

专业学位硕士论文

增材制造零件异形内表面磨粒流抛光实验研究

Experimental Study of Abrasive Flow Machining for Profiled
Inner Surface of Additive Manufacturing Parts

作者姓名: 段合露

工程领域: 机械工程

学号: 31704044

指导教师: 王宣平 副教授

陈亮 高级工程师

完成日期: 2020年6月

大连理工大学

Dalian University of Technology

摘要

许多零件在加工成型之后并不能直接投入使用，必须经过表面处理后才能达到正常的使用要求。目前，复杂结构零件的使用日益广泛，特别是增材制造技术的出现，更是促进了复杂结构零件的发展与壮大。因为现有增材制造技术的特点，增材制造零件在其完成制造之后会出现阶梯、球化以及粉末粘附等不良效应，其零件表面质量比较差，因此必须进行后续抛光工作。本文研究了磨粒流加工对增材制造格栅以及涡流器的抛光效果，分析了磨粒流加工对群孔以及弯曲流道零件的抛光特点。

针对磨粒流加工技术，阐述了磨粒流加工的抛光原理以及抛光特点。对磨粒流加工的磨料介质成分以及配制进行了论述，分析了磨料的性质对磨粒流加工的影响。对磨粒流加工专用夹具设计进行了分析，阐明了夹具的控流与密封等设计要点。

针对增材制造钛合金格栅零件，设计了磨粒流专用夹具，进行了格栅的磨粒流加工实验研究。对格栅斜孔经过磨粒流加工出现“月牙形”抛光现象的成因进行了分析，并对此提出了解决方案。对格栅零件的磨粒流加工抛光规律进行了研究，发现磨粒流加工格栅零件时零件表面质量的变化规律为先恶化后逐渐变好，其原因是增材制造钛合金零件表面存在缺陷层。

针对增材制造涡流器，确定了磨粒流加工工艺，进行了涡流器的磨粒流加工实验研究，提出了涡流器磨粒流加工后的清洗方案。实验结果发现磨粒流加工对增材制造涡流器的抛光效果良好，并能成功实现文氏管出口处端面棱边的保护使其不被“倒圆”。通过实验研究了磨粒流加工对涡流器流通面积的影响规律并进行了相关验证及分析，为涡流器采用磨粒流加工方式实现理想流通面积提供依据。

关键词：增材制造；磨粒流加工；表面质量；抛光效果

Experimental Study of Abrasive Flow Machining for Profiled Inner Surface of Additive Manufacturing Parts

Abstract

Many parts cannot be directly put into use after being processed and shaped, and they must be surface-treated to meet the normal use requirements. At present, the use of complex structural parts is increasingly widespread. In particular, the advent of additive manufacturing technology has promoted the development and growth of complex structural parts. Because of the characteristics of the additive manufacturing technology, the additive manufacturing parts have adverse effects such as stepping, spheroidization, and powder bonding after completed. The surface quality of its parts is relatively poor, so it is necessary to carry out subsequent polishing work. In this paper, the polishing effect of abrasive flow processing is studied for additive manufacturing grids and vortexers, and the polishing characteristics of abrasive flow processing are analyzed on group holes and curved runner parts.

The polishing principle and characteristics are described for abrasive flow machining technology. This paper analyzes the composition and preparation of abrasive media for abrasive flow machining and the influence of abrasive properties on abrasive flow machining. In addition, it expounds the design of special fixture for grain flow machining, the design points of flow control and sealing of the fixture.

A special fixture for abrasive flow was designed to manufacture titanium alloy grid parts made by additive manufacturing. This paper analyzes the reason of "crescent shaped" polishing phenomenon in the process of abrasive flow machining on inclined hole of grid, and puts forward the solution. It is found that the change law of the surface quality of the parts in abrasive flow machining is that the surface quality of the parts deteriorates first and then improves gradually. The reason is that there will be defect layer on the surface of titanium alloy parts manufactured by additive manufacturing.

The abrasive flow processing technology was determined for swirler made by additive manufacturing. The experimental study of the abrasive flow processing of the swirler was carried out, and the cleaning method after the swirler of abrasive flow processing was proposed. The experimental results show that the abrasive flow processing has a good polishing effect on the swirler made by additive manufacturing, and it can successfully achieve the protection of the end edge of the venturi to avoid "fillet". The influence law of abrasive flow machining on flow area of swirler was studied through experiments, and the

relevant verification and analysis were carried out, which provided the basis for realizing the ideal flow area of eddy current machining.

Key Words: Additive manufacturing; Abrasive flow machining; Surface quality;
Polishing effect

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论.....	1
1.1 增材制造技术.....	1
1.1.1 增材制造技术简介.....	1
1.1.2 增材制造金属零件特点.....	1
1.1.3 增材制造金属零件应用.....	2
1.2 金属增材制造零件缺陷.....	4
1.2.1 阶梯效应.....	4
1.2.2 球化效应.....	5
1.2.3 粉末粘附.....	6
1.3 抛光加工研究进展.....	7
1.3.1 机械抛光.....	7
1.3.2 激光抛光.....	8
1.3.3 化学与电化学抛光.....	9
1.3.4 磨粒流抛光.....	11
1.3.5 抛光方法对比.....	12
1.4 研究目标及意义.....	13
1.5 本文主要研究内容.....	13
2 磨粒流加工技术.....	14
2.1 磨粒流加工原理及特点.....	14
2.1.1 磨粒流加工原理.....	14
2.1.2 材料去除机理.....	15
2.1.3 磨粒流加工特点.....	17
2.2 磨粒流加工机床.....	18
2.3 磨料介质.....	19
2.3.1 磨粒.....	19
2.3.2 基体.....	20
2.3.3 添加剂.....	21
2.3.4 磨料配制.....	21

2.3.5 磨料性质.....	21
2.4 磨粒流加工夹具.....	22
2.3.1 夹具的定位与夹紧.....	23
2.4.2 夹具的控流.....	23
2.4.3 夹具的密封.....	26
2.4.4 夹具的结构优化.....	27
2.5 主要工艺参数对加工效果影响.....	27
2.5.1 加工时间影响.....	27
2.5.2 加工压力影响.....	27
2.6 本章小结.....	28
3 增材制造格栅零件磨粒流加工研究.....	29
3.1 实验设计及方案.....	29
3.1.1 增材制造格栅类零件分析.....	29
3.1.2 钛合金格栅夹具设计.....	30
3.1.3 钛合金格栅加工参数.....	32
3.2 实验结果及分析.....	32
3.2.1 抛光结果.....	32
3.2.2 材料去除分析.....	33
3.2.3 抛光规律研究.....	36
3.3 本章小结.....	38
4 增材制造涡流器零件磨粒流加工研究.....	39
4.1 涡流器抛光实验设计及方案.....	39
4.1.1 增材制造涡流器零件分析.....	39
4.1.2 涡流器夹具设计.....	42
4.1.3 涡流器磨粒流加工参数.....	45
4.1.4 涡流器清洗.....	45
4.2 抛光结果及分析.....	46
4.3 流通面积加工规律研究.....	48
4.4 本章小结.....	51
5 结论与展望.....	53
5.1 结论.....	53
5.5 展望.....	53

参考文献.....	55
攻读硕士学位期间发表学术论文情况.....	59
致谢.....	60
大连理工大学学位论文版权使用授权书.....	61

1 绪论

1.1 增材制造技术

1.1.1 增材制造技术简介

增材制造（Additive Manufacturing, AM）俗称为“3D 打印”（3DP），它最早出现于上世纪末期的一种快速成型技术^[1]。增材制造技术通过快速成型的理念，借助于计算机等手段将零件的数字模型利用“从零到整”的方式将金属材料逐层堆积形成完整的实体零件^[2, 3]。由于技术的不断发展，增材制造零件已经不限制于早期的模型，正在逐步应用于许多领域，可以说增材制造技术的出现与运用，逐渐使得零件制造迈向新的台阶。根据所用金属粉末添加方式的区别，可大致将增材制造技术分为两种^[4]：一种是选区融化的方式，这种方式主要以粉末熔覆进行零件的立体成型，运用这种方法的增材制造技术主要包含选区激光熔融（SLM）、选区激光烧结（SLS）、直接金属激光烧结（DMLS）和电子束熔融（EBM）等技术；另外一种是定向能量沉积的方式，这种方式主要是将作为原料的金属粉末输送到特定位置进行零件的立体成型，运用这种方法的增材制造技术主要包含激光融化沉积（LMD）和激光近净成形（LENS）等技术。

1.1.2 增材制造金属零件特点

与现在运用广泛的车削加工、铣削加工等典型的减材制造方法相比，增材制造技术有着许多不可比拟的特点：

（1）增材制造技术改变了零件的设计思想^[5]，打破了传统加工制造方法所受到的诸多限制，可以使得零件的结构更加多元化，拓展了一部分传统加工技术所达不到的结构功能设计，满足了更多的使用场合。

（2）增材制造技术一定程度上简化了一些复杂零件的结构设计制造，原本为了满足功能往往需要多个零件组成的零部件才能达到生产条件，增材制造技术可以直接一体成型，这不仅减轻了总体重量，同时增加了结构强度，也有利于日益复杂的设计工作简单化。

（3）增材制造技术不仅可以用于零件的成型，也能在一定程度上满足高性能的需求，即用于已损伤高成本复杂零件的修复工作，可有效解决重新制造复杂零件的高成本以及其他落后修复方法使得零件性能变低的尴尬境地。

（4）增材制造技术对小批量多类型零件优势明显，传统生产制造工艺流程繁杂，小批量生产成本较高，并且对于零件的品种变化需要同时改变其生产工艺，这无疑又是

成本的增加，而增材制造技术不需要定制复杂的生产工艺流程，同一设备也可用于各种类型零件的成型。

1.1.3 增材制造金属零件应用

目前，增材制造技术在航空航天以及生物医疗等领域表现出非常大的应用空间^[6-13]，并在模具、齿轮、汽车制造等工业领域逐渐显示出其巨大的优越性^[14-19]。

在航空航天领域，美国的通用电气公司通过增材制造将发动机喷嘴由原来的 20 个零件简化成一个零件，实现了零件的高度集成化，重量减轻 25%，效果增加了 15%，同时还减少了零件加工的成本^[20]。增材制造技术也可用于飞机机身框架以及格栅等结构的成型制造，传统的加工工艺通常是将多个零件进行组合，其一体性差，结构强度与疲劳性能都不理想。而采用增材制造技术可以无视结构的复杂性进行零件的一体成型^[21]，一方面减轻了机身重量，一方面也使得飞机的结构强度与疲劳性能得到了显著提升。对于出现损伤的复杂零件，增材制造技术可以实现零件的在线快速修复，缩短了零件更换的周期，减少了大量制造成本，并且被修复的零件综合性能也能得到保证。

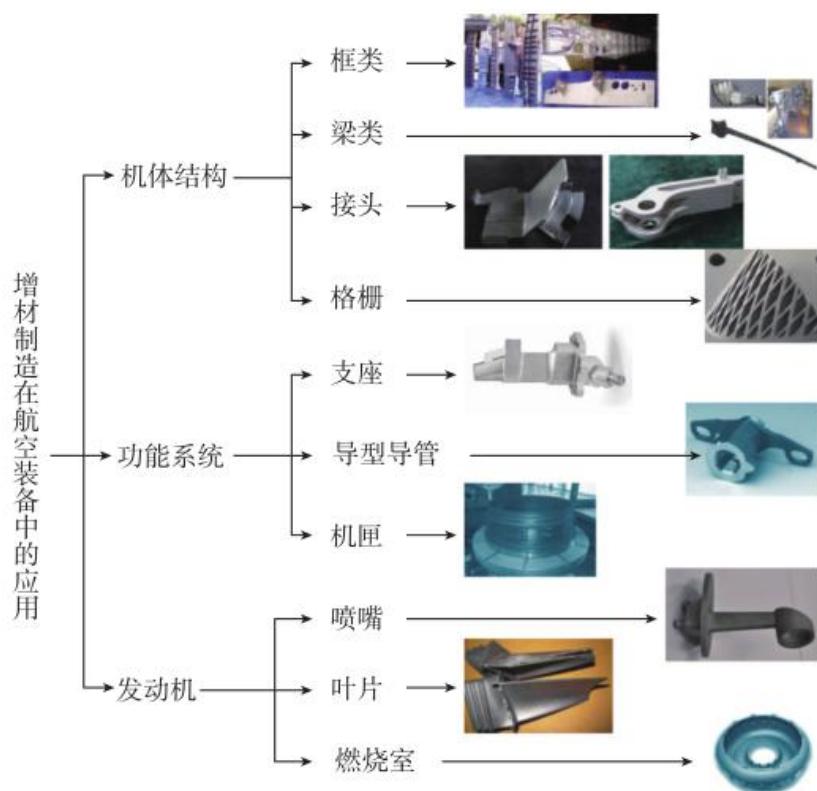


图 1.1 增材制造在航空应用^[21]

