有付出就有收获：为什么 Xaar TF Technology 墨水再循环技术仍首屈一指

Adam Strevens | Angus Condie | Mark Crankshaw

TF TECHNOLOGY

有付出就有收获：

为什么 Xaar TF Technology 墨水再循环技术仍首屈一指

Adam Strevens | Angus Condie | Mark Crankshaw

简介

十多年前，Xaar喷嘴压电打印头墨水再循环技术改变了工业喷墨打印，在此之前，外部墨盒和打印头歧管再循环技术已普遍使用。

随着采用TF Technology 墨水再循环技术（TF表示通流）的Xaar 1001打印头于 2007年问世，使用高色度和高粘性墨水进行可靠喷墨打印首次成为可能，从而 开辟了令人激动的新应用（例如从瓷砖打印刷转型 到数字喷墨打印）。

自此，众多市场部门和应用的工业喷墨解决方案基本上采用打印头墨水再循环， 例如使用玻璃料墨水的玻璃印刷、使用高度不透明白色颜料墨水的标签印刷、使用高浓度导电墨水的电子产品印刷以及使用高浓度颜料墨水的艳丽纺织品印刷[1]。因此，工业喷墨解决方案的潜在购买者（从OEM到最终用户）均会遇到各种不同的再循环方法。虽然产品多样化和竞争是一件好事，但由于每种设计均有自己的特点、优点和缺点，要在其中选择正确的打印头变得更加困难。

本白皮书可帮助人们轻松地作出正确选择。
其分为三个部分：

第1部分：

为什么墨水再循环极为必要

本节就任一打印头墨水再循环系统的基本特征（共同特点及其功能）进行了解释。

第2部分：

不同墨水再循环设计产生的不同效果

第2部分着重探讨不同打印头制造商如何将关键特点和功能纳入其再循环结构，并就不同设计影响系统功效的一些方式进行了说明[2]。

第3部分：

流速越高，收益越大

最后，本节将介绍一系列受控实验，以展示再循环的关键特性 - 墨水流经系统的路径和速度 - 如何确定打印头处理粘性流体（包括那些颗粒浓度百分比高的流体）的能力。换句话说，打印头墨水再循环的关键特征也影响打印头性能的各个方面，例如打印可靠性、喷嘴故障的预防和恢复、喷嘴延迟、打印头灌注和墨水稳定性。

第1部分

为什么墨水再循环极为必要

早期压电喷墨打印头的内部工作方式相对简单。关键组成部分是陶瓷制动器元件，当向其施加电压时，其高度和宽度会发生变化（变得更高和更薄）。这一膨胀可推动或弯曲膜片，使腔室中的墨水压力上升，迫使墨滴从喷嘴中喷出。制动器腔室配有一个墨水入口和一个从入口直接流向喷嘴的墨流。所需操作仅为在每个喷嘴的弯月面处施加适当压力，以及产生足够墨流来满足最大输出时的喷射需求。

但这种结构存在一些局限性：

- 当喷嘴因为正在打印的特定图像（例如有大面积空白区域）或因整个打印头处于闲置状态而不需 喷射墨水时，墨水可能会在打印头喷嘴中停留很长时间，并且会在不同腔室及其各自的喷嘴中停留不同时间。在此期间，墨水特性（如温度、粘度、颗粒浓度、溶解氧含量）可能会发生变化，挥发性成分可能会从喷嘴孔等开口处挥发到大气中。
- 此外，碎屑或气泡还可能进入打印头（尤其是在尘土飞扬的工业环境中），如果颗粒很大，则会直接堵塞喷嘴或者极有可能堵塞保护喷嘴的过滤器。

而当Xaar 1001打印头于2007年问世后，这些问题迎刃而解。这款打印头结合了Xaar开创性和高度创新的墨水再循环方法"TF Technology "- 这是全球首次采用这一技术的打印头，而该技术也成为了之后Xaar 1002和最新一代Xaar 1003，Xaar 501，Xaar 502以及如今Xaar 2001+打印头的主要特点。TF Technology墨水再循环技术通过直达喷嘴入口的完整流体路径持续循环墨水，而且非常重要的一点是（我们将在稍后介绍）让墨水直接流过喷嘴背部。这种持续运动可去除制动器中的碎屑和气泡，使得喷射更加可靠，并使喷嘴能从堵塞中"自我恢复"。此外，因为墨水停留在任何给定喷嘴中的时间较短，所以能更轻松且更均匀地控制墨水温度以及整个打印头喷嘴阵列中的墨水固体和气体含量。

图1显示了任何墨水再循环设计的基本特点。墨水经过墨水入口进入子歧管，墨水流在子歧管处先通过分配功能分开，然后墨水才进入给定的制动器泵送室。墨滴喷出后，尚未喷出的墨水会继而进入到另一个子歧管中，并从该处返回至墨水输送系统。

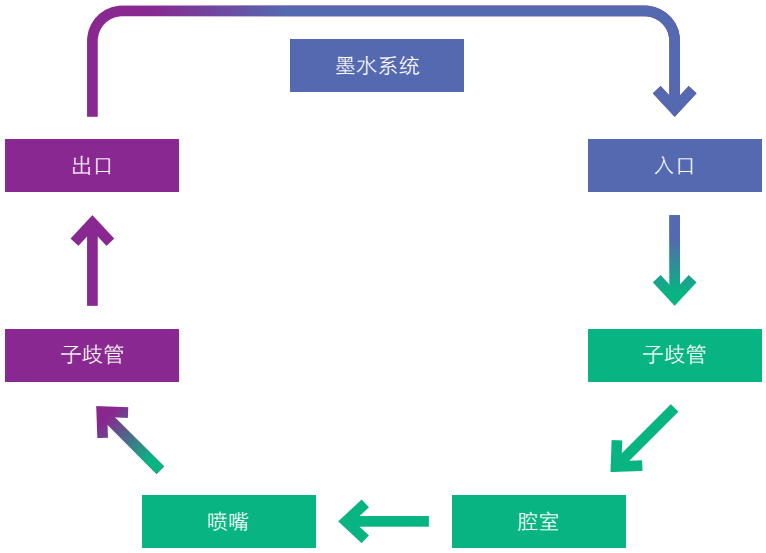


图1:
任何喷墨打印头墨水再循环设计的基本特点

第2部分

不同墨水再循环设计产生的不同效果

图2和**图2a**展示了Xaar将墨水再循环功能配置到Xaar1001打印头中的方式。(已开发成当前的Xaar 1003型号。**图2**下方的插图来自Xaar再循环墨打印头原始专利申请)。这里有几个需要注意的特点。首先是简单、不复杂的墨流。第二个事实是，在墨滴喷射期间，墨水直接流过喷嘴后部执行再循环 (如上所述)。

