

第四章.反渗透系统的使用与维护指南

性能优良的反渗透膜元件、合理的 RO 系统设计和正确的系统操作和维护是保证 RO 系统长期稳定运行的三个关键因素。

反渗透系统的使用与维护包括系统的初次调试、日常的使用与维护及系统的清洗。

4-1. 反渗透系统的初次调试

4-1.1.膜元件的安装与拆卸

4-1.1.1.膜元件安装前应检查事项

对于新的工程项目，RO 膜元件装入压力容器之前，必须检查以下内容：

- ✧ 用于润滑的甘油、固定工具、防水胶鞋、手套及其它防护装备准备齐全；
- ✧ 用于记录膜元件位置、调试及运行数据的表格准备齐全；
- ✧ 确认对前面存在的预处理装置（石英砂或活性炭过滤器）冲洗干净， $SDI_{15} < 5$ ；
- ✧ 检查 RO 膜元件上游的进水管路，确保里面没有淤泥、油、金属碎屑等，并确认已经对上游管道、压力容器及高压管路冲洗干净；
- ✧ 检查预处理系统是否运转正常，其出水 SDI、浊度、余氯、温度、pH、ORP 等是否符合膜元件进水要求；
- ✧ 高压泵前保安过滤器内已经安装了清洁的滤芯；

4-1.1.2.安装膜元件

- ✧ 从包装箱内小心取出第一支膜元件，记录膜元件编号，检查元件上的 Y 型圈（盐水密封圈）位置和方向是否正确（Y 型圈开口方向必须面向进水方向），用甘油少量涂抹第一支膜两端中心管内壁；
- ✧ 必须从压力容器进水端安装膜元件，将第一支膜元件不带 Y 型圈的一端平行推入压力容器，直到膜元件露在压力容器外面约 1/5 长（20cm），用甘油少量涂抹 Y 型圈和连接器上的‘O’型圈，将连接器插入第一支膜元件的中心管内；
- ✧ 取出第二支膜元件，检查 Y 型圈位置和方向，用甘油少量涂抹第二支膜两端中心管内壁，固定第一支膜元件防止其被推入压力容器，将第二支膜元件平行托起，让第一支膜元件中心管内的连接器的另一端插入第二支膜元件的中心管内，此时应保持平行不得使连接器承受膜元件的重量，将第二支膜元件推入压力容器直到其露在压力容器外面约 1/5 长（20cm），用甘油少量涂抹 Y 型圈和连接器上的‘O’型圈，将连接器插入第二支膜元件的中心管内；
- ✧ 重复上一步操作直到所有膜元件装入压力容器内，注意最后一支膜元件不需要再插入中心管连

接器；

- ✧ 转移到压力容器出水端，安装止推环，安装压力容器出水端端板密封组合件；
- ✧ 转移至压力容器进水端，将膜元件完全推入压力容器，使出水端的端板密封组合件与第一支膜元件紧密接触，然后安装压力容器进水端端板密封组合件；
- ✧ 重复以上步骤，安装其它压力容器；
- ✧ 所有压力容器内膜元件安装完成后，安装外部的进水、浓水、纯水管路。

4-1.1.3 拆卸膜元件

- ✧ 首先拆掉压力容器两端的外接管路，拆掉压力容器两端的端板密封组合件，将所有拆下的部件编号并按次序放好。
- ✧ 从压力容器进水端逐一推出膜元件，每次仅允许推出一支元件，当元件被推出压力容器时应及时接住该元件且应使膜元件水平，防止中心管连接器损坏受重力造成破坏，可以适当旋转膜元件使膜元件与中心管连接器分离。

