第 1 章
清洗：无处不在的焕新术

1.1 从身边说起

清洗是一种和我们生产生活实践息息相关的劳动，对于清洗，我们都不陌生。日常生活中，我们每天都要洗脸、洗碗、洗衣服、擦洗家具、拖地等，这些都属于清洗。在工业上，飞机、轮船、建筑物等，需要定期去除它们表面老化的油漆、铁锈、污垢，保持清洁。可以说，清洗无处不在。

从专业角度看，清洗到底是什么呢？简单来说，一个物体表面（比如人脸、地板、轮船或飞机外壳、机器、墙壁）因为物理附着、化学反应或者微生物生长等，覆盖上了一层我们不需要的东西——也就是污染物（例如，灰尘吸附主要是物理作用，铁锈形成是化学作用，而霉菌滋生则属于生物作用）。把这层东西去除掉、让表面恢复原样的过程，就是清洗。

无论是生活中的洗脸、洗碗、洗衣服、擦洗家具、拖地，还是工业中的除锈、清污，本质上都是在做同一件事——去除污染物，恢复物体本来的面貌。随着生产力发展和社会进步，清洗已经发展成为一门涉及范围广泛、内容丰富的实用技术。

清洗的意义是显而易见的。在日常生活中，清洗不仅有助于提高卫生标准、保障人体健康、保护生活环境，还能保持物品的洁净美观，从而全面提高人们的生活质量。工业清洗的意义则更多，主要有下述多个方面：①改善设备外观，净化美化环境；②去除污渍污垢，维持正常生产；③延长运行周期和设备寿命；④提高生产效率，提高产品质量；⑤降低能源消耗及生产成本；⑥减少生产事故，

利于人体健康。

可见，清洗对于人类的生产生活是不可或缺的，不断发展清洗技术，可造福人类（图 1.1）。这本书，我们就来谈谈清洗。



图 1.1　清洗就是洁净对污染的“战斗”（尤宇丹绘画）

1.2　清洗，都在哪儿用

清洗这件事，其实遍布我们生活的每个角落，衣、食、住、行都离不开它；在工厂和生产领域，清洗也同样重要，几乎每个行业都需要它。我们穿的衣服、吃的食品、坐的汽车、住的房子，再到能源、化工、电子等，都少不了清洗环节（图 1.2）。近年来工业生产中的清洗工作备受关注，例如手机、计算机里的精密零件，交通工具，医疗器具，相机镜头，以及各种高端制造环节等。具体而言，工厂中的很多设备，比如各种管道、锅炉、反应器、冷却系统等，用久了就会结垢、生锈、堵塞，就像家里的水壶用久了会形成水垢一样，所以必须定期给它们“洗个澡”。同样地，我们熟知的各种交通工具（如汽车、飞机、火车等）也需要定时清洗。在制造产品之前，用到的原材料（如钢板、铝合金、复合材料）也需要清洗，以保证后续的生产质量和精度。



图 1.2　生活、工业生产中常见的清洗现象（AI 生成）

作为一个清洗技术产业的新兴大国，近几十年来，中国在清洗行业发展迅猛，形成了相当的规模。据统计，目前清洁剂使用量达数百万吨，其中工业清洗中清洁剂的用量占比约 60%。另外，在工业上广泛使用的喷丸清洗技术，其应用规模也远超其他国家。

不过，清洁剂和喷丸清洗都存在环境污染问题。随着环保意识的加强和清洗技术的不断创新，中国在全球清洁技术产业中的地位也逐渐提升，为推动绿色经济发展做出了重要贡献。2011 年，经国务院批准、民政部注册登记，我国成立了中国工业清洗协会（简称“中清协”，The Industry Cleaning Association of China，ICAC）。这是我国工业清洗行业唯一行使行业管理与服务职能的国家级行业协会，接受民政部的业务指导。协会主要由国内工业清洗行业相关的企事业单位、社会团体、清洗行业专家学者自愿组成，是全国性、行业性、非营利性社会组织。

1.3　清洗的四要素

你可能听过这个故事：牛顿从一颗落下的苹果中获得灵感，进而发现万有引

力定律。那么，什么是定律呢？简单来说，就是对一种自然规律的总结，并且常常以数学公式的形式进行更加清晰地表达。牛顿是怎么发现这个规律的呢？他的方法是先“建立模型”——就像我们为了理解复杂事物，首先画一张简图一样。在这个模型里，他先把苹果和地球都想象成两个有质量、但没有大小的“点”（称为质点），这样问题就大大简化了。其次，他找出了两个关键因素：一是苹果和地球之间的距离；二是苹果和地球的质量。最后，也是最重要的一步，就是找出这些关键因素之间的联系。通过反复思考和数学推算，牛顿最终找到了它们之间的数学关系，这就是著名的万有引力定律。

