

柔性膜结构分析

公报摘要

自从二十世纪七十年代柔性膜曝气头诞生以来，柔性膜曝气头的设计经历了很大的变化。一般说来，绝大多数柔性膜曝气头可以分为如下几种类型：

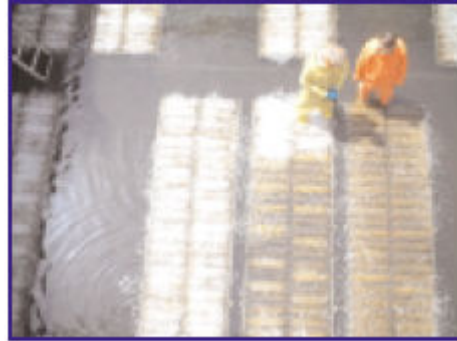
管式曝气头



盘式曝气头



板式曝气头



在过去的几十年里，虽然这些产品的主要制造商改进它们的设计，但是，每种布局内在的机械设计特征并没有发生什么改变。

总的说来，柔性膜所承受的压力决定着曝气产品的使用寿命和操作灵活性（能否随时开机/关机）等机械性能。选择柔性膜曝气产品的时候，设计工程师和终端

公报内容

柔性膜曝气头的柔性膜可以制得很薄，但是，太薄的柔性膜会由于弯曲而折断。如果你想了解柔性膜的机械设计，请参考由费迪南德 P·贝尔和小 E. 罗素·约翰斯顿撰写、麦克格罗-希尔图书公司出版的《薄壁压力容器的应力》一书中的材料机械学部分。

下面，我们就使用该书中介绍的方法来对上述三种曝气头的机械应力进行分析。

管式曝气头

图 1a 和 1b 显示的就是管式曝气头或圆柱型压力容器柔性膜的机械应力。

如图所示，柔性膜上的主要应力为切向应力（ δ_{Hoop} ）。切向应力等于：

$$\delta_{\text{Hoop}} = pr/t$$

其中，

p = 管内压力（曝气头的管内压力等于曝气头工作时的动态湿压）

r = 半径（内径）

t = 厚度

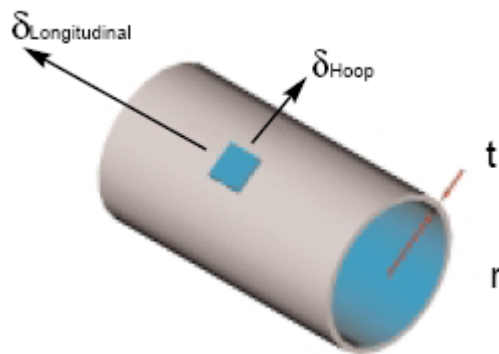


图-1a

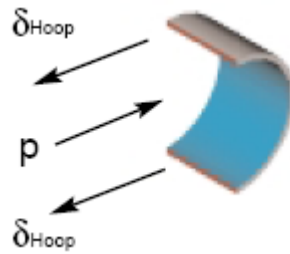


图-1b

管式曝气头的切向应力一般都很小，柔性膜都能承受，所以，设计上都不会有什么问题。

美国环境动力公司生产的 FlexAir Magnum 曝气头和 MiniPanel 曝气头的切向应力为：

美国环境动力公司生产的 FlexAir Magnum 曝气头：

δ_{Hoop} (三元乙丙橡胶膜) = 0.58 磅/平方英寸 \times 1.85 英寸/0.0787 英寸

= 13.5 磅/平方英寸

= 9.3 牛顿/平方厘米

$$\begin{aligned}
 \delta_{\text{Hoop}} (\text{氨甲酸乙酯膜}) &= 0.58 \text{ 磅/平方英寸} \times 1.85 \text{ 英寸} / 0.028 \text{ 英寸} \\
 &= 38 \text{ 磅/平方英寸} \\
 &= 26.2 \text{ 牛顿/平方厘米}
 \end{aligned}$$

美国环境动力公司 MiniPanel 曝气头:

$$\begin{aligned}
 \delta_{\text{Hoop}} (\text{三元乙丙橡胶膜}) &= 0.36 \text{ 磅/平方英寸} \times 2.24 \text{ 英寸} / 0.0787 \text{ 英寸} \\
 &= 10.3 \text{ 磅/平方英寸} \\
 &= 7.1 \text{ 牛顿/平方厘米}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{\text{Hoop}} (\text{氨甲酸乙酯膜}) &= 0.36 \text{ 磅/平方英寸} \times 2.24 \text{ 英寸} / 0.028 \text{ 英寸} \\
 &= 28.9 \text{ 磅/平方英寸} \\
 &= 19.9 \text{ 牛顿/平方厘米}
 \end{aligned}$$

