模具清洁

复杂模具的清洁

本文介绍了一种用于复杂模具的非破坏性清洁技术，它适用于要求清除顽固表面污渍以确保精密模具和零件表面质量和耐用性的工况。

文 | David Jackson，CleanLogix LLC 公司董事会主席

在高科技或高可靠性模具和产品制造领域中，清洁看似平淡，但却是一项非常重要的工作。其重要性对于模具制造（例如机加工后清洁）和模具生产（模压后清洁）工作都是相同的。由于一系列原因，安全、有效地生产和清洁精密或复杂模具代表着各种挑战，例如需要控制好关键表面特征的尺寸公差和保护好小型表面的几何形状。

就本文而言，对于复杂模具的定义是拥有多个面或是精细小巧表面特征和几何形状的模具，这些模具有非常严格的尺寸公差和表面光洁度要求，用于满足精密小型零件、小型聚合物或塑料零件的生产，而这些零件往往代表着高价值、高可靠性和高性能。

复杂模具要求采用强有力但却不会产生破坏的清洁工艺，用于清除顽固污渍，确保精密模具表面和零件表面的质量和耐用性。制造业的发展趋势正朝着生产更小型、更复杂零件（微型零件）的方向发展，这些零件要求采用能力更强的清洁工艺，能够在不损坏零件的前提下清除精细和复杂表面上的污渍，以确保生产出洁净的产品。

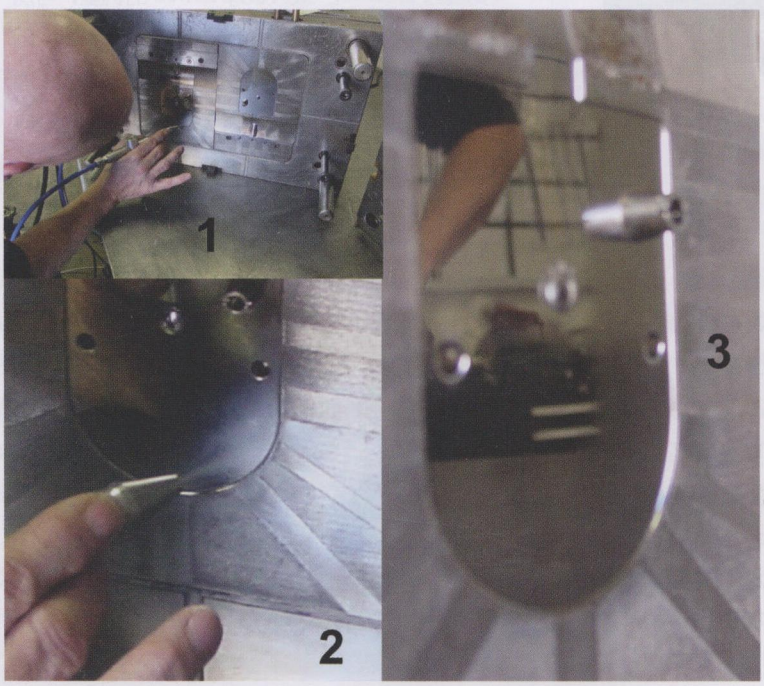

图 1 CO_2 复合喷射流的应用直接而清晰，一位操作者正在使用一款 Coanda 喷射器，这款喷射器中的粗糙颗粒物与高温 CDA 一起生成并喷出，抛光模具表面上积聚的油性和颗粒残留物在简单的 Z 字形喷射动作之下得到了选择性的清除

微型零件包括过滤零件、微流动零件、复杂外壳、传感器、电子部件、光学元件、引线阵列、引线框和机械零件等。在手机、电信、微电子、手术器械、助听产品、医疗设备、天线、接头和其他领域中都可以看到微型零件的身影。

对于更小型和多面体零件的需求正在随着设备尺寸的继续缩小而增加。这将导致模具在可制造性、可清洁性和可编制性方面遭遇各种限制。而经过一段时间发展的 CO_2 精密清洁技术能够解决这一挑战。

CO_2 技术的发展

近 35 年来，CO_2 技术一直应用于许多高科技、高可靠性和大批量生产的制造企业。其涉及的行业和应用领域包括航空硬件、硬盘、医疗设备、微电子和光电器件等。CO_2 清洁技术可用于清

除复杂元器件和组件上的颗粒物、离子污染和有机物残留，提升了采用这项技术的系统性能和可靠性。该技术还可用于安全地清洁制造这类零件和组件的精密模具和设备。

最早期的 CO_2 清洁技术之一就是 20 世纪 40 年代出现的 CO_2 喷丸技术。从那时起，CO_2 喷丸技术就一直在通用设备和模具清洁领域广泛应用。

Hughes Aircraft 公司于 20 世纪 80 年代初期就开发出了 CO_2 精密清洁技术，以满足地面、机载和航天系统精密零件关键性清洁作业的需要（清除微小颗粒、低电压无压继电器、离子污染和排气现象）。同时还开发了基于液态和临界态二氧化碳（CO_2）的清洁工艺，用来清洁硬件以满足军用和美国航空航天局（NASA）严苛的清洁标准。这些元器件包括激光器光具座、柔光镜、光学元件、硅橡胶电缆、减振器、接头、密封件和电气绝缘体。

