

1 实践单位概述

本次实践单位佛山快造三维科技有限公司于 2017 年 08 月 11 日成立，注册资本 100 万元。该公司是一家以 3D 打印为核心业务的科技型企业，致力于国内的 3D 打印解决方案推广与应用服务，主营业务有四大业务版块：3D 打印服务，设备销售，3D 创客实验室建设，3D 打印课程培训。销售北京太尔时代，先临三维，天远三维，阿泰克三维扫描仪等国内外品牌设备。公司产品涉及航空航天、电子电器、汽车制造、精密器械、雕塑制作、考古文物、文化创意、生物医药、珠宝首饰、工艺礼品等多种行业。

2 工作情况总结

2.1 实践岗位

本次实践岗位为 3D 打印建模，拟进行气动软体手爪 3D 打印研究，具体内容如下：

气动软体手爪作为机器人末端夹持器，能够适应多种产品，可用于夹持翅片管，具有重要的工程应用价值。目前软体手爪多为中空结构，主要材料为硅橡胶，制造工艺通常需要粘接，容易出现粘接缺陷。针对软体手爪的制造问题，为了避免粘接，采用 3D 打印一体化成型，根据 3D 打印的技术要求对气动软体手爪进行 3D 建模、切片等，进行气动软体手爪 3D 打印实践。

2.2 工作情况总结

2.2.1 软材料的分析选择

目前市场上已经开发好的 3D 打印平台都是应用于刚性材料如塑料、金属、树脂等材料的打印制造。而软材料具有低杨氏模量、易变形的特点，导致软材料的 3D 打印工艺与其他材料存在很大的差异，针对这个问题，本次实践基于 DIW 3D 打印平台进行软材料 3D 打印。

面向软体手爪的软材料 3D 打印研究过程中，选择符合软体手爪机械性能和可打印性能稳定的 3D 打印软硅胶材料非常重要。硅胶是常用的软材料之一，由于与软材料相关功能部件所需要的是密闭空间，因此所需硅胶材料必须具有良好

的成型性以及相容性，这是本次实践材料选择的关键考虑因素。各硅胶的组成成分各不相同，所变现出来的材料性能存在差异。因此，对单组份硅胶和双组份硅胶进行简单的材料性能测试，多方面对比选择最佳的打印材料。

经过测试实验，最终选用了单组分 DC737 材料作为本次实践的软材料。

2.2.2 3D 打印机平台喷嘴分析

硅胶材料 DIW 式 3D 打印平台的挤出系统已在前面报告中说明，软材料挤出系统的主要作用就是稳定地、高质量地将硅胶软材料挤出，选用气压挤出方式，具有一定的安全性、可靠性。气压挤出的整个工作装置又包括三个部分：气泵、气压调节控制器和喷嘴装置，而最重要的是喷嘴系统部分，它不仅影响整个打印过程中材料的流动情况，而且还会影响整个实体成型的状态。喷嘴装置常用两种类型的喷嘴：直管型和楔型喷嘴，依次对这两种喷嘴进行分析选用；其次分析喷嘴内硅胶材料被挤出的流态分析，包括粘性流体流动特征、流体动态特征分析；然后对材料挤出后的挤出成型模块分析，不仅需要分析材料在挤出喷嘴内的受力情况，还需要研究硅胶材料挤出喷嘴系统模型和挤出后成型状况。

喷嘴是整个气动挤出式 3D 打印装置的执行部件，呈收缩状的喷嘴结构能够有效的实现硅胶材料的挤出成型。在本次实践中，将对比目前最常见的两种喷嘴类型（楔型喷嘴和直管型喷嘴）。这两种喷嘴具有不同的结构，结构的差异会导致仿真和实验中硅胶材料挤出时的状态，特别是挤出硅胶的压力分布与流动速度分布。

