

基于选区熔化制造工艺的涡轮预旋喷嘴结构优化设计与有限元分析

谢 晋,熊艳华,张灵俊,陈阿龙

(中国航发四川燃气涡轮研究院,四川 成都 610500)

摘 要:为实现减轻航空发动机涡轮预旋喷嘴重量、缩短制造周期,根据涡轮预旋喷嘴组件的结构和加工特性,基于选区熔化制造技术(SLM)对其进行适应增材制造工艺的结构优化设计,并对预旋喷嘴的增材制造过程进行有限元分析,探究预旋喷嘴的最优成型方向和在增材制造中的变形情况。后期制造表明,通过 SLM 增材工艺的预旋喷嘴结构优化设计,可获得 17.08% 的轻量化效果,缩短了制造周期,达到轻量化的目的。

关 键 词:增材制造;激光选区熔化;预旋喷嘴;结构优化设计;轻量化

中图分类号:V235.13

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.05.004

[引用本文格式]谢 晋,熊艳华,张灵俊,等.基于选区熔化制造工艺的涡轮预旋喷嘴结构优化设计与有限元分析[J].热能动力工程,2024,39(5):34-41. XIE Jin, XIONG Yanhua, ZHANG Lingjun, et al. Structural optimization design and finite element analysis of turbine pre-swirl nozzle based on selective melting manufacturing process[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(5):34-41.

Structural Optimization Design and Finite Element Analysis of Turbine Pre-swirl Nozzle based on Selective Melting Manufacturing Process

XIE Jin, XIONG Yanhua, ZHANG Lingjun, CHEN Along

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu, China, Post Code: 610500)

Abstract: In order to reduce the weight and manufacturing cycle of pre-swirl nozzle of aeroengine, according to the structure and processing characteristics of the pre-swirl nozzle assembly of turbine, we have conducted structural optimization design adapted to additive manufacturing processes based on selective laser melting manufacturing technology (SLM). Finite element analysis has been conducted on the additive manufacturing process of the pre-swirl nozzle to explore the optimal forming direction and deformation situation of the pre-swirl nozzle in additive manufacturing. Post production indicates that the light weight effect of 17.08% can be obtained by optimizing the structure of the pre-swirl nozzles based on SLM additive manufacturing process, shortening the manufacturing cycle and achieving the goal of lightweight.

Key words: additive manufacturing, selective laser melting, pre-swirl nozzle, structural optimization design, lightweight

引 言

涡轮预旋喷嘴组件是航空发动机重要的热端功能部件之一,其主要功能是加速和偏转进入涡轮转子叶片的冷却气流,从而降低气流的相对总温,提高涡轮工作效率^[1]。目前,涡轮预旋喷嘴组件常采用精密铸造的方式进行毛坯加工,再由多个零件组合焊接而成。焊接不仅降低了零件的可靠性,也带来组件变形、结构冗余等问题^[2]。此外,采用传统机加方式制造涡轮预旋喷嘴组件还存在制造周期长、重量超标、流量特性不稳定等一些列问题,严重制约着航空发动机的研制周期和工作性能^[3]。

增材制造技术中的选区熔化制造技术(SLM)具有加工精度高、自由成形能力强和材料组织致密度高等优势^[4-6],在航空航天领域的应用日益广泛和成熟^[7-10]。国内许多研究机构开展了广泛的增材制造技术研究,但主要集中于航天或飞机零部件。在航空发动机领域,基于增材制造工艺的结构设计、仿真研究和实际应用还少有报道。

为此,本文基于选区熔化制造技术(SLM)对涡轮预旋喷嘴组件进行一体化设计和适应选区熔化制造工艺的结构优化设计,并对优化后预旋喷嘴的成型过程进行仿真分析,确定预旋喷嘴的最优摆放方向,探究在增材制造中零件的应力分布及叶片壁厚与叶片型面最大变形的关系,为后续的增材制造工艺优化提供参考。

1 基于选区熔化制造工艺的结构优化设计

1.1 预旋喷嘴一体化设计

涡轮预旋喷嘴组件结构复杂,由于传统制造工艺的局限,为便于取模,预旋喷嘴组件常分解成前支撑环、调整垫、冷气弯管和预旋喷嘴等多个零件,优化前预旋喷嘴组件结构如图 1(a)所示。在传统制造过程中,需要先将铸造合格的预旋喷嘴与前支撑环单独焊接,再通过预留的直孔安装冷气弯管和调整垫,不仅工艺复杂,而且在预留的直孔处容易造成漏气,可靠性低。同时,重要型面轮廓度和重量等关键设计指标难以达到设计要求。与传统制造相比,增材制造技术具有工艺流程短、设计自由度高等优

