



滤池气水反冲洗机理探讨

李圭白 刘俊新 郑庭林

摘 要: 本文根据试验结果, 通过分析单独气反冲洗和气水同时反冲洗时气泡对滤层的影响和滤料移动情况, 对气水反冲洗机理进行了探讨。

关键词: 滤池; 气水反冲洗; 机理

过滤是水质净化的基本单元操作。滤池过滤时, 污物被截留于滤层中; 反冲洗时, 污物被由滤层中清除出去, 以恢复滤池的过滤能力。滤池常用的反冲洗方法有水反冲洗和气水反冲洗两种。气水反冲洗的效果要比水反冲洗好, 且节水节能, 故正在我国得到推广。下面是笔者对气水反冲洗机理的探讨。

1. 单独气反冲洗

最常见的气水反冲洗方式, 是先单独用气进行反冲洗紧接着用水反冲洗。

当单独用气反冲洗时, 在滤层中能形成直径大于数毫米的气泡。气泡在水中的上浮速度较快, 通过对有机玻璃制的模型中上浮气泡的追踪测定, 当气泡直径 $D=5\sim 10\text{mm}$ 时, 上浮速度 $v=260\sim 270\text{mm/s}$; $D=20\sim 30\text{mm}$ 时, $v=330\sim 360\text{mm/s}$; $D=40\sim 50\text{mm}$ 时, $v=380\sim 400\text{mm/s}$, 其值比水反冲洗时的水流速度要高 10 倍以上, 它必然会产生更强烈的搅动。

气泡在上浮过程中, 随上升速度增大, 气泡的上半部分水的附面层逐渐形成并发展。在这部分, 水压力沿球面逐渐降低。在气泡的下半部分水压力回增, 附面层因克服粘性摩擦损失大量动能, 因而附面层便开始脱离气泡, 在气泡尾部形成旋涡状尾迹。尾迹对周围水层扰动的大小与气泡直径有关, 气泡直径大, 扰动范围大。当气泡达到水面时, 气泡破裂, 尾迹也随之消失^[1]。

在气反冲洗时, 进入砾石承托层的空气是以气泡形式存在的。由于承托层砾石的粒径较大, 气泡不能使砾石发生移动, 因此气泡绕砾石的空隙上升。气泡进入滤料层后, 滤料颗粒能被气泡所移动, 处于气泡上部的颗粒被挤到气泡两侧。由于尾迹内的压力低于周围的压力, 所以在气泡的下部有一个和气泡速度接近的尾涡, 由强烈翻滚的颗粒所组成。在上升过程中, 气泡尾迹内的颗粒与周围的颗粒不断进行交换。而且当气泡及尾迹上升后, 留下了空缺, 周围的水会迅速移向空缺, 并将部分滤料也带人空缺。当下一个气泡经过时, 又将滤料挤到两侧, 气泡和尾迹过后, 周围的水和滤料又会来填补空缺, 如此反复, 使气泡周围滤料产生振动, 振动大小与气泡直径有关, 气泡直径大则周围振动大, 滤层搅拌激烈。当气泡冲出滤层进入水层后, 尾迹内的颗粒随气泡一起上升, 并不断被周围的水交换出来而落回到滤层表面, 当气泡达到水面而破裂后, 尾迹内剩余的颗粒便落回到滤层表面。

气泡通过滤层的情况还与滤料颗粒之间的摩擦阻力有关。摩擦阻力又正比于颗粒间的接触压力。设静止滤层如图 1 所示, 考察滤层深度 L 处的 $A-A$ 断面上滤料颗粒间的接触压力。其值等于单位滤层面积上滤料在水中的重量, 可以下式表示^[2]:

$$p = (\rho - \rho_0) g (1-m)L \quad (1)$$

式中: p ——滤层深度 L 处滤料颗粒间的接触压力;

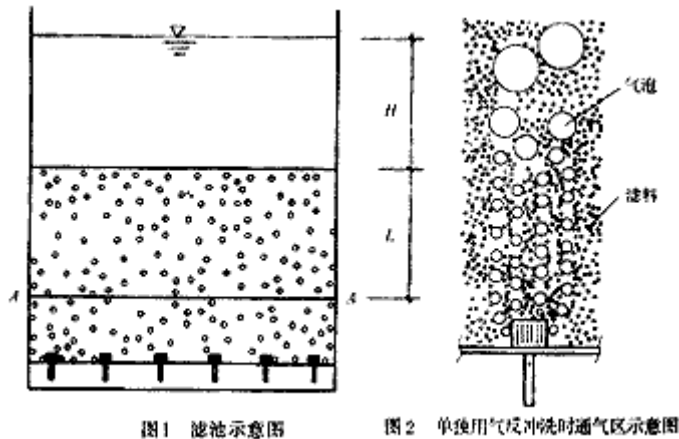
L ——滤层深度;