经过分析讨论，两种喷嘴所表现的共同之处是，中轴线上的流速随驱动挤出气压的增大而增大；同样大小的驱动挤出气压下，楔型喷嘴的流速偏大，且顺滑，最终选用楔型喷嘴作为接下来各项实验研究的喷嘴类型。此外，还进行了楔型喷嘴两相层流的分析，研究了气压两相对硅胶的出丝状态的影响。

2.2.3 密闭空腔结构 3D 打印实验及工艺参数确定

在软体机器人领域中，气动式的软体手爪占主导地位，气动的软体手爪内部一般拥有内部腔道结构，如何进行参数化腔道密封是一个有待解决的问题。针对这一问题，考虑到充分利用 3D 打印过程中硅胶材料的粘性，因此通过倾斜的角度用于桥接，以构建覆盖硅胶 3D 打印过程中空腔的密封结构。

桥接概念和关键工艺参数以及用于研究桥接的工件的形状和尺寸如图 1 所示。图 1 (1) 显示了该零件的透视图，该零件的底部具有一个开放空间，通过桥接填充该开放空间以密封空间。基部和桥接区域的特写视图如图 1 (2) 所示。图 1 (3, 4) 中的侧视图显示了桥接工件的底部、桥梁过渡和顶部区域，桥接过渡角度为主要的工艺参数。主要以 30° ， 45° 和 60° 的过渡倾斜角度为主，验证过渡倾斜角度对本实验中密封腔道结构的影响。

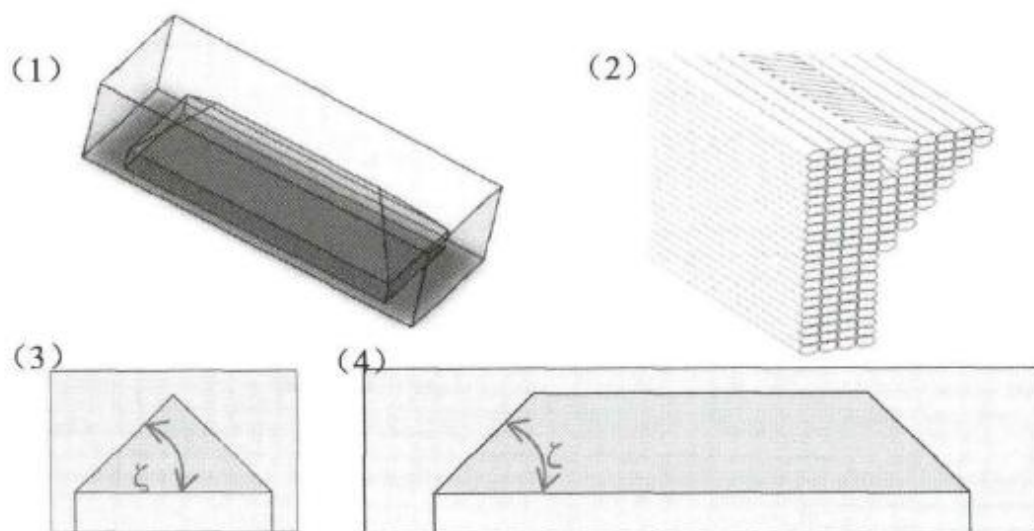


图 1 桥接概念和关键工艺参数

在所有的桥接密封测试中， 45° 的桥接过渡角度所打印出来的结构是最佳的，如图 2 所示。图 2 显示了测试打印样品的底视图，以及测试打印样品的截面图和细节图，最大程度地减少缺陷破坏桥接的现象，从而减轻了在构建填充时由压缩力和拖动力引起的桥接边缘变形。

其他桥接角度导致打印失败的主要原因有三个：挤出不足、过度挤出和零件变形。当桥接过渡角度过小时，桥跨接线没有足够的粘附力，没有提供足够的压缩力以桥接硅胶材料。当桥接过渡角度过大时，虽然为内部桥接边缘提供了足够的压缩力，但实际上在打印过程中存在过度挤出的现象，桥接边缘上的任何缺陷都会累积并扩展到后续层，从而导致构建失败。