势,能够不受传统制造工艺限制将零件整合,取消不必要的装配结构,提高构件可靠性并实现大幅减重。

为此,基于增材制造技术自由制造的技术优势,从功能第一的原则出发,分析预旋喷嘴组件功能,在保证主要功能和接口尺寸不变的前提下,开展预旋喷嘴组件一体化设计。针对预旋喷嘴组件进行功能分析,可知预旋喷嘴主要利用流道面和叶片型面加速和偏转进入涡轮转子叶片的冷却气流,同时通过冷气弯管引导冷气对喷嘴前腔进行冷却^[11]。结合选区熔化制造工艺特点,将冷气弯管、支撑环与预旋喷嘴融合,实现预旋喷嘴组件一体化结构设计,优化后的预旋喷嘴结构如图 1(b)所示。

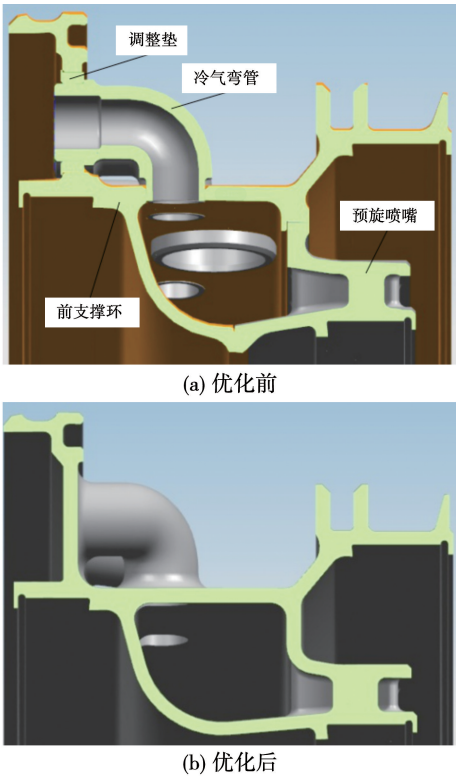


图 1 优化前后预旋喷嘴结构示意图
Fig.1 Schematic diagrams of pre-swirl nozzle structure before and after optimization

1.2 基于选区熔化制造工艺的轻量化设计

选区熔化制造技术独特的成型方式使得结构设计自由度大幅提升,合理利用其工艺优势,基于工艺特点开展轻量化设计,同时提升零部件性能是当下航空发动机结构设计的一大趋势。基于选区熔化制造工艺的预旋喷嘴轻量化设计,需要考虑增材制造

工艺的独特性。本文主要从支撑结构设计对成型质量的影响以及预旋喷嘴增材制造所需材料最少等方面开展轻量化设计。

1.2.1 预旋喷嘴成型摆放方向的分析与确定

由于选区熔化制造工艺特点,成型零部件必然会产生支撑结构,支撑结构具有固定、传热、支持和加强等作用^[12],但后续需要去除。去除支撑后的表面质量相对较差^[13],且在去除支撑后由于残余应力的释放会进一步导致型面变形,因此如何减少支撑是结构设计面临的挑战之一。减少支撑结构的主要思路是减少零件的悬垂区域和悬垂面积,零件的摆放位置决定了悬垂区域的分布,从而决定着支撑结构数量,并最终影响预旋喷嘴的成型时间、成本和力学性能^[14-16]。此外,也可以通过调整制造工艺参数,增大零件悬垂角度或者通过支撑设计来改变支撑形式,从而减少支撑结构,但后两种方法成本较高且成效有限。因此,在结构优化设计时需要首先考虑零件的摆放位置。