Xaar (WO2001012442, 2001)

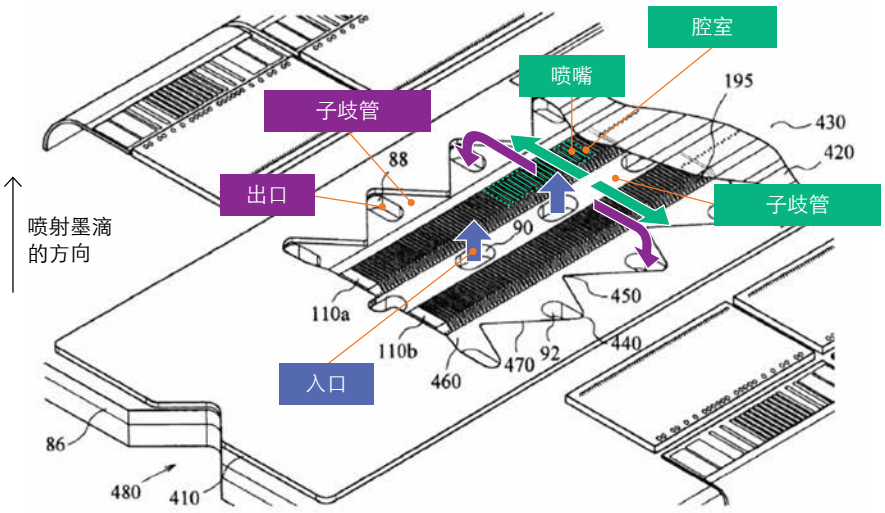


图2:
Xaar墨水再循环打印头的原始专利，该打印头具有开放式结构，可产生强劲的再循环墨流

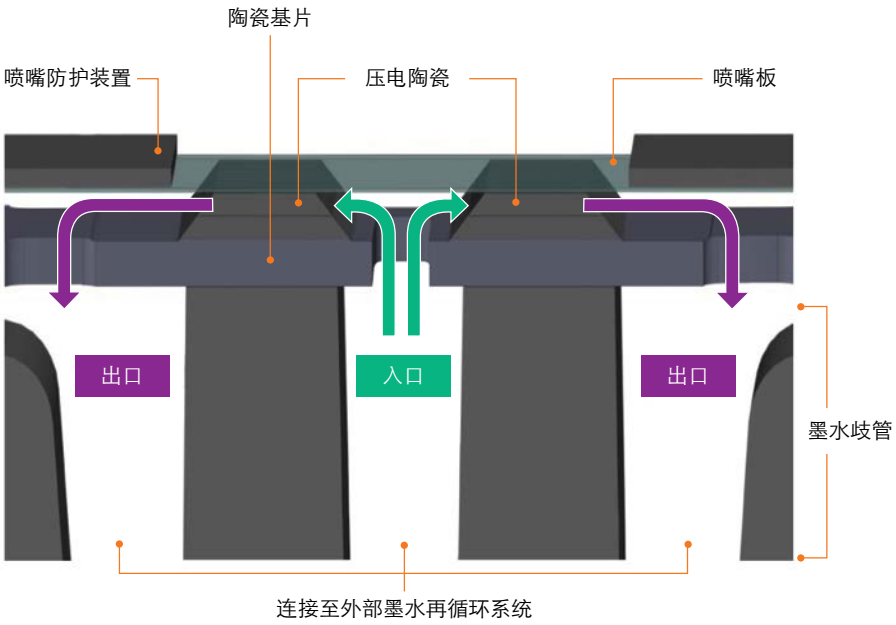


图2a:
Xaar TF Technology墨水再循环技术示意图，其中显示了流体进入压电陶瓷通道的路径-直接流到喷嘴后部，然后再流出

将图2和2a所示的Xaar结构与图3中采用替代设计的Xaar结构进行比较。即可清楚发现墨水通道更为复杂，通过各种上升通道、下降通道和再循环通道以及子歧管输送墨水。而且通过在腔室顶部驱动压电元件向下挤压墨水从喷嘴中喷出。这种称为"顶压模式结构"的设计不让墨水流过喷嘴后部进行再循环。

(WO2015147307, 2015)

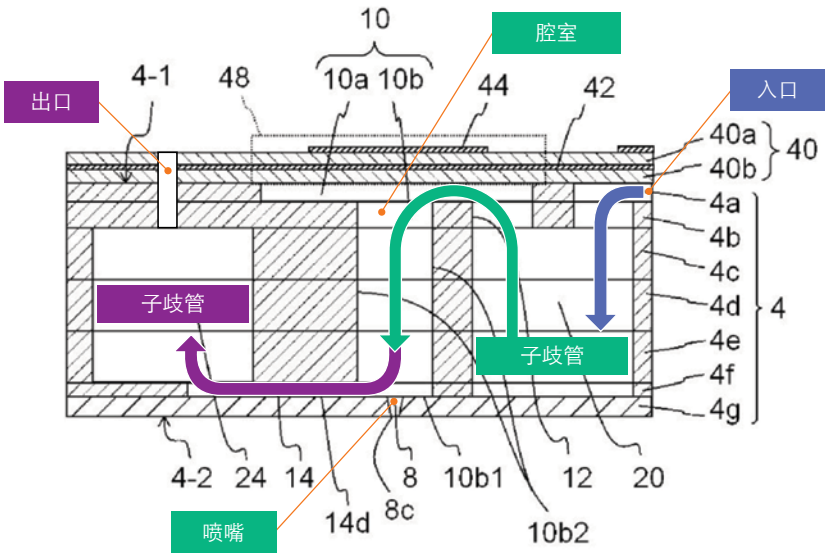


图3:
替代的顶压模式打印头设计

图3中另一个明显特点是墨水入口和出口很窄。这一特点的原因在于：通过限制入口和出口的压力损失，减少通过喷嘴的能量损失。但缺点是因为总的流动路径受到限制，必然会大大降低再循环流速。