上述管式曝气头的工作压力都比较低，这和管式曝气头的机械设计应当保守一点的要求相吻合。实际应用表明，美国环境动力公司生产的产品也符合这一要求，因为美国环境动力公司生产的管式曝气头不会出现机械故障。

由于管式柔性膜曝气头的机械设计一般都比较保守，所以，它们具有很大的操作灵活性，即可以调节气流的大小。曝气头的气流即使增大很多，也不至于引起材料疲劳。就工作负荷而言，管式曝气头即使在超过设计气流量每分钟 10 标准立方英尺/平方英尺（每小时 183 标准立方米/平方米）的情况下也能正常工作，而不会产生材料疲劳。

管式曝气头的第二种应力叫纵向应力（ $\delta_{\text{Longitudinal}}$ ）。纵向应力等于：

$$\delta_{\text{Longitudinal}} = pr/2t$$

其中：

p = 管内压力

r = 半径（内径）

t = 厚度

管式曝气头所使用的卡子和管式曝气头的纵向应力有着直接的关系。使用卡子的目的在于将套在支撑管上的柔性膜扎紧，避免漏气。因此，对卡子的结构要求很低，扎紧卡子的力量约等于曝气头的动态湿压。除了起密封作用外，卡子还可以将起固定柔性膜断头的作用。由于柔性膜上的纵向应力很小，即只有切向应力的二分之一，所以，

只需稍稍用力就可以将卡子卡紧。而有些管式曝气头的设计容许柔性膜在支撑管上纵向移动，所以，卡子就卡得不紧，起不到应有的密封作用。

管式曝气头通常使用比较简单的带型卡子。这种卡子不但箍力比较均匀，而且可以保护柔性膜。此外，可以选用不同的材料来制作这种卡子，以提高其性能。通常使用 304 和 316 不锈钢以及非金属材料来制作曝气头的卡子。

有限元分析 (FEA) 证明，我们前面计算的应力是正确的。FlexAir Magnum 曝气头如果使用三元乙丙橡胶膜，其切向应力约为 13.5 磅/平方英寸 (9.3 牛顿/平方厘米)。

平板式曝气头

目前，市场上有好几种平板式曝气头。如图-3 所示，平板式曝气头的膜相当于一个圆柱型压力容器的纵向部分。因此，膜的机械设计及相应的应力可以估算如下：

美国制造的平板式曝气头 (图-4)：

$$\begin{aligned}\delta_{\text{Hoop}} \text{ (主要应力)} &= pr/t \\ &= 1.0 \text{ 磅/平方英寸} \times 5.94 \text{ 英寸}/0.028 \\ &\text{英寸} \\ &= 212 \text{ 磅/平方英寸}\end{aligned}$$

$$= 146 \text{ 牛顿/平方厘米}$$

其中：

$r = (4b^2 + c^2)/8b$ (请参看美国钢铁建筑协会颁布的《钢铁建筑手册》)

$b =$ 高度 (现场测量值 $b = 0.8125$ 英寸)

$c =$ 长度 (现场测量值 $c = 6$ 英寸)

(以上数值是根据制造商广告中所说的工作压力和曝气设备的现场测量值计算出来的)