r ——滤料的密比

ρ_0 ——水的密度;

g ——重力加速比

m ——滤层的孔隙度。



由式(1)可见，滤料间的接触压力或摩擦阻力随滤层深度增大而增大。

当单独用气反冲洗时，气泡由配气系统首先进入滤层的下层，气泡上升时虽然可以将滤料挤开，但由于滤料间摩擦阻力较大，形成的气泡通道较小，所以在滤层内产生的搅动也小。在试验中观察到，通道的直径大约为 5mm 左右。气泡对通道周围大约数毫米的范围内具有振动作用。在气泡上升过程中，有时几个气泡会聚合到一起。但由于受通道的限制，它不能形成大的球形气泡，而是以圆柱形气泡上升。当气泡达到滤层表层时，表层滤料间的摩擦阻力比滤层内部小，因此柱形气泡在表层可迅速变成球形，而且各通道的气泡有较多的机会聚合成更大的气泡(见图 2)，所以在试验中可以观察到，气泡通过滤层表层时，表层的滤料强烈地翻卷，能使周围更大范围的滤料振动。

由上可知，由于气泡在滤层中的运动速度很大，能在气泡周围及其后部引起强烈的搅动，所以能获得远比单独用水反冲洗要好的冲洗效果。

气水反冲洗滤池的配水配气系统主要有滤头式和穿孔管式系统。不论滤头式还是穿孔管式系统，滤头之间或孔眼之间都有一定的距离。因此，在气水反冲洗时，在滤头或孔眼上面的滤层中有气泡通过，而在滤头或孔眼之间的滤层中没有气泡通过。根据这种情况，可将整个滤层分为两个区域，即有气通过区和无气通过区。显然，有气通过区的冲洗效果将远高于无气通过区。

试验发现，气泡通过滤层时，有一定的携砂作用，即气泡上浮时，其后部尾迹的液体将随之运动，而进入气泡尾迹的滤料，能随气泡移动一定距离，然后被另外的滤料替换；后进入气泡尾迹的滤料继续随气泡运动，从而在通气区内形成一个向上运动的砂流。非通气区内的滤料，则不断向下运动以填补通气区内的空位，如此在整个滤层内产生了滤料的循环运动。

上述滤料的循环运动，可在用透明有机玻璃做的滤池模型中清楚地观察到。模型为煤、砂双层滤料滤池，其颗粒级配情况见表 1。当单独用气反冲洗时，可以看到砂被气泡大量带到煤层中，很多砂可达煤层表面，并与煤混合。随着冲洗时间的延长，煤层内的砂越来越多，煤也向下移动进入砂层，但只有少量煤能达到砂层深处。

对于单独用气反冲洗，由于滤料间摩擦阻力较大，在滤层内气泡扰动范围小，因此滤料循环移动的速度较慢。为了定量地反映出滤料的移动速度，在试验中以黑色石英砂作为示踪滤料，对单独用气反冲洗时不同滤层深度处的滤料移动速度进行追踪测定。如图 3 所示。由图中可看出，随着滤层深度的增加。滤料的下移速度减小。

表 1 砾石承托层和滤料级配

材料	粒径(mm)	厚度(mm)
无烟煤	0.8~1.8	100
石英砂	0.5~1.2	200

砾 石	2~4	100
砾 石	4~8	100
砾 石	8~16	100

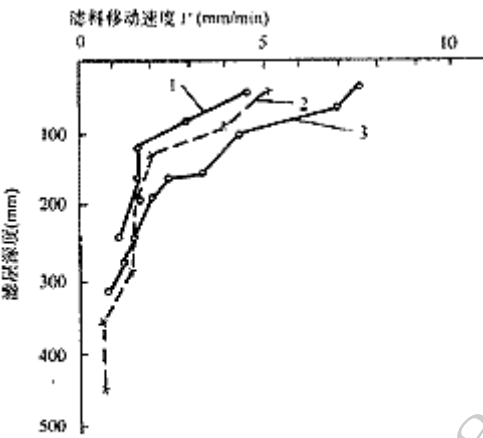


图3 单独用气反冲洗时石英砂滤料移动速度
 1— $q_a=5\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$; 2— $q_a=10\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$;
 3— $q_a=5\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$; q_a —气反冲洗强度