Fig. 1.1 Application of additive manufacturing in aviation^[21]

在生物医疗领域，增材制造可用于修复骨组织的损伤，由于不同个人以及人体不同部位的差异，骨组织的植入也必须达到个性化要求，增材制造技术可以低成本满足这个要求的同时，也可以提高植入的成功率。增材制造能够制造出与自然骨组织类似的复杂多孔结构，可以对骨组织的微观孔径等结构进行控制，所用的 HA 材料可以实现良好的生物相容性和骨传导，在医疗植入发挥着重要作用。增材制造零件可以定制结构复杂的骨骼，在骨骼中应用的可降解增材制造多孔骨科螺钉能够使其逐渐溶解并被代谢，打破了传统螺钉的限制^[22]。此外，增材制造技术还可以用于制造人工器官和血管，这种方法制造的器官比其他方法更容易被人体所接受，能够很好的解决排异反应问题，甚至人体细胞也能够在这种器官上形成自身组织。

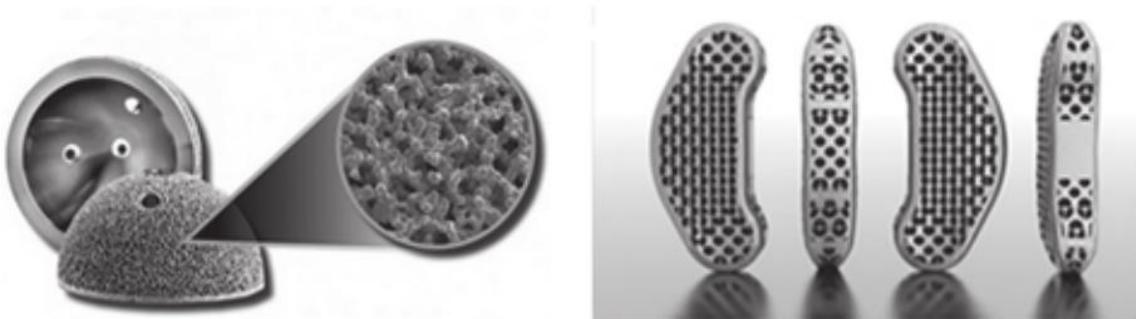


图 1.2 增材制造医疗植入应用^[9]

Fig. 1.2 Application of additive manufacturing in medical implantation^[9]

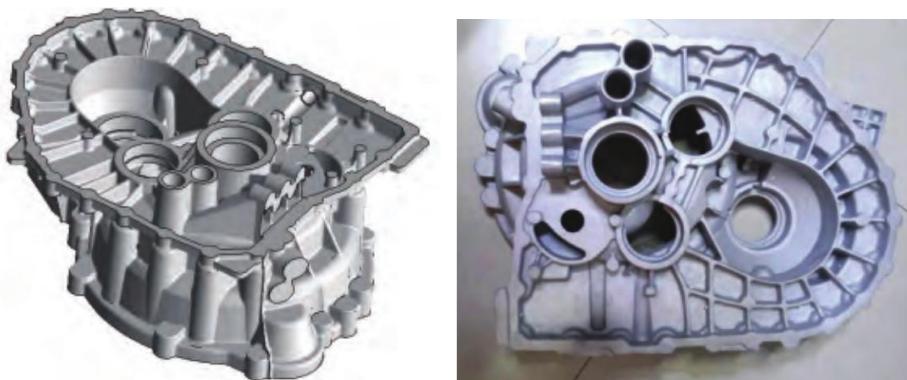


图 1.3 增材制造模具^[23]

Fig. 1.3 Additive manufacturing mould^[23]

在磨具、汽车制造等领域，增材制造技术可以成型出形状复杂的模具曲面，解决了传统工艺方法很难达到的模具结构形状^[24]，也可以提高模具的制作效率，大大降低了模具制作的成本。对于复杂的汽车零配件，传统方法实现加工的难度较大，增材制造技术

可以发挥出巨大的优势。增材制造不仅可以用于汽车零部件的原型制造，汽车模具的制造，也可以直接成型出复杂的汽车零件并能进行零件的修复工作^[25]。

1.2 金属增材制造零件缺陷

增材制造是通过数字控制原材料逐点逐层累加的工艺成型出实体零件，并使其具有所需要的形状和尺寸^[26]，这种零件制造方法与传统的减材（材料去除）制造思路正好相反。由于增材制造本身的技术原理特点，其制造的金属零件在成型后往往会产生“阶梯效应”，“球化效应”与“粉末粘附”等不良现象，这些不良现象直接造成此技术生产的零件表面粗糙度通常都比较大、表面质量不够理想。

1.2.1 阶梯效应

增材制造零件是通过一层一层堆积原材料形成的实体，其每一层材料在必然会存在一定的厚度，这就使得实际生产的零件轮廓表面无法与理论的数字模型完全一样，特别是对于倾斜的零件表面以及有弧度的表面会呈现出一定的“阶梯状”外观^[27]，如图 1.4 所示^[28]。这直接造成零件表面的粗糙度会比较大，严重影响了零件的使用性能。

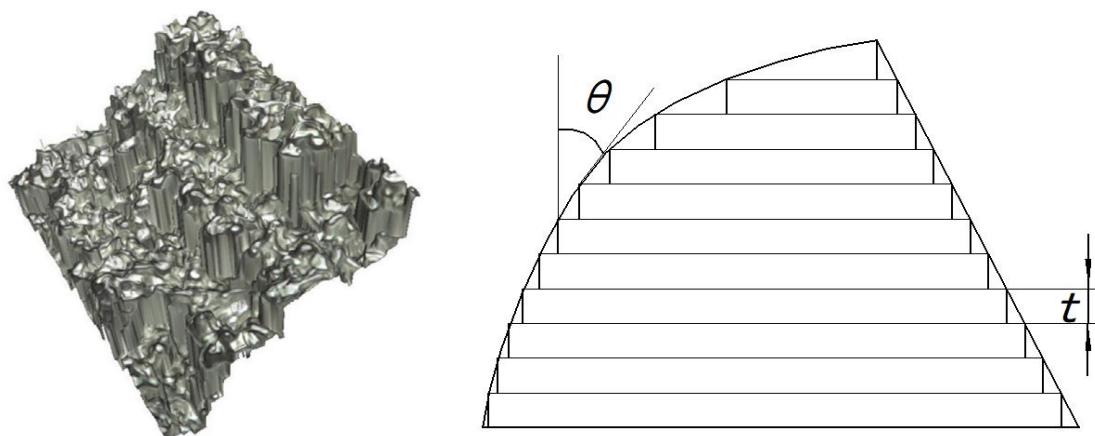


图 1.4 阶梯效应^[28]

Fig. 1.4 Staircase effect^[28]

阶梯效应产生的原理示意图如图 1.4 所示，其中 t 为每层的厚度， θ 为生长方向与零件表面切平面的夹角。机加工波峰刀痕大小与进给速度和刀具的参数有关，与传统的机加工零件表面有些类似，增材制造的阶梯效应大小与每一层的厚度有着直接的联系，每层的厚度愈厚，则阶梯效应会愈加明显，每层厚度减薄，此效应便可减弱，此外，成型面的相对倾斜角度与曲率愈大，阶梯效应也将会愈明显。

改善增材制造阶梯效应的方法主要有以下几种：

(1) 因为阶梯效应与成型时每层的厚度直接相关，故可采用减小厚度的方法减弱阶梯效应。由于每层的厚度必然存在，并且随着每层厚度的减薄，增材制造的效率便会降低，制造成本随之增加。效率与成本随厚度的减薄是成指数性增加的，因此需要找到合适的参数进行生产制造。

(2) 阶梯效应在型面倾斜以及弯曲时会更加明显，因此可考虑将零件放置状态处于最佳位置，例如使得原本倾斜的表面在进行成型时与生长方向相对垂直，尽可能的减小阶梯效应。

(3) 优化设计模型，尽量减小成型面的曲面曲率与相对与垂直方向的倾斜程度，优化零件的设计。

1.2.2 球化效应

增材制造过程是金属材料融化再凝固的过程，在激光烧结成型过程中，金属材料的粉末在很短的瞬间内吸热熔融然后又快速固化。大部分金属粉末在高温融化成球后便会相互结合，形成熔融池，随着激光的移动，新的金属粉末被融化形成新的熔融池区域，而激光束后面的熔融池部分则会快速形成固体。因为激光移动的速度比较快，形成的熔融池会比较细长，熔融金属的表面张力也在迅速变化，部分体积较小的熔融金属成球后并没有与熔融池完全相互融合形成平整表面，其单独固化后形成固体颗粒与零件表面相结合，形成“球化效应”，如图 1.5 所示。球化效应的形成不仅会严重影响增材制造零件的表面质量^[29]，也会改变零件的致密度^[30]，从而影响零件的综合性能。

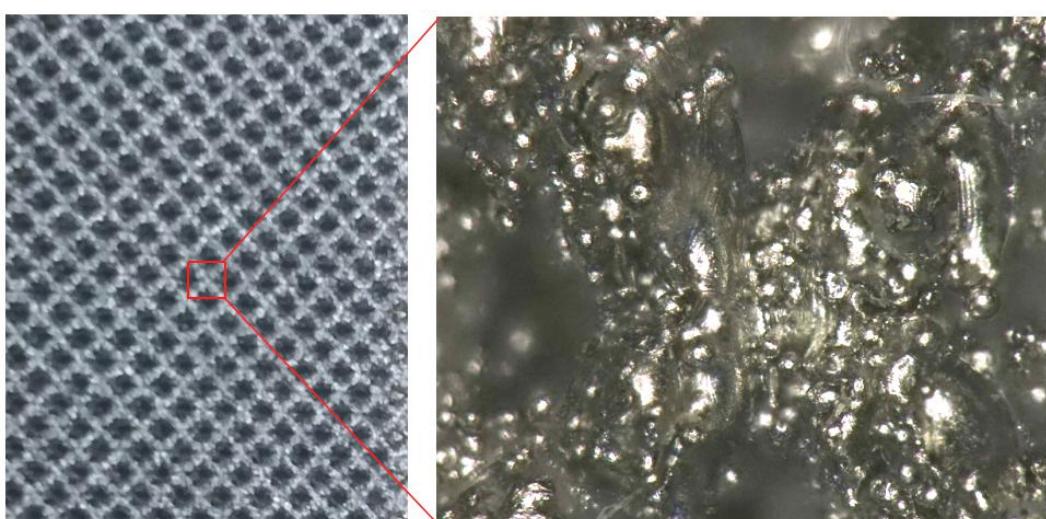


图 1.5 球化效应
Fig. 1.5 Balling effect

影响球化效应的因素很多，主要可分为两类，一类是增材制造的工艺参数，一类是金属粉末材料本身的性质。通过增加激光束的能量在一定程度上可以减轻球化效应的产生，但能量过高对金属组织有着较多不利的影响。