再看图2。子歧管通道更加开放，因此墨水可立即进入通道，使得流速比具有较窄流体特点的设计（如图2所示）要高得多。喷嘴上游和下游均有压力腔；这种"双端"设计可防止压力损失，而无需借助通常称为限流器的狭窄入口和出口。这也意味着可以泵出更多的液体和更多更大的墨滴。

例如，最近已成功实现了高滴量打印模式。使用Xaar 1003 GS12打印头时，墨滴体积可高达400 pL。

第3部分

流速越高，收益越大

虽然打印头墨水再循环技术现在很常见（尽管仍有一些打印头OEM尚未采用打印头墨水再循环），但由于打印头结构不同，因此打印头制造商实现墨水再循环的方式会有所不同。有些设计在墨水再循环方面具有固有优势，而其他设计则存在更多限制。

因此，最终用户到底能体验到多少墨水再循环带来的益处具体取决于其所使用的打印头设计。设计方面造成墨水再循环存在差异的原因主要有两个：再循环流速以及再循环距离喷嘴后部的距离。以高流速直接流过喷嘴后部（例如Xaar 1001/1002打印头和近期的Xaar 1003/2001+型号中的喷嘴）会导致喷嘴本身中的流体发生相互作用。正是这种相互作用提高了打印头的生产率、可靠性和打印质量。

Xaar进行了一系列实验（见附录）来确定这些因素可在多大程度上改善打印头性能。实验着眼于三个方面：

- **喷嘴延迟和补充** – 确定再循环率的增加量，在乎于喷头在闲置一段时间后再启动打印对质量的影响降至最低。这里的延迟是指喷嘴可闲置的时间，且在此之后其仍可完美喷射。
- **弯月面压力操作窗口** – 展示高再循环流速如何降低墨滴喷射波动的影响并扩大操作压力范围。
- **灰度性能** – 展示TF Technology墨水再循环技术的"开放"结构如何减少缺墨，并实现高容量灰度子墨滴的可靠喷射。

实验结果表明，使用TF Technology墨水再循环技术的喷墨打印头内的墨水再循环带来了超出预期的好处。Xaar墨水再循环不仅仅简单可清除碎屑，并有助喷射难处理的液体，还改善了墨水和制动器的温度控制。由于再循环率高，而且墨水直接流过喷嘴背部，因此TF Technology促进了喷嘴通道中的墨水更换。这意味着打印头闲置很长一段时间後仍可迅速重新开始打印，而不出错。墨水在喷嘴中的静止狀态下会干燥而会变得更加粘稠，但这可以通过再循环更换墨水来避免。此外，在这种静态情况下，干燥会导致颗粒（例如用于着色的颜料）沉积在喷嘴孔内或孔周围。TF Technology墨水再循环技术也避免了这种情况。

总而言之，自Xaar 1001推出以来，TF Technology墨水再循环技术一直是Xaar在打印头技术方面所取得的一系列进步的重要组成部分，一直延续到最近的Xaar 1003和Xaar 2001+系列打印头，为工业喷墨打印树立了新的标杆[3,4]。

此外，TF Technology还在一系列应用中大大推动了数字印刷[5,6]，提供了明显的优势，最终改善了生产正常运行时间并拉长了维护周期间隔。

在多尘环境中实现可靠打印

瓷砖装饰现已几乎采用全数字化；只有Xaar TF Technology墨水再循环技术才能实现这一转换，这种墨水再循环能在恶劣的多尘环境中使用颜料浓度非常高的陶瓷颗粒墨水进行印刷。瓦楞纸板印刷相关的应用也同样受益于TF Technology。

即使是特白墨水打印，也能带来高打印质量

TF Technology帮助解决了数字技术一直难以克服的某些特殊的标签打印需求，例如高打印质量、打印肤色和极小文本，以及不透明度高的特白打印[7]（针对彩色前或后打白应用）。用于产生特定不透明度的二氧化钛颜料容易沉淀，最终堵塞喷嘴，而Xaar TF Technology墨水再循环技术的极高墨水流速可避免这种情况。类似地，在玻璃印刷应用中，TF Technology墨水再循环技术确保玻璃料基墨水 内的颗粒保持悬浮。

颜色均匀性

在广泛的单喷打印应用（如装饰层压板）中利用TF Technology墨水再循环技术的热管理功能，无论是横越整个打印机宽度或在不同时间打印，颜色依然保持一致。TF Technology的连续液体流动有助于确保墨水温度和粘度的恒定；这有助于防止颜色因墨水粘度波动而发生变化。

喷射非常粘稠的流体

这包括印刷3D打印用光聚合物树脂[8,9,10]，用于表面选择图案的光刻胶和PCB制造用阻焊液，它们当中的一些在室温下粘度都大于20cP。

Xaar 1003

TF TECHNOLOGY

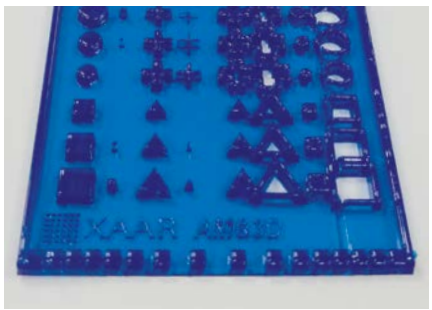
High Laydown TECHNOLOGY

Xaar 2001+

利用Xaar HL技术，通过单喷打印实现触感清漆效果[†]（喷墨速度为25m/min，打印厚度为80µm）（Xaar 1003 GS12）。Xaar 2001 GS12可在单程打印中以25 m/min的喷墨速度实现高达130µm的打印厚度

