

增材制造创新性整体加强结构的设计和表征

■ 英国考文垂大学 杨 静

■ 呼和浩特众环（集团）有限责任公司（内蒙古 010051） 张国斌

摘要：增材制造（AM）和熔融材料沉积技术（FDM）的最新进展已经带来了3D打印的商业化和普及。本文针对复合加强结构的变形进行了研究探讨，开发了通过弯曲试验来研究加强结构的功能。通过有限元分析（FEA）数值计算变形和试验测试结果对比分析误差，创建了新型加强结构，并与基准加强结构进行比较。

随着3D打印的商业化和普及，3D打印数据可以以数字形态存储，并可以通过3D建模软件进行修改，数据方便复制并通过互联网传输。有限元方法具有精确建模的优点，在工程应用中广受欢迎。本研究中，通过有限元分析计算加强结构的变形，并对计算结果与弯曲试验结果进行比较。

1. 模型设计和制造

（1）整体加强结构：基准面板由CATIA设计，整体加强结构被设计成尺寸为60mm×60mm、峰高为5mm的加强筋。为降低风险，面板的设计由CATIA V5中，基准曲线加强面板的实体模型转换成详细的CAD数据。整体加强结构如图1所示，复合加强模型由

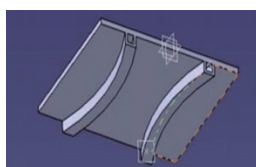


图1 CATIA实体模型

表层和两个曲线加强筋组成。

面板的一个重要特征是参数方式，因此几何体的形状和尺寸完全由设计面板优化指定。尺寸被定义为设计变量，以确定加强结构。例如面板的厚度、加强筋的厚度和高度。面板尺寸被定义为70mm×60mm的矩形，以包括沿顶部边缘和底部边缘，半径80mm的曲线肋。当面板厚度为2mm时，曲线肋要求为6mm×4mm的矩形，包括4mm×3mm的矩形孔。图2显示了加强结构尺寸。当设计曲线肋时，三阶均匀有B样条表示具有

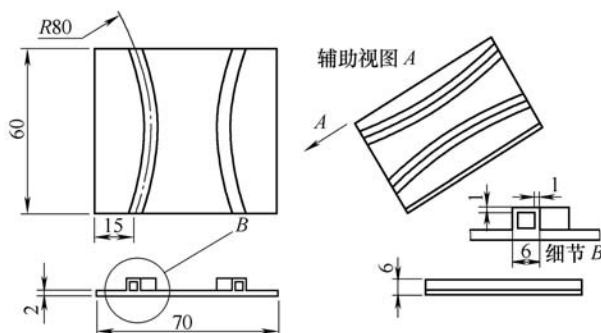


图2 加强结构尺寸

两个端点和控制点的加强筋曲线，以使加强筋始终保持在面板区域中。

设计变量定义加强筋曲线的形状和位置，如图3所示。更多的点可用于定义加强筋曲线，但设计变量的数量会随之增加。加强筋曲线由位于面板周边的加强筋端点产生，使用周边曲线参数来定义面板周边上的端点。参数化可以表示面板与加强筋具有任意几何形状。应注意，每个加强板的端点可以用设计变量 x_1 和 x_2 表示，设计变量 x_3 和 x_4 可表示作为曲线中心的控制点。为了使加

强筋的横截面均匀，设计变量应包含半径、高度和宽度。目前，加强结构支持任何半径的曲线加强筋，但在优化期间设计应采用80mm半径的加强筋。

(2) 产品建模包括支撑制作和实体制作两个方面。

支撑制作：由于FDM工艺特点，系统必须对产品CAD模型做支撑处理，否则，在分层制造过程中，当上截面大于下截面时，上截面的多出部分将悬浮（或悬空），因此截面部分发生塌陷或变形，影响原型零件的成型精度，甚至原型不能成型。支撑还有一个重要目的。建立基础层。在工作平台和原型底部之间建立缓冲层，使成型后容易从工作平台剥离原型。此外，基础支撑可以给制造过程提供平面。所以关键是制作FDM建模支撑。