1.2.3 粉末粘附

SLM 成型的增材制造零件的生长是由金属粉末融化并凝固而形成的，金属粉末在形成融池的过程中由于受热不可能完全均匀，没有完全融的金属粉末便会粘连在融池周围并最终粘结在工件表面，形成“粉末粘附”，如图 1.6 所示，为不同激光扫描速度下的粉末粘附现象。粉末粘附现象同样会使得工件表面质量较低，造成工件表面粗糙度值较大^[31]。

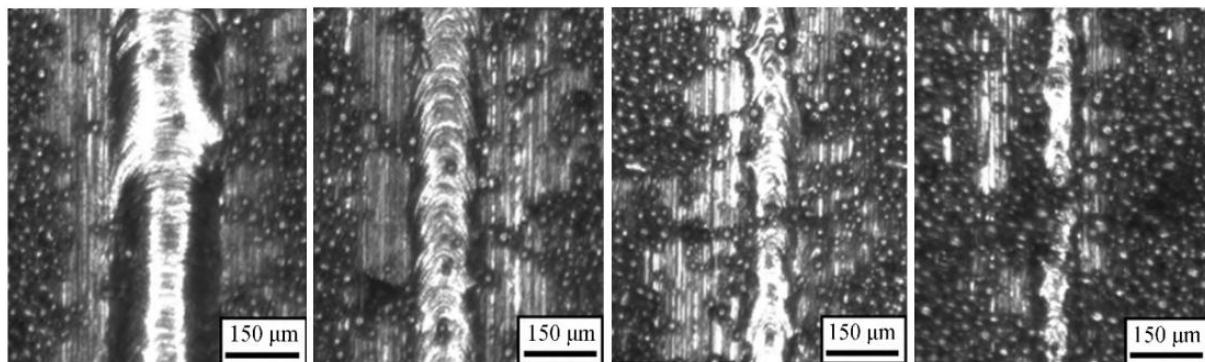


图 1.6 粉末粘附^[32]

Fig. 1.6 Powder adhesion^[32]

粉末粘附现象大致分为两种^[32]，一种是指没有融化的金属粉末，只是因为与融池相接触使得其粘连在工件表面，并没有刺破工件表面伸入到工件内部，这种粉末粘着用简单装置稍加外力便可将其去掉；另一种粉末粘附是指金属粉末的一部分直接刺破融池表面到其内部，金属粉末的另外一部分仍然留在融池之外，在形成零件后这些粘结在零件表面的金属粉末较难去除。对于粘结在下一个扫描层下方的金属粉末，由于在进行下一层的成型时这些金属粉末会被融化在融池内部，因此这部分粉末并不会对零件表面质量造成影响。而位于边缘的粘结金属粉末由于不会被继续融化，便停留在工件表面，这就严重影响了增材制造零件的表面粗糙度。

粉末粘附现象在 SLM 成型的增材制造零件上是必然存在的，没有办法完全防止此现象的产生，只能改变一定的增材制造参数来减小此效应的影响，但目前仍然没有办法取得较好的效果。

一种方法是例如适当降低增材制造的扫描速度，因为 SLM 成型增材制造存在保护气体，当激光进行扫描时金属粉末在热量作用下发生融化并形成融池，而融池附近的保护气体也会因为吸热而产生一定量的膨胀，气体在膨胀的同时会将融池附近没有融化的金属粉末“推走”。气体膨胀程度也受激光扫描速度的影响，扫描速度慢，则气体膨胀的程度愈大，则金属粉末被“推走”的愈多，便可在一定程度上减轻粉末粘附现象。

此外，增材制造零件的表面质量也受到扫描策略以及生长方向等因素的影响，同一零件模型在扫描策略改变之后其成型的零件表面质量不相同，不同生长方向上的表面粗糙度差异也比较大，因此为提高增材制造零件的表面质量，要综合多种参数的影响，最后采取最佳的组合参数。

就目前的技术基础，增材制造零件的表面质量无论如何也远达不到直接投入使用的标准。并且随着功能需求的不断增长，增材制造零件越来越复杂化，这也需要在一定程度上调整某些工艺参数，从而不能使用成型质量最佳的工艺参数，因此对增材制造复杂零件进行后续抛光至关重要。

1.3 抛光加工研究进展

金属表面的光整加工技术（一般将其称为抛光技术）通常认为是在机械的力作用下或者在化学、电化学的腐蚀作用下提高物体表面质量的一种加工技术^[33]。随着科技的发展，增材制造零件的使用愈加广泛，并且其结构复杂程度仍在进一步增加。提高增材制造零件表面质量的方法主要有两大类，一类方法是提高增材制造成型质量，另一类方法是成型后进行抛光加工。而由于目前增材制造技术的限制，通过第一种方法并不能很好的解决问题，因此对增材制造复杂零件进行后续抛光是提高其表面质量的必然选择。增材制造复杂零件的抛光与其他复杂表面的抛光一样具有相当大的难度，目前采用较为广泛的是比较落后的手工抛光的方法，因手工抛光存在质量差、成本高和效率低等问题，并不能很好的满足需求适应时代的发展。普通的机械磨削抛光因抛光可达性比较差，只能用于抛光表面比较规则的零件，并不能适应于日益复杂的增材制造零件的抛光。新兴的激光抛光、化学电化学抛光、磨粒流加工等方法所抛光的零件表面通常比较复杂^[34-37]，适合复杂曲面抛光^[38]，可用于增材制造复杂零件的抛光处理^[39]。

1.3.1 机械抛光

机械抛光主要是利用一定粒度的磨粒在工件表面进行挤压、划擦、切削从而使得零件粗糙度下降的一种抛光方法。机械抛光是通过磨粒在外力作用下的物理抛光方法，这种抛光方法是依靠大量的磨粒在工件表面产生的微量切削作用，将工件表面呈现微观凸

起的部位进行切除，因此可以在一定范围内提高零件的表面质量，机械抛光方法出现较早并且使用已经十分广泛。

S. Bagehorn 等^[40]分别采用了铣削、喷砂、振动磨削等机械加工方法对 Ti-6Al-4V 增材制造零件进行了抛光试验研究，研究了不同的机械光整加工工艺在降低增材制造零件表面粗糙度之后对其表面形貌和疲劳性能的影响。其研究表明，在经过机械抛光之后，增材制造零件的表面粗糙度可降低至 $R_a < 1\mu\text{m}$ ，经过抛光之后的增材制造零件的疲劳性能在 3×10^7 个循环的条件下能从 300MPa 提升至 775MPa。

1.3.2 激光抛光

激光抛光是指利用激光产生的热能使得工件表面的材料发生融化，所融化的这部分材料在重力以及液体表面张力的作用下进行自然流动从而逐渐趋向于平坦，然后经过放热固化之后得到平整表面的抛光方法。激光抛光是一种非接触式的抛光方法，即不需要其他抛光材料与被抛光的表面进行接触。这种抛光方法的抛光层厚度能够达到微米级，相对来说比较薄，对于不同材料的熔点区别，可通过调整激光发生器使得激光在零件表面的温度达到合适范围。

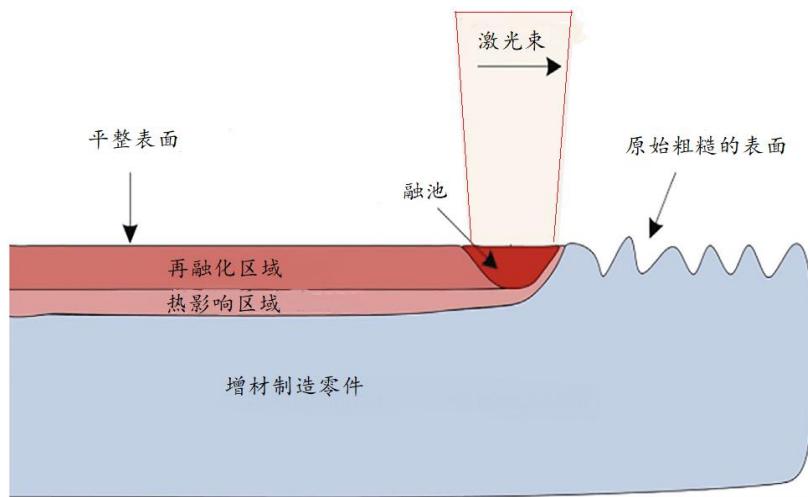


图 1.7 激光抛光示意图^[35]

Fig. 1.7 Schematic of laser polishing^[35]

Ukar 等^[41]研究了激光抛光工艺对选择性烧结方法的增材制造零件进行抛光的效果，在激光抛光过程中利用保护气体保证被融化的材料重新固化。其将抛光操作实现了自动化，抛光之后零件表面的粗糙度降低了 80% 以上。C. P. Ma 等^[42]研究了激光抛光对 Ti-

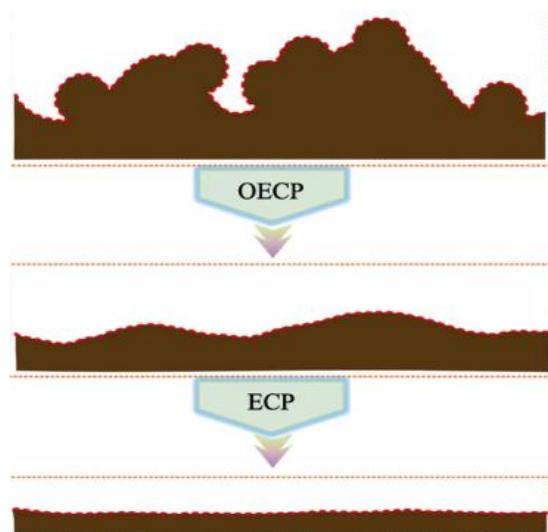
6Al-4V、TC11 等钛合金材料增材制造零件的抛光性能，其研究结果发现表面粗糙度大于 $5\mu\text{m}$ 的增材制造零件在经过激光抛光后其表面粗糙度可降低至 $1\mu\text{m}$ 以下。他们测量了激光抛光区的耐磨性和显微硬度等参数，用于研究激光抛光对增材制造零件的表面层影响。Debajyoti Bhaduri 等^[28]研究了激光抛光对增材制造成型的不锈钢（SS316L）零件的抛光结果，其主要目的在于探索激光能量和频率对工件表面质量的影响。结果表明，经过激光抛光之后，零件的表面粗糙度在最佳参数条件下最高可降低 94%，抛光表面没有划痕、坑洞等不良现象。Fang 等^[43]研究了激光抛光对增材制造 IN718 合金的抛光性能，其探究结果表明咋经过激光抛光处理之后，零件表面粗糙度可由最初的 $7\mu\text{m}$ 降低到 $0.1\mu\text{m}$ 以下，降低幅度高达 98%。此外还发现在不损伤零件表面的状态下，激光抛光还可以显著提高增材制造 IN718 合金零件的表面硬度。K.C. Yung 等^[44, 45]利用激光抛光工艺对 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的增材制造钴铬合金进行了研究，其研究了激光抛光的各项参数（激光功率、激光扫描速度、保护气体流量、激光靶距等）对抛光质量的影响。其研究结果发现当激光的焦距在大于 6mm 时钴铬合金的表面质量 Sa 不大于 $1\mu\text{m}$ ；保护气体的流量提高，可降低表面粗糙度，当流量达到 6L/min 时，即可达到较好的表面质量，若再继续提高流量表面质量提高不显著，激光移动速度对表面质量的影响也有相似特性。同时其研究结果表明各项参数中激光焦距和能量对合金零件表面湿润性的影响最为明显。李健等^[46]研究了激光抛光的工作参数对被抛光零件轮廓的误差复映，发现零件表面的轮廓在经过激光抛光后会有残留，残留高度随激光能量的增加而减小。