印度Scientifica Tiles LLP使用Xaar 2001+ GS12打印头（具备Xaar大墨量喷印技术）打印出墨量60 g/m²的瓷砖光泽效果（喷墨速度为24 m/min）

使用Xaar 2001+ GS12打印头通过扫描式打印装饰玻璃

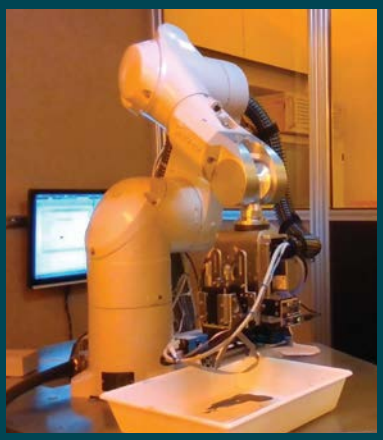


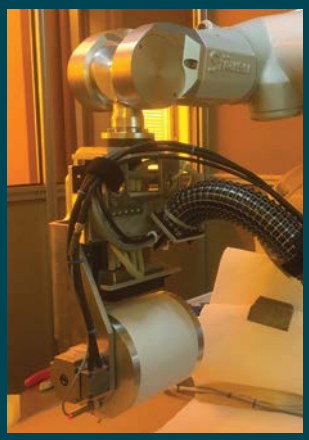
使用Xaar 1003 GS12打印头（配备标准三周期喷射）打印由光敏聚合物（50℃下粘度为40 mPa.s）制成的2.5D分辨率测试样品

[†]使用Xaar 1003 GS12打印头（配备标准三循环喷射）打印由光敏聚合物（50℃下粘度为40 mPa.s）制成的2.5D分辨率测试样品
http://whattheythink.com/articles/article.cfm?id=86463

3D打印拉伸试验棒，由BASF感光聚合物制成，使用配有Xaar二元大墨量喷印技术的Xaar 1003 GS12打印头 (同时采用三周期喷射模式生产类似样品)

KHS打印机中的瓶具打印站，包括UV固化灯和Xaar 1001 (左图)，处于"摩天大楼"模式；瓶具上带有白色+四色直接标签打印的喷射站 (上图)





左边显示的是带有Stäubli机械臂的Xaar喷射试验台 (位于瑞士的Iprint印刷研究所)，右边的特写显示安装在机械臂上的Xaar 1003打印头，用于在高加速和减速条件下喷射[11]

如需了解更多关于Xaar打印头和TF Technology的信息，或讨论Xaar能为您的企业做些什么，请联系 **info@xaar.com** 或访问 **www.xaar.com**

附录

实验#1：打印头通道中气泡的影响

图4是Xaar 1003喷射通道的长轴横截面的简化示意图，该图显示再循环墨流从喷嘴后面带走气泡[12]。

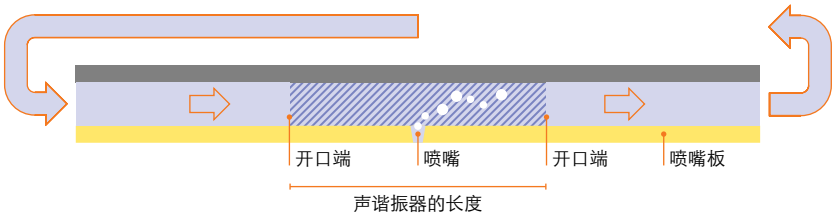


图4:
显示再循环墨流从喷嘴后面带走气泡的示意图（以红色箭头表示）

下面的**图5**显示声信号在喷射通道中的振幅与声谐振器频率的函数，通道中没有气泡（左图），且在距离声谐振器中心不同距离的a、b和c处，通道中也有气泡（右图）。

该数据是在Xaar[13]对改进的Xaar 1001打印头进行实验获得，该打印头能够在单个墨水通道中对70µm直径的气泡进行受控引入和光学监控。该数据清楚地显示声信号形状和峰值位置的变化，这取决于气泡是否存在以及气泡所处位置。即使是很小的气泡也会使声谐振器失谐，且会使给定墨水的滴喷射停止。