实体制作：在支撑实体的形状基础上进行，底部叠层形成三维实体，可以确保实体建模的精度和质量，如图4所示。

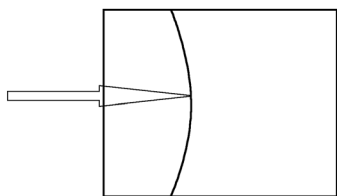


图3 加强筋的位置

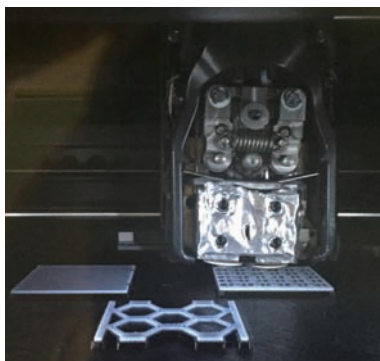


图4 3D打印机的制作

(3) 后处理：快速成型处理主要是原型表面处理。移除实体支撑部分，对实体表面部分进行处理，使原型精度、表面粗糙度等达到要求。然而，原型的复杂和精细结构的支撑部分难以去除，在此过程中会有原型表面损坏的情况，会影响原型的表面质量。因此，1999年St Ratasys研究开发了一种水溶性支撑材料，有效解决了这个问题。完成的加强结构如图5所示。

2. 方法论

在这项工作中，包括建模加强结构可用的ABS材料和切割成制造模型样品尺寸。在本研究中，需要有限元模型验证，创建有限元模型来模拟弯曲试验。将该模型视为基准，创建各种有限元模型，假设各向同性，模拟弯曲试验进行比较，模拟复合材料的弯曲试验，并将结果与基准进行比较。

使用CATIA V5创建了复合加强结构的有限元模型，并在ANSYS软件中分析模拟过程。加强结构由表层和肋构成，在该模型中，肋的数量、位置和取向不限于建立的肋元件网格。为简化演绎过程的描述，引入了一般情况，即元件内只有一种加强筋。加强结构的几何模型首先使用



图5 3D打印机完成的加强结构

CATIA作为IG文件生成，并作为3D静态结构导入ANSYS。

建模：使用有限元分析（FEA）计算整体加强结构的位移。讨论加强结构，其尺寸为 $L=70\text{mm}$ ， $L_R=5.39\text{mm}$ ， $H=3.24\text{mm}$ 。平面 h 的厚度为2mm，如图6所示。

边界条件：本研究考虑了加强面板，包括材料、网格、支撑条件和力。这意味着不同材料特性和网格尺寸对有限元模型结果是有影响的。

材料属性：ABS塑料存在许多等级，通常使用等级最类似于3D打印机长丝，所有合适的理想材料属性对于成功的FEA模型是关键。所选材料为ABSplusTM-P430，材料性能如表1所示。

元件尺寸：对于加强结构的轮廓，建议选择元件尺寸为1.5mm，如图7所示。

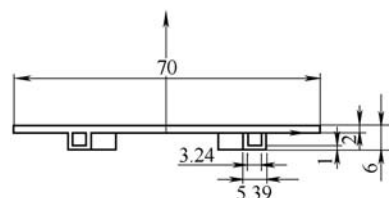


图6 模型尺寸

表1 ABS材料特性

描述	数值
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 200
杨氏模量/MPa	2 200
泊松比	0.4
抗拉屈服强度/MPa	31
抗拉极限强度/MPa	33

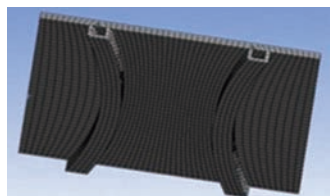


图7 加强结构网格

支撑位置和施加固定载荷：
支撑位置平行于加强筋板边缘，
如图8所示。载荷施加在平行于加强筋与支撑相反的板边缘上，如图9所示。

数字结果：加强结构的变形变化根据载荷的施加情况进行测试。加强结构可以降低可能的工程风险，图10显示出了在加强面板受力表面上施加 $P=10\text{N}$ 力的最大变形。