由于气冲洗时整个滤层内有滤料的循环移动，这样就使非通气区内的滤料能周期性地移动到通气区，受到比较彻底的清洗。特别是，含污物最多的表层滤料，不仅受气泡的搅动较强烈，并且移动速度也较快，常能在每1—2个反冲洗周期内经通气区被彻底清洗一次。但位于滤层中、下部的滤料，由于循环移动速度较慢，常需几个反冲洗周期才能经过通气区一次。所以，单独用气反冲洗，冲洗效果虽然优于水反冲洗，但是冲洗效果仍不是十分理想的。

2. 气水同时反冲洗

气水同时反冲洗，时气水反冲洗的另一种工作方式。

当气水同时反冲洗时，反冲洗水穿过滤层产生水头损失，从而引起滤料之间接触压力和摩擦阻力的变化。这时，滤料之间接触压力可按下式计算^[2]：

$$p=(p-p_0)g(1-m)L-hp_0g \tag{2}$$

式中： h ——反冲洗水在 L 厚滤层中产生的水头损失。

其它符号同前。由式(2)可知，气水同时反冲洗时，滤层滤料间的摩擦阻力或接触压力，要比单独气反冲洗时小。当 h 值增大到使 p 为零时，滤层便开始流化。

气水同时反冲洗时，由于滤层内部摩擦阻力减小，使气泡能在更深的部位变成球形，并且各通道的气泡也能在更深的部位聚合成更大的气泡，从而可以在更深的部位对滤料进行更强烈的搅动和振动，如图4。在上述双层滤料模型滤池中，据测每个滤头上面的通气区扰动范围约为70mm，而且气泡尾迹内携带的滤料颗粒也较多。同时，由于滤层内摩擦阻力减小，使滤料比较容易移动。可以观察到整个滤层有较大的循环移动，并且移动速度也大大加快。图5为不同气水同时冲洗强度条件下，不同滤层深度处的滤料的下移速度。图中横轴滤料移动速度的单位为mm/s，比图3单独用气反冲洗时的滤料移动速度单位(mm/min)要大60倍。由图5可见，在气水同时冲洗时，不同滤层深度处的滤料的下移速度大致相同。

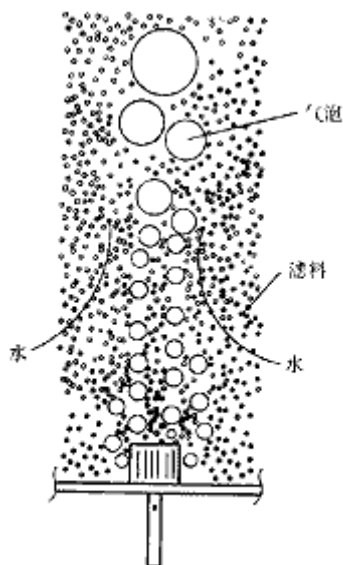


图4 气水同时冲洗时通气区示意图

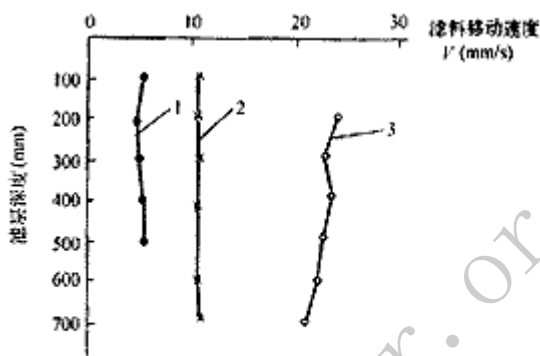


图5 气水同时冲洗时石英砂滤料移动速度

1— $q_a=10$, $q_w=6$; 2— $q_a=10$, $q_w=10$; 3— $q_a=10$, $q_w=15$;
 q_a —气反冲洗强度 ($L/s \cdot m^2$); q_w —水反冲洗强度 ($L/s \cdot m^2$)

在煤、砂双层滤料滤池模型中进行气水同时反冲洗时，水反冲洗强度为 $4.2 L/s \cdot m^2$ ，气反冲洗强度分别为 10.5 , 13.1 , $17.5 L/s \cdot m^2$ ，发现煤、砂两层滤料在 $1 \sim 2$ 分钟内便很快完全混杂，并与 $2 \sim 4mm$ 粒径的砾石承托层有部分混杂。而单独用气反冲洗，反冲洗时间 15 分钟，煤砂只部分地相互混杂。这也说明，气水同时反冲洗时，滤料的移动速度确实大大加快。

