轮上的纱布是曲线缠绕的，可以径向扩张，即使砂布叶轮的运动轨迹与陶瓷工件的外形有微量（1～2mm）出入也可进行抛光。总之，对于磨削抛物面采用金刚石磨头结构较简单，可以通过数控系统的插补运动实现直面和抛物面的加工。

4. 夹具设计

如图6所示，该专机在允许的行程内可以进行陶瓷工件内腔的全部加工，陶瓷工件的车削、磨削夹具相同，设计时需要综合考虑。磨内孔时，夹具通过ϕ320H7/g6与工作台配合，由卡爪1四点夹紧，在夹具体3中部采用与陶瓷工件外大锥面基本吻合的略大一点的锥面配合。先将陶瓷工件放入夹具体3内，在ϕ600mm的外圆四周设计有4个均布的尼龙顶紧块5，顶紧螺钉固定在夹具体上，将陶瓷工件调正并适量顶紧，然后再用4个压板6通过螺钉7压住陶瓷工件的大端顶面，工件调正后在中部采用4个螺钉顶紧限位2将工件完全定位，这样陶瓷工件就实现了定位和夹紧，可以进行内腔车磨加工。

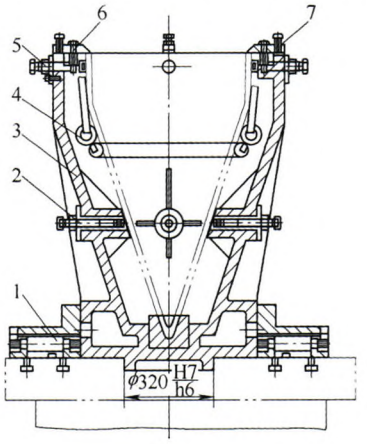


图 6

1.卡爪 2.顶紧限位 3.夹具体 4.吊具 5.顶紧块 6.压板 7.螺钉

如图7所示，磨外圆时，陶瓷工件翻个，用另外一套夹具固定。当磨削上部长锥面时，陶瓷工件底面放在卡爪体3上，采用四爪内胀，力量不要太大需适量，然后在对应的位置用螺钉1通过顶紧座2顶紧4个均布的尼龙顶块将工件压紧；当磨削下部短锥面时，将下部顶紧座2组件卸下，在4个卡爪

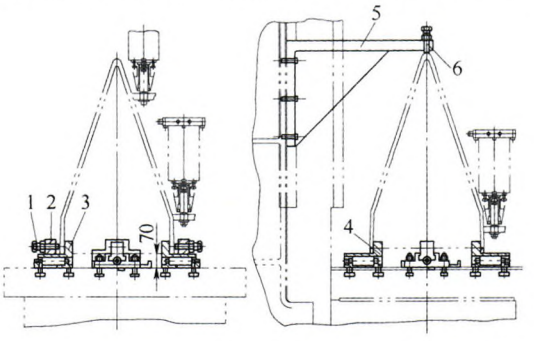


图 7

1、6.顶紧螺钉 2.顶紧座 3.卡爪 4.垫圈 5.压板

上安放一个30mm高垫圈4，陶瓷工件安放在垫圈4上，在陶瓷工件的上部固定压板5，压板与立车立柱联接，这样压板不会与方滑枕碍事，顶紧螺钉6拧紧可与*SR*20mm圆球面点接触压紧，实现陶瓷工件的定位和夹紧，可以进行外圆车磨加工。

5. 数控系统硬件和软件程序的设计

CK5116数控单柱立式车磨床进给采用交流伺服电动机驱动，配备高档数控系统，实现微量的直线、圆弧和抛物线插补运动，最小进给单位在0.005mm以内，定位精度在0.005mm以内，只有这样，磨削出来的各种锥面才具备理想状态。