3. 试验和讨论

(1) 试验过程。加强筋试样由两条曲线组成，零件尺寸与模型相同。支撑边缘尺寸为 60mm 。零件材料是广泛用于增材制造的ABS。为了实现一体式面板试样的冲压弯曲试验，我们设计了一套冲压弯曲试验仪器，如图11所示。



图8 加强筋面板支撑位置

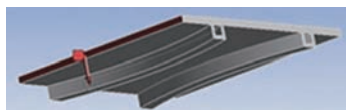


图9 施加力的位置

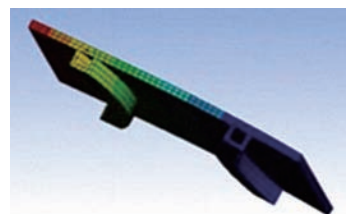


图10 在边缘上施加10N力的加强结构的变形结果



图11 一套弯曲试验仪器

首先与加强筋平行地固定在加强面板的一个边缘上，同时在加强面板与固定边缘相反侧增加重量，使用变形仪器来测试面板的垂直位移。该测试目标是在面板上增加载荷时计算垂直位移的变化。试验施加的最小载荷为 223g ，则最小垂直位移为 1.95mm 。

(2) 试验结果。通过使用载荷试验测量加强面板的垂直位移，结果如表2所示。试验结果表明，每次加入 100g 质量将导致加强结构的垂直位移增加约 1mm 。试验测试了三次变形，由于测量

结果值和真实值之间总存在差异，故采用三次测试的平均值作为最终的试验结果。为了减少误差，测量次数越多越好，多个测量平均值更接近于真实值。

(3) 讨论。FEA结果显示，有限元模型被施加与试验相同的载荷后，面板垂直变形如表3所示。

如图12显示了测试结果和有限元结果具有相同的趋势线，测试值线和有限元模拟值线几乎平行。差异是由测量仪器、测量方法、测量条件和测量人为因素引起的。其中一个差异原因是载荷条件，载荷应施加在面板边缘的

表2 试验的弯曲变形结果

质量/g	力/N	第一次测试变形/mm	第二次测试变形/mm	第三次测试变形/mm	测试平均值/mm
223	2.19	2.05	1.95	1.25	1.75
323	3.17	3.15	3.30	1.80	2.75
423	4.15	4.25	4.20	2.45	3.63
523	5.13	5.50	5.35	2.90	4.58
623	6.11	6.90	6.35	3.65	5.63
723	7.09	8.10	7.60	4.25	6.65
823	8.07	9.70	8.80	5.00	7.83

表3 有限元分析的弯曲变形结果

质量/g	力/N	ANSYS变形/mm
223	2.19	2.31
323	3.17	3.35
423	4.15	4.39
523	5.13	5.42
623	6.11	6.46
723	7.09	7.49
823	8.07	8.53

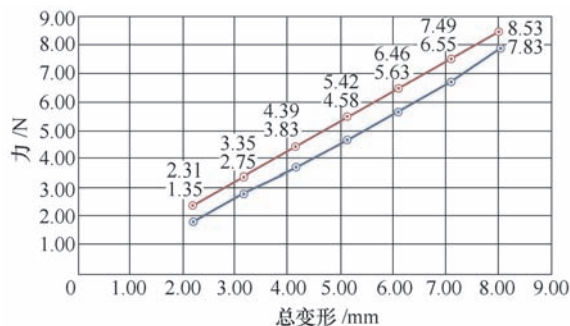


图12 试验和有限元分析的变形趋势

一个点上,而在试验过程中,载荷均匀地施加在边缘表面上。为此,在试验过程中施加载荷的位置每次都不固定,误差分析如图13所示,平均误差小于20%,试验结果和有限元计算结果接近。