当今的 CO_2 技术

在 20 世纪 90 年代，CO_2 精密清洁技术的开发和商品化一直在继续进行着。如今，液态、固态、超临界态和离子态 CO_2 清洁技术都已研发成功并商品化，用于清洁和准备众多类型的组装工具和制造零件，应用于模压、粘接、涂覆和精密装配等工序。

CO_2 精密清洁技术一直以来都在各类高可靠性和大批量生产中应用，用于减轻由污染造成的各种问题。CO_2 精密清洁技术已经通过自身的运用证明他能够提供范围宽广的通用和精密清洁技术，其适用范围从一般性的清洁重度污染的机加工零件上的润滑脂，到从光学部件表面清除少量亚微米级颗粒物以及去除印刷电路板的焊剂，再至实现等离子蚀刻和注塑零件的功能。

精密清洁的应用和工艺

先进的 CO_2 精密清洁技术能够解决多种最新出现的微污染现象和关键性的清洁问题，这些问题涉及到复杂模具、模具生产和模压零件。CO_2 清洁技术的应用范例包括：

（1）离心式 CO_2 清洁：用于清除经过精密机加工的复杂模具上的润滑脂，并用于包括模压硅酮零件在内的模压零件的精密清洁。

（2）CO_2 复合喷涂：用于有选择性地、无腐蚀性地在线或离线清除复杂模具上的污染物，可用于清涂脱模剂和其他表面残留物，或用于在粘接前选择性的对模压零件表面进行清洁。

（3）CO_2 等离子清洁：用于模压零件表面的活化，可用于清除顽固污染物和改善涂层和电解层的粘着度，并可用于清洁模具表面。

（4）超临界 CO_2 清洁技术：通过清洁（萃取）从微孔型塑料、陶瓷和金属零件上清除模压后产生的污染物。

CO_2 精密清洁技术的范围从简单直至强力。例如，CO_2 的显微级颗粒物或晶体和清洁干燥空气（CDA）通过接近声速的流体射流形式，可用于有选择性地从注塑模具的抛光表面上清除硅酮脱模剂和其他顽固性残留物，而且毫不损伤表面。采用这一简单技术的清洁效果与采用金刚石抛光和清洁膏的效果相近。这些 CO_2 复合喷射流还可以为模具机加工和零件模压成型后表面处理时提供清洁和冷却作业。

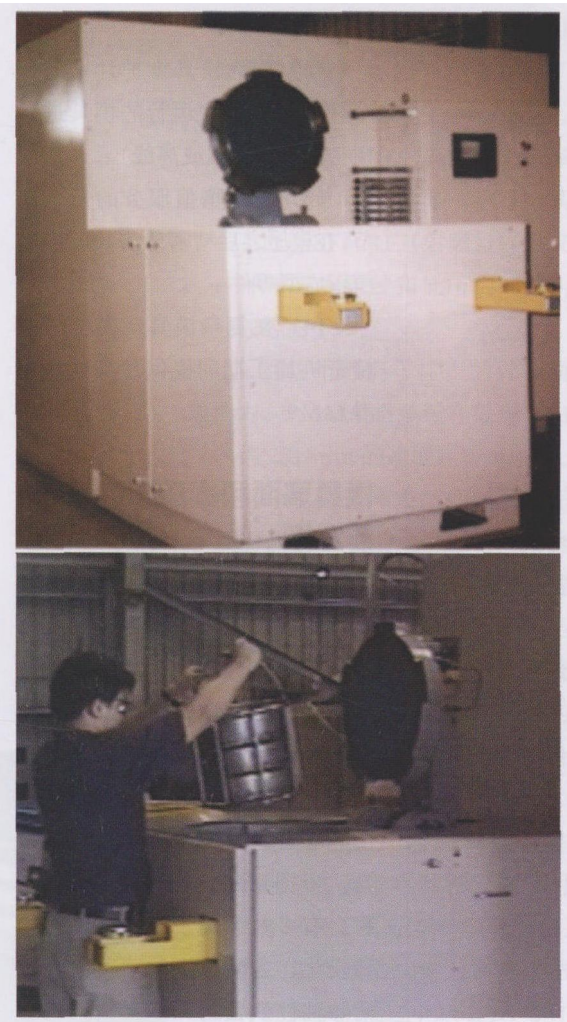

图 2 PMMA 零件被放置到一个清洗容器内并在离心清洁系统内进行处理

混合式处理方式将 CO_2 技术组合运用，提供了非常强大的处理能力，能够显著提升清洁能力和速度。例如，液态和等离子态 CO_2 可以组合运用，同时用于清除硅酮脱模剂和在电镀工序之前活化注塑聚甲基丙烯酸甲酯零件表面。