图 2 三个角度测试打印样品

2.2.4 软体手爪三维模型设计

2.2.4.1 概述

基于 Solidworks 设计了软体手爪的结构，手爪整体为气囊驱动式结构，执行器由多个气囊结构组成，执行器的弯曲取决于气囊的充气情况，因此，气囊的设计是最关键的。图 3 是气囊的横截面，气囊的设计基于 Yeoh 模型，该模型广泛用于不可压缩的材料。

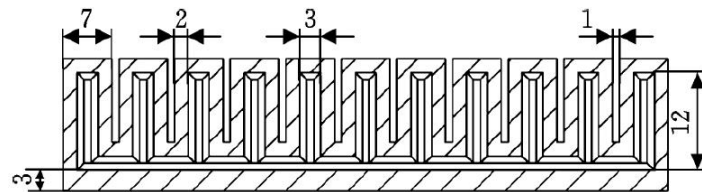


图 3 气囊的横截面

由 Yeoh 模型可知，气囊壁的变形量随驱动气压压强的增加而变大，如果想获得小压强大变形，可以减小气囊壁的厚度，然而减小壁厚会影响气囊的强度以及最大承载压力。此外，当压强一定时，变形量随着气腔高度和宽度的增加而增强。

2.2.4.2 软体手爪结构设计及参数尺寸

该软体手爪的整体结构主要分为五个部分：1) 位于底部的基层板；2) 位于上方的 11 个气囊相互连通；3) 具有部分倒刺结构的前爪垫；4) 具有部分倒刺结构的后爪垫；5) 气管。气囊式驱动软体手爪具体结构如图 4 所示，其整体尺寸大约 81mmx20mmx 18mm，共拥有 11 个相连通的腔室。在对此气囊式软体手爪进行侧躺(气管接口所在面向上)3D 打印过程中，即如图所示的 XYZ 坐标系，材料的累积层在 Z 方向上构建。气囊式驱动器软体手爪的具体尺寸参数为：气囊的宽度 7mm，气囊的内部高度 12mm，气囊的长度 20mm，气囊壁厚 2mm，气囊之间的距离 1mm，基板的厚度 3mm，过渡区的厚度 1mm，过渡区的角度 45°。

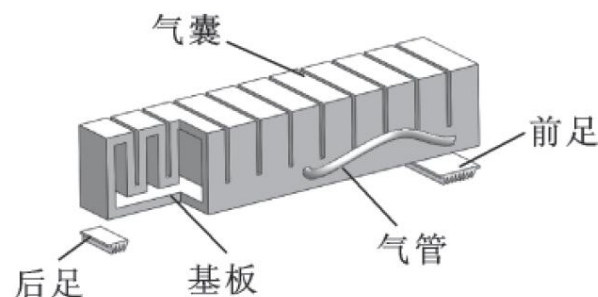


图4 气囊式驱动软体手爪结构

2.2.5 软体手爪的 3D 打印

通过 DIW 式 3D 打印平台进行 3D 打印气囊式驱动软体手爪，其打印制造过程如图 5 所示：1) 使用三维建模软件对气囊式驱动软体手爪进行建立模型；2) 使用 Simplify 3D 软件对 STL 格式的模型切片，调整好打印参数，最终生成喷头移动运动路径 G 代码文件；3) 将硅酮胶注入储料筒中，注意避免气泡的产生影响打印质量；4) 气囊式驱动软体手爪由 DIW 式 3D 打印机层层累积硅胶材料制造而成；5) 制造的软体手爪在 60℃ 的高湿度环境中固化 24 小时；6) 将管子嵌入制造的结构中，并加以密封，以形成整体软体手爪系统。然后将该制造的整体搭配到气动控制器中以控制软机器人的运动。