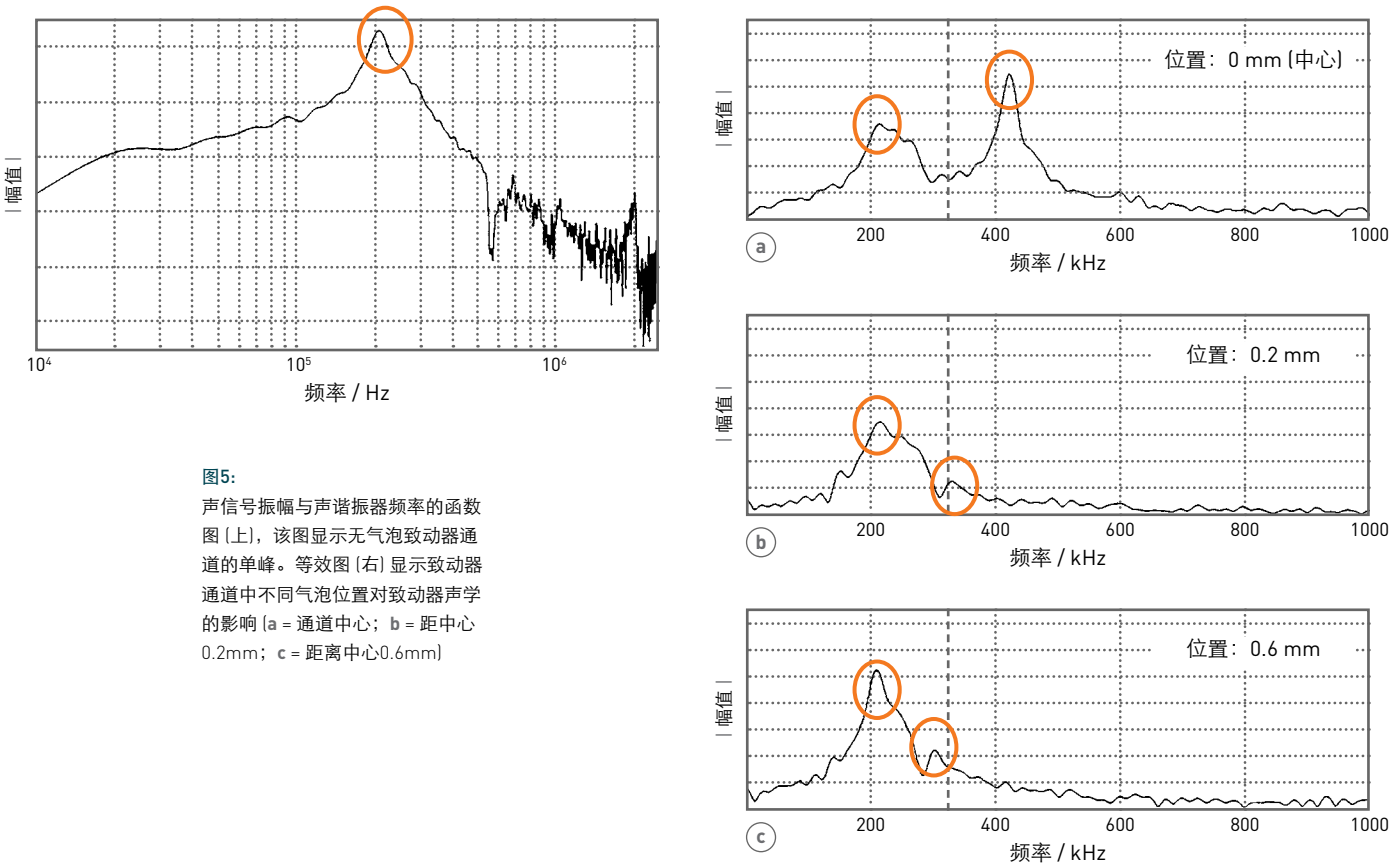


图5:
声信号振幅与声谐振器频率的函数图（上），该图显示无气泡致动器通道的单峰。等效图（右）显示致动器通道中不同气泡位置对致动器声学的影响（**a** = 通道中心；**b** = 距中心0.2mm；**c** = 距离中心0.6mm）

实验#2：喷嘴延迟和补充

当打印头闲置时，喷墨喷嘴的属性会发生变化，这可能会影响重新开始打印时的性能。尤其是对于溶剂或水基墨水，因溶剂（可以是水）部分蒸发而在喷嘴中的弯月面形成黏性表层时，墨滴的形成将发生变化。弯月面周围的墨水黏度略高于主致动器通道或腔室以及墨水回路的其余部分。通过喷嘴背面的墨水再循环可持续补充喷嘴中的墨水，并且理论上可防止弯月面上形成黏性表层，从而最小化闲置事件对启动的影响并提高打印质量和可靠性。

由于很难直接监控喷嘴内的墨水交换，因此该实验[14]采用了间接方法，根据（a）打印头在重新开始打印之前的闲置时间和（b）墨水流速来测量墨滴形成的变化。由于任何黏性层都会降低滴墨速度，因此可以通过测量点的位置误差来评估。

使用容易蒸发的溶剂墨水，在不同的闲置时间和不同的墨水流速的情况下，连续喷射10滴。以第10个点的位置作为参考，测量10滴中每一滴的点位。参考点位通过推理选出，虽然弯月面处的黏性表层会影响每次喷射中第一个墨滴的形成，但这种影响会逐渐被随后的墨滴去除，因此不会影响第十个和最后一个墨滴的点位。以不同的流速设定（30、60、125和160ml/min）运行Xaar 1001打印，每个设定持续闲置五分钟不进行喷射（**图6**）。此外，閑置时间長短對所測墨滴位置的影响會因不同流速而异（**图8**）。

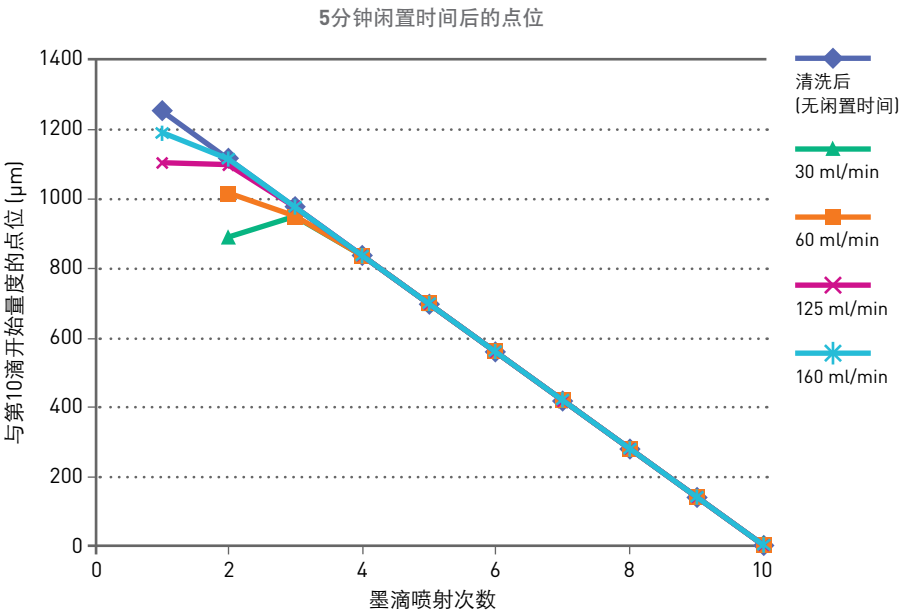


图6：
闲置5分钟后的落点测量位置，测量10点连喷中每一点相对于第10滴点位置的距离。所用试验图案在每个喷射点之间都有一个空白像素相隔，在每10点连喷之间有200个空白像素隔开