光电隔离可以吸收滤波，抑制干扰信号的产生，使微机与强点部件不共地，阻断干扰信号的传导；也可采用闭环控制，进一步提高加工精度。磨削加工需要现场适时调整，磨头与工件的接触依靠手脉微调，最后尺寸依靠量具测量。采用KND数控系统，分辨率0.005mm，两轴联动，RS232通信接口。磨头旋转采用的是电主轴变频电动机，便于数控控制，*X*、*Z*轴采用交流伺服电动机控制。各继电器和电动机等电器元件，在启动和停止的瞬间产生的电磁噪声，将会对电气系统造成一定的干扰，故应采用抗干扰电路。

37° 38′ 30″ 直斜面的磨削，用绿碳化硅磨头，从图8内腔小端开始向大端磨削，数控编程如下：

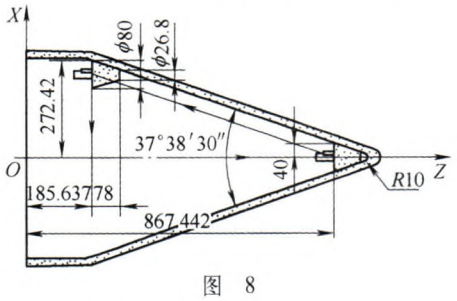


图 8

O0001；（程序号）

G50 S100；（主轴最高限速100r/min）

N010 G50 X310 Z800；（坐标预选）

N020 G00 U30 W100；（磨头接近砂轮修整器）

N030 G01 U－53.2 W－78 F0.15；（37° 38′ 30″ 锥度插补修砂轮）

N040 G28 X310 Z－100；（自动回原点）

N050 G50 X0 Z867.016；（磨头接近起始点）

N060 G90 U0.01 W－681.805 R－464.84 F20；（开始循环磨削，磨量0.005mm，冷却开）

U0.015；（循环共4次，2次）

U0.020；（3次）

U0.020；（4次）

N070 G00 X0 Z－80；（取消G90，磨头退刀）

N080 M02；（程序停止）

对于内腔抛物面的磨削，需用金刚石砂轮，只需将G01直线插补改为抛物线G06插补即可。对于G06插补为高级编程，是一种抛物线数字积分插补的算法，抛物线被积函数的形式非常简单，使得这种算法可以用软件实现，仿真运算表明，插补坐标点都落在理论抛物线上。

对于其他段的插补程序与上面的结构相似，只是直线插补、圆弧插补和抛物面插补的运用，将各段程序排号为O0001、O0002…O0006，在加工操作中具体运用即可。

6. 防护头内外腔形状的检测

陶瓷导弹头内外腔形状的检测可以在三坐标测量机上进行。检测内腔时陶瓷导弹头安装在内孔夹具上进行测量，用测头测量圆的直径，在每个圆上测量4～6点，然后轴向移动2～5mm再测量，利用三坐标测量机的软件功能将测量的直径显示在显示器上，计算机程序用近似曲线逼近可绘出轮廓线，便可知道内孔的形状和尺寸；同时利用陶瓷头与内孔夹具上部之间的空隙，可以将测头放入，检测大端外圆尺寸，在轴向距离100mm内再测另一个外圆尺寸，利用三坐标测量机的软件功能，外圆中心线可与内孔中心线进行比较，便知同轴度误差.考虑到两套夹具定位和磨削的一致性，这个同轴度就是外圆与内孔全长上的同轴度。如果检测外圆尺寸，只需将工件大端置于三坐标测量机的工作台上，按照检测内腔的方法测量外圆的形状和尺寸，然后将关键的内外腔尺寸标出由打印机打印输出，并将数据存入数据库，便可知道加工陶瓷头是否满足图样要求，如尺寸有偏差通过工艺改进，采取工艺措施调整切削程序使误差减小，最终达到图样尺寸要求。

7. 结语

通过对CK5116数控车磨专机的分析，完成了陶瓷工件内外腔的磨削加工设计，通过数控系统硬件设计和软件程序的编制，采用金刚石砂轮进行抛物面的磨削加工，满足了用户的特殊加工要求。

MW（收稿日期：20130316）