那么，从清洗这个现象，我们能否发现什么规律呢？我们能够建立什么模型？模型中有些什么物理参量，它们之间又有什么关系呢？

我们先分析洗脸，这是我们每天都做的事情。为什么要洗脸？因为脸上沾上了灰尘、汗渍、油污等污染物，为什么会沾上这些污染物？其实是因为存在黏附力的作用，灰尘等污染物由于黏附力的作用被黏附到脸上。需要给一个作用力，使得污染物从脸上脱落，这就是清洗。我们来看一看洗脸的过程：将毛巾沾湿，在脸上揉搓，通过水的浸润、手或毛巾的揉搓（图 1.3），有时还有香皂或洗面奶的作用，最终将脸上的污染物去除，恢复到洁净的脸。这里涉及的物有脸、污染物



图 1.3　洗脸

（灰尘、汗渍、油污等）、某种媒介或工具（水、手、毛巾、香皂等）和动作（浸润、揉搓等）。



图 1.4　拖地

我们再看看拖地，之所以拖地，是因为地上有了灰尘、污渍等污染物，使得干净的地面受到污染。用拖把拖地，可以把污染物清除掉（图 1.4）。清除过程中，涉及的物有地面、污染物（灰尘、污渍等）、工具（湿润的拖把）和动作（拖地）。

再看一个工业上的例子。工业上常用一种清洗方法：喷丸处理。铁板生锈后，将细小的砂丸通过一个高压机器喷射出来，打在生锈的铁板上，利用击打、摩擦等作用将铁板上的铁锈清洗掉，使铁板恢复到原先的干净状态（图 1.5）。这个过程中涉及的物有铁板、铁锈、工具（高压喷丸机、喷丸）和动作（击打、摩擦）。

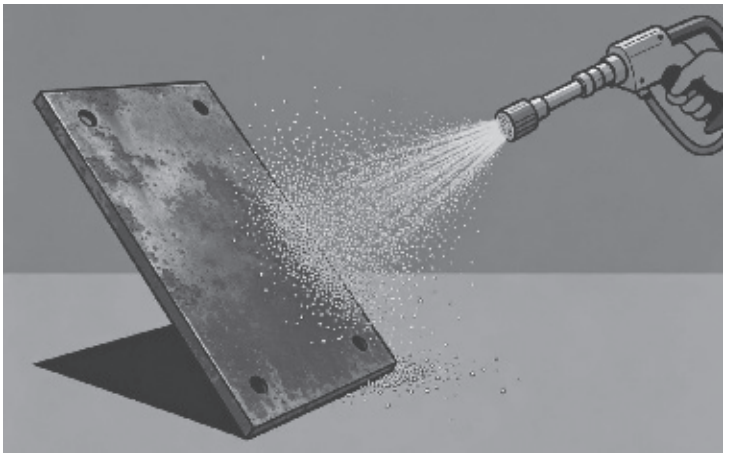


图 1.5　喷丸清洗

通过这些例子可以看出，要完成一次清洗，首先要有清洗对象，也就是被污染了的某种物体，比如有污染物的脸、有灰尘或污渍的地面、生锈的铁板等。这个清洗对象有两部分：基底和污染物。

清洗过程就是要将基底上的污染物去除掉。上面的例子中，有污渍的脸、脏了的地面和生锈的铁板都是清洗对象，其中脸就是基底，脸上的污渍是污染物；地面是基底，地面上的污渍是污染物；干净的铁板是基底，铁板上生成的铁锈是污染物。

要把污染物从基底上清洗掉，需要有工具或媒介，如上面提到的水、毛巾、香皂、湿拖把、喷丸等。这些工具或媒介，没有借助任何动作，也不能把污染物清洗掉，需要通过揉搓、摩擦、击打等动作。在这些动作中，有溶解（灰尘溶于水）、化学反应（香皂与油渍作用）、摩擦（毛巾揉搓、拖把摩擦、喷丸击打）等作用，这些作用过程中的力，如果大于污染物与基底的黏附力，则污染物就能够脱离基底，实现清洗。

总结上面的内容，我们可以得出结论：利用某种媒介或工具，通过清洗力，使污染物离开基底，这就是清洗过程。清洗中包括基底、污染物、媒介或工具、清洗力。这就是清洗的四个要素（图 1.6）。