4-2. 反渗透系统初次运行的操作步骤及方法

4-2.1. 开机前的检查事项

- ✧ 所有管路、设备及连接件应符合设计压力；
- ✧ 预处理设备已经反冲洗及冲洗干净，保证出水达到设计要求，其中 $SDI_{15} < 5$ 、浊度 $< 1 NTU$ 、余氯 $< 0.1 ppm$ 、 $5^{\circ}C < \text{温度} < 45^{\circ}C$ 、 $pH = 3 \sim 10$ 、不含其他氧化剂（ $ORP < 200$ ）；
- ✧ 检查系统中使用的所有阀门开闭状态是否合适，其中产水排放阀、浓水排放阀、浓水压力调节阀、高压泵流量旁通调节阀处于全开状态；
- ✧ 各加药箱内药品及其浓度准确可靠，各药品添加装置的设置和运行状态正确；
- ✧ 所有管路及设备应符合设计规定的 pH 范围 $2 \sim 12$ （包括清洗时）；
- ✧ 所有的仪表都安装正确并进行了校正；
- ✧ 安装了用于防止产生背压的装置并设置正确；
- ✧ 安装了用于防止水力冲击的装置（电动慢开门）并设置正确；
- ✧ 高压和低压保护装置的设置正确；
- ✧ 按制造商的要求将反渗透容器及相应管路固定在机架上；
- ✧ 在预处理时使用了氧化剂杀菌时，保证这些氧化剂在进入反渗透主机前被完全去除；
- ✧ 检查用于反渗透系统的自控电气元件是否工作正常。

4-2.2. 初次启动步骤

- 1) 高压泵启动前，按开机前检查事项的内容逐条仔细检查，保证预处理出水 $SDI_{15} < 5$ 、浊度 $< 1 NTU$ 、

余氯<0.1ppm、5℃<温度<45℃、pH=3~10、不含其它氧化剂（ORP<200mV）。

- 2) 检查所有阀门并确保所有位置正确，产水排放阀、进水旁通控制阀、浓水控制阀和浓水排放阀完全打开。
- 3) 用合格的预处理出水低压、低流量充满反渗透压力容器并冲洗膜元件，此时的进水压力控制在30~60psi左右，流量约为相应膜元件最大进水流量的60~70%，同时浓水和产水应完全排放掉；冲洗时不得投加阻垢剂。
- 4) 密切注意系统中的管路和连接部件尤其是高压部分是否存在渗漏点。
- 5) 膜元件的初次冲洗，对于北京上远公司提供的膜元件，无论干元件或湿元件，建议低压冲洗4~6小时，或者冲洗1~2小时，浸泡过夜，再冲洗1小时。冲洗时不允许投加阻垢剂。
- 6) 为了防止水锤对膜元件的冲击，对于未使用电动慢开门的小型反渗透系统，应在启动高压泵前用预处理水充满压力容器（排气）；而大型反渗透系统多采用电动慢开门（电动蝶阀）或变频启动。
- 7) 启动高压泵。缓慢调节高压泵旁通控制阀，逐步增加反渗透压力容器进水流量；同时缓慢关闭浓水控制阀，升高压力，直到系统回收率和产水量达到设计值；其中升压过程的时间不小于30~60秒，进水流量增加的时间不小于20~30秒；检查系统运行压力和膜元件压力降是否超过极限值。
- 8) 检查系统内各种药品的投加量是否与设计值一致。
- 9) 测定反渗透进水、每支压力容器及总产水的电导，对各并联压力容器的产水电导进行对比，判断是否存在膜元件、连接器和压力容器密封圈的泄漏或其它故障。测定浓水pH值、电导、钙硬度、碱度等计算出浓水LSI和S&DSI指数，并判断在此运行条件下反渗透系统有无CaCO₃污垢形成。
- 10) 让系统连续运行1~2小时，记录所有运行数据。系统投入正常运行后，连续运行24~72小时，之后重新记录所有运行数据并存档，这些数据包括进水压力、压力差、温度、进水流量和电导率、浓水流量和电导率、产水流量和电导率和系统回收率，并以此作为对以后系统运行参数标准化比较的基准。
- 11) 参考运行和水质分析资料对比设计参数，检查设备是否运行正常并判断是否达到设计要求。
- 12) 在投入运行之后的第一周内，应定期检测系统性能，认真记录运行参数，确保设备正常运行。

4-2.3.膜元件初始性能的稳定性判定

新投入使用的反渗透膜元件从初始性能过渡到稳定状态需要一定的时间，其中湿膜元件在连续运行12小时之后基本会达到稳定的性能，而干膜元件则连续运行2天后或更长时间，才能达到稳定