从模具至模压零件

先进 CO_2 技术可通过多种方式解决模具制造、模压和模压零件生产中的清洁难题：

（1）作为模具生产的一个环节，在机加工之后对模具进行精

密清洁；

（2）作为模具维护计划的一个环节，对正在运行的模具进行精密清洁（在线或离线）；

（3）作为增值服务的一个环节，在模压之后精密清洁（和处理）模压成型零件；

（4）在复杂模具或模压零件精密机加工期间提供冷却（和润滑）。

模具表面和模压零件的污染

模具制造商和零件生产商在模具生产和运行过程中，以及所生产出的零件的表面都面临着一系列的污染问题。在制造过程当中，诸如钢或铝的材料需使用切削刀具和冷却液进行机加工，以便能够将其加工成一个完整的模具。根据最终模具的复杂程度，将会有多数粗加工和精加工的迭代发生，之间会执行清洁工序以清除油性残留物和颗粒物。机加工污染必须进行仔细地清除，以便在制造过程中进行适当的测量，并让模具准备好接受最终的加工，例如抛光和电镀。在模具制造完成并投入运行之后，对清洁的需要将会继续作为一种周期性维护而存在，其目的在于清除过程中的污染积聚。

运行时产生的污染物积累是由于少量的塑料添加剂在模具表面结晶造成的。用于注塑生产的聚合物或热塑性塑料均为复杂的人造材料，针对具体应用而选用的，其中包含着相当丰富的化学和物理添加剂。

热塑性塑料包含有各种性能的添加剂，如稳定剂、改性剂和填充料，它们提供了物理结构上的增强、优化脱模、防火、防老化和各种增值功能，如各种防静电和防微生物特性，以及颜色。化学物添加剂包括酚类防老化剂、有机亚磷酸酯、酞酸酯、胶体银、二氧化钛、碳黑和其他有机物、无机物和离子化学物。

在注塑生产的热应力和压力作用时下，这些添加剂会结晶并沉积在模具或注塑零件的表面。表面污染物可以是有机物和无机物质的混合体，并在外观上呈现为脂性、油性或黄色蜡性薄膜，内含白色颗粒物质。

更多时候，外部脱模剂也会用于型腔本身。外部脱模剂可能含有硅酮、PTFE（特氟隆）和植物油酯等，并且倾向于采用拥有高沸点和低表面能量的无极性物质。这些特性使脱模剂能够均匀分布并粘附至高温、高表面能量和有极性的金属型腔表面。随着时间的推移，少量的外部脱模剂会转移至注塑零件的低能量表面上。外部脱模剂还可能与来自热塑性塑料的添加剂结晶混合，而这种混合物有可能沉积，甚至结合到模具或塑料零件的表面。这将会导致外观上的缺陷。

诸如此类的表面污染物对于模具运行和塑料零件模压后加工的质量都是有害的，例如电镀、油漆、胶粘、涂层和精密装配工序。这就要求对型腔进行定期的清洁，以清除添加剂结晶和残留脱模剂的积聚，对塑料零件表面进行精密清洁和处理。但是，添加剂结晶和脱模剂的低表面能量和高沸点的特性使得它们较难在不使用有效化学清洁药剂的情况下被清除。此外，运行压力和温度能够让这些污染物与模具表面和零件本身相结合，从而导致需要采用大量的机械清洁处理。

解决难题

CO_2 精密清洁技术为模具制造商和零件生产商提供了更多降低成本和增强性能的机会。在制造过程中，复杂模具可以采用这种技术进行安全有效的清洁，用于在机加工工序后清除油类物质，并用在运行期间保持表面的清洁。

CO_2 精密清洁技术可以在增值制造过程中用于处理模压零件以便执行额外的加工，让零件表面能够更好地执行精密装配操作。例如，CO_2 精密清洁技术正用于清洁硅橡胶电缆，以消除其在洁净环境下排出气体的问题。这项技术还用于清洁多种类型热塑性塑料零件，如聚酰胺、聚乙烯、氟化塑料和聚甲基丙烯酸甲酯。

清洁光学元件模具

采用 CO_2 复合喷射流可以精密而安全地清洁精密抛光光学元件模具的表面。有一种 CO_2 复合喷射流显示出了高密度和类似于卤化溶剂的化学特性，在清洁时对污染模具表面同时进行了物理冲洗和化学清洁。