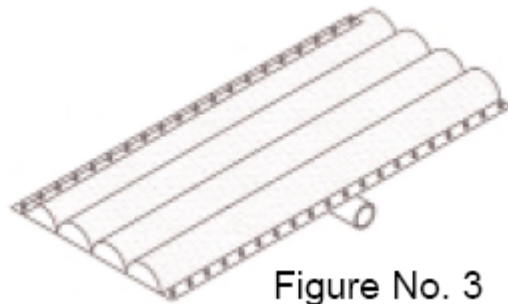


图-3 平板式曝气头

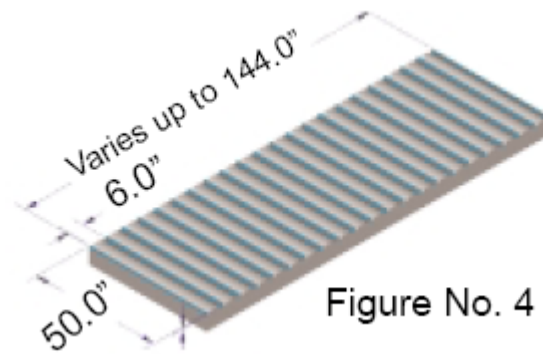
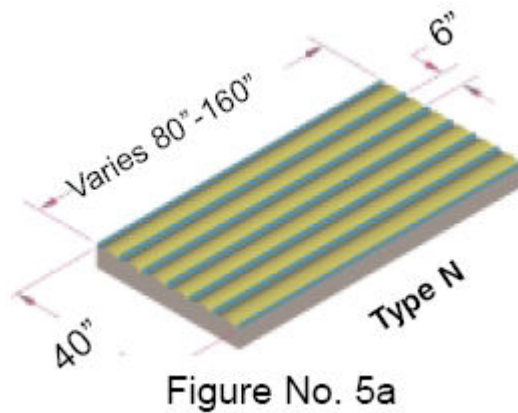


图-4 美国制造的平板式曝气头

德国制造的平板式曝气头---N型和T型（图-5a和图-5b）：

$$\begin{aligned}\delta_{\text{Hoop}} \text{ (主要应力)} &= pr/t \\ &= 1.45 \text{ 磅/平方英寸} \times 6 \text{ 英寸}/0.028 \text{ 英寸} \\ &= 310 \text{ 磅/平方英寸} \\ &= 214 \text{ 牛顿/平方厘米}\end{aligned}$$

（以上数值是根据制造商广告中所说的工作压力和产品尺寸计算出来的）



附图-5a 德国制造的 N 型平板式曝气头

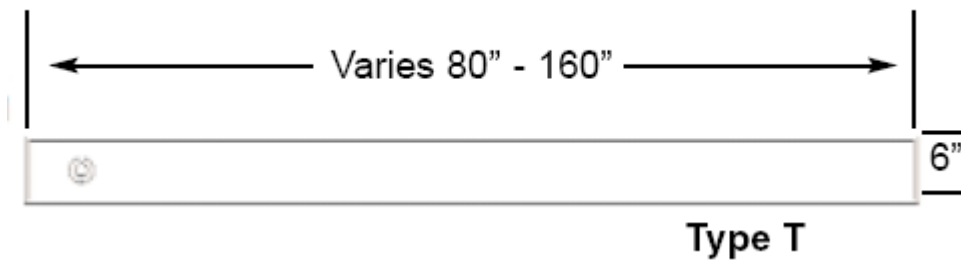


图-5b 德国制造的 T 型平板式曝气头

这种平板式曝气头的工作压力为 200 磅/平方英寸到 300 磅/平方英寸(140 牛顿/平方厘米到 200 牛顿/平方厘米)。由于平板式曝气头的几何形状不一样，所以，平板式曝气头的压力比管式曝气头的要大得多。因此，在设计平板式曝气头和选择柔性膜材料的时候，必须特别小心。此外，由于平板式曝气头的压力比管式曝气头或盘式曝气头的

要大一些，所以，平板式曝气头的操作灵活性要小得多。因此，选择曝气头的时候，必须考虑整个处理厂的处理能力。

与管式曝气头相反，平板式曝气头的卡子必须既能起密封作用还能将膜上的工作压力传递到支撑管上。卡子的结构要求如下：

美国制造的平板式曝气头（图-4）：

该产品的尺寸为 50 英寸 × 144 英寸（127 厘米 × 366 厘米）。该产品将柔性膜装在一个边框里。为了降低曝气头的压力，防止柔性膜向上弯曲，在边框里面用十字支撑将柔性膜固定住。然后再用卡子将边框的四周固定在曝气头的支撑上面。

边框上的应力可以估算如下：

$$\begin{aligned} \text{涨力} &= \text{工作压力} \times \text{表面积} \\ &= 1.0 \text{ 磅/平方英寸} \times 50 \text{ 英寸} \times 144 \text{ 英寸} \\ &= 7,200 \text{ 磅} \\ &= 3,266 \text{ 千克} \end{aligned}$$

