超精密加工的支持环境

■ 中国航空精密机械研究所 （北京 100076） 荣烈润
■ 哈尔滨第一机械集团有限公司 （黑龙江 150056） 魏传利

摘要： 本文介绍了各种影响超精密切削加工精度的环境因素及其消除或减弱的对策。

为了适应超精密加工的需要，获得微米甚至纳米级的加工精度，必须对它的支持环境加以严格的控制。这里的支持环境是指各个外部环境（超精密加工工艺系统、工人的操作经验及技术水平除外）。它们主要包括空气环境、热环境、振动环境以及声、光、电场、电磁环境等。各种不同超精密加工方法，需要对不同的支持环境进行不同程度的控制。对这些支持环境方面需要控制的品质要求大致如表1所列。

超精密加工所要求控制的支持环境都只是在某一范围内的局部环境，为室内的环境或加工区附近的局部环境。随着超精密加工所能达到的精度不断的提高，对要求加以控制的支柱环境方面也会越来越多，要求也会越来越高。

表1 构成支持环境的诸方面及控制要求

支持环境	控制要求	支持环境	控制要求
空气环境	洁净度、气流速度、压力及有害气体等	声环境	噪声、频率及声压等
热环境	温度、湿度及表面热辐射等	光环境	照度、眩光及色彩等
振动环境	频率、加速度、位移及微振动等	静电环境	静电量、电磁波及放射线等

一、超精密加工环境基础设施——洁净室

据美国联邦标准，洁净室的定义为：将室内空气中尘埃、微粒、压力、温度、气流的分布和其形状与速度等控制在一定范围内而采用积极措施的方向。尘埃为肉眼不能看到的微小的灰尘，一般以0.5μm为基准。如用通用的空气过滤设备是不能消除如此小的灰尘的。洁净室要使用叫做HEPA（超高性能过滤器）进行净化，产生几乎不含灰尘及微粒的洁净空气。

在大规模集成电路元件制造过程中，如果在硅片上混入了空气中的尘埃杂质，它就可能会在后续的工序中成为不可控制的扩散源而严重影响产品的合格率。

因此，为了保证超精密加工产品的质量，必须净化周围的空气环境，减少空气中的尘埃含量，即控制空气的洁净度。空气洁净度是指空气中含尘埃量多少的程度。含尘浓度越低则空气洁净度越高，规定以空气洁净度级别来区分之。

洁净室的四原则为：

（1）不带灰尘进入洁净室。①穿无尘工作服和经“风淋”后进入洁净室。②持物进室前，物品须洗净，并经由传送箱送入室内。③防止不同压差的污染空气混入洁净室。④修建密封性极好的房屋。

（2）不要产生微细灰尘。①缩短作业路线，不作无用的动作。②室内选用产生灰尘少的材料装修。③限制易产生灰尘的物品及装置进入。

（3）不要使灰尘停留。①选用难以积存灰尘的材料进行容易清扫的内部装修。②采用不易带电的材料，防止浮游微粒的粘附。

（4）不使产生的微粒扩散并进行排气。①在污染源附近进行排气。②供给过滤器的空气尽量要净化。③使室内空气层流化，不让污染空气扩散并及时排除。

此外，从防火角度来看，烟的蔓延较快，在底层，即使天棚上装有通用的烟雾报警器，有时也会出现报警功能失灵的问题。再有，对操作者来说，身穿宇宙服那样的防尘服，在密封的房间内工作，也很难说是舒适的环境。由于人的活动产生的灰尘最大，因此，开发无人化生产方式，未来会有增加的趋势。

在空气环境中主要应控制的品质除了“洁净度”之外，还有气流速度、压力及有害气体等。

二、超精密加工的设施环境

超精密加工的环境因用途不同而有所不同，为此，需要建立符合各自要求的特定环境。为了实现这种特殊性，需要将对应各种环境条件的技术进行综合配套。超精密的洁净环境不只是确保空气的洁净度。构成超精密加工环境的条件如图1所示。

在规划建筑时，超精密洁净环境不要单独设置，而是采取空间序列化（见图2）。通过多层次的保护层，创造出即使在环境遭到紧急破坏时，也可保护住超精密环境的系统，以构成在整体设施中有部分精密环境，其中包含着超精密环境。

三、构筑超精密加工环境的技术

超精密加工环境的主要部分有以下几个方面：

1. 空气环境的净化

洁净室技术得以实现是由于开发出能过滤亚微米细粒的超高性能的HEPA过滤器。它采用光散射法，具有过滤0.3 μm微粒达99.97%以上的能力。在超级洁净室的环境中，使用一种比上述过滤器更好的ULPA过滤器，它能过滤0.1 μm微粒达99.999%以上。而现在正在开发的一种过滤器可对0.05 μm微粒过滤达99.999 999%以上。