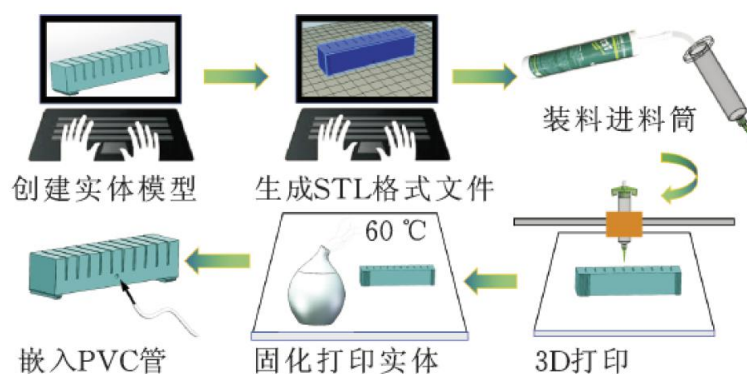


图5 软体手爪打印制造过程

由于硅胶材料特性和固化成型机理情况，对 DIW 式 3D 打印机的打印参数进行了优化。在材料选择阶段，已经选择出单组份硅胶材料，在打印参数优化阶段，对材料进行优化分析，获得最终最优打印参数组合，并使用对应的参数、材料打印出相应的软体手爪。具体参数为：层高 0.5mm，填充率 100%，打印速度 15mm/s，喷嘴直径 0.84mm，气压 22psi，线宽 0.6mm，热床温度 50°，空气湿度 50%。

2.2.6 软体手爪的实验分析

为分析 3D 打印出来的软体手爪的性能，进行了角度弯曲实验和失效气压实验。

首先，为进行爬行实验的比较，建立了闭环控制系统模型（如图 6 所示），主要包括直流 12V 电源、空气泵（30 L/min）、减压阀、电磁阀（MAC-35A）、微控制器（Arduino UNO）和 3D 打印的软体手爪。它使用小型真空泵和电磁阀来控制软机器人的线性运动。压缩泵是控制软体手爪的主要动力源，小型真空泵起抽气作用。

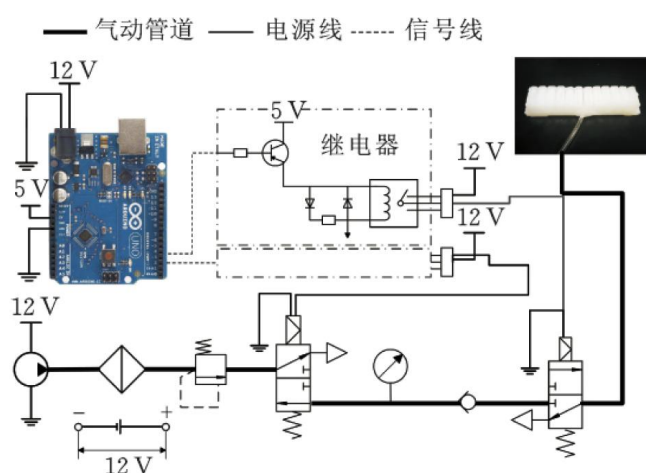


图 6 控制系统模型

2.2.6.1 角度弯曲实验

软体手爪的弯曲角度随驱动模块充气气压的增大而增大，且限制最高气压在此过程中不能出现破裂、漏气等失效现象，3D 打印的软体手爪能够达到较高的弯曲程度。

为了表征性能，对软体手爪进行弯曲程度测量。软体手爪分别从 5kPa 到 20kPa 进行 20 次测量，测量结果如图 7 所示。

在弯曲的最初阶段，软体手爪的弯曲角度响应较快，内部通道压力迅速变大。当软体手爪的驱动压力为 5kPa 时，弯曲角度通常大于 120° ，主要壁厚的尺寸大小影响较大，壁厚越小，其弯曲角度变化越快。

此外，各自打印软体手爪的弯曲角度随材料密度的增加而变小。软体手爪弯曲测试结果基本符合预期，当压力在 7 到 12kPa 之间时存在较大差异，是因为存在通道横截面的不均匀几何形状。由于硅胶材料的特殊性质，其打印出来的软体