当水反冲洗强度适宜时，可使整个滤层的滤料在气水同时反冲洗时都具有较高的移动速度，从而使全部滤料都能在 $1 \sim 2$ 个反冲洗周期内经过通气区一次，这样就能使全部滤料在每次反冲洗时都能得到比较彻底的清洗，从而获得良好的冲洗效果。这可能是气水同时反冲洗的效果优于单独气反冲洗的另一个原因。

3. 气水反冲洗的机理

笔者认为，无论是水反冲洗还是气水反冲洗，使污物由滤料表面脱落的原因，是水流剪切和滤料碰撞摩擦共同作用的结果^[3]，而在气水反冲洗时，滤层内的水流剪切和碰撞摩擦作用要比单独用水反冲洗大得多。

$$G=(P_0/\mu)^{0.5} \quad (3)$$

首先，气水反冲洗增大了滤层中的水流速度梯度 G 值。 G 值通常采用下式计算^[4]：

式中： p_0 ——单位体积滤料所耗功率；

μ ——水的动力粘滞系数。

通过对试验结果的分析 and 计算可得出，在单独用水反冲洗时，水反冲洗强度为 $15 L/s \cdot m^2$ 时， $G=270 \sim 350 s^{-1}$ 。在单独用气反冲洗时，若气反冲洗强度为 $15 L/s \cdot m^2$ ，在通气区内 $G=658 s^{-1}$ 。在气水反冲洗时，若以 $10 L/s \cdot m^2$ 的气和 $5 L/s \cdot m^2$ 的水同时冲洗，在通气区内 $G_k=187 s^{-1}$ ， $G_w=475 s^{-1}$ 。可见气水反冲洗时的 G 值要比单独水反冲洗时大得多。

根据剪切理论，水流剪切力可用下式表示^[5]：

$$\tau=\mu G \quad (4)$$

式中符号同前。由于气水反冲洗时 G 值远大于单独用水反冲洗得 G 值，所以相应产生的剪切力 τ 也大。



$$N=(1/3)n^2D^3G \quad (5)$$

根据颗粒碰撞摩擦理论，颗粒群的碰撞次数可用下式表示^[5]：

式中：N—在单位体积的颗粒群中单位时间内颗粒相互间发生的碰撞次数($m^{-3} \times s^{-1}$)；

n——单位体积内颗粒数(m^{-3})；

D——滤料直径(m)；

G——速度梯度(s^{-1})。

在气水反冲洗时，滤层不膨胀或略有膨胀，因此气水反冲洗时的n和G均远大于单独用水反冲洗时的n和G值，所以碰撞摩擦作用增大。

气水反冲洗时水流剪切和碰撞摩擦作用的增强，主要表现在以下几个方面：

1. 气泡尾迹内携带的许多滤料，在上升过程中强烈地翻滚扰动。
2. 气泡对通道周围产生振动，由于气泡的振动而使水流剪切和碰撞摩擦作用增强。对于单独气反冲洗，在滤层深处气泡粒径较小，达到表层时可合成大气泡(见图 2)，因此，单独气冲洗时作用的增强主要发生在滤层的表层。对于气水同时反冲洗，气泡在滤层深处即可合并成大气泡，因此作用的增强发生在大部分甚至整个滤层。
3. 在气水反冲洗时，由于气泡的携砂作用，导致滤层中的滤料发生循环移动。在循环移动过程中，滤料间发生碰撞摩擦作用。

其次，在气水反冲洗时，整个滤池分为通气区和非通气区。通气区为反冲洗高效区，滤料只有经过通气区冲洗后才能彻底清洗干净。由于气泡的携砂作用，使滤料发生循环移动。由于气水同时反冲洗时滤料间的接触压力小于单独用气反冲洗的，所以气水同时反冲洗时滤料循环移动速度远大于单独用气反冲洗时的速度。因此，单独用气反冲洗时，每次只有部分滤料经过通气区，经过多次冲洗后才能使全部滤料都经过通气区，所以冲洗效果尚不理想。气水同时冲洗时，1~2 次冲洗即可使全部滤料都经过通气区，从而可以获得更好的冲洗效果。

参考文献

1. 郑洽余，鲁钟琪. 流体力学. 机械工业出版社，1986
2. [德]古德胡斯著，朱百里译. 土力学. 同济大学出版社，1986
3. 李圭白. 深层滤床的高效反冲洗问题. 中国给水排水，1985(2)
4. 同济大学主编. 给水工程. 中国建筑工业出版社，1980
5. 藤田贤二著，于泮池译. 有关快滤池冲洗的各部分的水力学研究(原载日本《水道协会杂志》，1972.8)