2. 温湿度的环境

在要求纳米级加工程度的超精密环境中，温湿度也是基本要求的环境因素。因为温度、湿度稍有变化均对加工精度有极大的影响，两者有密切的关系。为了严格控制湿度，对温度也要进行严格控制。表2给出了美国209B标准温度和湿度的控制建议。

一般性生产设施的温度、湿度条件如表3所示。

表2　温度和湿度的控制建议

	温度/℃			湿度（%）		
美国209B标准	范围	推荐值	波动值	最高	最低	波动值
	19.4～25	22.2	±2.8，特殊需要时为±0.28	45	30	±10，特殊需要时为±5
趋势	–	–	±0.1	45	30	±2

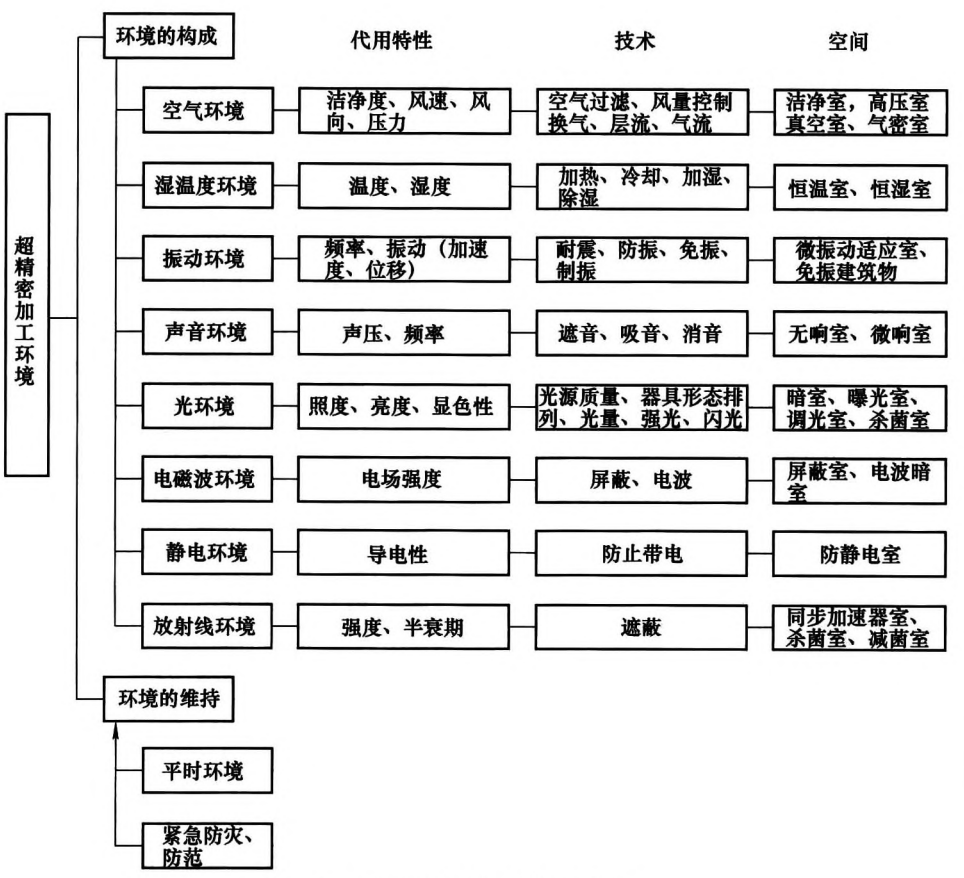


图1　构成超精密加工环境的条件

表3　生产设施的温湿度条件示例

加工过程	温度/℃	湿度（%）
精密机械加工工厂	(20～26)±0.5	50以下
半导体加工	23±1	45±5
半导体装配	24±3	55±5

通常，为了保持洁净室的洁净度，须加大空调机的供气量，使室温的变动幅度缩小，但需要事先充分地掌握好机器的发热量。

3. 气流和压力的保持

为了持续地维持超精密加工的环境，控制气流和保持压力是重要的因素。

（1）气流的控制：根据洁净

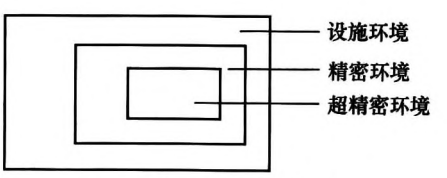


图2　超精密加工的环境层次

的气流流向可以把气流分为如下方式。①非层流方式（常规的紊流方式）。将经过超高性能过滤器（HEPA）净化的空气，用普通的空调方式，由天棚吹进室内，再从地面或接近地面的墙壁将空气吸出，用洁净的空气稀释室内灰尘的浓度，从而净化空气。由于空气的流向不一样，故叫做非层流方式（见图3）。这种方式适用于洁净度低（1 000～100 000）级的洁净室，是建设费及运转费都很便宜的方式。②层流方式（单向气流方式）。使室内气流以均匀的速度向一个方向流动的方式，让洁净的空气直接流过作业区域，用洁净的空气冲洗灰尘，可得到很高的净化度。这种方式叫做层流方式（单向气流方式）。它适用于洁净度高（100级以上）的洁净室，但其建设费用和运转费用都是很高的。这种方式又分为使气流垂直流动的垂直层流方式和使气流水平流动的水平层流方式。垂直层流方式：整个天棚装设过滤器，整个地面作为吸气口，使气流由天棚流向地面，在洁净室的上部空间如果不产生灰尘，则整个洁净室就成为高度净化的环境。采用这种方式时，作业区和机床的布置要认真研究。