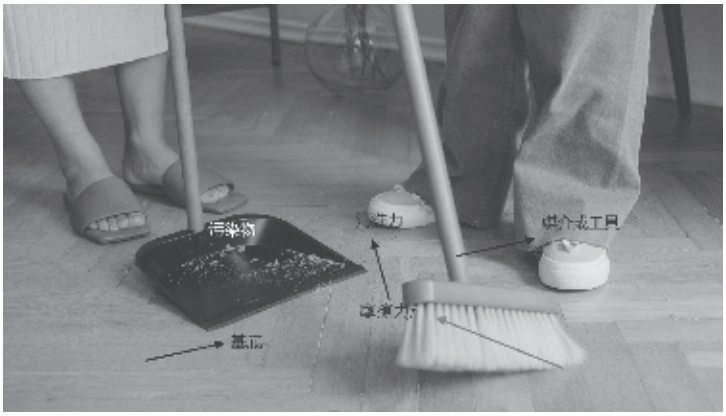


图 1.6　清洗四要素示意图：以扫地为例

1.4　清洗技术，如何分门别类

一说到清洗，我们的第一想法多半是用水或其他液体来清洗物体。确实，几千年来，人们最习惯的做法就是用液体来对付固体表面那些污染物。但是我们知道，世界上的污渍多种多样，被弄脏的物体也千差万别。有些物体上的顽固污垢，单靠水或者普通清洁剂无法清除。比如珍贵文物上的陈年斑迹、远洋轮船外壳上

厚厚的铁锈与旧漆、精密电子线路板上细微的粉尘，还有硅片上容不得半点杂质的污染颗粒……这些都不是只靠简单清洗能解决的。

随着时代的发展和科技的进步，人们发明了很多新的清洗方法，比如高压水射流法、喷丸处理法、化学清洗法、超声波清洗法等，这些方法对于微小颗粒、铁锈和油污的清洗效果较好，在很大程度上满足了现有工业生产和日常生活中的需求。它们的共同原理，其实就是借助某种外力——无论是机械冲击、化学反应还是光电作用——清除物体表面的污染物。我们可以从不同角度对清洗技术进行分类。

1.4.1　看本质：清洗靠的是什么

根据工作原理的不同，清洗可以分为物理清洗和化学清洗（生物清洗也可归类于化学清洗）。

物理清洗，顾名思义就是不用任何化学药剂，单靠“物理力量”把脏东西从物体表面弄走，这个过程中不发生化学反应。最大优点是安全、基本不伤基底。现在发达国家中大部分的清洗工程都采用物理清洗法进行清洗。最近几十年来，我国工业发展迅速，对清洗需求越来越多，对环境保护要求越来越高，对物理清洗技术也越来越重视。像之前提到的喷丸处理、高压水射流清洗技术，以及后面要介绍的干冰清洗、等离子体清洗和超声波清洗，都属于传统的物理清洗技术。

化学清洗主要依靠化学试剂对污染物“干涉”，通过化学反应把污垢分解，或者使其从表面松动脱落。这个过程是实实在在发生了化学变化的。就像我们用肥皂洗衣服，就是一个典型的化学清洗过程。化学清洗的优点是速度快、效果好、成本往往较低，但缺点是有时会造成一定的环境污染。常用的化学清洗有化学试剂浸泡、电化学分解、微生物清洗等。

在实际清洗时，伴随着物理或化学反应，或者两者同时发生。比如我们用清水洗脸，一般只涉及物理作用。水把脸润湿，毛巾来回揉搓，脸上的灰尘和污渍就被水带走或者黏附在毛巾上。这个过程中，水、脸和污垢本身都没变成别的物质，只是位置和状态改变了。又比如，工业上常用的喷丸清洗，高速运动的砂粒通过撞击使铁锈脱落，靠的是纯粹的物理冲击。

如果洗脸时使用了肥皂，那么肥皂会与脸上的油污产生化学反应，生成一种

容易被水冲走的新物质，这就涉及物质本质的改变。工业上通过酸液除锈、碱液去油污，都是利用了化学反应。

很多时候，一次清洗往往是物理和化学两种手段协同作用的结果。仍用香皂洗脸这个例子：用手或毛巾搓揉这个动作，是物理清洗；而香皂和油脂之间发生的反应，就是化学清洗。两者完美配合，才能更加彻底地去除脸上的污垢（图 1.7）。



图 1.7　洗脸的物理与化学反应（AI 生成）

1.4.2　看形态：清洗过程是“干”还是“湿”