的性能。

4-2.4. 膜系统运行记录

对于大多数反渗透膜系统可参照下表内容进行数据记录。

反渗透系统运行记录表							
日期	日期						
	时间						
进水	温度(°C)						
	SDI ₁₅						
	浊度(NTU)						
	余氯(mg/L)						
压力(bar)	一段进水						
	二段进水						
	浓水						
	产水						
压差(psi)	保安过滤器						
	一段						
	二段						
流量(m ³ /h)	进水						
	产水						
	浓水						
	回收率						
电导 (μs/cm)	进水						
	一段产水						
	二段产水						
	总产水						
	浓水						
pH 值	进水						
	产水						
标准化	产水量						
	脱盐率						
	运行压力						
备注	(系统故障、停机、化学清洗等说明)						
记录人:	班组:		审核:				

4-2.5. 加药系统运行记录及化学清洗记录

加药系统的运行记录可参照下表制作。

加药系统的运行记录						
日期	日期					
	时间					

絮凝剂	药箱液位					
	补充量					
	配制浓度					
	计量泵旋钮位置					
	投加量(ppm)					
加酸	药箱液位					
	补充量					
	配制浓度					
	计量泵旋钮位置					
	投加量(ppm)					
还原剂	药箱液位					
	补充量					
	配制浓度					
	计量泵旋钮位置					
	投加量(ppm)					
阻垢剂	药箱液位					
	补充量					
	配制浓度					
	计量泵旋钮位置					
	投加量(ppm)					
备注	(系统故障、停机等说明)					
记录人：		班组：		审核：		

4-2.6. 化学清洗的记录

化学清洗的记录可参照下表制作。

化学清洗记录							
日期	清洗液成分及浓度	清洗液 体积	清洗液 pH	清洗液 温度	清洗起始 时间	清洗终止 时间	备注
记录人：		班组：		审核：			

4.3. 反渗透膜系统的日常启动和停止

反渗透系统一旦投入运行并稳定，应尽量让其处于稳定运行状态中，但事实上大多数反渗透系统都必须经常性的启动和停止。每一次系统的启动和停止都涉及流量与压力的变化，对膜元件产生机械应力。因此，必要时尽量降低系统的启动停止频率，正常的启动和停止也应该平稳。日常启动的方法步骤与初次运行的步骤相同，要求压力和流量的升高要缓慢。

膜系统的停止时注意事项：

- ✧ 必须用产品水或预处理出水低压冲洗整个膜系统，冲洗掉膜面的浓水，防止盐类沉淀污染；
- ✧ 低压冲洗时不应投加阻垢剂等其他药剂（若使用预处理出水冲洗系统则保持絮凝剂和还原剂的投加）；
- ✧ 防止产生背压，应首先打开产水排放阀；
- ✧ 流量和压力的下降要缓慢，降压期间注意系统的进水流量不要超过膜元件最大进水流量值和压力容器两端的压力差也不能超过极限值。

膜系统停机的步骤：

通常，首先打开产水排放阀，打开高压泵旁通控制阀降低系统的进水流量，同时缓慢打开浓水控制阀，降低压力至 30~40psi 左右，关闭相应的加药装置，较高的流量有利于提高冲洗效果，但不应超过单只膜元件最大进水流量，同时压力容器两端的压力差也不能超过极限值，维持此低压冲洗直到浓水电导与进水电导一致（冲洗时间约 10~20 分钟）。

流量和压力的上升下降要缓慢进行，时间控制在 30~60 秒，海水淡化系统所需的时间也要相应延长。系统的启动和停止可由 PLC（可编程控制器）实现自动控制，但要定期检查相应电气设备的运行状态。

4.4. RO 膜系统停运期间的管理

4.4.1. 日常停运期间（0~48 小时）的管理

日常停运期间（0~48 小时）的管理参照正常停机程序进行，关键是必须进行停机时的低压冲洗，且为了防止微生物的滋生每隔 24 小时须冲洗一次。

4.4.2. 系统停运（5~30）天的管理

- ✧ 膜系统的停机按照本章“反渗透系统的日常使用和维护”中所述的停机步骤进行。
- ✧ 停机后保证压力容器内充满 RO 生产的纯水，并关闭所有的进水、浓水阀门和产水阀门，防止膜元件干燥和微生物的滋生。

- ✧ 当温度大于 20℃时，每 12 小时便需要重复冲洗一次；当温度小于 20℃时，每 24 小时重复冲洗一次。
- ✧ 对于地表水或存在高微生物污染的水源，须用 RO 产水配制的含有 1.0%亚硫酸氢钠的溶液冲洗反渗透系统，如果同时用这种溶液浸泡膜元件，效果更好，重复冲洗周期也将相应延长。
- ✧ 系统停机期间，温度保持在 5℃~45℃之间。低温有利于膜元件的保存，但应防止系统结冰冻结。