(4) 加强结构研究。在以前的研究中,支撑表面和加载表面平行于加强筋,施加在面板侧面。然而,为了进一步研究加强结构,将表面的加载和支撑垂直于加强筋施加,其定义为模式2。第二有限元分析与与加强筋垂直的面板边缘表面上施加载荷,支撑施加在加载表面的相反侧,如图14和图15所示。

计算后,结果如表4所示。模式1是先前的有限元分析变形结果,模式2是第二有限元分析变形结果。比较模式1和模式2之间的结果,模式2显著降低垂直变形。图16表明,当载荷施加到模式2时,加强结构可以降低风险。

4. 表征

设计加强结构,以提高接头表面的强度。加强结构的功能是在不增加产品厚度的情况下提高产品强度和刚度,从而节省材料使用,减轻质量并降低成本。

加强结构可以克服产品弯曲变形,以及由于应力不均匀引起的产品厚度差异。为了在不使

面板产品厚度增加的情况下保证产品的强度和刚度,在产品适当的部位中设置加强筋,不仅避免了产品变形,而且在某些情况下,加强筋也可以改善产品的流动性。为了提高产品的强度和刚度,适合增加加强筋的数量,而不是增加面板的厚度。

(1) 改进的加强结构。为了

提高加强结构的强度和刚度,加强筋增加6mm,其他条件不变,改进的加强结构如图17所示。

ANSYS软件分析改进的加强结构。首先,设置加载和支撑,如图18和图19所示,为了证明加强结构的功能,加载和支撑施加在垂直于加强筋的侧面上。

计算后,变形结果如表5所

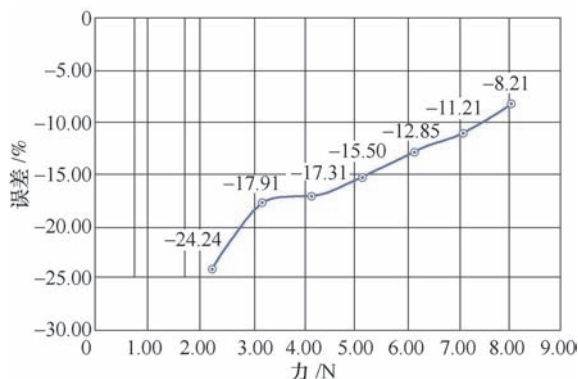


图13 试验和有限元分析之间的误差



图14 模式2支撑表面



图15 模式2加载表面

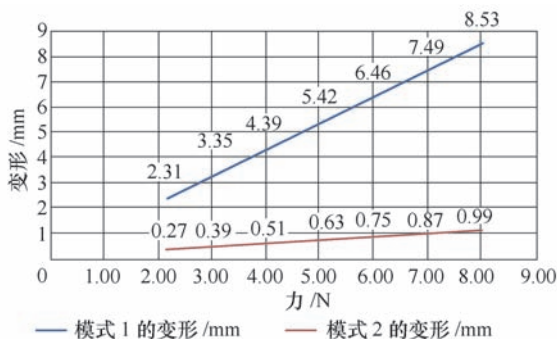


图16 基准加强结构和模式2的变形趋势

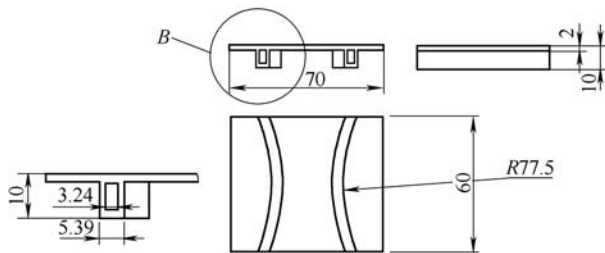


图17 改进的加强结构的尺寸

表4 基准加强结构和模式2的变形

质量/g	力/N	基准加强结构的变形/mm	模式2的变形/mm
223	2.19	2.31	0.27
323	3.17	3.35	0.39
423	4.15	4.39	0.51
523	5.13	5.42	0.63
623	6.11	6.46	0.75
723	7.09	7.49	0.87
823	8.07	8.53	0.99