根据清洗时是否添加液体，可以分为干式清洗和湿式清洗两大类。

根据字面意思，干式清洗全程不用任何液体，湿式清洗则离不开液体。一般化学清洗都是湿式清洗；物理清洗则干、湿都有，如喷丸清洗一般为干式清洗，而高压水射流则为湿式清洗。液体在清洗中是个“好帮手”，它能渗进污垢和物体表面之间，或者把污垢软化、浸湿，使其与物体表面的黏附力下降，这样清洗起来就省力多了。如果用的是合适的化学清洗剂，那更能直接和污垢发生化学反应，从而将其分解，实现彻底清除。

有个特别生动的例子——猫洗脸。猫咪直接用爪子干擦脸蛋，那就是标准的“干式清洗”；但如果它先舔舔爪子，再用湿爪子抹脸，就立刻切换到了“湿式清洗”模式。

此外，按照清洗的“精细程度”，还能分成一般清洗、精密清洗和超精密清洗。我们生活中和一般工业里的大部分清洗，对精细度要求并不高，只需去除明显的污染物。但有些领域，比如清洗光学镜片、精密仪器零件等，必须做到一丝不苟，这时需要通过更精细的方式进行清洗。

第 2 章

清洗：为何重要

清洗看似日常，其重要性却不容小觑。一个文明的社会，离不开干净整洁的环境；工业生产的顺利进行，离不开对设备和零件的彻底清洗；而幸福的家庭生活，也同样离不开洒扫庭院、擦拭家具和个人卫生的保持。清洗看似简单，其实是一个复杂而多样的过程（图 2.1）。



图 2.1　清洗是一个复杂而多样的过程（尤宇丹绘画）

2.1　主要污染物的“家族成员”

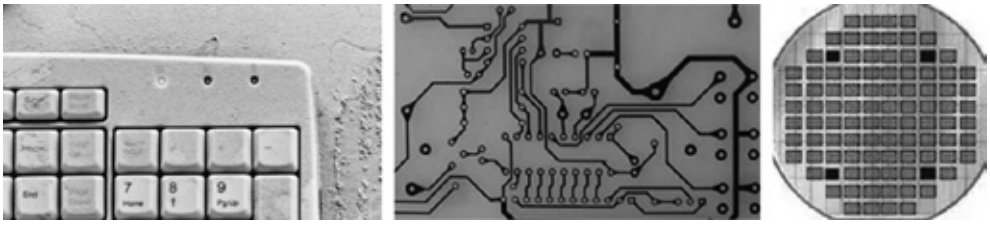
生产和生活中，存在着各种各样的污染物，它们附着在各种物体表面。下面，让我们认识一下这个“污染家族”里的几位主要成员。

2.1.1 灰尘：无处不在的“微型混合体”

灰尘是最常见也最让人头疼的污染物。它们是飘浮在空气里的微小颗粒，来源非常广泛，比如风吹起的泥土、工厂排放的烟尘等。它实则是个成分复杂的“大杂烩”，里面既有矿物颗粒、金属粉末、细沙、煤灰这样的无机物，也混杂着皮肤碎屑、毛发、微塑料等有机物，甚至还藏着尘螨、细菌、病毒这些生物成分。

灰尘不仅会飞扬或悬浮在空中，附着在我们的皮肤上，更会随着呼吸进入我们的身体。灰尘颗粒的直径通常小于 500μm，其中小于 10μm 的悬浮粒子（PM_{10}）能侵入我们的呼吸道，对人体健康造成危害；小于 2.5μm 的细颗粒物（$PM_{2.5}$）更可穿透肺泡直达血液，对人类健康造成极大威胁。

除了对人体健康的危害，灰尘带来的麻烦远不止如此：它落在家具上，使家具显得陈旧；钻进计算机里，影响散热甚至导致硬件损坏；附着在精密的电子线路板上，易造成电路故障；若是落在晶圆上，则会直接导致产品良品率下降（图 2.2）……



（a） （b） （c）

图 2.2 附有灰尘的物体

（a）计算机键盘；（b）电子线路板；（c）晶圆

2.1.2 油渍或油污：黏腻的“胶水”

油渍或油污的主要成分是油脂。它来源很广：动植物脂肪——做饭、接触动植物时就会碰到；人体汗液里含有油脂；工业上常用于润滑或保护零件设备的防护油。

环境中的灰尘和小颗粒，通过沉降和物理吸附于物体表面，如果物体表面有油脂，就会像“胶水”一样，让这些污垢粘得更紧。高温环境下，如烹饪或机器发热升温后，油脂软化甚至部分烧焦，形成油烟，冷却后又会凝结成黏糊糊的油