4-4.3. 系统长期停运期间（30 天以上）的管理

- ✧ 参照正常停机程序进行，并用产品水低压冲洗系统。
- ✧ 最好进行一次化学清洗及杀菌处理，清洗完后用 RO 产水低压冲洗系统，直到浓水电导与进水电导一致。
- ✧ 用反渗透产纯水配制含有 1.0%的亚硫酸氢钠保护液，依靠化学清洗系统循环冲洗膜元件，排除压力容器中的空气，将膜元件完全浸泡在保护液中，防止膜元件干燥，关闭所有的进水阀门、浓水阀门和产水阀门，防止空气进入使保护液失效。
- ✧ 每周检查保护液的 pH 值，当 pH 小于 3 时，请及时更换保护液。
- ✧ 系统停机期间，温度保持在 5℃~45℃之间。低温有利于膜元件的保存，但应防止系统结冰冻结。

4-4.4. 系统停运后取出膜元件的保存管理

系统停机后若将膜元件取出则须对取出膜元件进行保存处理，请按照《北京上远膜元件通用技术条件》中湿式膜元件的保存及储存要求操作。

4-5.反渗透膜系统的清洗导则

4-5.1. 膜元件污染简介

进水中存在的悬浮物、胶体、有机物、微生物以及浓缩后沉淀析出的盐等都会对膜元件产生污染。反渗透系统的预处理可除去这些污染物，减少对膜的污染，延长系统运行的时间。但是由于预处理不能完全去除水中的上述污染物，所以经过一段时间的运行后便会产生膜元件污染，造成系统的性能下降。膜系统的性能下降主要表现为：产水量下降，脱盐率降低（电导升高），进水与浓水之间的压差增加。

4-5.2 膜系统清洗时机判断

由于反渗透膜系统的性能随着温度、压力、pH、进水 TDS 等因素的变化而变化（如温度每降低 3℃，产水量降低 10%；pH 有较大变化是对产水电导产生影响），故有时膜系统性能的变

化并非是膜系统受到污染所致，为了准确判断系统的清洗时机，应依据膜元件生产商提供的标准化软件对运行数据进行标准化计算，运行数据标准化后若出现下列情况之一时应及时对反渗透膜系统进行化学清洗：

- 数据标准化后，系统产水量比初始值下降 15%以上。
- 数据标准化后，盐透过率比初始值增加 10%以上。
- 数据标准化后，进水与浓水之间的压差比初始值增加 15%以上。

达到化学清洗条件后必须及时进行化学清洗，一般情况下清洗后都能基本恢复初始性能；但若不及时清洗将会造成膜系统的深度污染，导致化学清洗效果甚微，则很难恢复系统较好的性能。

4-5.3 膜系统清洗步骤

第一步：低压冲洗

最好使用反渗透产品水冲洗，也可以用预处理出水（原水中若含有特殊化学物质，如能与清洗液发生反应的不能使用）。

第二步：配制清洗液

用反渗透产品水配制清洗液，准确称量药剂并混合均匀，检查清洗液的 pH 值、温度（温度不低于 25℃）及药剂含量等条件是否符合要求。

第三步：低压低流量输入清洗液并循环

用正常清洗流量（表 1）的 1/3 流量及 20-40psi 的压力向反渗透系统输入清洗液，刚开始的回水排掉，防止清洗液被稀释。让清洗液在管路循环 5-10 分钟。观察回流液的浊度和 pH 值，若明显变浊或者 pH 值变化超过 0.5，可加入适量药剂或重新配制清洗液再进行上述操作。

表 13.膜元件推荐的正常清洗流量

清 洗 流 量	
膜元件直径 (in)	每根压力容器的流量 gpm (m ³ /h)
2.5	5 (1.2)
4	10 (2.3)
8	40 (9.1)

第四步：浸泡及间歇循环

停止清洗泵循环，防止清洗液流出压力容器，可关闭清洗液进水阀、清洗液浓水回流阀、清洗液产水回流阀。视组件污染情况，膜组件全部浸泡在清洗液中 1 小时左右或更长时间（10~15 小时或过夜）。期间可以间歇的开启循环泵保持恒定的清洗液温度（25~30℃）。