根据预旋喷嘴工作性能的稳定性要求,识别预旋喷嘴的关键特征为叶片型面及其流道,需要重点保证其成型质量,不同叶片摆放位置的支撑分布如图 2 所示。

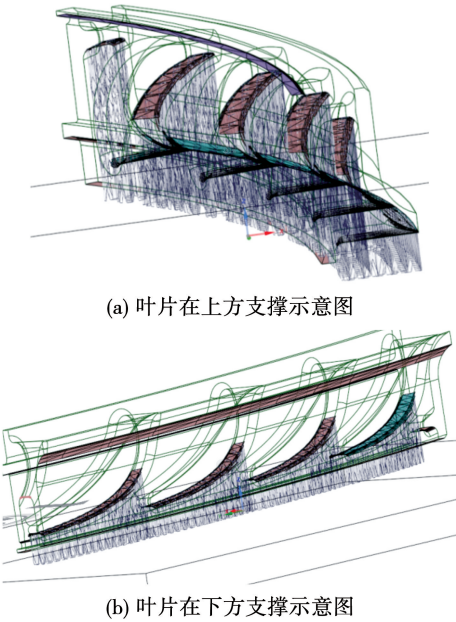


图 2 不同叶片摆放位置支撑分布示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of support distribution at different blade layout positions

由图 2 可知,叶片朝上摆放时,支撑数量更多,后续去除支撑将会导致支撑面的成型质量变差,且支撑位于零件内腔,去除支撑十分困难;叶片在下方摆放时,叶背处有少量支撑,但支撑位于外侧,便于除去和后续的表面处理。因此,为保证叶片及流道质量,选择叶片朝下的摆放方式。

预旋喷嘴为功能件,在成型时需要综合考虑零件的性能、变形、支撑数量和成本,为此采用 ANSYS Additive 软件从打印时间、支撑量、变形趋势 3 个方面对预旋喷嘴叶片朝下摆放的成型方式进行“预打印”分析。成型时间和变形趋势仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知,当预旋喷嘴的成型方式为叶片朝下放置时,整体变形较小,成型时间合理。

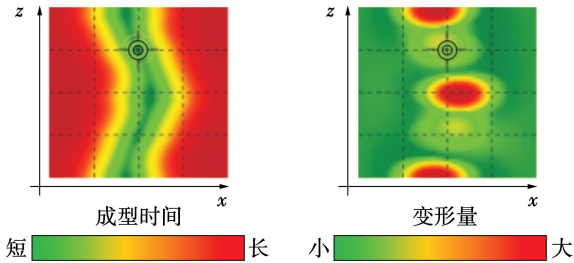


图 3 预旋喷嘴成型时间及变形趋势仿真结果

Fig. 3 Simulation results of forming time and deformation trend of pre-swirl nozzle

1.2.2 基于增材工艺的内腔自支撑结构设计

确定零件摆放方向后,对预旋喷嘴整体结构进行优化设计。由于环形件内腔结构的支撑难以去除,因此需要对内腔结构进行适应增材工艺的结构优化,减少或使内腔没有支撑。根据材料自支撑角经验准则,镍基合金材料的自支撑角为 45° ^[16],为此,以 45° 为角度临界值,对一体化预旋喷嘴的内腔进行自支撑结构设计。

优化前的内腔结构如图 4(a) 所示。可以看到,原结构的内腔倾斜角度均大于自支撑角,内腔有很多支撑且难以去除,因此将内腔壁面倾斜度设计为 45° ,同时对外腔结构进行局部调整,优化后的内腔结构如图 4(b) 所示。通过内腔结构的自支撑设计,支撑结构数量大幅减少。优化后的内腔支撑分布如图 4(c) 所示。只在内腔上部小倒圆处存在局部支

撑,但支撑并未对流道及叶片型面造成影响,可以通过通气孔去除。

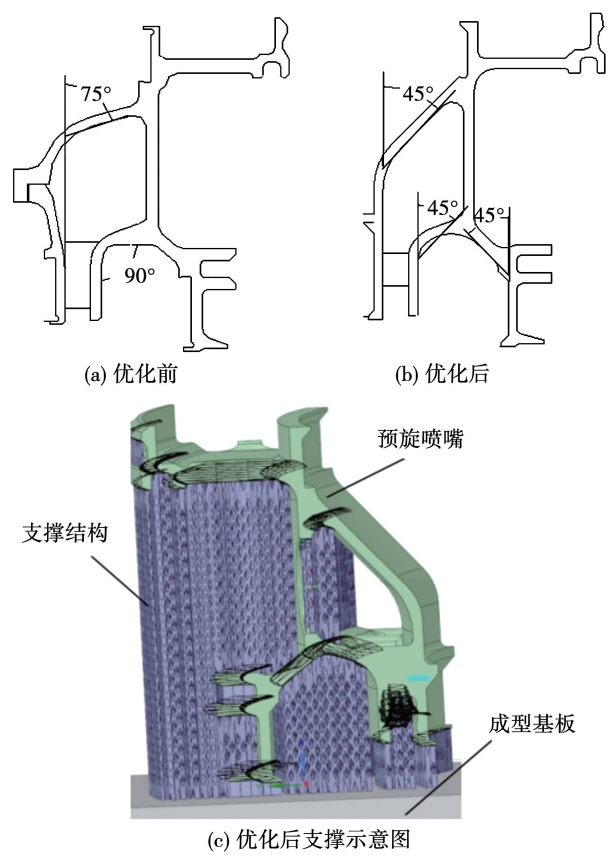


图 4 内腔自支撑结构优化示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of optimization of self-supporting structure of inner cavity