1.3.3 化学与电化学抛光

化学抛光主要是利用化学腐蚀的原理进行抛光的一种抛光方法。化学抛光是将金属工件放置在相应的化学抛光液中，工件表面的金属材料在化学试剂的作用下产生化学反应。高低不平的工件表面在化学抛光液中会形成溶解速率不一致的溶解现象，粗糙的工件表面上微观突出的材料由于其本身的结构特性，造成其溶解速率大于表面微观凹陷的材料，使得工件表面高低不平的状态得到改善，即粗糙度得到降低，从而获得相对平整的表面。电化学抛光是通过直流电场的作用，将被抛光工件作为阳极在电解液中进行溶解产生抛光效果的一种抛光方法。电化学抛光技术中工件需要被抛光的表面作为阳极与阴极材料接触在同一电解质中，在直流电源的作用下，被抛光工件表面材料发生氧化反应，被逐渐去除，工件表面微观凸起的部位发生氧化反应的速率大于微观下凹的部位，因此其表面不平度得到改善。

化学与电化学抛光对于多孔网状增材制造金属零件有着良好的抛光效果。Pyka 等^[47]采用两水平三因素全因子的试验研究了化学与电化学抛光的时间和化学试剂浓度对孔

状结构零件的抛光影响，试验样件为选择性熔融 Ti-6Al-4V 合金零件，其试验结果表明溶液的浓度对抛光质量的影响最为明显。零件在经过抛光之后，其表面粗糙度 R_a 值可从最初的大于 $6\mu\text{m}$ 降低至 $1\mu\text{m}$ 以下。由于增材制造零件表面质量往往都较差，电化学抛光方法对如此粗糙的表面难以发挥出其最佳的抛光质量状态，为了解决这个问题，Chang 等^[48]提出了一种新的电化学抛光方法，即超电势电化学抛光，其利用超电势与电化学相结合的方法，可将表面粗糙度大于 $8\mu\text{m}$ 的增材制造零件降低到 $0.18\mu\text{m}$ ，材料的去除厚度也可保持在比较小的范围之内。Guoying Dong 等^[49]采用田口方法利用化学与电化学对增材制造网格零件进行了抛光研究，其试验样件材质为激光烧结 Ti-6Al-4V。其研究结果表明这种抛光方法在零件边缘位置特别是零件外表面的材料去除速度更为明显，可以较好的去除网格结构零件表面的颗粒。该研究还发现表面粗糙度与材料去除量有关，即粗糙度随材料去除量的增加而降低。

图 1.8 化学与电化学抛光组合^[48]Fig. 1.8 Combination of chemical and electrochemical polishing^[48]

Sajjad Habibzadeh 等^[50]发现经过电化学抛光的 316L 不锈钢增材制造零件可以显著改善其表面的耐腐蚀性和生物相容性。这是由于经过电化学抛光后，零件表面的氧化膜相相比抛光前在厚度方面有所增加，并且氧化膜的 Cr 含量在一定程度上有所提高，电化学抛光表面在血浆试验中呈现出较低的血栓形成状态。V. Urlea 等^[51]发现电化学抛光对不同生长方向的增材制造零件抛光质量相差很大，因此他们研究了生长方向对抛光质量的影响。其研究表明，这些差异主要是由于不同方向的零件初始表面质量有较大区别

造成的，初始粗糙度高的零件在经过电化学抛光后该值依然比较大，而初始粗糙度小的零件在经过电化学抛光后该值下降更加明显。

1.3.4 磨粒流抛光

磨粒流加工在国内也被称为挤压珩磨，是一种利用粘弹性磨料介质在压力作用下对工件表面进行微量加工的抛光以及去毛刺技术^[52]。在磨粒流抛光过程中，夹具的主要作用是固定待抛光工件并被设计成合适的流道用来通行磨料介质。夹具与工件一起被夹紧在两个料缸之间，抛光前先将配制好的磨料放置在其中一个储料缸之中。一般情况下，在料缸将夹具以及工件夹紧后，他们会一起形成密闭的空间。在开始抛光时，装有磨料介质的料缸活塞在外加力（通常是液压油的压力）的作用下进行移动，迫使磨料经过夹具的流道和待抛光的工件表面。磨料介质中的磨粒在压力的作用下对流经的工件表面产生微量切削作用，产生一定的材料去除，从而达到抛光效果。当活塞运动到其极限位置的时候，磨料介质已经从开始的料缸到达另外一个料缸，此时则可以通过调整，使得另外一个料缸活塞在压力作用下将磨料介质推回最初的料缸，此时则完成了磨粒流抛光的一个循环，连续这样的循环，根据需要设定循环次数便是磨粒流抛光的整个过程。通常情况下在其中一个活塞进行推料时另外一个活塞是不受推力的。也可以根据需要采用背压抛光，即在一个料缸的活塞运动时，另外一个活塞也给予一个小于推料活塞的压力，这样的好处是可以增加细长类零件表面抛光的均匀性，对于一些不适合循环抛光的零件也可以采用单向抛光的方式进行加工。

磨粒流加工是一种适合复杂零件表面的抛光方法，汤勇^[53]等对磨粒流加工壁面滑动现象进行了实验研究，其结果表明，磨料介质在流道内流动的速度均值有一个临界值，当平均速度大于临界值时则会产生壁面滑动现象。其研究发现磨料介质沿着壁面产生滑移的速度会随磨料介质的平均速度升高而变快。临界值的大小受到磨料介质的粘度的影响，当粘度减小时，临界值达到的条件便会提高，磨料介质需要更高的速度才能达到此条件。可以说，磨料介质在工件表面的壁面滑移是实现磨粒流抛光的必要因素。Rajendra K. Jain^[54]提出了磨粒流加工中比能和切向力的数学模型，此模型是利用磨粒流加工的各项参数与加工结果，计算了抛光过程中去除单位体积的工件表面材料所需要的能量。通过测量磨粒流加工的各项工艺参数对抛光过程中磨料介质和被抛光零件的热影响，分析了它们之间的相互作用关系，然后通过实验研究与理论计算结果进行对比，得出了磨料颗粒的硬度和目数、加工压力、加工时间以及工件表面硬度等对加工区域温度变化的影响规律。

王伟等^[55]利用摩擦学理论对磨粒流加工的抛光过程进行了一些分析研究。他们根据

摩擦学的相关理论，建立了针对磨粒流加工和工件表面的摩擦学系统模型，得到了系统的主要结构元素、元素的特性以及他们彼此之间的关系。他们认为由磨料介质的磨粒产生的作用效果不同，工件的表面材料则会发生不同效果的应变。根据应变效果的不同，磨粒流抛光去除材料的现象具体表现为磨粒对工件表面的微观切削、工件表面的材料在发生多次塑性变形之后产生疲劳断裂以及工件表面材料发生的脆性断裂等三种情况。通常状态下，尽管磨粒流加工工艺参数大不一样，但其抛光原理都是利用磨粒微量去除工件表面的材料，从而达到工件表面质量较好的效果，只是由于参数的不同使得去除效率与三种去除方式分别所占的概率比重有所区别。多以，通过实验设计改变磨粒流加工工艺参数，能够得到不同表面质量的工件表面。

最早采用磨粒流加工对增材制造进行抛光处理的是 Williams 等^[56]，他们利用磨粒流抛光了增材制造零件，改善了由于增材制造零件所具有的阶梯效应。Chaneaca 等^[57]通过磨粒流加工实验的手段，探索了这种抛光方法对增材制造零件表面残余应力和表面硬度的影响，其研究结果表明磨粒流加工会显著提高零件的表面硬度并会形成较高的表面压应力。E. Uhimann 等^[58]研究了一种 CFD 数值模拟方法，将非牛顿流体与非弹性方程相结合的形式实现了粘弹性磨料的模型，模拟并通过试验验证了磨粒流加工叶片的结果，其研究结果表明磨粒流可以提高叶片的表面质量，但是会出现边缘“过抛”问题。高航等^[59]研究了磨粒流加工对增材制造格栅零件的抛光效果，通过基准孔的方法对比了磨粒流加工过程中格栅表面形貌和基准孔附近的表面轮廓，研究了磨粒流加工对“球化效应”的去除机理。高航等^[60]又通过工艺参数对增材制造铝合金零件的表面完整性研究发现磨粒流加工在提高了零件表面质量的同时，还在一定程度上减弱了增材制造所造成的表面缺陷。Tatsuaki Furumoto 等^[61]探索了磨粒流加工对增材制造模具的加工性能并对流道的流体流动进行了数值模拟，研究了螺旋形内表面对磨粒流加工性能的影响。

1.3.5 抛光方法对比

对于增材制造复杂零件的表面抛光技术，各种不同的抛光方法分别具有不同的抛光特点。机械抛光的抛光可达性较差，通常只能用于简单表面的抛光，面对日益复杂的增材制造零件，机械抛光的致命缺点造成其对增材制造零件的实际应用很少。

激光抛光属于非接触式抛光，抛光后对工件表面没有磨痕，对环境的污染小，容易实现零件表面特定区域的微区局部抛光，比较适合硬脆材料的抛光。然而激光抛光在抛光时消耗能量多且设备较为昂贵，造成其抛光成本高，并且在抛光时需要比较严格检测技术和精度控制技术。

化学电化学抛光的效率与可达性都比较高，抛光设备通常较为简单，加工成本比较低廉，在抛光后工件表面不会形成应力且耐腐蚀性提高。但化学与电化学抛光抛光质量受限制于被抛光工件的纯度和组织的均匀性，对粗糙度高的零件抛光质量差，不易保证零件的精度，对环境不友好。

磨粒流加工可达性好，适用于加工复杂零件表面，对被抛光的零件材料没有限制，加工效率高，适合批量加工。但磨粒流加工对不同的零件时需要不同的夹具，适应性差，其磨料介质也难以长期保存。

1.4 研究目标及意义

由于各种产品发展的需要，增材制造复杂零件的应用不仅在种类同时也在数量上愈加广泛，而增材制造复杂零件的表面质量往往对零件的性能以及观感等起着相当重要的作用。在起初，对增材制造复杂零件的抛光基本都是依靠手工等比较落后的抛光方法，这些抛光方法的效率比较低下，而且抛光后工件的表面质量与均匀性较差，零件的综合使用性能受到不同程度的制约。此外，随着复杂表面零件的多元化发展，新型材料以及更加复杂的增材制造零件的出现使得它们的抛光来到了更加困难的地步，为了解决这个难题，国内外研究了许多比较新的抛光方法。磨粒流加工技术在抛光领域有着较为独特的优势，这种抛光方法可抛光各种形状零件的复杂表面，抛光后表面质量比较高，一致性好，成本也比较低廉。面对日益复杂的增材制造零件，研究磨粒流加工对其表面质量的影响有着重要的作用。

1.5 本文主要研究内容

本文主要针对两种比较典型的增材制造金属零件进行了磨粒流加工试验研究，主要研究内容如下：

（1）研究磨粒流加工技术特点及加工参数研究

分析了磨粒流加工的原理，总结了磨粒流加工的三个要素与抛光特点，研究了夹具的设计思路，分析了磨粒流加工过程中加工参数对加工效果的影响。

（2）增材制造格栅零件磨粒流加工试验研究

进行了增材制造格栅零件的磨粒流加工实验，分析了格栅零件的抛光效果，总结了磨粒流加工对增材制造钛合金零件的材料去除规律。

（3）增材制造涡流器磨粒流加工试验研究

研究了磨粒流加工对增材制造涡流器的抛光效果，提出了涡流器的清洗方案，研究了磨粒流加工对涡流器流通面积的影响规律。

2 磨粒流加工技术

2.1 磨粒流加工原理及特点

2.1.1 磨粒流加工原理

利用磨粒流加工技术对零件表面进行抛光有三个要素：磨粒流加工机床，专用夹具和磨料介质，缺一不可。磨粒流加工机床主要有两个正对的料缸以及料缸内用于推料的活塞，料缸的固定主要分为立式与卧式两种。活塞的往复运动可采用液压或者气压进行驱动，料缸的夹紧也可采用液压或者气压，但需要注意的是夹紧的压力必须要在一定程度上大于活塞推料的压力，否则会产生磨料介质的泄露不能正常进行磨粒流加工。理想的磨料介质是具有粘弹性的非牛顿流体，夹具则是根据待抛光零件的结构特征经过专门设计用于零件定位以及磨料引流。