第五步：大流量循环

加大清洗液流量到正常清洗流量的 1.5 倍进行清洗，循环 30-60 分钟。此时压力不能太高，以系统无或稍有产水的压力为限，注意膜元件压差和压力容器的压差不能超过极限值。

第六步：冲洗

先用产品水(最低冲洗温度为 20℃)冲洗系统约 5 分钟,然后用预处理合格产水冲洗系统 20-30 分钟，为防止沉淀，最低冲洗温度为 20℃，将清洗液完全冲出无残留。开启系统运行，检查清洗效果，产水排掉不用。若要停机不用的要按相关方法保存好组件。

4-5.4.反渗透膜系统污染后的症状及清洗方法

反渗透系统日常的运行记录是判断系统是否出现污染及污染后采取合理的清洗方法的主要依据。反渗透系统的管理中必须重视数据的记录。

4-5.4.1.无机盐结垢污染及清洗

无机盐结垢污染后的症状：

首先膜系统二段产水电导异常（电导升高），产水量出现较大的降低，压力逐步变大，二段的压差也逐步变大。最显著的症状是产水量降低比较明显。

反渗透膜系统中最常见的是碳酸钙、硫酸钙结垢；对于膜系统几小时或几天内产水量出现大幅下降的情况，多数属于此类污染。

无机盐结垢通常是由于过高的回收率、阻垢剂的投加量不足、离子交换软化树脂未及时再生等原因造成。

碳酸盐结垢的清洗

碳酸盐结垢可按照以下配方进行清洗：

主要污染物质	推荐清洗液	备注
碳酸盐沉淀物	0.2% 盐酸 (HCl)	优选，最高温度 45℃，pH=2
	2.0% 柠檬酸 (C ₆ H ₈ O ₇)	可选，最高温度 45℃，pH>2

清洗时按照前述步骤进行清洗。

硫酸盐结垢的清洗

硫酸盐结垢的清洗是无机盐结垢中比较难清洗的一种，对硫酸盐结垢的清洗应该及早进行，结垢形成一周以上后，清洗后性能恢复的可能性极低，因此对高硫酸根含量特征的水源，预处理要求较高，必须加强对系统的监控，一旦出现硫酸盐结垢现象，立即进行相应的清洗。

硫酸盐结垢可按照以下配方进行清洗：

主要污染物质	推荐清洗液	备注
硫酸盐垢	0.1% 氢氧化钠(NaOH) +1.0% EDTA 四钠(Na ₄ -EDTA)	NaOH、Na ₄ -EDTA, pH=12, 最高温度 30℃

清洗时按照前述步骤进行清洗。

4-5.4.2.胶体污染的症状及清洗

反渗透进水中的胶体包括淤泥、无机胶体、胶体硅及部分有机物等，通常采用絮凝过滤、活性炭吸附等方式去除。

无机胶体污染的症状：

反渗透膜系统中污染首先出现在第一段，产水量逐渐下降，压差逐渐变大，产水电导轻微上升；胶体污染最主要的症状是产水量及压差缓慢变化。

无机胶体污染可按照以下配方进行清洗：

主要污染物质	推荐清洗液	备注
无机胶体	0.1%氢氧化钠（NaOH） + 0.025%十二烷基苯磺酸钠 （Na-DDBS）	NaOH、Na-DDBS, pH=12, 最 高温度 30℃
	2.0% 柠檬酸（C ₆ H ₈ O ₇ ）	可选，最高温度 45℃，pH>2

清洗时按照前述步骤进行清洗。

4-5.4.3.有机物污染的症状及清洗

以地表水、废水、海水等做水源的反渗透系统存在较高的有机物污染风险，这些有机物的成分主要是腐殖质、有机酸等。

有机物污染的主要症状是产水量大幅下降，脱盐率基本不变。发生有机物污染时可按照以下配方进行清洗：

主要污染物质	推荐清洗液	备注
有机物	0.1%氢氧化钠(NaOH)+ 0.025%十二烷基苯磺酸钠 （Na-DDBS） 0.2%盐酸(HCl)	优选，先用 NaOH 和 Na-DDBS 溶液清 洗，pH=12，最高温度 30℃；再用 HCl 溶液清洗，pH=2，最高温度 30℃。

	2.0%三聚磷酸钠 (STPP) +0.025%十二烷基苯磺酸钠 (Na-DDBS)	可选, $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ 、Na-DDBS, pH=10, 最高温度 30℃。
--	--	--