图18 改进的加强结构支撑表面

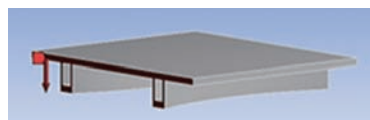


图19 改进的加强结构加载表面

表5 模式2和改进的加强结构变形结果

质量/ g	力/N	模式2的变形/ mm	改进的加强 结构的变形/ mm
223	2.19	0.27	0.08
323	3.17	0.39	0.12
423	4.15	0.51	0.16
523	5.13	0.63	0.20
623	6.11	0.75	0.24
723	7.09	0.87	0.27
823	8.07	0.99	0.31

示，并与模式2进行比较。图20表明变形明显下降，验证了增加加强筋可以提高产品的强度和刚度。

然而，当加载和支撑施加在平行于加强筋的面板边缘时（见图21、图22），变形结果与基准加强结构几乎接近，如表6所示。但改进的加强结构的变形略低于基准加强结构，这是由于增加质量可增大面板变形。图23显示了基准加强结构和改进的加强结构结果几乎一致。

改进的结构表明，加强筋的高度增加会影响产品的强度和刚度。加强结构的安装位置至关重要。

（2）圆形加强结构：新的加强结构用CATIA V5设计（见图24），与基准加强结构进行比较，精细化设计，图25为圆形加强结构尺寸。

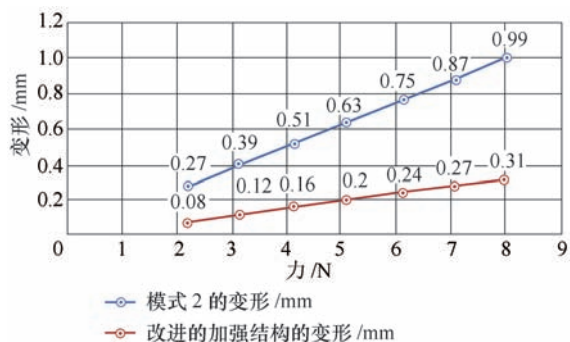


图20 变形结果的趋势

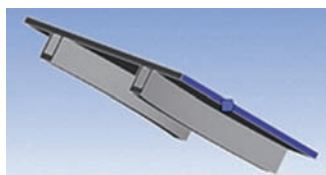


图21 改进的加强结构支撑表面



图22 改进的加强结构加载表面

表6 基准加强结构和改进的加强结构的变形结果

质量/g	力/N	基准加强结构的变形/mm	改进的加强结构的变形/mm
223	2.19	2.31	2.31
323	3.17	3.35	3.34
423	4.15	4.39	4.38
523	5.13	5.42	5.41
623	6.11	6.46	6.45
723	7.09	7.49	7.48
823	8.07	8.53	8.51