卡力(传递主要(切向)应力所需要的力量)：

$$\begin{aligned} \text{柔性膜的拉力} &= \text{压强} \times \text{横截面积} \\ &= \delta_{\text{Hoop}} \times t \\ &= 212 \text{ 磅/平方英寸} \times 0.028 \text{ 英寸} \end{aligned}$$

$$= 5.94 \text{ 磅/延长英寸}$$

$$= 1.1 \text{ 千克/延长厘米}$$

$$\text{夹力} = 5.94 \text{ 磅/英寸} \div 0.5$$

其中:

$$\begin{aligned} \text{摩擦系数} &= 0.5 \text{ (假设值)} \\ &= 11.9 \text{ 磅/延长英寸} \\ &= 11.9 \text{ 磅/延长英寸} \times \text{周长} \\ &= 11.9 \text{ 磅/延长英寸} \times (50 + 144) \div 2 \\ &= 4,600 \text{ 磅} \\ &= 2,090 \text{ 千克} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{总夹力 (估计值)} &= 7,200 + 4,600 \\ &= 11,800 \text{ 磅} \\ &= 5,350 \text{ 千克} \end{aligned}$$

德国制造的平板式曝气头---T 型:

该产品 (T4 型号) 的尺寸为 5.9 英寸 × 158 英寸 (15 厘米 × 400 厘米)。如图-7 所示, 该种曝气头将柔性膜安装在一个边框里。边框上的压力可以估算如下:



图-7 德国制造的 T 型平板式曝气头

$$\begin{aligned}
 \text{涨力} &= 1.45 \text{ 磅/平方英寸} \times 5.9 \text{ 英寸} \times 158 \text{ 英寸} \\
 &= 1,352 \text{ 磅} \\
 &= 613 \text{ 千克}
 \end{aligned}$$

夹力(传递主要(切向)应力所需要的力量)

$$\begin{aligned}
 \text{柔性膜的拉力} &= \delta_{\text{Hoop}} \times t \\
 &= 310 \text{ 磅/平方英寸} \times 0.028 \text{ 英寸} \\
 &= 8.7 \text{ 磅/延长英寸} \\
 &= 1.55 \text{ 千克/延长厘米}
 \end{aligned}$$

$$\text{夹力} = 8.7 \text{ 磅/延长英寸} \div 0.5$$

其中:

$$\begin{aligned}
 \text{摩擦系数} &= 0.5 \text{ (假设值)} \\
 &= 17.4 \text{ 磅/延长英寸} \\
 &= 17.4 \text{ 磅/延长英寸} \times \text{周长}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 17.4 \text{ 磅/延长英寸} \times (5.9 + 158) \div 2 \\
 &= 5,690 \text{ 磅} \\
 &= 2,580 \text{ 千克}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{总夹力} &= 1,352 + 5,690 \\
 &= 7,043 \text{ 磅} \\
 &= 3,195 \text{ 千克}
 \end{aligned}$$

德国制造的平板式曝气头---N 型:



图-8 德国制造的 N 型平板式曝气头

该产品 (N4 型号) 的尺寸为 41 英寸 × 158 英寸 (104 厘米 × 400 厘米)。如图-8 所示, 这种曝气头用一种带交叉支撑的边框将柔性膜固定住。边框上的应力可以估算如下:

$$\begin{aligned}
 \text{涨力} &= 1.45 \text{ 磅/平方英寸} \times 41 \text{ 英寸} \times 158 \text{ 英寸} \\
 &= 9,393 \text{ 磅}
 \end{aligned}$$

$$= 4,260 \text{ 千克}$$

夹力(传递主要(切向)应力所需要的力量):

$$\begin{aligned} \text{柔性膜的拉力} &= \delta_{\text{Hoop}} \times t \\ &= 310 \text{ 磅/平方英寸} \times 0.028 \text{ 英寸} \\ &= 8.7 \text{ 磅/延长英寸} \\ &= 1.55 \text{ 千克/延长厘米} \end{aligned}$$

$$\text{夹力} = 8.7 \text{ 磅/延长英寸} \div 0.5$$

其中:

$$\begin{aligned} \text{摩擦系数} &= 0.5 \text{ (假设值)} \\ &= 17.4 \text{ 磅/延长英寸} \\ &= 17.4 \text{ 磅/延长英寸} \times \text{周长} \\ &= 17.4 \text{ 磅/延长英寸} \times (41 + 158) \div 2 \\ &= 6,925 \text{ 磅} \\ &= 4,775 \text{ 千克} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{总夹力} &= 9,393 + 6,925 \\ &= 16,318 \text{ 磅} \\ &= 7,400 \text{ 千克} \end{aligned}$$

上面这些数值只是平板式曝气头卡子理论设计数值的近似值。因为没有任何卡子是百分之百的有效，应力集中在局部的现象时有发生，所以，为了确保曝气头的性能，设计的时候必须考虑到这一点。这些柔性膜发生机械故障的例子不胜枚举。正如大家预料的那样，曝气头四周和螺钉部位的应力疲劳常常导致柔性膜出现机械故障。