结果如图6所示。正如预期的那样，在无闲置时间的情况下（即直接清洗后），所有10个点是等间距的，因为没有时间形成黏性表层。经过5分钟闲置时间后，使用160ml/min的流速时，只有第一个点的打印距离缩短，预计是由于形成的黏性表层较轻微。但若将流速小幅降低至100-125ml/min，那么第一个点就会出现明显错位，与标称喷射速度下的第二个点实际重叠。若将流速进一步降低至60ml/min，第一滴将完全消失，而第二滴的速度也大大降低。随着流速的进一步降低，这些特征变得更加明显，第二和第三墨滴的速度都有所降低，这表明弯月面处已形成越来越黏的表层。引用的所有流速都是不喷射时墨头内再循环的速率。喷射时，所提供的总流速由喷射速率和再循环速率组成，这与墨水再循环路径更狭窄的替代打印头设计不同。在Xaar 1003和2001打印头中，再循环速率远大于喷射速率。

下图7显示点位误差如何反映打印头中流速的影响。在最高流速160ml/min下，除第一滴之外的所有位置误差都很小。在60ml/min下，第一滴缺失，且第二滴的位置偏离100µm，在30ml/min下则偏离200µm以上。

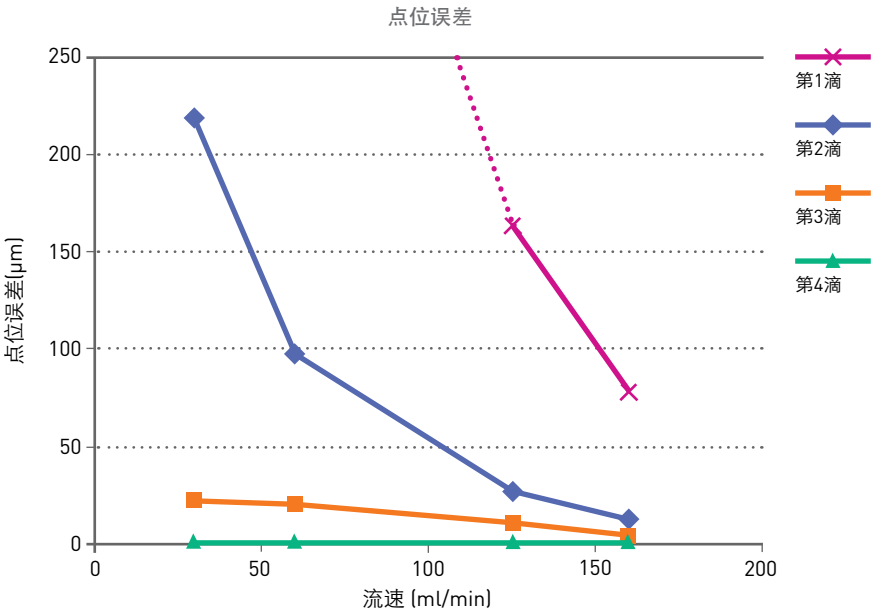


图7:
10点连喷中前4个点的点位误差与流速（30、60、125和160ml/min）的关系。在所有情况下，进行10点连喷前的闲置时间为5分钟

图8显示，在闲置时间较长的情况下，125ml/min的流速可防止任何墨滴损失。即使闲置时间长达24小时，仍可喷射出第一滴。第一滴的点位误差随着闲置时间的增加而增加，这表明会形成更黏的表层，而第二滴和第三滴基本上具有标称速度。

因此结论是，125ml/min的流速足以防止形成的墨水表层黏度增加，该表层会限制甚至完全阻塞任何给定的喷嘴。

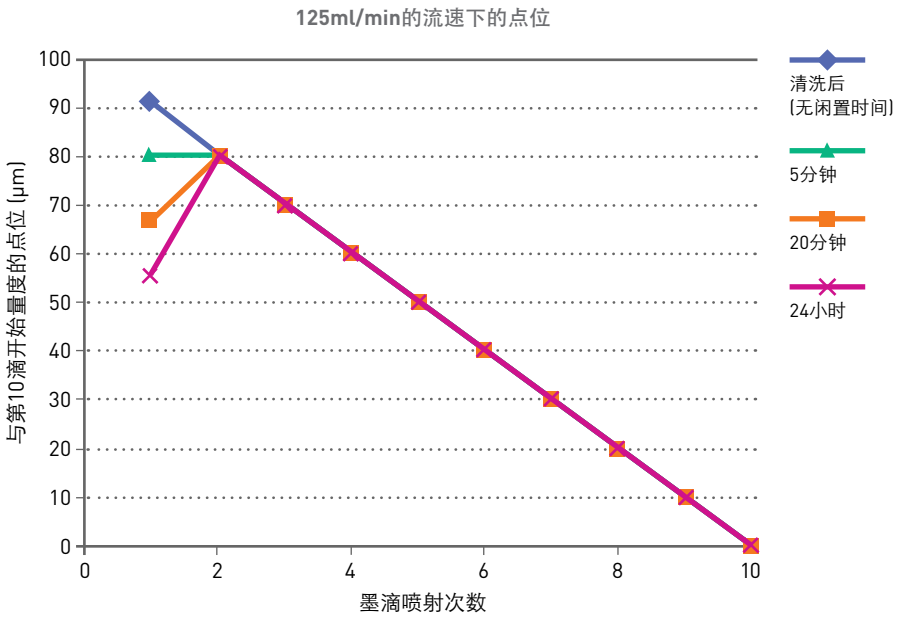


图8:
点位误差与流速的关系。125ml/min流速可防止形成黏性表层，该表层会堵塞喷嘴或导致落点位产生严重误差

实验#3: 闲置时间对打印质量的影响

第3号实验中，打印头在关闭再循环（即无墨流）的情况下闲置，在打印质量恢复前，记录下随后的墨滴缺失或错位的次数。结果如**图9**所示。在没有再循环墨流下闲置30秒，前两次或三次连喷已出现故障，并且在五分钟后，一些通道在37次连喷后仍未能恢复打印。然而，当再循环墨流恢复时（即使在闲置10分钟后），除第一次喷射外，所有通道均正确打印。