另外，地板下应留有空间，形成了高台（见图4）。水平层流方式：在一侧整面墙上安装HEPA过滤器并吹进空气，而将其相对面的墙壁作为排气口，空气以水平方式流过，室内上部分可获得高洁净度的空间。但由于底层的空气洁净度低，所以加工作业时人与机器的布置必须进行充分考虑（见图5）。③风洞式净化方式。这是一种将一个单元或洁净工作台连接组合的方式，是与制造设备生产线组合而成风洞式的洁净室。它使用的风量少，整个装置比较小。其优点是容易维修，建设费、运转费及管理费都比全面流层方式便宜，其缺点是生产设备的尺寸和形状受到限制，人和物的活动路线也有限制（见图6）。

（2）室内压力的保持：为保持超精密加工环境内的洁净度和温湿度，需要使室内的压力比外部高，即所谓正压，以防止外部环境的污染空气和不同温湿度的空气侵入室内。

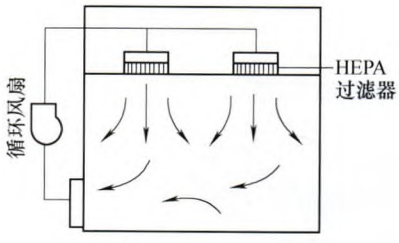


图3　非层流方式

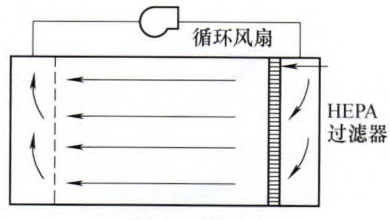


图5　水平层流方式

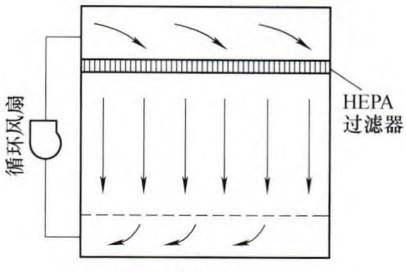


图4　垂直层流方式

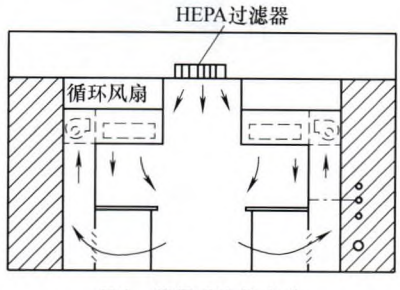


图6　风洞式净化方式

为保持室内压力为正压，空气的输入量必须比排出量大。为此，正确掌握从作业空间排出的气量很重要。为保持室内与室外的稳定压差，需要设置“平衡阻尼器”来调整压力。这个压差一般为1.25 mm水柱，但现实设计时，采用表4所示的压差值。

表4　必要的压力差（单位：mm水柱）

相应的场所	最低压力差
不同级别洁净室相互间	0.5
洁净室与准净化室	1.0
洁净室与一般工作室	1.5

通常，将洁净度最高的室内压力保持在最高，而对洁净度低的洁净室的压力则逐次降低。

4. 振动环境

超精密加工对振动环境的要求越来越高，限制越来越严格。例如在精密磨时，如果有振动干扰，就会产生多角形的轮廓形状而影响加工精度，表面粗糙度也达不到镜面要求。只有将磨削时的振控制在1～2 μm，才可能获得R_a=0.01 μm以下的表面粗糙度值。

超精密加工的质量（加工精度及表面粗糙度）不但与振动干扰的振幅有关，而且与振动干扰的频率有关。尤其是频率<70 Hz的振动干扰严重地影响加工表面质量。所以较低频率振动的振幅应控制在0.125 μm以下，而较高频率振动的振幅应控制在0.25 μm以下。