盘式曝气头：

如图-9 所示，从结构上来讲，盘式曝气头的柔性膜相当于一个薄壁球体。如图所示，盘式曝气头柔性膜上的主要应力等于：

$$\delta = pr/2t$$

其中：

p = 压力

r = 半径

t = 厚度

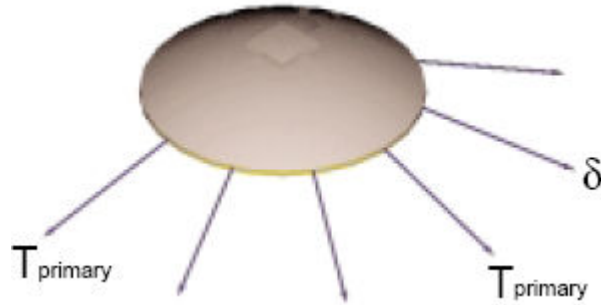


图-9 盘式曝气头

9 英寸（23 厘米）盘式曝气头：

$$\begin{aligned}
 \delta &= 0.36 \text{ 磅/平方英寸} \times 8.7 \text{ 英寸} / (2 \times 0.0787 \text{ 英寸}) \\
 &= 20 \text{ 磅/平方英寸} \\
 &= 13.8 \text{ 牛顿/平方厘米}
 \end{aligned}$$

这种盘式曝气头柔性膜上的应力大约是管式曝气头的 1.5 倍到 2.0 倍。盘式曝气头的应力随着直径的增加而增大。曝气行业已经发生过几次大直径盘式曝气头机械故障。

盘式曝气头一般使用一个圆周式固定环来固定柔性膜。9 英寸盘式曝气头的直径为 8.75 英寸 (22.2 厘米)。如图-10 所示，这个直径没有包括将柔性膜固定在托盘上的 O 型密封圈。

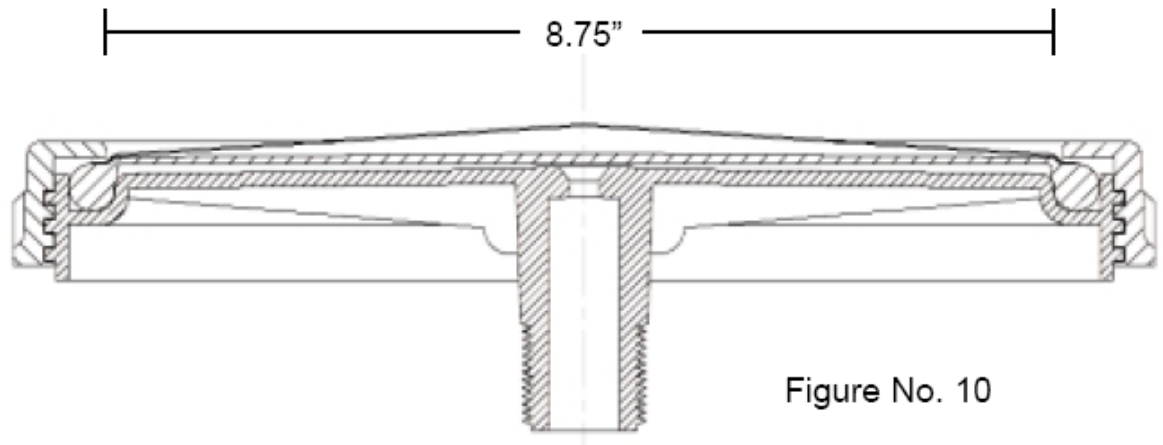


图-10 9 英寸盘式曝气头

$$\begin{aligned}
 \text{涨力} &= pr^2\pi/4 \\
 &= 0.36 \text{ 磅/平方英寸} \times 8.75 \text{ 平方英寸} \times \pi/4 \\
 &= 22 \text{ 磅} \\
 &= 10 \text{ 千克}
 \end{aligned}$$

夹力(传递主要(切向)应力所需要的力量):

$$\begin{aligned}
 \text{柔性膜的拉力} &= \text{应力} \times \text{厚度} \\
 &= 20 \text{ 磅/平方英寸} \times 0.0787 \text{ 英寸}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 1.6 \text{ 磅/延长英寸} \\ &= 1.6 \text{ 磅} \times \pi \times 8.75 \\ &= 43 \text{ 磅} \\ &= 19.5 \text{ 千克} \end{aligned}$$