手爪在施加气动压力超过 8kPa 时，产生局部膨胀现象导致多次失效，无法确定真实弯曲测量结果。总之，软体手爪的整体尺寸要求和局部打印缺陷都会严重导致软体手爪的弯曲角度误差。

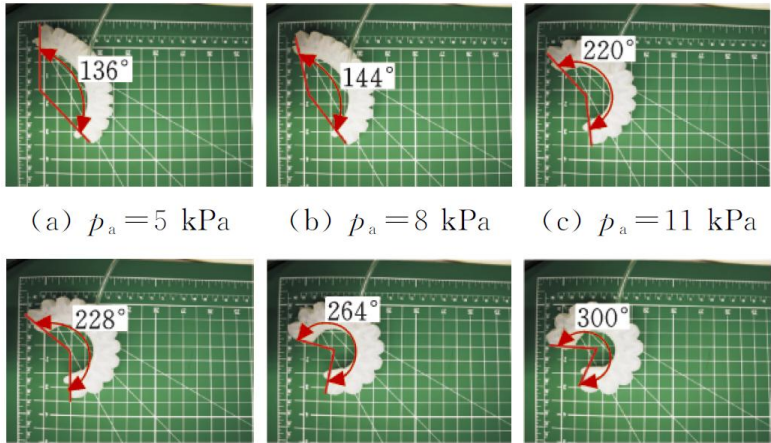


图 7 软体手爪弯曲实验

2.2.6.2 失效压力实验

为验证 3D 打印单组份硅胶的软体手爪打印质量，打印多个软体手爪，测试打印出的软体手爪的破坏失效压力以及软体手爪的质量。

图 8 显示了破损位置的情况，一般气囊驱动式软体制动器的失效原因主要是是打印误差和材料本身的粘结不稳定引发的驱动失效，如打印裂口、应力集中、局部膨胀等。软材料 DC737 打印出来的软体手爪表现出了良好的性能，较为可靠。

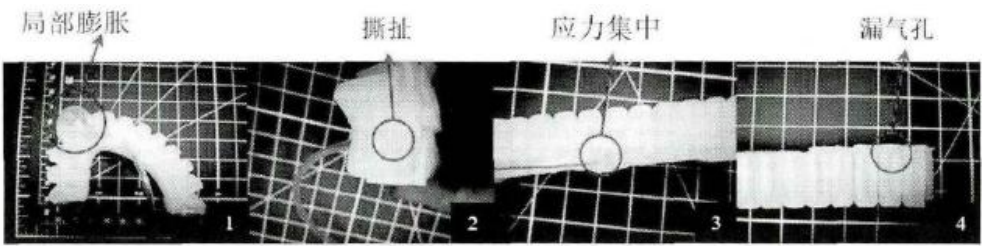


图 8 软体手爪失效形式

多次实验发现，软体手爪平均失效压力为 78kPa，平均质量为 22.4g。

3 实践收获

软体手爪是机器人技术发展的一个重要方向，在多方面具有巨大的应用前景，如抓持物体、野外勘探以及伪装逃生等方面。3D 打印技术在制造具有复杂外部形状和内部多孔结构的软体手爪方面上具有独特的优势，将复杂的内部腔道结构

设计与 3D 打印技术连接在一起，可以创建一系列具有多材料、多驱动方式的软体手爪。传统的软体手爪制造方法大多以模具浇注成型，由于传统方法的单一性和低效率，已经逐步地被 3D 打印技术所取代，因为 3D 打印更快、更可靠。结合现有直接 3D 打印软体手爪的国内外研究现状和优缺点，以及直接墨水打印式（DIW）3D 打印制造技术理论，使用 DIW 式 3D 打印平台系统，建立软材料 3D 打印方案，进行了有机单组份硅胶材料的选择，并开展了使用所选材料和搭建的平台进行气动 DIW 式 3D 打印硅胶的相关打印工艺参数研究，最后对所得最佳工艺参数进行软体手爪的打印实验研究。本次实践主要研究收获如下：