超精密加工对微小的振动干扰也极为敏感，对其构成威胁的微振动，其振动加速度为2×10^{-2} m/s^{2}以下，振动振幅为5 μm以下，频率在0.5～70 Hz之间的情况较多，这种微小振动属于所谓暗振动，即“常时振动”的范围，主要来自于室内振动、室外振动及自然界振动。

这些微振动源通过不同途径传播到超精密加工区域而产生影响。所以必须在搞清主要振源的基础上，分析其可能的传播途径，采取积极的预防及隔离措施，以消除振动干扰的影响，保证超精密加工对振动环境的要求。

为保证超精密加工的正常进行，必须采取有效措施消除振动干扰的影响，其主要途径如下：

（1）内部振动干扰的消除——防振。①提高设备回转零件的动平衡精度。②减少设备传动系统的振动干扰。③减少液压系统的干扰。④提高加工设备的抗振性。

（2）外界振动干扰的消除——隔振。外界振动干扰常常是独立存在而不可控制的，为交通运输产生的振动干扰，只能采取各种隔离振动干扰的措施，阻止它们传播到工艺系统中来。最基本的隔振措施是采取远离振动源的办法，使对振动敏感的设备不受影响。超精密加工的隔振措施常常是多层次的。首先洁净室外甚至整个车间都应当建筑在一个良好的隔振地基上，然后在这个隔振地基的基础上再安放隔振的弹性材料或隔振元件，以达到更好的隔离振动干扰的目的。

5. 噪声环境

对超精密加工来说，操作者长时间在封闭的洁净室中工作，人的情绪受噪声的影响将更为严重，因此必须重视噪声的影响。

洁净室噪声的判断指标：一般在动态时不超过70 dB（A），最高不超过75 dB（A），空态时紊流洁净室不超过60 dB（A），层流洁净室不超过65 dB（A）。

对噪声进行控制，首先应从噪声源入手，尽量减少噪声源或降低噪声辐射；其次就是在噪声传播的过程中采取控制措施，它们包括隔声、吸声及消声等方法。

6. 其他环境

（1）电磁波环境。对来自测量机和加工机床以外的电磁波噪声，抗干扰性能极弱，会造成误动作及损坏。为此，要求修建能屏蔽电磁波的工作室。

（2）静电环境。由于静电会造成半导体元件损坏，胶片感光、出现气泡以及粘灰等造成生产故障，为此要采取措施，防止物体带电。

（3）此外，还必须充分考虑到光、声和放射线环境的影响。

为了适应现代技术的高速发展，设施环境必须要适应制造工艺不断变化的要求。

某种超精密加工作业或方法，通常都会对几种支持环境提出要求，因此就出现了恒温洁净室、恒温防振洁净室及恒温防振无响洁净室等。随着超精密加工的不断发展，对洁净室的性能及要求将越来越高、越来越多。

四、典型案例分析

图7给出了一个考虑比较全面的层流式洁净室的剖面设计情况。在本设计中，从建筑角度看，它的空间利用合理、布置紧凑，无论是空气、水和工作气体的送、回管路安装及照明、电器的布线及维修都比较方便。从功能角度看，除了保证洁净度、温湿度外，还采用了措施使地面不传播振动，使室内没有噪声，使照明不产生眩光，使人体避免静电电击等，创造了一个较为完全的超精密加工的支持环境。

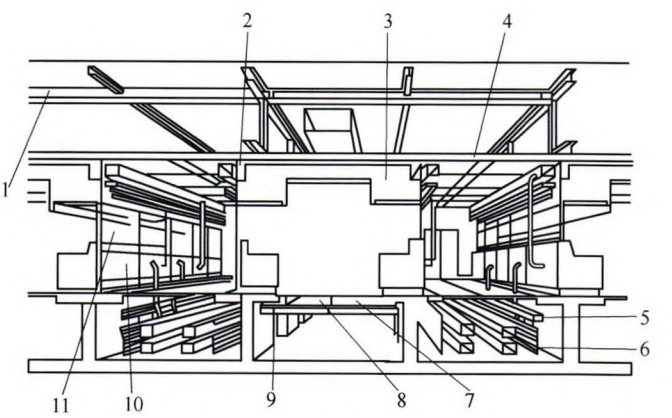


图7　层流洁净室的剖面设计

1.双梁结构法（方便柔性导管、容易悬挂净化装置，顶棚上有便于维修的空间）
2.方便起吊净化装置的构件 3.低噪声型洁净单元 4.便于维修检验 5.实用配管
6.排气管 7.防止带静电的筛条 8.不产生闪光的照明
9.非基座工作法（柔性地板下的有用空间、不传播走步振动的地面）
10.便于实用配管控制盘的安装 11.方便维修控制盘

MW（收稿日期：20140718）