1.2.3 预旋喷嘴叶片轻量化结构设计

整体结构优化后,对结构进行轻量化设计。结合增材制造技术的优势,对叶片进行轻量化设计,可在不改变叶片型面和叶片上下流道面的条件下,将其优化为空心叶片,以减轻预旋喷嘴的总体重量。叶片结构优化如图 5 所示。

为防止热应力积累过大,导致结构开裂或成型失败,根据增材制造工艺设计原则,应当尽量避免结构截面突变^[17]。因此,在叶片优化设计时,使空心叶片上壁面厚度与喷嘴出口壁面厚度相等。此外,为避免成型过程中应力集中,对尖角边进行倒圆,局部进行自支撑设计,同时在重要装配面添加加工余量,便于后续采用机加方式加工配合面,提高装配精度。空心叶片结构二维示意图如图 6 所示。

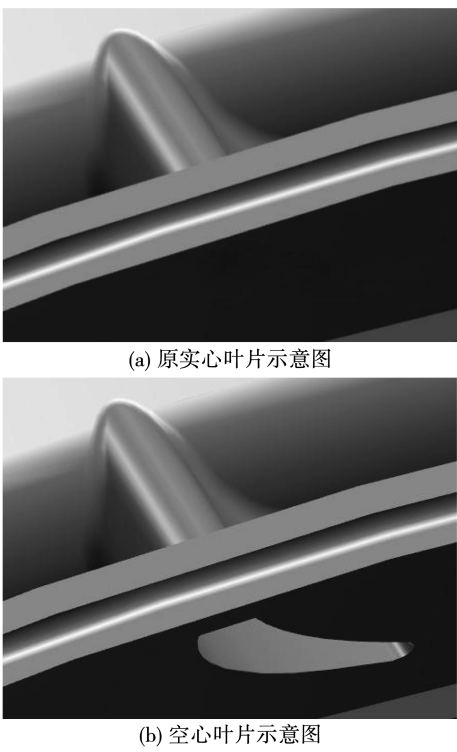


图 5 叶片结构优化示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of blade structure optimization

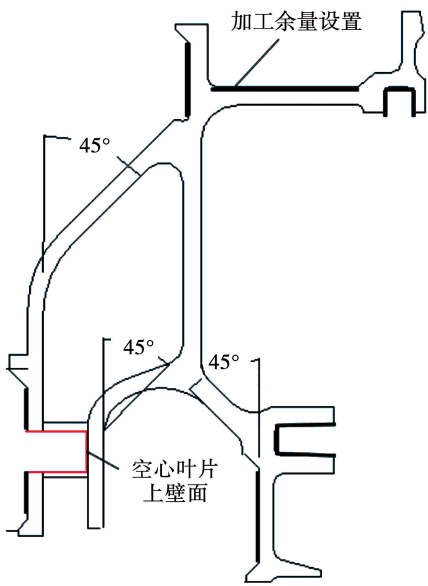


图 6 空心叶片二维示意图

Fig. 6 Two-dimensional diagram of hollow blade

1.3 适应选区熔化制造工艺的冷气弯管优化设计

冷气弯管的结构决定着预旋喷嘴的冷却效果,为进一步发挥选区熔化制造技术优势,基于选区熔化制造工艺对冷气弯管开展结构优化。对冷气弯管

的周向分布进行调整,并通过调整冷气弯管内径保证冷气流量。同时,为减少成型支撑,将冷气弯管与喷嘴壁面进行融合,弯管中心轴线与底平面夹角为 45° ,实现自支撑。优化前、后冷气弯管结构如图 7 所示。