曝气行业采用好几种方法将柔性膜固定在托盘上面，比如，螺纹固定环、带卡子或螺钉的圆型密封圈、推入式柔性膜、中心螺钉。如果柔性膜固定装置上的力量很大，那么，为了延长其使用寿命，必须仔细分析不同的固定方法。

柔性膜材料

一般说来，柔性膜曝气头制造商采用如下三种聚合物材料来制造柔性膜：

- 三元乙丙橡胶（乙烯丙烯）
- 聚氨酯乙酯（聚醚）
- 硅有机树脂

大多数溶媒和油脂较低的城市和工业污水处理场合，一般选用三元乙丙橡胶材料制成的柔性膜。现在，曝气行业中的主要供应商都能提供高级化合物材料。现场使用表明，由于这些材料中的油脂含量比较低，所以，它们具有卓越的长期材料稳定性和使用寿命。

此外，为了增强柔性膜的抗裂强度和更好地满足柔性膜的开孔需要，还可以使用一些特种化合物来制造柔性膜。就机械强度来说，三元乙丙橡胶化合物的抗拉强度大约为 1,300 磅/平方英寸到 2,000 平方英寸（900 牛顿/平方厘米到 1,400 牛顿/平方厘米），抗裂强度大约为 50 磅/延长英寸到 70 磅/延长英寸（9 千克/延长厘米到 12 千克/延长厘米）。

氨甲酸乙酯聚合物在城市和一些工业领域的污水处理中使用效果很好。和三元乙丙橡胶相比，氨甲酸乙酯能更好地抵抗油脂和溶媒的腐蚀。但是，在高温、高压下，氨甲酸乙酯容易滑动。就机械强度而言，氨甲酸乙酯化合物的抗拉强度通常为 5,500 磅/平方英寸到 6,000 磅/平方英寸（3,800 牛顿/平方厘米到 4,000 牛顿/平方厘米）。虽然氨甲酸乙酯化合物的强度比三元乙丙橡胶的要大，但是，氨甲酸乙酯膜却要比三元乙丙橡胶膜要薄，所以，氨甲酸乙酯柔性膜曝气头的工作压力要低一些。

有几个曝气头制造商正在推销他们生产的硅有机树脂膜化合物。一般说来，硅有机树脂的耐热性比较好，但是，它的机械性能一般，机械强度比较低——200 磅/平方英寸到 1,500 磅/平方英寸（130 牛顿/平方厘米到 1,000 牛顿/平方厘米），抗裂强度比较差。因为制造扩散曝气系统使用的材料，比如聚氯乙烯，通常都能抵抗 140 华氏度（60 摄氏度）以下的热量，所以，硅有机树脂的耐热性能就显得微不足道了。

公报总结

选择曝气产品的时候，必须考虑曝气头的工作条件和环境条件。目前，市场上的曝气产品种类繁多，所以，为了提高产品的工作性能，延长产品的使用寿命，选择曝气产品的时候，必须考虑如下因素：

- 就机械设计而言，低压设计能提供更大的操作灵活性，并能延长产品的使用寿命。
- 从机械性能来说，管式曝气头比盘式曝气头和平板式曝气头都要优越。
- 选择能够和污水中的化学成分兼容的膜材料。因为确定材料的兼容性不是一件很容易的事情，所以，应当选择一个能够提供多种解决方案的供应商。为了提高曝气头的长期工作性能和使用寿命，建议在初始安装之前按照曝气头的正常工作条件对曝气头进行现场调试。
- 所有的柔性膜曝气头都使用经过机械打孔的柔性膜。但是，只有那些能够提供多种打孔模式的供应商才能根据不同曝气系统的氧气传递效率、气流量和工作压力量身打造相应的柔性膜。

柔性膜曝气头代表着曝气技术的未来。如果设计得当，那么，从投资成本、安装成本、工作效率、使用寿命、维护工作量等方面来说，柔性膜曝气头都是最经济划算的曝气技术。选择正确的曝气头将提高你曝气系统的长期使用寿命，降低其使用成本。

如果你想进一步了解柔性膜曝气技术，请与美国环境动力公司在当地的市场营销伙伴，或者直接给美国环境动力公司发电子邮件：

EDI@wastewater.com。

参考文献：

1. F. P. Beer and E. R. Johnston, Jr., “Mechanics of Materials”, McGraw-Hill Book Company.

2. Manual of Steel Construction, American Institute of Steel Construction, Inc., Properties of the Circle.