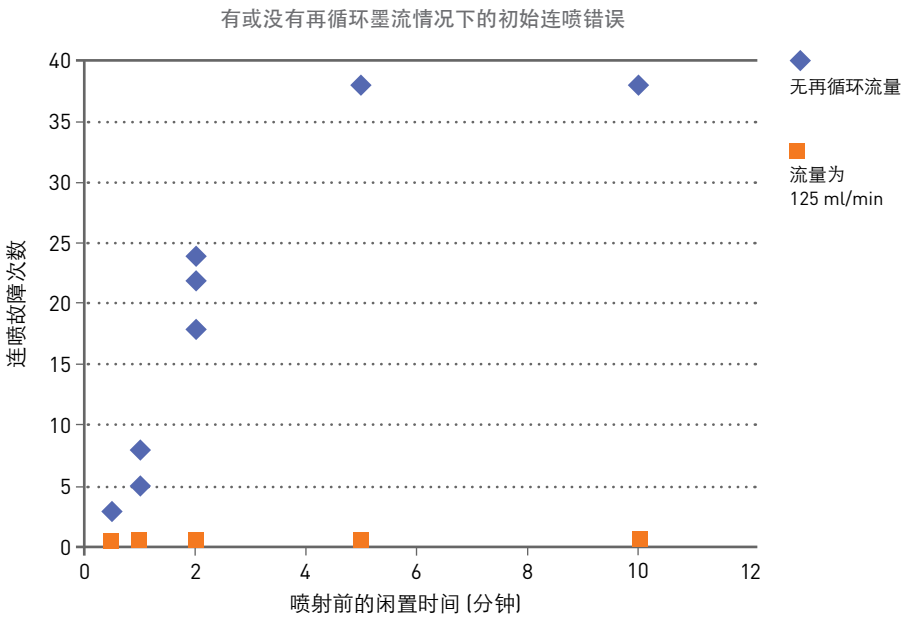


图9:
零流量与额定流量时的初始连续喷射的对比。蓝色菱形表示完全恢复前的10连射故障数（即首个没有缺陷的连续喷射）

弯月面压力 (MP) 操作窗口

打印可靠性往往非常重要，尤其是在单喷打印中，任何喷嘴故障都可能影响最终打印质量。可靠性前提在于，关键参数具有尽可能宽的操作窗口，以允许这些参数在不导致缺陷或故障的情况下尽可能变化多样。

该实验旨在测试这样一个假设，即通过降低局部喷嘴效应和墨流速 (包括液滴喷射) 的影响，提高再循环系统中的流速可为弯月面压力 (MP) 创建更大的操作窗口。为此，有必要测量在再循环率范围内操作可靠时的弯月面压力范围。

通过调节墨水供应量来调节MP弯月面压力在一定数值范围，并通过改变打印头进出口之间的压差 (DP) 独立调节再循环流速，以此测量MP弯月面压力窗口。对于不同MP和DP数值组合，喷射可靠性可通过目视检查测试设备内喷头所喷出的"帷幕"来评估。**图10**显示了良好和有缺陷"帷幕"示例。

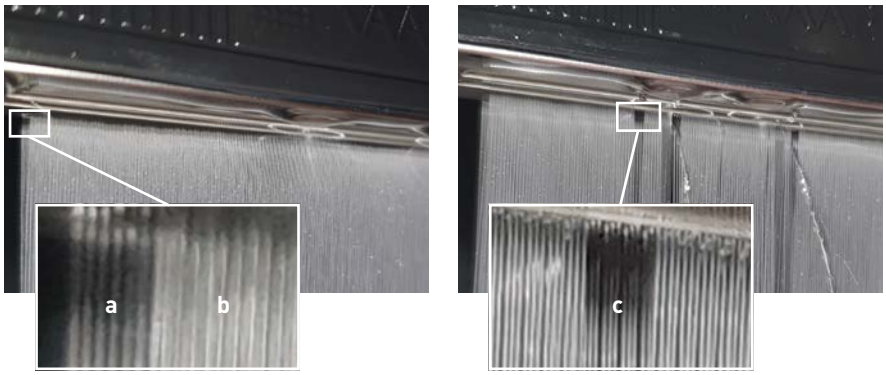


图10:
左上图像的插图显示，所有喷嘴在双层帷幕中喷射并且每个帷幕均对应于一排喷嘴。这张照片以一定的角度拍摄喷射帷幕，以便人们可以看到每个帷幕的起始位置。第一排 (也是离摄像机最近的喷嘴排) 中的前帷幕**a**看起来比后面的第二排帷幕**b**更亮。右上图中的放大插图显示了双层帷幕**c**前排帷幕中的不能喷射喷嘴

弯月面压力通常设置为略低于大气压力，以避免喷嘴在不打印时出现泄漏。接近大气压力—即负压较低的MP值(操作窗口顶部)，MP无法将墨水保持在喷嘴中，墨水会出现溢出现象。在负压较高的MP值(操作窗口底部)，弯月面更容易出现破裂，从而允 许空气进入喷嘴并导致喷射失败。在每个DP (流速) 设定点，改变MP弯月面压力以寻找可在无溢流情况下进行可靠喷射的最小负压，以及在空气注入导致喷嘴故障前的最大负压。这些MP数值代表了该DP压差设置下MP弯月面压力窗口的最大和最小值。

图11显示了使用典型UV固化墨水的测试结果, 当DP设定较低为40mbar时MP操作窗口为20个mbar (-5至-25mbar)，但DP设定为200mbar时MP值增加到26个mbar。

- 使用典型UV墨水的结果，其中横跨打印头上的压差 (DP) 是基于再循环流量强度而量度：
  - 压差为40mbar时，弯月面压力 (MP) 窗口 (范围) 为20个mbar
  - 差压为200mbar时，MP窗口增加到26个mbar
- 增加再循环率可提高弯月面压力操作窗口

