高硬度镶嵌式钢铝组合件高效精密车削加工工艺

孙武兵，黄元红，张甜甜，李昭，李根
湖北三江航天红峰控制有限公司　湖北孝感　432000

摘要：以高硬度镶嵌式钢铝组合件为例，针对其结构特点及切削加工难点进行工艺研究，分析组合件在车削过程中表面粗糙度、圆柱度不合格的主要原因。通过优化车床夹具、量化控制夹紧力以及运用硬态车削新技术的方式，优选刀具材料和切削参数，解决了组合件在车削过程中遇到的振动和变形难题，满足了设计精度指标要求，实现了高效精密车削加工。

关键词：高硬度；镶嵌式组合件；难切削材料；精密车削；车床夹具

1　序言

轴承内圈组合件中间为中空结构，加工难度大，传统工艺采用磨削加工的方法，效率较低。本文对镶嵌式精密框架组合件进行工艺研究，根据硬态数控车削技术的加工特点，制定合理、可行的加工方案，有效控制了零件加工过程中遇到的振动和变形问题，为后期高硬度材料硬态切削技术的推广奠定了基础。

2　轴承内圈结构及技术指标

轴承内圈如图1所示，由上罩、下罩及两个直径不同的钢圈3部分组成。上罩、下罩通过销钉、螺钉连接，钢圈通过过盈配合压装到组合件外圆上。上罩、下罩采用铸铝合金材料，组合件中间为中空结构，钢圈材料为GCr15轴承钢，淬火硬度为60～65HRC。

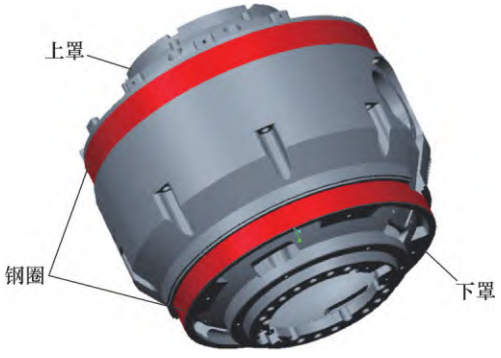


图1　轴承内圈

轴承内圈结构尺寸如图2所示，外圆$\phi170_{-0.025}^{0}$mm与$\phi182_{-0.029}^{0}$mm的圆柱度为0.005mm，同轴度为ϕ0.008mm，表面粗糙度值Ra=0.4μm。

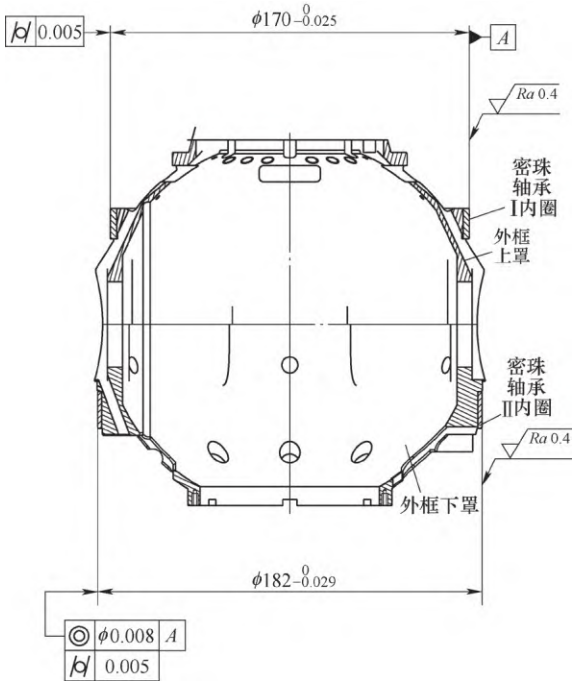


图2　轴承内圈结构尺寸

3　加工难点分析

（1）材料特性分析　GCr15轴承钢淬火硬度≥60HRC，为典型的淬硬钢。淬硬钢强度高、脆性大，几乎无塑性，导热系数低，切削时的切削力大、切削温度高，属于典型的难切削材料，普通刀

