

一种新型的垂直单向流洁净室

单向流（平行流）洁净室最早在 1961 年出现在美国，叫层流洁净室。这种洁净室的出现，对于空气洁净技术来说，是一个重要的里程碑，使空气洁净技术发生了飞跃，使创造异常洁净的环境成为可能。单向流洁净室又可分为垂直单向流洁净室和水平单向流洁净室，本文主要介绍垂直单向流洁净室。

1 垂直单向流洁净室原理

垂直单向流是高级别洁净室应用最广泛的一种气流流型。在洁净室内高效空气过滤器(或超高效空气过滤器)布置在顶棚或侧面，从送风口到回风口，气流流经途中的断面几乎没有什么变化，加上送风静压箱和高效过滤器的均压作用，使得全室断面上的流速比较均匀，而至少在工作区内流线单向平行，没有涡流。干净的气流不是一股或几股，而是充满全室断面，所以这种洁净室不是靠参混稀释作用，而是靠推出作用将室内脏空气沿整个断面排至室外，从而达到净化室内空气的目的^[1]。空气经架空地板回至循环风机，从而形成上送下回的垂直单向流流型。当房间宽度小于等于 6m 时，也可以在侧墙下部设回风口形成上送下侧回的气流流型，这种方式基本上也属于垂直单向流流型^[2]，其原理图如下图所示：

2 单向流的三要素

单向流的形成除了要满足气流充满洁净室或洁净区，还有三个要素：气流速度、气流的不均匀度、气流的平行度。而且对三要素均有严格的要求。

1、气流速度

气流速度的选择原则应该使整个气流均匀流动不发生滞留区。气流速度应能抵抗人员活动、热浮升的干扰，对于垂直单向流洁净室横断面的断面风速 V_d 可参考下述数值选用^[2]：

- a) 室内无人或经常处于无人状态 0. 1~0. 15m / s；
- b) 一般情况 ISO1~4 级 0. 25—0. 35m / s, ISO5 级 0. 2~0. 35m / s；
- c) 有上升热气流(流速为 V_r)时， $V_d > V_r$ ；
- d) 考虑人员舒适 $V_d < 0. 5m / s$ ；
- e) 工艺有特殊要求时按工艺要求确定。

2、气流速度的不均匀度

洁净技术发展初期，对气流的不均匀度要求很严格。美国 FS209B 规定：不均匀度在±20%以内。此规定没有说明以那个速度为基准值，是设计风速还是断面风速的实测平均值。一般认为其准值是断面实测的平均风速。

美国 FS209 以后，删掉了气流不均匀度的要求。这显然是长期实践得出的认识。从长期对洁净室的测试发现这一要求基本达不到。我们知道，出口气流除射流的主体段之核心部分，气流速度相等，流线平行外，其它部分均不可能。由于过滤器滤料密度不均，过滤器送风静压箱压力不均，及由于相邻高效过滤器边框形成的无风区，相邻过滤器出风搭接处的风速与过滤器表面的出风风速也不相同^[3]。

3、流线的平行度

各种规范都规定单向流的一个要素是气流平行。这一点到目前为止仍被坚持。然而实践证明这也是完全没必要的。我们知道，只要整个气流中的流线（迹线）不交叉就不会形成涡流区。尘粒就会沿着迹线（流线）排走，而不会被滞留，或改行其它迹线。

那么，两个流线之间在什么情况下形成涡流呢？对此，尚无定论。流体力学中的渐扩管的局部阻力损失，经推算当扩散角为 $5\sim 8^\circ$ 最小。这就意味着当扩散角为 $5\sim 8^\circ$ 时只有流速分布改变形成的损失，而基本无漩涡区损失。所以理论上当两个流线的夹角小于 $5\sim 8^\circ$ 时，则不会形成涡流；由此推论只要送风口的出流中，相邻的流线扩张角小于 $5\sim 8^\circ$ ，整个气流沿单一趋向流动仍可形成单向流^[3]。

除了要满足单向流洁净室 3 项特性指标的要求外，还应满足《洁净室施工及验收规范》(50591—2010)规定的回风口风速不应大于 2.0m/s ，并且回风口高度和洁净室室宽的比值应大于或等于 0.1 的条件。在一般应用中，回风口设在低于工作区下限高度 0.8m 以下^[4]。

3 垂直单向流洁净室新技术

1、全顶棚送风、两侧下回风的洁净室

常规的垂直单向流洁净室大多采用顶棚满布高效过滤器送风，全地板格栅回风。这种洁净室的特点是：可以获得均匀的向下单向平行气流，因而自净能力强，能够达到最高的洁净度级别，不仅工艺设备可以任意布置，而且可简化空气净化设施。但是对于全地板格栅回风，地板给人的视觉不好，行走（特别是女性）和放置物件都有不稳的感觉，微小东西又容易掉落到地板下面。所以这种地板不利于垂直单向流洁净室的推广使用。为此需要对这种回风方式加以改进，就出现了全顶棚送风两侧下回风的洁净室。全顶棚送风相对两侧墙下回风式洁净室是传统的垂直单向流洁净室的变型，也被称为准单向流洁净室。这种送、回风方式可造成室内良好的气流流型，室内大部分区域(包括人的工作区)处于主流区，要求的洁净度指标可在较小的送风量下达到。显然，它是一种比较理想的气流。该系统的气流组织形式室内流场分布如下图^[5]：

4 关于垂直单向流洁净室的经济性比较

国内外大量研究表明，洁净室的洁净度主要取决于合理的气流组织和高效过滤器的效率。对气流而言，单向流无疑是最佳的气流流型，因为它可以达到高级别洁净度。当然低级别洁净度可用非单向流。典型的垂直单向流流线平行，同一高度上尘粒排走的路径相同而且最短。当然垂直单向流是最佳气流。

但是对于顶棚满布高效过滤器送风，全地板格栅回风系统。但这种系统也有明显的缺点，除了上述提到的视觉效果不佳外；由于使用了格栅地板。这种地板一般用铸铝、塑料、钢材等制做，代价是比较高的，采用格栅地板不仅耗用空间而且其造价约占单向流洁净室室内装修费用的 $30\%\sim 50\%$ ，因此该系统的造价很高，不利于垂直单向流洁净室的推广使用。而全顶棚送风两侧下回风的洁净室，正是克服了上述缺点，因此这种洁净室因其相对低廉的造价以及较佳的流型受到人们的欢迎。

5 系统使用场合

由于垂直单向流洁净室主要应用于高洁净度等级的。无论是以无生命微粒的控制为对象工业洁净室；还是以控制有生命微料（细菌）与无生命微料（尘埃）对工作对象的生物洁净室，该系统都是适用的，但是由于采用了两侧下回风，为了获得理想的气流分布，规定房间宽度小于 6m 。

6 前景展望

与顶棚满布高效过滤器送风，全地板格栅回风系统相比，全顶棚送风两侧下回风系统具有相对低廉的造价以及较佳的流型，使室内大部分区域(包括人的工作区)处于主流区，洁净室要求达到的净度指标可在较小的送风量下达到。比常规的垂直单向流洁净室和水平单向流洁净室更具有很大的优越性，因此，该系统广泛用于医疗卫生、制药、化学实验、精密机械工业、电子工业等领域。可以预测随着经济的发展，对洁净室的要求会越来越高，该系统会有广阔的应用前景。