在进行磨粒流加工前，需要将磨料介质装入机床料缸之内，然后将工件通过夹具固定在机床的两个料缸之间。在夹紧缸的加紧作用下，机床料缸与夹具通道密封紧密接触后便可开始进行抛光。在抛光时，磨料介质在料缸活塞的作用下通过夹具以及工件表面在两个料缸之间往复循环，其原理图如图 2.1 所示。

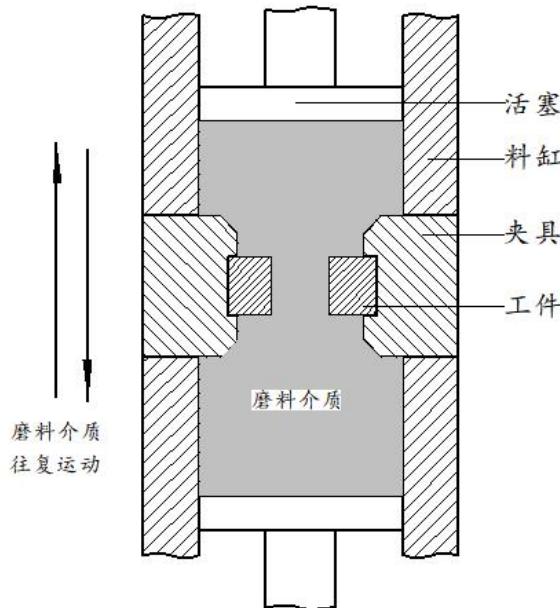


图 2.1 磨粒流加工原理

Fig. 2.1 Principle of abrasive flow machining

在进行磨粒流加工时，磨料介质在夹具通道的引导下经过工件的待抛光表面，磨料介质中的磨粒充当微尺寸的刀具，对被抛光零件表面起到“切削”的作用。磨料介质的基体为具有一定粘稠度的高分子材料，对磨粒起到承载作用，磨料介质整体充当为柔性的磨头，为磨粒提供能量，使得磨粒获得向前移动的动力。而与零件表面相接触的磨粒一方面受到基体内力的影响被压向零件表面，一方面也具有向前移动的动力，这些磨粒在经过工件表面时便会对工件表面产生微量的材料去除。

磨粒流加工在经过一个抛光循环之后只能对工件表面去除相当薄的一层材料，因此零件经过磨粒流加工可以获得较高的表面质量。由于抛光过程不会产生高温，所以零件表面也不会出现磨削烧伤等缺陷。此外，因为磨粒与工件表面的接触是在基体的作用下实现的，基体的内力变化均匀，并且具有弹性，因此在抛光时不会出现“磨削力”的突然变化从而使得磨粒刮伤零件表面。因为磨料介质属于流体范畴，其形状变化是由容腔的形状决定的，因此磨粒流加工在经过夹具的精心设计之后可用于复杂表面零件的抛光工作。

2.1.2 材料去除机理

在进行磨粒流加工时，大量的磨粒对工件表面的作用效果大致可分为三种情况，挤压划擦、挤压变形与微量切削，如图 2.2 所示：

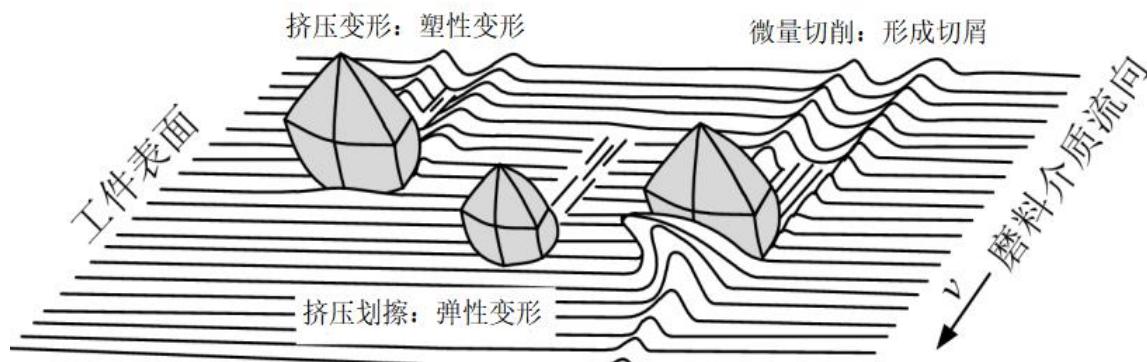


图 2.2 材料去除模型^[62]
Fig. 2.2 Material removal model^[62]

(1) 磨粒在介质挤压的作用下对工件表面形成挤压划擦时，磨粒只是迫使工件表面与其相互作用的部分产生弹性变形。在磨粒经过之后，此部位发生弹性变形的材料会立即发生弹性恢复，所以此过程并没有产生切屑。

(2) 磨粒在介质挤压的作用下破坏工件原始表面，使得工件表面的材料同时产生弹性与塑性变形，磨粒经过后弹性变形部分得到恢复，而塑性变形部分则得到保留，此

过程称之为挤压变形，挤压变形仍然没有产生切屑。分析表明，在大量磨粒的作用下，工件表面高低不平中较高的部位发生变形的程度以及机率比低处的部位更大。

(3) 当受到挤压变形的工件表面材料所受到的挤压力大于此部分材料的强度极限后，此部分材料便会发生断裂从而脱离工件表面变成切屑。因为这个过程所形成的切屑很小，故称此过程为微量切削。

在大量磨粒经过工件表面时，与工件表面接触的磨粒会产生上述三种作用结果的其中一种，并且随着磨料介质的流动，磨粒对工件表面的三种作用效果会相互发生改变。当然，这些磨粒中会有一部分由接触状态变为非接触状态从而脱离作用效果，也会有新的磨粒从非接触状态变为接触状态并开始形成作用效果。

磨粒流加工的抛光效果是在众多磨粒分别在各自的作用效果下共同完成的，为了更直观的分析磨粒作用效果，现研究单颗磨粒的作用机理。磨粒流加工所采用的磨粒一般是不规则的多面体颗粒，磨粒的棱边作为微刃与车削刀具有些类似，呈现出微小的圆弧，与工件表面相接触的磨粒微刃因受到从基体到磨粒的挤压，从而会产生对工件表面的作用力。

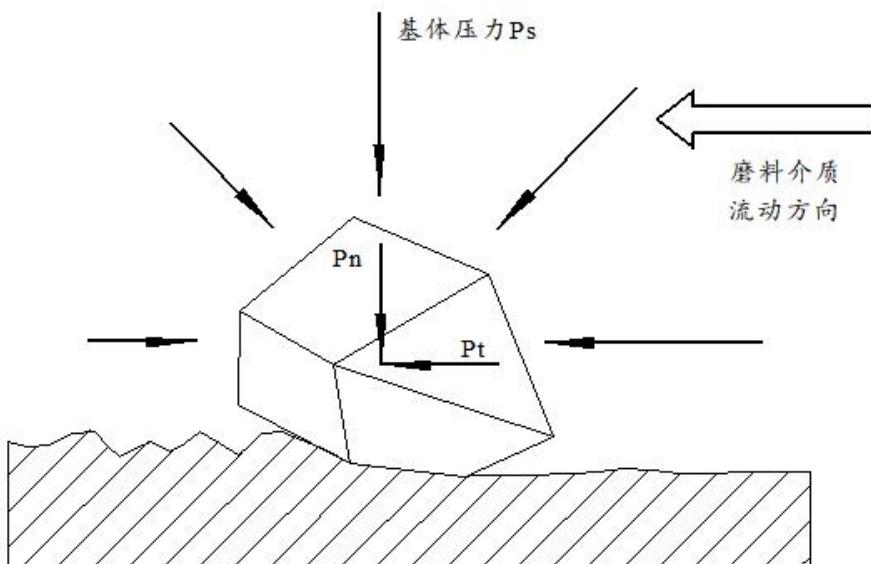


图 2.3 单颗磨粒受力分析

Fig. 2.3 Stress analysis of single abrasive

如图 2.3 所示，磨粒周围受到基体的压力 P_s ，由于存在压力损失，故磨粒所受到不同方向的压力是不一样的，其变化规律是沿磨料介质流动方向逐渐减小。由于前后的压

力差，使得磨粒受到沿着磨料流动的分力 P_t ，此力推动磨粒向前运动。在基体的压力作用下，磨粒还受到垂直于工件表面的分力 P_n ，此力将磨粒压向工件表面，使得磨粒的微切削刃对工件表面材料产生挤压压力。在分力 P_t 和分力 P_n 的合力作用下，磨粒对工件表面产生挤压划擦、挤压变形与微量切削三种作用效果。在大量磨粒的共同作用下，工件表面的材料不断被去除从而产生抛光效果。

在进行抛光时，由于柔性磨料介质流体不断流动以及工件表面情况的变化，磨粒可能因为受力情况发生改变而失去运动平衡，进而发生姿态改变去寻找新的平衡，寻找平衡的过程可能是时时发生的。这就造成磨粒微刃与工件的接触角度与接触状态有可能是不断变化的，有可能由浅入深，有可能由深变浅，也有可能从接触状态变为非接触状态，也有可能有新的磨粒微刃参与到接触中来。

2.1.3 磨粒流加工特点

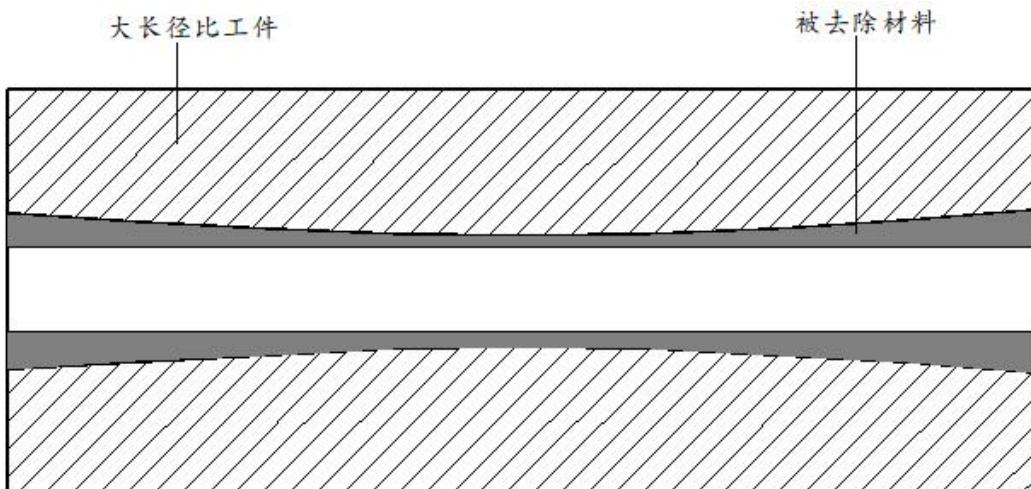


图 2.4 哑铃形抛光误差
Fig. 2.4 Dumbbell polishing error

由于磨料介质与零件表面以及夹具流道相互接触，并产生材料切除，因此磨料介质的能量在流动的通道内会产生沿程损失，这就造成磨料介质与零件表面不同位置接触时的作用力有所区别。在单个循环中，工件表面距离磨料介质入口处近的位置所受到的磨粒作用力较大，故材料去除的量也会比较大，而距离出口处近的磨粒的作用力会比较小，材料去除则会比较小。对于单向循环磨粒流加工之后的零件，其抛光表面会呈现锥形加工效果，对于双向循环的零件由于入口与出口相互交替，材料去除量也会交替变化，则会出现哑铃形加工误差，如图 2.4 所示。对于长径比较小的零件，由于不同加工位置产

生的误差比较小，此值可忽略不计，不会对零件的正常使用造成影响。而对于长径比很大的零件，由于不同加工位置造成的材料去除量相差较大，抛光之后的形状误差会比较大，甚至可能会影响零件的正常使用，因此必须想办法对其进行消除。常用的措施是增加机床的背压，即在一支料缸内的活塞进行推料时，也给另外一支料缸内的活塞施加一定压力，这样磨料介质在出口处与入口处的压力差减小，工件的形状误差便可相应减小。需要注意的是，磨料介质前后压差减小会造成磨料介质的流动速度变慢，从而影响零件的抛光效率，增加抛光成本。一般情况下，零件长径比很大的零件较少，大多数零件在不采用背压或者使用小背压（背压小，入口处与出口处的压差仍然较大）进行抛光时基本上都能满足零件的抛光要求。