具即便是涂层硬质合金刀具也很难实现正常切削[1]。淬硬钢按传统的方法只能采用磨削加工。

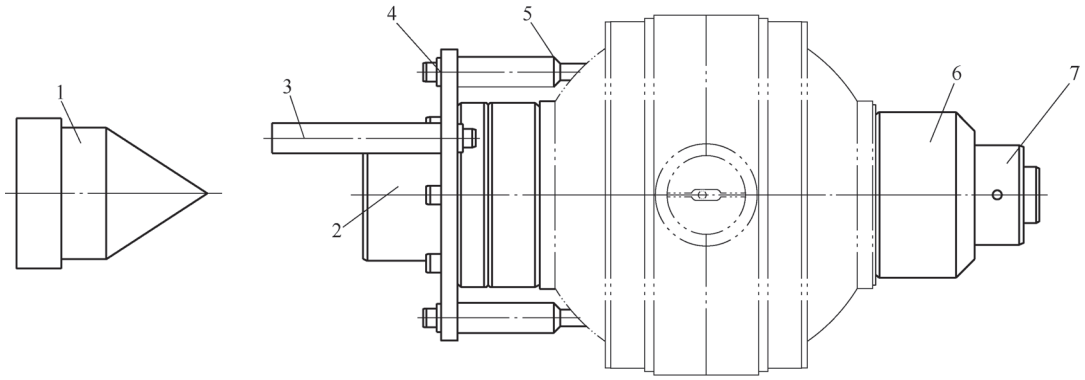
（2）结构特性分析　图2中，组合件为中空球状结构，框架材料为铸铝，零件端面夹紧部位壁厚5mm，最薄处仅2mm，属于薄壁零件，因装夹过程中极易变形，故组合件的装夹方式及夹紧力的控制是车削加工的难点。回转体装夹方法有夹持外圆、反撑内孔及心轴定位等，根据该组合件的结构特点，只可采用心轴定位。因加工部位的左右圈位置相距120mm以上，跨距大，两端定位孔接触面积小，装夹时仅靠两端孔壁接触支撑，故切削过程中整个结构的刚性差，极易引起振动，组合件的几何公差精度、表面粗糙度均难以保证。

4　工艺流程及工装设计

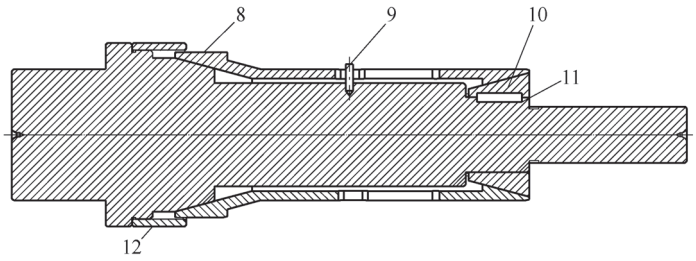
该镶嵌式组合件的工艺流程设计为：装配（上罩与下罩的组装）→钢圈与铝合金基体的压装→粗车钢圈外圆→热处理去应力→精车外圆。

根据零件结构、加工精度及硬态切削特点，选用高精度肖布林数控车削中心，设备刚性好，转速可达8000r/min，主轴径向圆跳动和端面圆跳动均≤3μm，满足硬态切削要求。

依据该组合件结构和设备条件，设计了车床夹具。组合件与夹具间的定位采用可胀心轴方式，两者之间无配合间隙，提高定位精度的同时控制了心轴的可胀量，防止零件内孔过分胀紧引起变形。夹具采用在组合件端面夹紧的方式，设有限位螺母，限定夹紧力，控制零件变形。车床夹具结构如图3所示。夹具设计制作后，安装到设备上进行精度检测，心轴基准外圆径向圆跳动量应控制在0.002mm以内，以满足零件加工精度要求。



a）自制主轴顶尖　　b）夹具与零件组装



c）夹具体和定位元件

图3　车床夹具结构

1—自制主轴顶尖　2—心轴主体　3—拨杆1　4—拨盘　5—拨杆2　6—限位螺母　7—压紧螺母
8—胀套　9—连接销　10—锥套　11—键　12—定位套

5　组合件不合格原因分析

高效车削研究过程中，首选高硬度、高耐磨性的立方氮化硼（CBN）刀具，易出现如下质量问题：①尾座端ϕ170mm外圆表面粗糙度值Ra=6.4μm，有明显车削颤纹。②两端外圆圆柱度0.006mm，不合格。原因分析如下。

5.1　表面粗糙度不合格的原因

零件表面颤纹一般是切削过程中出现振动所导致。工艺系统的振动从本质上划分为三大类：自由振动、强迫振动和自激振动。

（1）自由振动的影响　切削力的突然改变或其他外界力的冲击会引起自由振动。钢圈由GCr15轴承钢锻造毛坯加工而成，锻造后内部组织检测不存在裂纹、夹渣及隔层等缺陷，不会因材料缺陷而导致切削力突然改变，切削过程中也不存在外界力的突然冲击，故自由振动可忽略不计[2]。