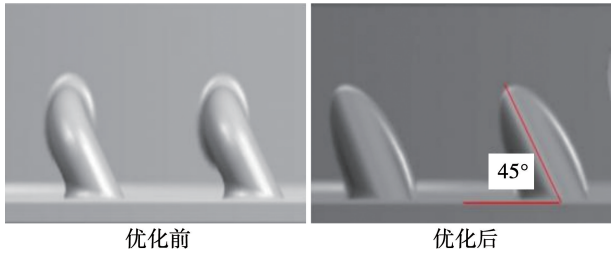


图 7 优化前、后冷气弯管示意图
Fig. 7 Schematic diagrams of cold air bend pipes before and after optimization

涡轮预旋喷嘴的工作温度为 $680 \sim 784\text{ K}$,对优化后的预旋喷嘴进行结构验证。优化后的预旋喷嘴等效应力分布如图 8 所示。由图 8 可知,预旋喷嘴应力水平较低,同时应力储备大于 1.5,满足强度设计要求。

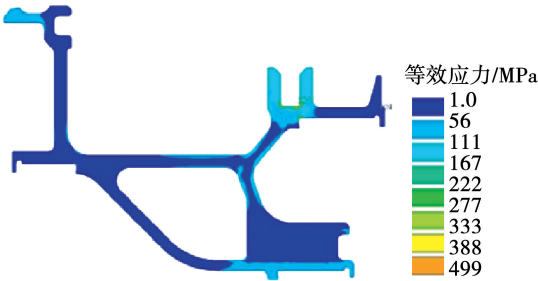


图 8 优化后预旋喷嘴等效应力分布
Fig. 8 Equivalent stress distribution of optimized pre-swirl nozzle

综上所述,结构优化后的预旋喷嘴满足结构强度和性能的要求。通过对预旋喷嘴组件的一体化设计和基于增材工艺的结构优化设计,预旋喷嘴的最终质量为 3.98 kg ,较原质量 4.8 kg ,减重 17.08% ,实现了预旋喷嘴的轻量化。

2 预旋喷嘴选区熔化成型有限元分析

在金属增材制造技术中,特别是以激光为热源的金属增材制造技术中,由于热源能量密度较大,

熔池附近存在较大的温度梯度,从而在产品内部产生较大的残余应力,显著影响产品的尺寸精度、结构稳定性和强度^[18],同时也使得零件极易变形或开裂,甚至会导致成型失败。因此,对优化后的预旋喷嘴进行增材过程仿真,预测残余应力、变形趋势及空心叶片壁厚与叶片型面最大变形的关系十分必要。

2.1 增材过程热应力及变形分析

采用 Ansys additive 软件对优化后的预旋喷嘴进行选区熔化制造过程模拟,探究成型过程中零件的变形和受力情况。由于优化后的预旋喷嘴为循环对称结构,为减少计算量,选取结构的 $1/9$ 进行仿真,重点分析零件的热应力分布及叶片型面和流道面的变形情况。

成型过程中预旋喷嘴的应力分布如图 9(a)所示。由图 9(a)可知,应力较大位置主要集中在基板与零件底部支撑连接处、内腔小倒圆处和零件顶部与支撑连接处。这是因为基板和零件在成型时温度梯度较大,造成热应力集中;而倒圆处与空气对流面积小,散热慢,热应力相对集中。成型过程中预旋喷嘴的变形分布如图 9(b)所示。由图 9(b)可知,内腔大圆弧处变形较大。这是因为经过优化后的预旋喷嘴内腔为自支撑结构,没有支撑的传热作用,热积累相对其他区域更加明显,因此变形较大。但内腔大圆弧位置为非重要特征,且在后续的增材过程中,可以增加外部支撑导热,降低此处的热积累,减小变形。另一处变形较大的位置位于喷嘴件的顶部悬垂处,这是因为悬垂处为薄壁结构,热应力影响更大,造成的变形也更明显。同时,后续去支撑也会有热应力释放,加剧悬垂位置的变形。悬垂部分的变形对零件性能影响不大,在实际制造中可以通过添加余量及增材制造完成后再用线切割、切削等方式保证凹槽的精度。

为进一步分析、验证叶片及流道变形情况,选取预旋喷嘴特征结构,即单个叶片及其流道进行典型结构仿真分析,通过细化网格,得到更精确的变形情况。叶背和叶盆的变形如图 10 所示。由图 10 可知,叶片及流道变形均小于 0.2 mm ,满足设计要求。