2.2 磨粒流加工机床

磨粒流加工机床是磨粒流加工的主体组成要素，其主要由床身、料缸、活塞、夹紧机构、动力系统、控制系统、人机交互系统以及检测系统等部分组成，其外形如图 2.5 所示。根据料缸内活塞的运动方向可将机床分为立式与卧式两种类型，立式机床的活塞在竖直方向往复运动，卧式机床的活塞在水平方向上往复运动。



图 2.5 磨粒流加工机床
Fig. 2.5 Abrasive flow machine

磨粒流加工机床的主要运动有夹紧运动和活塞的往复推料运动，他们的运动轨迹均为直线，机床的动力系统多采用具有明显优势的液压系统，可动料缸在夹紧机构的作用下可以完成机床的夹紧与松开。检测系统可检测机床系统压力、活塞移动速度和位移等信息，机床的控制系统与人机交互系统可实现手动操作与机床的自动操作，一般情况下零件的装夹与拆卸需要人工进行操作。

2.3 磨料介质

磨粒流加工所用的磨料介质是磨粒、基体以及添加剂的混合物。良好的磨料介质犹如优质的车刀，不仅可以提高加工的效率，也能提高加工的质量。对于不同工件其材质和粗糙度等都有所不同，同一磨料介质并不适合用于所有零件的抛光工作，因此专用磨料的配制是磨粒流加工的重要一环。



图 2.6 磨粒介质
Fig. 2.6 Abrasive medium

2.3.1 磨粒

磨料介质中的磨粒是对工件表面材料起到切削作用的物质，磨粒的主要材质有碳化硅、氧化铝、金刚石和立方氮化硼等。在选择磨粒时要充分保证使用性能，又要顾及成本问题，同时粒度大小也要合适。

碳化硅磨粒有绿色和黑色两种，绿碳化硅外观呈绿色，其莫氏硬度为 9.5，黑色碳化硅外观呈黑色，莫氏硬度为 9.2-9.3，碳化硅的化学性质稳定、导热性高、耐磨性好、价格便宜。氧化铝磨粒呈白色固体，莫氏硬度为 9.0。金刚石的莫氏硬度为 10，是现存

最硬的自然材料，其耐磨性能与耐腐蚀性能好。立方氮化硼化学性质稳定、热稳定性好，莫氏硬度仅低于金刚石，这几种磨粒的对比如表 2.1 所示。

表 2.1 磨粒对比

Tab. 2.1 Abrasive contrast

磨粒材质	硬度	价格
碳化硅	较高	低
氧化铝	中	低
金刚石	高	高
立方氮化硼	高	较高

综合比较，经常选用硬度较高并且价格相对便宜的绿色碳化硅颗粒作为磨粒流加工的磨粒。

磨粒的粒度大小会直接影响磨粒流加工效率与质量，当磨粒的粒度逐渐增大时，其单位时间的材料去除量也增加，抛光效率会得到提高，但当粒度过大时，磨粒容易在加工过程中逐渐聚集进在狭窄流道处形成堵塞，并且采用较大的磨粒抛光后工件表面质量会比较差。磨粒粒度大小的选择需要根据工件表面的质量以及流道的情况进行裁决，通常情况下，对于较为粗糙的工件表面，适合选用颗粒较大的磨粒，从而可以适当提高加工效率，在工件表面质量较好时，更适合选用颗粒较小的磨粒用于获取更高的零件表面质量。

2.3.2 基体

基体作为磨粒的载体通常由高分子材料组成，磨料介质的粘弹性等特性主要是由基体的性质决定的。如果将磨粒比做刀具的话，那基体就好比是机床的刀架。机床刀架需要夹紧刀具保证刚性，并提供刀具的运动轨迹，磨料基体也需要起到类似的作用，即带动磨粒进行移动，保证边缘的磨粒与工件表面良好接触。总的来说，磨料基体要满足以下要求：

- (1) 基体的流动性能要好。磨粒流加工的优点就是能够抛光复杂的工件表面，若磨料介质的流动性能差，将直接影响磨粒流加工的抛光性能。
- (2) 基体应具有较好的粘弹性。基体与磨粒的接触性性能要良好，既不能与磨粒相互排斥，也不能包裹磨粒，同时也要保证不易粘连工件。基体与磨粒相互排斥则会造

成磨粒与基体分离，磨粒分布不均，基体包裹磨粒性能太强则会造成磨粒切削性能减弱甚至丧失切削性能。

(3) 基体的化学性质与机械物理性质要稳定。不与磨料介质其他成分、工件、夹具、机床等物体发生化学反应，并且最好不易变质利于反复多次使用。磨料介质是在高压下进行工作的，基体在高压下仍要保证具有较好的粘弹性与流动性等性能指标。

综合考虑基体的性能指标与价格条件，实验经常选用溶解的丁苯橡胶作为磨料介质的基体。

2.3.3 添加剂

为改善磨料的综合性能，常常会在磨料介质中添加一些化学添加剂。这些添加剂可以提高磨料介质的流动性能，也可以在一定程度改善粘温特性，减小磨料介质在工作时的内力消耗，降低温升。本研究采用的添加剂主要有润滑剂、热稳定剂、增塑剂等。

2.3.4 磨料配制

在配制磨料介质时需要先将基体原料进行完全溶解，形成具有流动性能的流体，然后加入各种添加剂改善基体性能，最后将特定的磨粒加入其中，每一步都需要将其搅拌均匀，不可出现未溶解的基体原料以及磨粒团，之后即可得到用于加工的磨料介质。

磨粒占总的磨料介质的比重称为磨粒的质量分数，磨粒质量分数不同，则加工性能不同。理想情况下磨粒质量分数高的磨料介质加工效率比较高，但随着更多磨粒的加入，磨料介质的性能也会发生变化。当磨粒质量分数较高时，磨料基体逐渐被“稀释”，磨料介质总体的流动性和粘弹性会逐渐降低，加工性能反而也会下降，其变化趋势是非线性的。因此磨粒质量分数要选择合适的范围，既不能太高，也不能太低，在工件流道条件下允许的情况下，在备选范围内应选择磨粒质量较高的磨料，在工件流道较为狭小时，为缓解磨料介质的流动性变差的现象，应在备选区域内选择磨粒质量分数较低的磨料。

2.3.5 磨料性质

磨料介质的最主要特征是具有粘弹性，粘弹性是指在一定条件下物体产生弹性物质和粘性物质的形变特征。由于磨料介质采用的高分子基体有较高的粘性和弹性，使得磨料介质也具有相似的特征^[63]。

物体的粘弹性与本身的性质有关，也会受到外界环境（温度、时间、压力等）的影响。在连续不变的外界情况下，粘弹性物体的应力会逐渐降低。粘弹性物体会逐渐产生逐渐蠕变效果，并随着时间的增长，蠕变效果加剧。粘弹性物体的变形具有迟滞效应，表现为应变的变化比应力的变化迟钝。

磨料介质的粘弹性特征造成其产生一定的流变特性，最典型的特征为剪切增稠。粘弹性流体的流变特性表示其材料应力与应变之间的关系，这种关系与物体本身的性质和结构有关也与流体内部的运动状态有关。剪切增稠特性是指随着物体内部的剪切速率或者剪切应力的增大，其粘度也会随之增大的现象，具有非牛顿流体特性，剪切增稠有利于磨粒流加工时工件表面的材料去除。

由于磨料基体是高分子材料，其性能指标受到温度的影响会比较显著。在环境温度、加工压力以及工作时间的影响下，磨料介质的粘度等参数会产生改变。环境温度较高、加工压力较大与加工时间较长都会造成磨料介质的温升，造成磨料的粘度下降等不良影响，从而影响加工效率，因此应合理设置加工参数将磨料介质温度控制在合理范围内。

2.4 磨粒流加工夹具

在工业生产中，夹具的使用非常广泛，因为夹具可以保证产品生产过程的高质量与高效率完成，而在某些场合，夹具的使用更是必不可少的重要工具。在机加工领域、夹具的使用，可在一定程度上突破机床的应用限制，不仅提高了产品在加工时的质量和效率，也在一定范围保证了操作者的安全。夹具按照专用程度大致可以分为两种：一种是通用夹具，通用夹具使用范围非常广泛，通常已经形成系列并被标准化，其在机床上可以满足多种不同规格零件的装夹，常见的通用夹具有卡盘、夹头、卡套等，虽然通用夹具的使用范围很广，但是生产效率低，适合小批量生产；另一种是专用夹具，专用夹具是在生产制造中为了继续提高零件的高效率与高质量装夹专门设计的夹具，这种夹具通常只能用于特定工件在特定工艺程序的使用，其制作成本比较高，在生产工艺改变时原来的专用夹具基本不能继续正常使用，故这种夹具经常用于单一零件的大批量生产。

在磨粒流加工技术的三个要素中，夹具的设计同样尤为重要，因为绝大多数工件并不能直接在磨粒流加工机床上进行定位并加工，需要设计夹具来完成此任务，磨粒流加工中一般情况下对于不同零件都需要设计专门的夹具才能进行使用。磨粒流加工专用夹具的主要作用有：对工件进行定位和固定并在需要时代替工件承受夹紧力、将磨料介质以合适的方式引入到工件的待抛光表面并与其组成合适的磨料介质流道、保证整个通道的密封以便进行多次循环抛光、当工件尺寸较小时可用于同时抛光多个零件提高抛光效率。为了保证磨粒流加工的正常运行，磨粒流加工专用夹具的设计制造要满足以下目标：

(1) 首先是能够保障工件在加工过程中位于正确的位置，即满足工件的定位。同时，因为磨粒流加工过程中压力较大，夹具一方面要保证工件不会窜动，另一方面也要承受夹紧力保护工件不被压坏。

(2) 然后就是要尽量想办法减小磨料介质流过夹具的阻力，并提高工件表面的有效流量。

(3) 第三是要保证良好的密封性，避免在加工过程中的压力交替以及热量的变化造成磨料介质泄露而影响正常加工。

(4) 再者是要尽量利用通用结构件，减少夹具的设计周期与制造成本，提高生产效率。

(5) 最后是要装夹方便，在满足基本需求的情况下尽量使得夹具整体结构更加简单紧凑并尽量减轻夹具重量。

2.4.1 夹具的定位与夹紧

在零件的生产与加工过程中，定位与夹紧是首先需要得到保证的。通常情况下，机加工要严格要求工件的定位情况，避免因欠定位与过定位带来的不良后果。对于磨粒流加工来说，欠定位也是应该避免的。因为磨粒流加工中夹具与工件的夹紧是通过机床的夹紧实现的，其压力也必须保证较高的范围，倘若工件出现欠定位情况，在夹紧时工件出现移动，机床的高压可能会直接压坏零件，造成无法挽回的损失。另一方面，在夹紧后，工件的移动也可能会对其加工造成影响，轻则会降低加工效率，影响工件表面的抛光质量，重则也可能由于零件受力状况发生变化，在磨料介质的压力下发生折断等严重后果。

过定位对于磨粒流加工来说基本不受影响，只要保证工件在过定位之后不被损坏，其对加工精度基本是没有影响的。因为磨粒流加工所用的是柔性磨料介质，去除材料时与机加工那种精确的刀具运动轨迹不同，工件的微小定位精度一般不会影响抛光质量与材料去除量。

对于磨粒流加工来说，被抛光工件大都是比较脆弱的精密零件，倘若工件直接承受机床的夹紧压力，极有可能被如此高的压力所压坏而报废，因此一般考虑将夹紧力由夹具来承受。工件的夹紧通常是夹具在机床夹紧装置的作用下连同夹紧的，也可根据需要采用诸如螺栓等其他形式，但是螺栓结构的加入会使得工件的拆装变得复杂，影响生产效率，因此应尽量避免过多的螺栓结构，使夹具结构更加简单。