（2）强迫振动的影响　产生强迫振动的因素包括：①机床传动零件的缺陷引起的振动。②切削过程不连续引起的振动。③工艺系统的刚性、旋转的工件和机床零部件不平衡时，因离心力在每转中改变方向而引起的振动。④外部振源传给机床的振动。

原因排查如下。

1）公司精密零件的加工均在肖布林数控车削中心上进行，零件加工精度稳定性好。因本项目研究前，对设备精度进行过检定，满足零件加工精度要求，故判定传动零件不存在有缺陷的情况。设备周围无其他振源传给机床。

2）因组合件外圆钢圈为连续性表面，不存在断续切削情况，故排除不连续切削引起的振动。

3）组合件试切时，对车床夹具心轴主体上基准外圆的径向圆跳动量进行复测，发现基准外圆径向圆跳动由切削前的0.002mm变化为了0.05mm，整个夹具出现了径向偏移。

针对此现象，对整个工艺系统的刚性进行分析。切削过程中的整个工艺系统由机床主轴、夹具、尾座顶尖、刀具和工件构成，其中主轴一端为卡盘夹持自制顶尖，尾座顶尖为高精度的弹性顶尖。组合件压装钢圈前，同样采用该车床夹具进行车削加工，切削铸铝材料时，切削力较小，夹具不存在偏移情况。压装钢圈后，硬态车削力增大，径向切削力大于主切削力，加上车床夹具的质量达15kg左右，导致工件旋转时与机床卡盘、尾座顶尖不平衡，离心力的作用在每转中改变方向引起振动偏移。同时对夹具结构进行分析，夹持在卡盘上的顶尖与夹具连接的部位是通过夹具上的拨杆带动的（见图3），夹具因切削力和自身质量的影响，引起旋转力不均匀，导致卡盘上顶尖与夹具定位中心孔配合精度降低，心轴旋转过程中与机床系统不平衡引起振动。

（3）自激振动的影响　系统本身引起的交变力作用而产生的自激振动，既与切削过程有关，又与工艺系统的结构有关。合理选择切削用量、刀具材料和几何参数，避开自振区域或抑制自振，可提高工艺系统刚性，增加工艺系统的抗振性能。

综上所述，引起振动的主要因素在于工艺系统的刚性、切削参数和刀具参数选择的合理性。

5.2　圆柱度不合格的原因

引起圆柱度不合格的因素有很多，主要包括工艺系统刚性、夹紧力及切削力。

（1）工艺系统刚性　该组合件长径比小，属于在两顶尖间进行短而粗的轴系车削。此时工艺系统的总变形取决于机床主轴前端头架（包括顶尖）、夹具及尾座（包括顶尖）的变形。车削过程中，随着切削作用点位置的变化，在切削力的影响下，工艺系统均产生一定的变形，引起圆柱度超差。

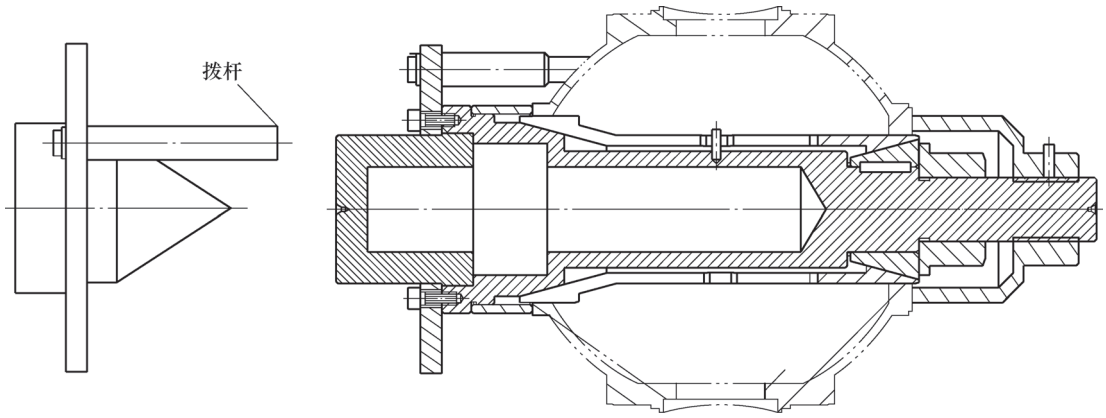
（2）夹紧力的影响　从车床夹具的结构看，设计时虽考虑采用限位螺母控制夹紧力，但在实际运用过程中，限位螺母的限位作用不可靠，随着端面夹紧力不断增加，由于组合件壳体端面为薄壁结构，刚性不足，因此限位螺母会随着端面的变形往前进。试验过程中进行了验证，完成外圆车削后，逐步松开拧紧螺母，同时检测外圆径向圆跳动量，因随着夹紧力的不断减小，外圆径向圆跳动量不断发生变化，故夹紧力控制不当易引起零件变形，造成圆柱度超差。