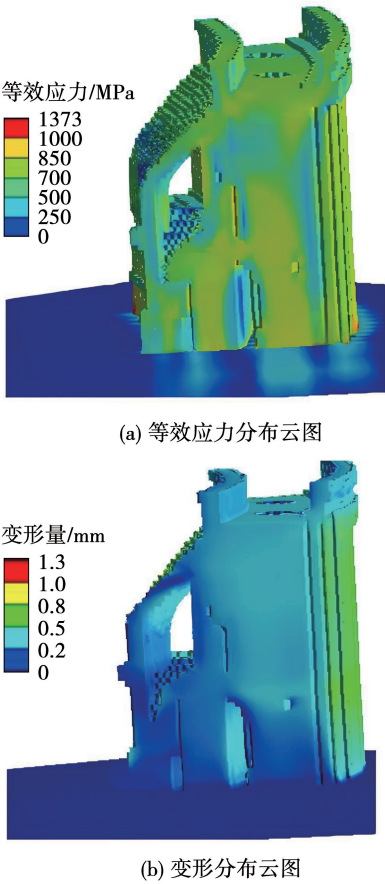


图 9 预旋喷嘴等效应力及变形示意图

Fig.9 Schematic diagrams of equivalent stress and deformation of pre-swirl nozzle

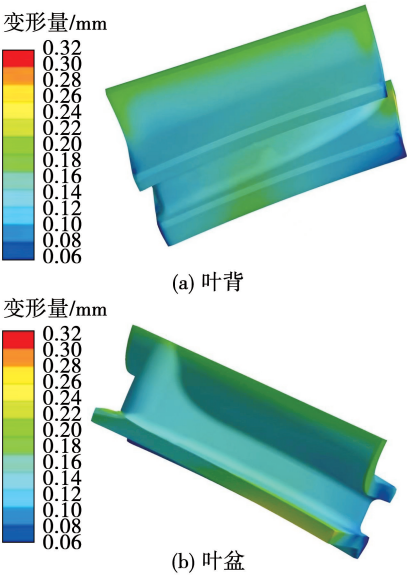


图 10 预旋喷嘴叶背及叶盆变形示意图

Fig. 10 Schematic diagrams of deformation of convex and concave of pre-swirl nozzle

进一步分析叶片型面的变形情况,叶背和叶盆型面变形如图 11 所示。由图 11 可知,零件最大变形位置位于叶背中心处。这是因为在选区熔化成型过程中,此处相对于叶片其他位置的成型高度更高,且没有支撑,散热较慢热积累大,从而变形最大。

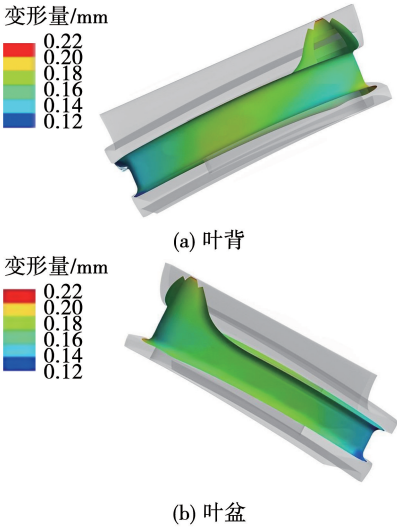


图 11 预旋喷嘴叶背及叶盆流道面变形示意图

Fig. 11 Schematic diagrams of flow channel surface deformation of convex and concave of pre-swirl nozzle

2.2 叶片壁厚优化与选取

为探究叶片型面的变形情况及叶片壁厚在增材制造中与叶片型面变形的关系,采用 Ansys Workbench 软件对预旋喷嘴的增材制造过程进行仿真,预测叶片型面的最大变形位置。同时,选取叶片壁厚分别为 0.5,0.8,1.0,1.2 和 1.5 mm 进行仿真,分析叶片壁厚与最大变形量的关系。叶片壁厚与最大变形量关系如图 12 所示。由图 12 可知,叶片型面最大变形量与空心叶片壁厚成正相关,即壁厚越大变形量越大,在壁厚为 0.5 ~ 1.2 mm 时壁厚对变形量的影响不大。

在实际加工过程中,影响成型质量的参数众多,此外还需要考虑成型设备的加工能力与制造成本^[19-20]。因此,壁厚不能太小,基于仿真结果和实际设备能力,壁厚选择为 1.0 mm 更为合理。