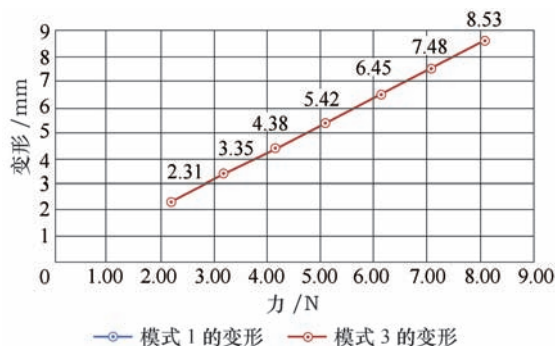


图23 变形的趋势

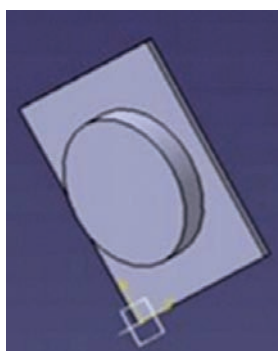


图24 圆形加强结构

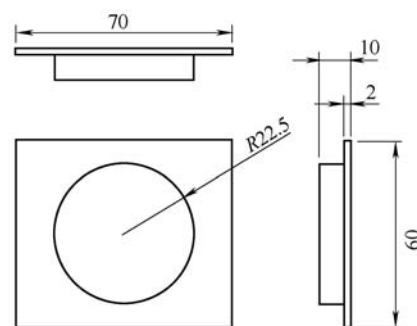


图25 圆形加强结构的尺寸

加载和支撑施加于面板边缘,如图26和图27所示。

变形结果如表7所示,与模式

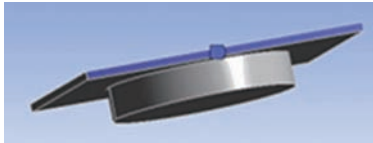


图26 圆形加强结构支撑表面

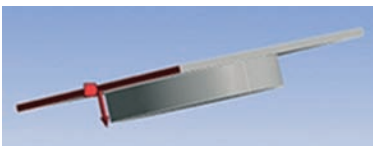


图27 圆形加强结构加载表面

2进行比较,圆形加强结构变形大于模式2。如图28所示,对圆形加强结构施加载荷越大,其变形越

表7 模式2和圆形加强结构的变形结果

质量/g	力/N	模式2的变形/mm	圆形加强结构的变形/mm
223	2.19	0.27	0.64
323	3.17	0.39	0.92
423	4.15	0.51	1.2
523	5.13	0.63	1.49
623	6.11	0.75	1.77
723	7.09	0.87	2.06
823	8.07	0.99	2.34

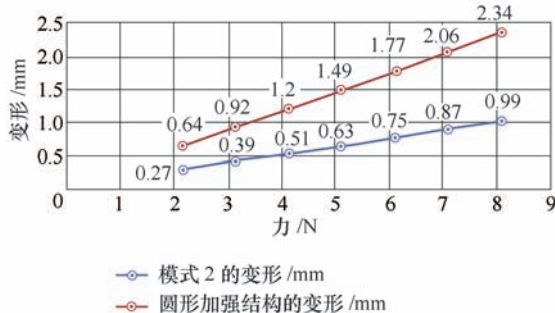


图28 变形的趋势

大,圆形加强结构不是很好的选择。

5. 结语

使用ABS材料制造,经济且快速,加强结构的增材制造技术可用于制造复杂零件,加强结构可以减小施加载荷时的变形。FEA结果表明,改进的加强结构方案可以有效提高结构强度和刚度,有效降低设计风险。

参考文献:

- [1]李黎明. ANSYS有限元分析实用教程[M].北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2]韩西, 钟厉, 李博. 有限元分析在结构分析和计算机仿真中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2001, 20 (s1): 124-126.

MW (收稿日期: 20170411)

首届金刚石刀具行业高峰论坛在京举办



先进刀具联盟董事长桂富强介绍刀具联盟具体情况

2017年4月17日,时值中国国际机床展(CIMT)开幕首日,由先进刀具联盟主办的首届金刚石刀具行业高峰论坛,在中国国际展览中心(新馆)举行。来自金刚石刀具领域的生产厂商代表、用户代表及专家学者等近200人齐聚北京,共谋金刚石刀具

产业发展。金属加工杂志社作为论坛特约媒体参加了本次盛会。

中国机械工业金属切削刀具技术协会理事长梁枫出席会议并发表致辞,先进刀具联盟董事长桂富强对先进刀具联盟的相关工作做了具体介绍。会议还特别邀请了全国知名专家、全国

数控技能大赛总裁判长金福吉,北京市技术交流中心原总工程师桂育鹏,中华全国总工会原主席倪志福秘书陈壁光,以及《金属加工》(原名《机械工人》)杂志社原主编王天谔等一干从事数控加工多年的老专家出席此次会议。论坛围绕金刚石刀具在航空航天领域的应用、金刚石刀具在航空航天领域国产化趋势和紧迫性、中国汽车行业对未来金刚石刀具的中高端需求、金刚石刀具行业整体布局探讨、超硬刀具最新进展及国家政策对先进制造业的支持等多个话题展开,并就“成熟稳定的金刚石刀具材料如何为超硬刀具保驾护航”等行业热点进行专题研讨。(本刊讯)