（3）切削力的影响　依据硬态车削原理，硬态车削过程中，刀具、切削参数的选择均会影响切削力，导致切削力的变化，对加工精度产生影响。

6　工艺改进

6.1　优化夹具结构

夹具设计的基本要求是具有足够的强度和刚度、较轻的质量，便于操作及安放稳定可靠。对车床夹具结构进行优化，改变拨杆位置，将拨杆与卡盘上的顶尖制成一体，通过机床主轴带动夹具旋转，减少中心孔的摩擦，同时对心轴采取减重措施，避免切削过程中高速旋转时惯性力的影响。将尾座弹性顶尖更换为高精度回转顶尖，将原A型中心孔优化为B型中心孔，既防止在长期使用时导致中心孔的磨损而影响定位精度，又提高了整个工艺系统的刚性。优化后的车床夹具如图4所示。



a）改制后的主轴顶尖　　b）夹具与零件组装

图4　优化后的车床夹具

6.2　夹紧力的量化控制

定位内孔的长度较短，与可胀心轴胀套接触面积较小，操作过程中限位螺母无法精准实现端面夹紧力的控制。试验加工时，夹紧力大小需要通过操作人员的手感进行把控，夹紧力大了则零件变形大，夹紧力小了则切削时零件不稳定，引起振动，导致零件加工精度不稳定。为了方便直观地控制锁紧螺母夹紧力的大小，选用力矩扳手。经试验研究，摸索出夹紧力范围为20～30N。

6.3　合理选择刀具

（1）刀具材料的选用　适用于硬态车削的刀具材料有立方氮化硼（CBN）、陶瓷和HiPIMS高硬度涂层硬质合金。硬态切削刀具材料切削性能对比见表1。

表1　硬态切削刀具材料切削性能对比

序号	刀具材料	切削特点及性能
1	立方氮化硼（CBN）	高硬度、高耐磨性，切削速度高
2	陶瓷	化学稳定性好，硬度、耐磨性较CBN差
3	HiPIMS高硬度涂层硬质合金	切削刃锋利，高硬度、高韧性，切削速度较低

通过加工对比试验，选用CBN刀具进行粗加工，充分发挥该材料刀具的切削性能，可采用高转速和较大背吃刀量，提高加工效率；选用HiPIMS高硬度涂层硬质合金刀具进行精加工，采用小的背吃刀量和较低的转速，保证加工精度。

（2）刀片形状及刀具参数的选用　硬态车削刀具几何参数的特点是较大的负前角和负倒棱。倒棱宽度和倒棱角度增大时，迫使切屑流经倒棱区域的阻力和切削力增大；负前角增大时，加大了负倒棱对工件的挤压和切屑在前刀面的堆积，使切屑与前刀面摩擦增大，切削力增大[3]。经试验加工，外圆粗车与精车选用的刀具参数见表2。

表2　外圆粗车与精车选用的刀具参数

刀具材料	刀片形状	刀尖圆弧半径/mm	前角/（°）	后角/（°）	负倒棱宽度/mm	备注
立方氮化硼（CBN）	三角形	0.4	－8～－5	5～15	0.1	粗加工
HiPIMS高硬度涂层硬质合金	55°菱形	0.2	15～18	5～7	不带负倒棱	精加工