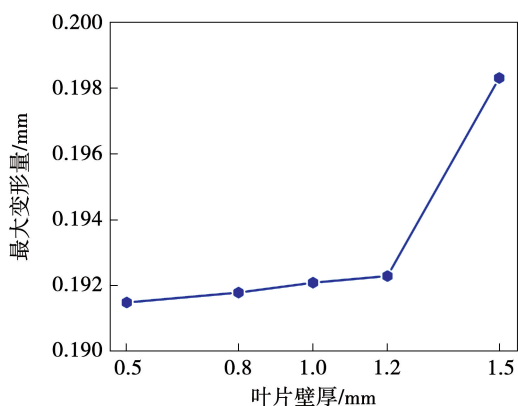


图 12 叶片壁厚与最大变形量关系

Fig. 12 Relation of wall thickness and maximum deformation of blade

3 结 论

基于 SLM 技术对预旋喷嘴进行一体化设计和适应增材制造工艺的结构优化设计,并对预旋喷嘴的增材制造过程进行了模拟仿真,确定了空心叶片的最优壁厚,进一步减轻预旋喷嘴质量,实现了预旋喷嘴的轻量化。主要结论如下:

(1) 基于增材制造的技术优势,可对零件进行一体化和轻量化设计,从而改善部件性能。通过基于 SLM 增材工艺的涡轮预旋喷嘴结构优化设计,最终实现了预旋喷嘴减重 17.08%。

(2) 预旋喷嘴增材制造成型的最佳摆放位置为叶片朝下水平摆放。叶片型面最大变形位于叶背前缘,叶片型面最大变形随空心叶片壁厚增加而增大。

(3) 由于自支撑设计,预旋喷嘴内腔大圆弧处和顶部悬垂处变形相对较大,且在后续的增材过程中,可以增加外部支撑导热,降低热积累,减小变形,对结构性能影响不大,后续可通过线切割等方式保证配合面精度。

(4) 叶片型面最大变形量与叶片壁厚成正比相关,即壁厚越大变形量越大。在壁厚为 0.5 ~ 1.2 mm 时,壁厚对变形量的影响不大。综合考虑变形量和可制造性,在叶片壁厚取值为 1.0 mm 时更为合理。

参考文献:

[1] 刘育心. 叶型预旋喷嘴流动特性数值计算及实验研究[D]. 西

安:西北工业大学,2017.

LIU Yuxin. Numerical and experimental investigations on the flow characteristics of vane shaped preswirl nozzle [D]. Xi'an: North-western Polytechnical University, 2017.

[2] 纪朝辉,刘昱乾,贾 鹏,等. 航空发动机高温合金焊接性能的研究现状[J]. 热加工工艺,2022,51(15):1-6.

Ji Chaohui, LIU Yuqian, JIA Peng, et al. Research status of welding performance of superalloys in aeroengine [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(15):1-6.

[3] 杜宝瑞,姚 俊,郑会龙,等. 基于激光选区熔化的航空发动机喷嘴减重设计及制造技术研究[J]. 航空制造技术,2019,62(11):14-18.

DU Baorui, YAO Jun, ZHENG Huilong, et al. Optimization design and manufacturing technology for aero-engine nozzle based on selective laser melting fabrication [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(11):14-18.

[4] 郝晓宇. 激光增材制造毛坯与传统锻件铸件差异性分析[J]. 航空制造技术,2017,60(5):82-86.

HAO Xiaoning. Difference analysis between laser additive manufacturing and conventional forging and casting [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5):82-86.

[5] HE B, LI J, CHENG X, et al. Brittle fracture behavior of a laser additive manufactured near- β titanium alloy after low temperature aging [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 699(24):229-238.

[6] MARCHESI T R, LAHUERTA R D, SILVA E C N, et al. Topologically optimized diesel engine support manufactured with additive manufacturing [J]. IFAC-Papers on Line, 2015, 48(3):2333-2338.

[7] 张海洲,白 洁,马 瑞,等. 激光选区熔化成形技术在航空航天发动机制造领域的研究与应用现状[J]. 推进技术,2023,44(3):6-21.

ZHANG Haizhou, BAI Jie, MA Rui, et al. Engine manufacturing current progress and application of selective laser melting technology in aerospace [J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(3):6-21.

[8] 激光制造网. 3D 打印燃油喷嘴制造数量突破 10 万件[EB/OL]. <https://www.laserfair.com/yingyong/202109/01/79719.html>, 2021-09-01.

Laserfair.com. The number of 3D printed fuel nozzles manufactured exceeded 100 000 [EB/OL]. <https://www.laserfair.com/yingyong/202109/01/79719.html>, 2021-09-01.