（1）针对软材料的 3D 打印工艺的特殊性，本次实践研究了基于直接墨水打印式（DIW）3D 打印平台，介绍了搭建平台的五个基本组成部分，设计搭建了一系列能够打印软体手爪本体及驱动结构的硅胶材料 3D 打印平台。在材料方面，对多种硅胶材料分别进行分析比较，最终确定 DC737 是最佳适合的打印软材料。

（2）针对硅胶材料 DIW 式 3D 打印平台的喷嘴装置，进行喷嘴流动模型分析，依次对直管型和楔型喷嘴这两种喷嘴进行分析选用。分析了喷嘴内硅胶材料被挤出的流态分析，包括粘性流体流动特征和两相层流流体流动模型。针对材料挤出后的挤出成型模块进行分析，研究了硅胶材料在挤出喷嘴内的受力情况和挤出后的成型状态。

（3）为实现高质量、高效打印出实体或复杂几何结构，基于本此实践中的 3D 打印平台和硅胶材料，通过对硅胶 DIW 式 3D 打印过程中的打印参数进行一系列优化实验。设计了单线材打印、单线墙壁打印、矩形实体打印、桥接过渡实体打印和测试拉伸件打印的实验，经过一系列实验对比，最终确定驱动挤出气压为 23psi、喷嘴移动速度为 5mm/s、层高为 0.5mm、间距为 0.6mm、桥接过渡角度为 45° 和填充角度为 $\pm 45^{\circ}$ 。并使用最佳打印工艺参数进行试验实体的打印，验证了最终打印的实体质量。

（4）根据气囊充气变形的原理并分析软体手爪的运动特征，设计了多气囊式驱动软体手爪，基于 Yeoh 模型，确定了仿生软体手爪尺寸。利用软体手爪的气动控制原理，设计气动控制系统。使用 DIW 式 3D 打印平台和选用的材料，进行多次打印软体手爪，分别对软体手爪的进行角度弯曲失效压力实验，验证了

所选软材料 3D 打印平台系统能够高效、高精度打印软体手爪的可行性。

4 教学案例

此次实践经历可作为新办专业机械设计与制造的专业核心课程的教学案例。比如对《机械产品数字化设计制造》这门课的教学有所启发，以往在教学中缺少实际机械设计项目，使学生对实际机械设计过程的理解不深，可以将气动软体手爪的设计制造作为教学用例，将实际项目的设计过程融入到教学过程中，提高教学效果。

气动软体手爪的设计制造流程图如图 9 所示，是一个完整的产品设计制造过程，可以作为一个教学案例，带领学生完成产品三维设计、3D 打印材料选择、3D 打印实操、产品实验的产品设计制造过程。

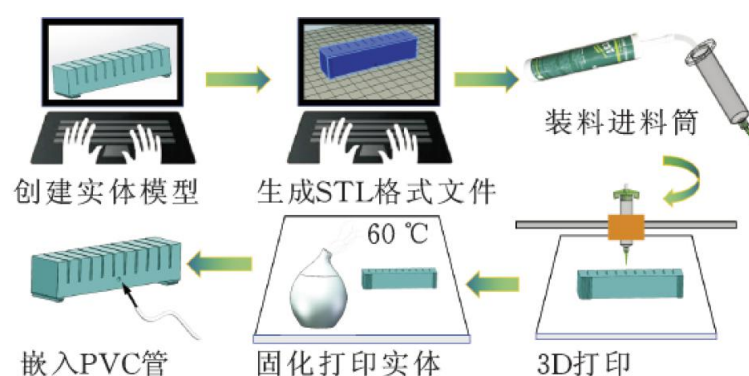


图 9 软体手爪打印制造过程