6.4　选择合理的切削参数

（1）切削速度的选择　切削速度在一定范围内易产生自激振动，避开此范围即避开自振区。选择转速时，尽可能使旋转工件的频率远离机床有关元件的固有频率，使工艺系统各部件在准静态区域或惯性区域运行，避免共振。硬态车削速度的提高会降低切削力，控制切削力引起的振动。依据相关资料推荐的切削用量的选择范围，背吃刀量a_p为0.1～0.3mm，进给量f为0.05～0.3mm/r，选用背吃刀量a_p=0.1mm，进给量f=0.05mm/r，分别采用CBN刀片（刀尖圆弧半径0.4mm）和HiPIMS高硬度涂层硬质合金刀片（刀尖圆弧半径0.2mm）对切削速度进行了试验。钢圈外圆表面粗糙度试验结果显示，CBN刀片在转速220～340r/min区间表面粗糙度值小，HiPIMS高硬度涂层硬质合金刀片在转速120～220r/min区间表面粗糙度值小。表面粗糙度值越小，对应的圆柱度值越小，精度越高。钢圈外圆圆柱度试验数据见表3。

表3　钢圈外圆圆柱度试验数据

序号	转速/（r/min）	圆柱度/mm			
		CBN刀片		HiPIMS高硬度涂层硬质合金刀片	
		ϕ182mm外圆	ϕ170mm外圆	ϕ182mm外圆	ϕ170mm外圆
1	80	0.012	0.013	0.008	0.01
2	120	0.010	0.012	0.005	0.007
3	140	0.009	0.010	0.003	0.004
4	180	0.005	0.006	0.003	0.004
5	220	0.004	0.005	0.003	0.003
6	260	0.004	0.004	0.004	0.004
7	300	0.005	0.005	—	—
8	340	0.004	0.004	—	—
9	380	0.007	0.005	—	—
10	400	0.009	0.006	—	—

（2）进给量f和背吃刀量a_p的选择　当采用CBN刀片加工时，f较小时表面粗糙度值增大，随着f的增加表面粗糙度值减小，当f增大到一定范围后，切削力增加，表面粗糙度值慢慢加大；背吃刀量与振幅成正比关系，随着背吃刀量的增加，振幅增加，颤纹严重，表面质量变差。当采用HiPIMS高硬度涂层硬质合金刀片加工时，随着f值和背吃刀量的增大，表面粗糙度值增大。试验选用的切削参数见表4。

表4　试验选用的切削参数

刀具材料	进给量f/（mm/r）	背吃刀量a_p/mm	备注
CBN	0.10～0.15	0.2～0.3	粗加工
CBN	0.05～0.08	0.10～0.15	半精加工
HiPIMS高硬度涂层硬质合金	0.03～0.05	0.03～0.05	精加工

6.5　切削液的选择

硬态车削技术的特点之一就是切削温度高，导致刀具寿命短。在试验过程中，切削液的选择对零件表面加工质量和刀具寿命起着至关重要的作用。试验加工得出，为了提高刀具寿命，粗加工、半精加工可选用切削液；由于切削液的冷却作用，使零件表面切削温度不稳定，影响了加工质量，故精加工时采用干切。

7　结束语

通过对高硬度镶嵌式精密框架组合件高效制造工艺进行研究，找出影响零件加工精度的主要因素，采用不同的工艺措施及手段，有效控制了零件加工过程中的振动、变形，最终保证了组合件的加工精度。

本研究突破了高硬度材料传统磨削加工方法的局限，创新数控高效车削技术，掌握了高效硬态数控车削技术的加工特点，制定了合理、可行的加工方案，积累了高硬度材料的高效车削加工经验，为后期高硬度材料硬态切削技术的推广奠定了基础。

参考文献：

[1] 郑文虎，张玉林，詹明荣. 难切削材料加工技术问答[M]. 北京：北京希望电子出版社，2001.

[2] 孟繁智. 机械加工先进工艺窍门与新技术应用图示例解及常用技术资料速查手册（二）[M]. 哈尔滨：黑龙江文化电子音像出版社，2008.

[3] 孟繁智. 机械加工先进工艺窍门与新技术应用图示例解及常用技术资料速查手册（三）[M]. 哈尔滨：黑龙江文化电子音像出版社，2008.

MW 20250429

专家点评

文章介绍了轴承内圈组合件的结构特点和加工难点，针对组合件车削过程中出现的问题进行原因分析和工艺改善，通过优化车床夹具、控制夹紧力、采用硬车削技术、选择合适的刀具材料和切削参数等工艺改进措施，解决了组合件车削中产生的振动和变形难题。

文章观点明确、分析透彻，亮点是镶嵌式钢铝组合件的硬态车削技术，突破了传统工艺中高硬度材料只能磨削加工的局限，创新采用硬态车削技术并掌握高效加工的特点和要领，为硬态切削技术的推广应用积累了经验。