[9] 杨胶溪,吴文亮,王长亮,等. 激光选区熔化技术在航空航天领域的发展现状及典型应用[J]. 航空材料学报, 2021, 41(2):1-15.

YANG Jiaoxi, WU Wenliang, WANG Changliang, et al. Devel-

opment status and typical application of selective laser melting technology applications in aerospace field [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(2): 1-15.

[10] 激光制造网. 美国通用电气助力美空军形成金属 3D 打印能力 [EB/OL]. <https://www.laserfair.com/yingyong/202112/21/80292.html>, 2021-12-21.

Laserfair.com. General electric helps the US air force form metal 3D printing capabilities [EB/OL]. <https://www.laserfair.com/yingyong/202112/21/80292.html>, 2021-12-21.

[11] 张小伟. 金属增材制造技术在航空发动机领域的应用 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 10-16.

ZHANG Xiaowei. Application of metal additive manufacturing in aeroengine [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 10-16.

[12] 王婧超, 谭 指, 刘 彬, 等. 基于激光增材制造技术的航天运载器上面级舱体结构一体化设计与成形方法 [J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(4): 60-62.

WANG Jingchao, TAN Zhi, LIU Bin, et al. Design and forming integration method of upperstage cabin structure in space vehicle based on laser additive manufacturing [J]. Aerospace Materials and Technology, 2018, 48(4): 60-62.

[13] 曹冉冉, 李 强, 钱 波. SLM 快速成型中的支撑结构设计研究 [J]. 机械研究与应用, 2015, 28(3): 69-71, 76.

CAO Ranran, LI Qiang, QIAN Bo. Design of support structure in SLM rapid prototyping [J]. Mechanical Research and Application, 2015, 28(3): 69-71, 76.

[14] 沈 威, 陶孟仑, 李丽杰, 等. 快速成型支撑结构设计的算法研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(6): 63-68.

SHEN Wei, TAO Menglun, LI Lijie, et al. Study on algorithm of support generation in rapid prototyping [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(6): 63-68.

[15] THOMAS D. The development of design rules for selective laser melting [D]. London: University of Wales Institute, 2009.

[16] STRANO G, HAO L, EVERSON R M, et al. A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66: 1247-1254.

[17] SNYDER J C, STIMPSON C K, THOLE K A, et al. Build direction effects on microchannel tolerance and surface roughness [J]. Journal of Mechanical Design, 2015, 137(11): 111411. 1-111411. 7.

[18] 王旭葆, 曲 波. 基于 SLM 工艺的航空支架优化设计 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(20): 68-72.

WANG Xubao, QU Bo. Optimal design of aero support based on selective laser melting [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(20): 68-72.

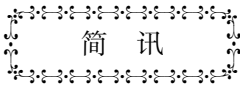
[19] 张 讯, 葛建彪. 激光增材制造技术在民机复杂结构上的应用及研究 [J]. 应用激光, 2018, 38(6): 1022-1027.

ZHANG Xun, GE Jianbiao. Application and research of laser additive manufacturing technology in complex structure of civil aircraft [J]. Applied Laser, 2018, 38(6): 1022-1027.

[20] 李 昂, 刘雪峰, 俞 波, 等. 金属增材制造技术的关键因素及发展方向 [J]. 工程科学学报, 2019, 41(2): 159-173.

LI Ang, LIU Xuefeng, YU Bo, et al. Key factors and developmental directions with regard to metal additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(2): 159-173.

(丛 敏 编辑)



阿达尼绿色能源公司的可再生能源项目组合超过 10 GW

印度阿达尼绿色能源公司 (AGEL) 宣布, 其可再生能源项目组合已超过 10 GW。该公司的运营项目组合包括 7 393 MW 的太阳能, 1 401 MW 的风能和 2 140 MW 的风能-太阳能混合容量, 可以为 580 多万户家庭供电。

阿达尼集团董事长 Gautam Adani 表示, 该公司的目标是到 2030 年实现 45 GW 的发电组合。为此, 该公司正在印度古吉拉特邦的 Khavda 村建设一座史无前例的 30 GW 可再生能源工厂。

据 AGEL 报道, Khavda 项目的规模将是巴黎的五倍, 几乎和孟买一样大。到目前为止, 累计 2 000 MW 的太阳能发电能力已经投入使用。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.powerengineeringint.com>)