清洗时按照前述步骤进行清洗。

4-5.4.4.微生物污染的症状及清洗

微生物污染通常出现在反渗透系统停机期间, 以及以地表水、中水 (三级废水)、海水等为进水水源的反渗透系统中, 发生微生物污染时通常还会伴有有机物污染。生物污染应在初期及时清洗, 一旦形成生物膜后, 清洗就非常困难, 只有更换膜元件。

微生物污染的症状:

污染出现在所有段, 一段、二段压差迅速增加, 产水量下降, 产水电导基本不变; 最主要的症状是压差增加。

发生微生物污染时可按照以下配方进行清洗:

主要污染物质	推荐清洗液	备注
微生物	0.1% 氢氧化钠 (NaOH) + 0.025% 十二烷基苯磺酸钠 (Na-DDBS)	优选, 用 NaOH 和 Na-DDBS 溶液清洗, pH=12, 最高温度 30℃
	0.1%氢氧化钠 (NaOH)	优选, 用 NaOH 溶液清洗, pH=12, 最高温度 30℃
	2.0%三聚磷酸钠 (STPP) +0.025% 十二烷基苯磺酸钠 (Na-DDBS)	可选, $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ 、Na-DDBS, pH=10, 最高温度 30℃。

清洗时按照前述步骤进行清洗。

对于发生微生物污染的反渗透膜系统化学清洗后还需要进行系统的消毒处理, 改进预处理防止微生物污染。

4-5.4.5.金属化合物的污染

金属化合物污染主要是金属氧化物、金属氢氧化物等, 尤其以铁污染为主。发生的原因主要是预处理缺陷、管路锈蚀等, 其症状是产水量和脱盐率下降, 膜元件压差增大, 可按照以下配方进行清洗:

主要污染物质	推荐清洗液	备注
金属化合物	1.0%焦亚硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, pH=5, 最高温度 30℃

	2.0% 柠檬酸($C_6H_8O_7$)	$C_6H_8O_7$, pH>2, 最高温度 45℃
--	-------------------------	------------------------------

清洗时按照前述步骤进行清洗。

4-5.4.6. 清洗液体积的计算

清洗液的总体积包括压力容器、清洗管道、高压管路和过滤器的体积及 20% 的裕度。清洗液体积计算包括粗略估算和精确计算两种方式。

粗略估算清洗液体积：根据膜元件型号和污染程度而定

对于一般污染情况： 每支 4040 型膜元件需配制 10 升清洗液；

每支 8 英寸膜元件需配制 40 升清洗液。

对于严重污染情况： 每支 4040 型膜元件需配制 18 升清洗液；

每支 8 英寸膜元件需配制 55 升清洗液。

精确计算示例：压力容器和清洗管道的体积估算见下表所示。

常用管路的容积率

管路直径 (in)	容 积 率
3	0.37 加仑/英尺 4.6 升/米
4	0.65 加仑/英尺 8.1 升/米

压力容器的容积

压力容器容积	
膜元件尺寸	每支膜元件的容积 加仑 (升)
4040	2 (8)
8040	8 (32)

以 36 支 8040 膜元件为例计算如下：

膜系统 4：2 排列，每个压力容器内装 6 个 8040 膜元件，采用分段清洗。

公称直径为 3 英寸的清洗管道长 15 米，则清洗管路体积=15x4.6=69L；保安过滤器内能储存 60 升水；一段压力容器体积=4x6x32=768L；清洗液总体积为=69+60+768=897 升，即第一段清洗需要配制 897+897x20%=1076 升清洗液。同理第二段清洗需要配制 615 升清洗液。

表 4：所需清洗液总体积

清洗液总体积估算		
	体 积 (升)	
	第一段	第二段

压力容器	$4 \times 6 \times 32 = 768$	$2 \times 6 \times 32 = 384$
清洗管路	$15 \times 4.6 = 69$	$15 \times 4.6 = 69$
保安过滤器	60	60
20%裕度	180	102
总体积	1076	615

- 注意：1. 进行化学清洗时请注意防止化学药剂伤害操作人员，尤其是在使用某些腐蚀性较强的化学药剂时（如清洗硅污染时可能使用含氟药剂），建议在专业人员指导下进行清洗。
2. 清洗液体积的计算示例仅供参考。