2.4.2 夹具的控流

控流作用是磨粒流加工专用夹具在众多夹具中所特有的功能，对磨粒流加工起着非常重要的作用。合理的控流结构设计可以大大减小磨料介质在流动时的阻力，减少能量损失，提高零件的加工效率。同时对于一些不需要抛光的表面以及部分零件的边缘也能起到保护作用，防止零件出现“过抛”现象。

磨料介质作为一种流体介质在通道里流动时也会像其他流体一样存在能量损失，能量损失分为两种，一种是沿程损失，一种是局部损失。

沿程损失是指磨料介质流体在缓慢变化的通道内流动时因壁面摩擦而损失的能量。理想流体在通道内流动时，因为没有粘性，对通道表面没有不存在黏附作用也就没有压力损失。由于磨料介质属于粘弹性流体，在通道内流动时位于通道表面的部分受到壁面的粘滞阻力，流体内部的剪切作用使得此阻力遍布于截面，流体流动克服阻力向前流动产生热量从而造成能量损失。对于圆形通道，流体沿程损失的计算公式如式 2.1 所示。

$$h_f = \gamma \frac{l}{d} \bullet \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

式中， γ 为沿程阻力系数， l 为流体在通道内流过的长度， d 为通道直径， v 为流体截面的平均流速。

在磨料介质流体通道截面发生突然变化时，会产生局部阻力使得流体的流动状态发生改变，造成一部分能量在流体内部形成热量产生能量损失，在此阶段磨料介质会产生局部能量损失。局部损失的计算公式如式 2.2 所示。

$$h_j = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (2.2)$$

式中， ξ 为局部损失系数，其数值大小由通道变化的情况决定。

由沿程损失的计算公式可以看出来，当流体通道的直径越小时，其沿程损失的能量越大，不仅会造成加工效率的降低，其产生的热量也会使得磨料介质的温度升高。因为磨料介质的基体主要是高分子材料，当温度过高时，其物理化学性质会发生改变，影响磨料介质的抛光效果。因此对于夹具的流体通道，应尽量增加其当量半径并尽量使其截面接近圆形，即控制通道流量使其最大化以便减少能量损失。

对于被抛光工件，有些工件（比如圆管、涡流器、格栅等）本身能形成四周封闭的通道，可以将工件本身直接作为此部分磨料介质的流道。而有一些零件（比如发动机叶片、模具、齿轮等）由于本身的特征并不能形成四周封闭的流道，需要配合夹具体共同形成磨料介质流道，此部分流道的设计便成了重要选择。倘若只为减小能量损失，则此通道的截面设计的越大越好，然而当通道截面逐渐增大时，尽管流量可以达到很大，但是磨料介质与被加工表面的接触面积并没有任何变化，这就造成每个加工循环流过被加工表面的有效流量减少，其他流量则会更多的去接触夹具表面，反而造成能量的浪费。简化成圆形通道模型时，有效流量 $Q_{\text{有效}}$ 可通过式 2.3 简单示意。

$$Q_{\text{有效}} = \lambda \frac{l}{s+l} \quad (2.3)$$

式中, λ 表示系数, l 表示被抛光工件的截面长度, s 表示夹具的截面长度。

当夹具体与工件表面组成的通道截面长度 s 逐渐缩小时, 工件表面的有效流量会随之增加, 抛光效率会有所提升。当 s 减小到 0 时, 整个截面显然全部是由工件组成的, 然而这并不符合实际。故此简单模型只是为了简单表示有效流量的影响趋势, 并不能用于精确计算。实际上, 由沿程损失计算公式可以看出来, 通道直径 d 与能量损失成反比, 当通道截面的当量直径减小到一定程度时, 此值的影响比例会越来越大, 并逐渐占据主导地位, 使得此部分的能量损失占比增大, 因此夹具体与工件表面的截面积并不能无限减小, 存在一个中间最优值。

由局部损失公式可以看出来, 当流速一定时, 影响能量损失的主要因素是局部损失系数 ζ , 而 ζ 值的大小主要由通道的突变程度决定, 流体通道突变的程度越剧烈, ζ 值便越大。因此, 在设计夹具时应尽量防止流道产生突变, 当通道截面积必须变化时, 应适当增加变化的长度, 在流道必须弯折时应尽量使流道平滑弯折, 如图 2.7 所示。

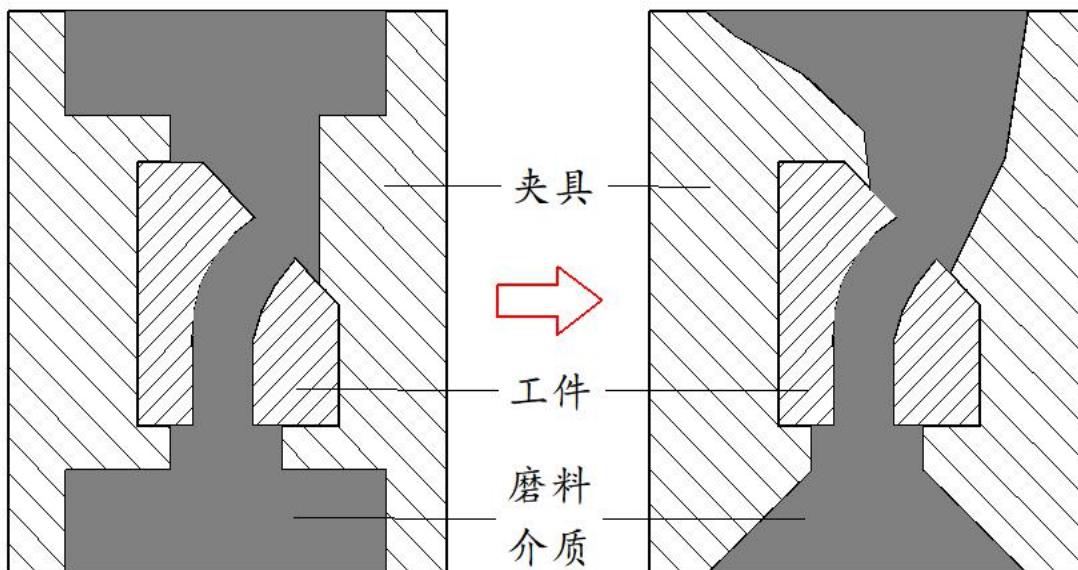


图 2.7 流道设计

Fig. 2.7 Runner design

工件上不需要抛光的表面, 可通过夹具结构设计阻止磨料介质通过这部分区域。对于一些零件的边缘需要防止产生“倒圆”等过抛现象, 可通过改良夹具结构对其进行保护。例如对精密螺杆进行抛光时, 可增加导流装置防止出现过抛以及欠抛等现象, 如图 2.8 所示。

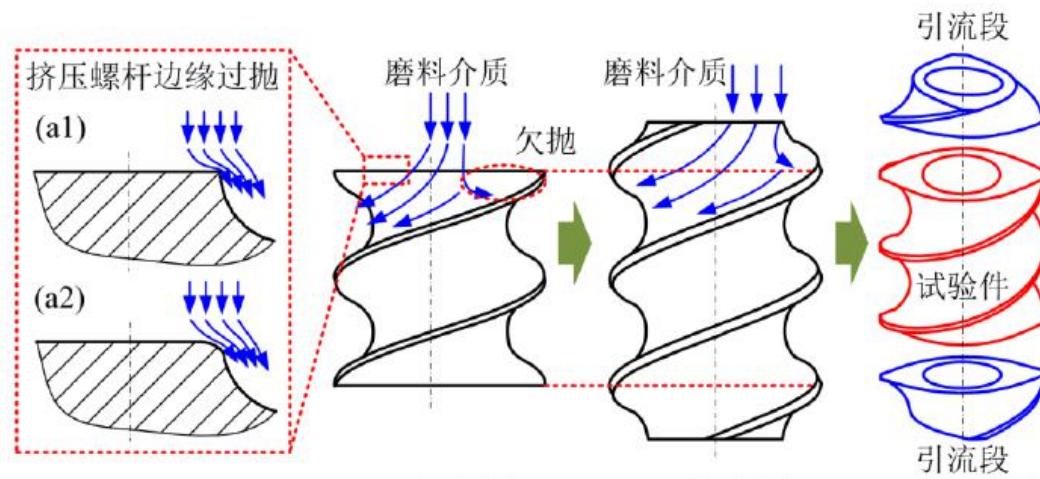


图 2.8 螺杆边缘保护^[62]
Fig. 2.8 Edge protection of screw^[62]

2.4.3 夹具的密封

因为磨粒流加工所用磨料介质是粘弹性流体，对夹具的密封性有一定的要求，在磨料介质发生泄漏时便无法进行正常的抛光加工。

夹具的密封性需求发生在多个物体的结合处，两物体静止不动则需求为静密封，静密封的结构简单、应用非常广泛^[64]，两物体相互移动则为动密封，动密封的实现成本较高，密封性能总体来说也较差，在磨粒流加工中，夹具的接合面一般不需要移动，故常采用静密封的方法保证夹具的密封性。

静密封根据密封的形式通常分为圈垫密封、密封胶密封和其他密封。由于工作压力的区别，又可将静密封分为中低压静密封和高压静密封，工作压力在 10MPa 以上的为高压密封。

圈垫密封是指利用经过专门加工的密封圈或者密封垫片等装置对结合处进行密封的方法。圈垫密封的使用非常广泛，其系列种类多种多样，并且密封圈和密封垫片都已经标准化，在选择密封圈或者密封垫进行密封时，只需要根据要求选择相应的规格进行购买。在磨粒流夹具设计用到设计此密封结构时，也要根据标准设计相应的密封沟槽和开孔。

密封胶密封是指利用具有一定粘性的密封材料对接合面进行密封的方法，此密封方法一般不能承受力的作用，并且在拆卸之后需要重新填充密封胶，故此种密封方法不适合用来作为磨粒流夹具的密封方法。

其他密封的形式也多种多样，一般没有固定的标准。当两物体接合面的精度较高时，不需要其他材料，在压力的作用下两物体之间便可达到一定的密封性能，这种密封方法通常用在温度和压力波动变化不大的场合。因为磨料介质的比较粘稠的流体，其中也含有大量的磨粒，两平面在压力作用下紧密接触时，磨料介质通过两物体表面的阻力很大。因此在工作压力不大的情况下，为简化磨粒流夹具的设计与拆装工作，也可采用此种密封方法。为提高这种密封方式的密封性能，可将两接触物体做成止口的形式，这种方法能在一定程度上增加磨料介质泄露时的阻力、提高密封效果。

2.4.4 夹具的结构优化

良好的夹具不仅要在功能上满足要求，更要在结构等优化上不断精益求精。在满足要求的前提下，应尽量使得夹具更加简单紧凑，这不仅可以节省制作夹具的周期和成本，在节省材料的同时也降低了零件的尺寸和重量，在选择夹具材质时也要在强度、质量以及成本之间综合权衡做出最佳选择。另外也要追求夹具的优良拆装性，若夹具配合的过于紧密，则经过磨粒流加工后各个夹具组成的分离将更加困难，严重影响加工效率。同时，也要尽量减少螺栓结构的设计，大量螺栓结构的拆装过于繁琐，也增加了夹具拆装的时间。

2.5 主要工艺参数对加工效果影响

2.5.1 加工时间影响

磨粒流加工的抛光时间表现为机床整体循环的次数，实际上是整个加工循环内经过工件被抛光表面的磨粒数目。因为磨粒数目难以统计，故经常在明确磨粒质量分数与磨料介质总质量的情况下，对同一批零件采用循环次数进行计算。

通常情况下，随着加工时间的增加，工件表面的粗糙度会逐渐降低，当粗糙度达到一定值时便不再增加，这是由于达到了此加工条件下的极限，这与材料去除量的变化趋势是一致的。工件表面粗糙度减小的过程也是趋于平缓的，在开始时降低非常明显，在接近粗糙度极限时很缓慢。因此，要合理选择同一加工条件下磨粒流加工的时间，要想在最短加工时间内达到更高的粗糙度，需要合理更改加工条件。