这种喷射流可以通过多个方面的调整，包括压力、温度、CO_2 颗粒物尺寸（精细至粗糙颗粒）和浓度这些关键工艺参数的变化，实现一系列的表面冲洗和清洁效果。与喷丸、喷干冰和传统的“CO_2 雪”清洁技术不同的是，这些喷射流在亚音速和高温气流内含有可以变化的显微级颗粒物（和可选添加剂）。

在整个清洁过程中，模具或零件表面始终保持在非常干燥的状态下，喷射流的清洁能量是可以控制的。少量而分散的 CO_2 颗粒的冲击具有非常高的能量，并有利于从固态向液态转变。正是

如此，CO_2 复合喷射流能够模仿采用卤化溶剂的高压溶剂喷射流。采用该技术的系统包括各种手动式、移动式和机器人等。

CO_2 复合喷射流的应用非常直接易懂。只需几分钟的指导就可以精通该喷射清洁操作的技巧。

一位操作者正在使用一款 Coanda 喷射器，这款喷射器中的粗糙颗粒物与高温 CDA 一起生成并喷出。抛光模具表面上积聚的油性和颗粒残留物在简单的 Z 字形喷射动作之下得到了选择性的清除。喷射操作的启动通过脚踏板或手动开关来实现（图 1）。

型腔表面呈现出如同镜子表面一样的光洁度。如图 1 中编号 3 的图片所示左侧为进行了无接触式 CO_2 清洁，右侧部分仍然被模具污染薄膜所覆盖。其他高度抛光模具镶件也可以使用 CO_2 喷射流进行清洁。在显微镜下的对比观察表明，CO_2 清洁与使用金刚石抛光膏进行微抛光之间并无差异。

清洁和活化 PMMA

被硅酮脱模剂所污染的喷塑成型聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）键盘经过采用将液态 CO_2 和等离子态 CO_2 结合运用的新颖混合式清洁过程的清洁和处理（活化）后，做好了电镀加工的准备。

液态 CO_2 是一种无毒溶剂，能够溶解许多类型的有机物薄膜和油类，并且对于溶解和清除诸如硅酮脱模剂的低能物质特别有效。接近于零的表面张力和低黏性让液态 CO_2 能够渗透入显微级的孔隙和裂缝当中，将溶液清洁的能力深入应用于表面之下。

离心 CO_2 清洁技术可以采用液态或超临界态的 CO_2。在本应用中，采用了一种专利离心液态 CO_2 浸没萃取和等离子清洁技术，首先对 PMMA 基底材料进行预清洁，溶解和清除 PMMA 零件表面上残留的硅酮脱模剂和颗粒物。PMMA 零件被放置到一个清洗容器内并在离心清洁系统内进行处理（图 2）。

处理室门关闭，随后室内充满液态 CO_2，PMMA 零件以大约 300 r/min（可调）的速度进行双向离心运动。这个离心预清洗工序大约需要 10 min 即可完成，其中包含一个清洗和一个漂洗周期。一体化的 CO_2 蒸馏工序能够回收几乎全部的 CO_2 清洗和漂洗溶剂，同时能够将从 PMMA 零件表面上清除下来的污染物（硅酮脱模剂）分离并浓缩。

图 3 水滴接触角测量将用于确认经处理的 PMMA 基底的清洁度和可湿性

在这个预清洗循环完成后，处理室内的（CO_2）蒸气压力将降至大约 300 mT（真空条件），其在腔内应用了 RF（射频）以形成一种软流体能量和低压力的 CO_2 处理等离子体。

在这个等离子体表面处理周期内，PMMA 将继续在处理室内以约 25 r/min 的速度旋转 10 min。在这个等离子体表面处理周期完成后，清洁室将采用 CDA 流重新回填至环境压力。清洁和处理后的零件从处理室内取出并转运至电镀生产线进行处理。水滴接触角测量将用于确认经处理的 PMMA 基底的清洁度和可湿润性（图 3）。

这种混合式的等离子液体 CO_2 清洁过程非常独特。它采用了源于同种 CO_2 化学物质的安全、干燥、组合式的化学、物理清洁和冲洗操作。就这个 PMMA 零件应用而言，整个过程在同一处理室内完成，从而无需采用分为多个工序的传统湿式工艺。

CO_2 精密清洗技术为模具制造者、模压生产者和零部件制造商提供了独特的精密清洁和表面处理能力。目前已有多种 CO_2 清洁和处理方案可供选择，包括 CO_2 复合喷射流、离心浸没清洁和大气压等离子体处理。这些技术能够减少维护负担，并且不会给模具带来损坏，可以独立使用，使用时既可以采用混合式，也可以与其他传统维护方案结合使用。此外，CO_2 技术可以用于生产更清洁的小形、复杂的聚合物或塑料零件，用于改善装配工序的清洁度和粘接度，如清洁装配、电镀、粘接和涂覆。MM