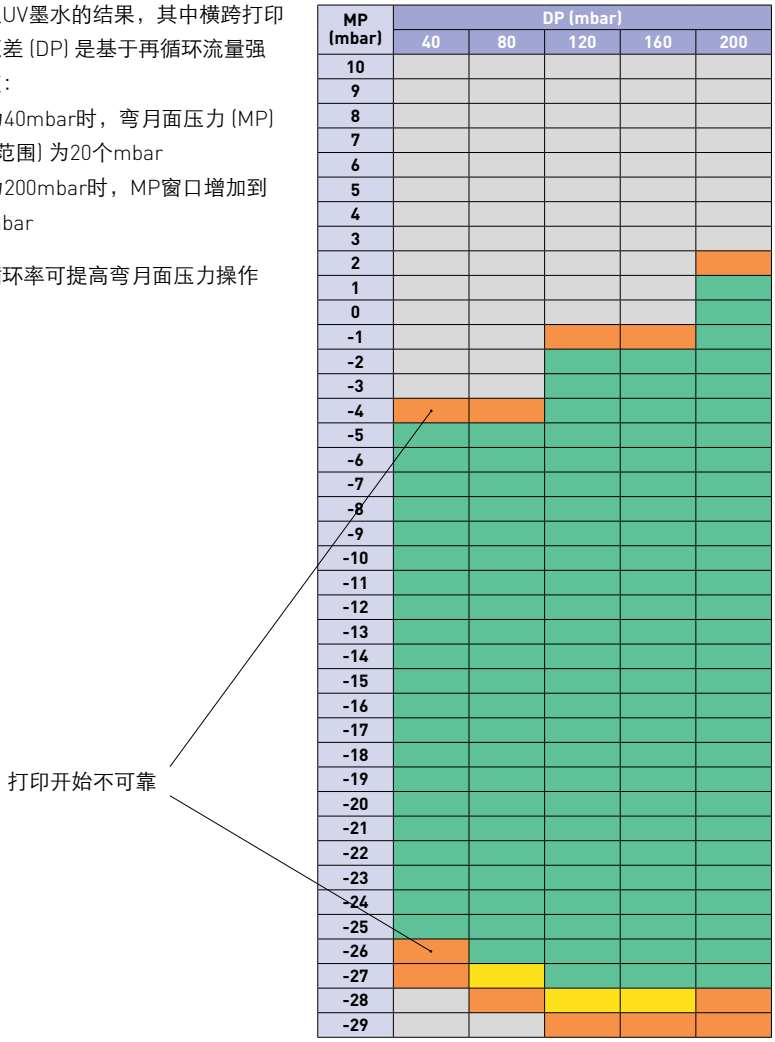


图11:
绿色单元代表可靠操作，红色单元代表不可靠操作 (顶部范围表示溢流，底部表示喷嘴故障)。黄色表示临界/不稳定性能。

灰度性能

我们之前已经描述了Xaar TF Technology墨水再循环技术的"开放式"结构如何确保墨水轻松地进入打印头通道。结合两个声波集中在喷嘴上的"双端"通道结构，TF Technology墨水再循环技术可以重复产生墨滴，而不会出现墨水不足的情况。就Xaar 2001 GS12而言，打印头最大生产率可达360 µl/s/inch，提供了多种墨滴大小选择，因此也提供了灰度选择以获得出色的打印质量。

二元性能

还应指出的是，具有更高速度、更高分辨率的二元打印模式也受益于喷射可靠性方面的Xaar TF Technology墨水再循环技术 (尤其是对于颗粒墨水)。二元模式中包括一种特殊的低分辨率、高滴量模式，即前面提到的大墨量喷印模式。在单喷打印中，Xaar 2001+GS12 U能够以线速50m/min的速度沉积高达80µm厚的UV固化层 (取决于墨水和墨水系统类型；通过串联两个打印杆与填隙式UV印刷，很容易实现盲文和三角形警告标志打印所需的厚度)。

参考文件

1. Handbook of Industrial Inkjet Printing, Werner Zapka编辑，Wiley出版，2018年
2. Presentation to the IJC: An Analysis of Different Ink Recirculation Architectures and their Benefits. Angus Condie, Mark Crankshaw, Adam Strevens, Xaar plc, 2016年10月5日-6日
3. Xaar 2001+ Printhead Technology Delivers the Speed Needed for New Canon Digital Label Printer, What They Think, 2018年6月20日
4. Print Quality vs. Print Resolution, Durst white paper（http://viantrade.com/pdfs/EN-durst_whitepaper_final.pdf, 2014）
5. www.Xaar.com/applications
6. High Speed Sintering for 3D printing applications Neil Hopkinson, Adam Ellis, Adam Strevens, Manolis Papastavrou和Torben Lange, Xaar plc, 2017年
7. UV white inkjet inks for single-pass label applications, Mark Ritchie, Xaar plc, 2016年
8. Jetting Very High Viscosities With Piezo-Electric Drop-On-Demand Printheads For Increased Capability Of Photopolymer 3D Printing, Nick Jackson1, Wolfgang Voit2, Renzo Trip2, Angus Condie1, Xaar plc; 1Cambridge, UK; 2Stockholm, Sweden, 2019年
9. Jetting Very High Viscosities with Piezo-Electric Drop-On-Demand Printheads for Photopolymer 3D Printing, Nick Jackson, Wolfgang Voit, Renzo Trip, Angus Condie, 2019年
10. Presentation to IJC: Expanding the boundaries of piezo inkjet technology with very high viscosity jetting capabilities. Nick Jackson, 2019年11月
11. Inkjet printhead on a robotic arm, R.Trip, Xaar plc, R.Rätz, iPrint Center, O.Bürgy, iPrint Center, F.Bircher, iPrint Center, W.Zapka, Xaar plc, 2018年
12. Presentation at InPrint Italy, 2018年, Xaar打印头技术, Tomas Cerny, Xaar plc, 2018年
13. 硕士论文: Detektion und characterisierung von verunreinigungen in Piezokeramischen Mikrokanälen Stefan Sack, 1989年
14. Ink Recirculation – Xaar TF Technology A Study of the Benefits, Mark Crankshaw, Mark Rulman, Hanifeh Zarezadeh, Maëlle Douaire, Angus Condie, 2016年

Xaar plc

电话： +44 (0) 1223 423663

电子邮箱： info@xaar.com

www.xaar.com

扫描二维码，关注赛尔官方微信。

2020年11月2日发布，英文版