对于工件的加工时间是受到有效流量影响的，当磨料通道全程阻力大小在接受程度内时，有效流量的数值越大，抛光相同零件所需的加工时间越短。

2.5.2 加工压力影响

磨粒流加工是磨料介质在较高压力的推动下进行的，磨料介质的压力由机床料缸内的活塞提供。在一般情况下，加工压力增高，磨料介质的流动速度变快，加工效率也提

高。加工压力增加时，磨粒受到的压力增加，其对工件表面的切深也会增加。当加工压力较小时，由于材料去除不明显，粗糙度变化程度小，抛光质量会较差。当压力增加时，材料去除逐渐明显，粗糙度降低也比较明显，抛光质量提高。而当加工压力提高到一定程度时，由于切深过深反而会影响最终的抛光质量。此外，当压力逐渐提高时，夹具的密封性能将会下降，若不采用更好的密封措施将会造成磨料泄露。综合考虑，应在合理的范围内选择最佳加工压力。

2.6 本章小结

针对磨粒流加工技术，本章主要阐述了磨粒流加工的抛光原理以及抛光特点，对磨粒流加工的三要素以及加工参数进行了分析。

- (1) 分析了磨粒流加工原理以及材料去除机理，叙述了磨粒流加工过程，对磨粒流加工的特点进行了阐述。
- (2) 对磨粒流加工的磨料介质中磨粒、基体以及添加剂等成分以及配制进行了论述，分析了磨料的性质对磨粒流加工的影响。
- (3) 对磨粒流加工专用夹具设计进行了分析，介绍了夹具的定位与夹紧对磨粒流加工的影响，阐明了夹具的控流与密封等设计要点，对控流与密封的结构设计细节进行了分析。

3 增材制造格栅零件磨粒流加工研究

3.1 实验设计及方案

3.1.1 增材制造格栅类零件分析

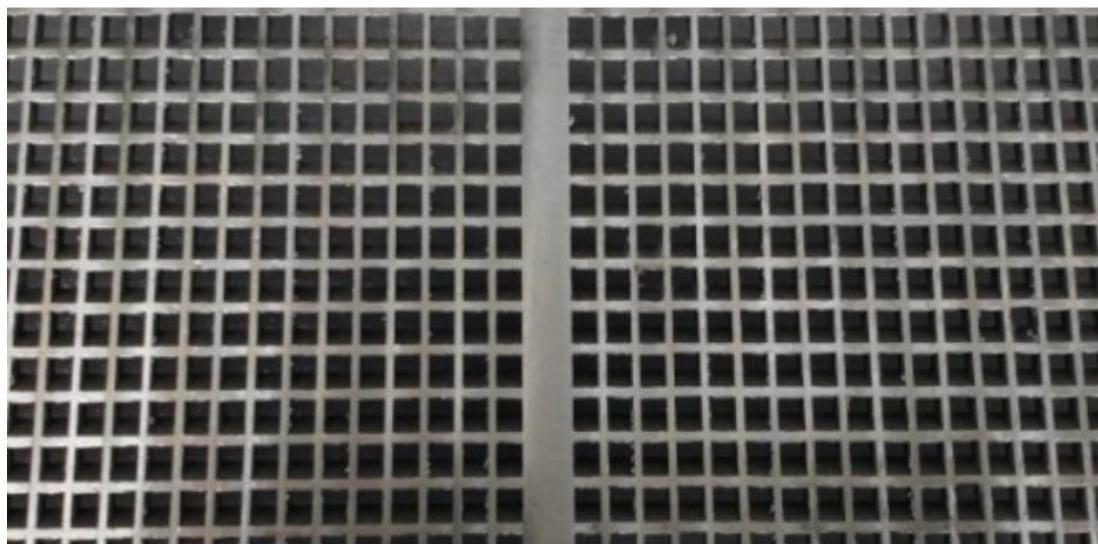


图 3.1 增材制造格栅

Fig. 3.1 Additive manufacturing grille

图 3.1 为一种利用增材制造技术生产的钛合金格栅零件局部外观。格栅零件属于多孔类零件，整个格栅上的格栅孔是均匀阵列分布的方形孔，增材制造钛合金格栅零件因为其优异的性能得到广泛使用。该格栅零件整体呈扁平状，其右端为增强边，上下厚度比格栅整体稍厚。左右呈双联状，即有左右两个格栅分区，格栅的上下两端为安装耳，用于格栅零件的安装。内部的格栅孔均匀排列，其流道相对于格栅整体呈上下倾斜布置，左右不倾斜，格栅孔的截面为方形。

从图 3.2 可以看出来，钛合金格栅零件表面存在着“粉末粘附”现象，在格栅孔的内部，因为其上下两个格栅壁面倾斜，故“阶梯效应”较为明显。总体来看，格栅表面凹凸不平，表面质量较差，特别是格栅孔内部非常粗糙，经过测量，格栅孔内壁的表面平均粗糙度为 $Ra15.7\mu m$ ，且粗糙度的差值比较大表面质量不均一。并且格栅表面存在着大量的“毛刺”以及松动层，不仅在性能上达不到使用要求，还会对其他零部件造成重大安全隐患。

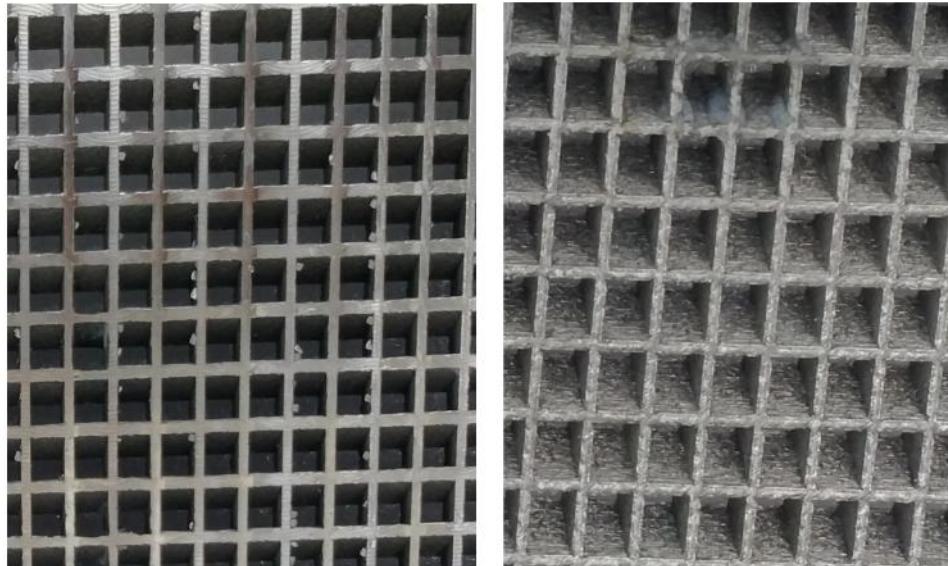


图 3.2 格栅缺陷
Fig. 3.2 Grating defect

3.1.2 钛合金格栅夹具设计

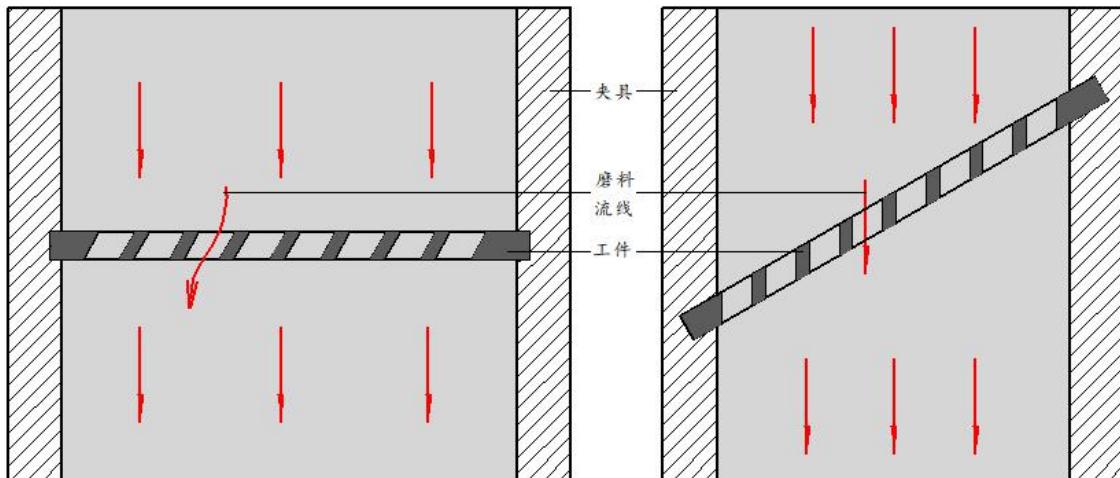


图 3.3 格栅放置方向
Fig. 3.3 Grid placement direction

钛合金格栅需要进行磨粒流加工的主要区域是格栅孔表面，因此夹具的设计应将磨料介质主要通过格栅孔表面。首先需要考虑的是格栅的放置状态，因为格栅孔与格栅零

件整体呈现一定的角度，因此当格栅在夹具中水平放置时，势必会造成磨料介质在经过格栅孔时的流向发生变化，如图 3.3 所示。一方面，这会造成磨料介质在经过格栅时阻力变大，影响加工效率，另一方面，增加的阻力也会使得格栅整体承受更大的压力，格栅在重压之下更容易产生变形乃至破裂。此外，磨料介质阻力增加之后会使得其能量更多的转向本身的热能，从而造成磨料介质形成更高的温升，磨料介质在温度过高时其性质会明显发生改变，会影响加工效率和加工质量。因此，为了达到更好的抛光效果，工件呈倾斜状放置在夹具中。

因为格栅零件整体偏薄，在长度方向上跨度较大，若将格栅整体全部同时进行抛光，则格栅会在磨料介质的压力下产生较大的挠度变形，很容易发生断裂。另外，因为格栅零件较长，其长度大于磨粒流加工机床的料缸直径，磨粒流在经过格栅时会造成格栅靠近左右两边附近的格栅孔流速过慢，与中间位置的流速差较大，这就会使得整个格栅不同位置经过磨粒流加工后的材料去除速率不同。当格栅中部位置的格栅孔达到较好的抛光质量时，边缘位置的格栅孔抛光质量还比较差，而当继续进行抛光使得边缘位置的格栅孔抛光质量也达到较好的程度时，中部位置的格栅孔会因材料去除过多，格栅壁面会严重变薄，这严重影响格栅整体的抛光效果。经过考虑，将格栅零件的左右两个格栅孔区域分开进行抛光。



图 3.4 格栅夹具

Fig. 3.4 Grid clamp

为减小夹具的制作成本，左右两个格栅孔区域分开抛光时仍然采用同一个夹具体进行抛光。在抛光一个区域时，另外那个不抛光区域利用轻质的支撑块进行支撑，当一个

区域抛光完成时更改支撑的区域即可进行下一步抛光工作。钛合金格栅零件的夹具实物图如图 3.4 所示。

3.1.3 钛合金格栅加工参数

(1) 磨料介质

因为钛合金格栅零件格栅孔较多，格栅孔壁面较薄，因此整个通道的阻力较小，为提高加工效率，采用粘度较大的磨料介质。选用的磨粒粒度为 24#和 W28，40#磨粒的质量分数为 60%，W28 磨粒的质量分数为 10%，磨料介质的总质量约为 30kg。

(2) 加工时间

经过探索，涡流器磨粒流抛光在经过 300 个循环后表面质量基本不会继续改善，已达到最佳的抛光效果。

(3) 加工压力

经过权衡选择，格栅的磨粒流加工压力确定为 3.5MPa，夹紧压力为 5.5MPa，因为格栅孔的长径比很小，沿程损失造成的加工误差可忽略不计，为提高加工效率，采用无背压的加工条件。

3.2 实验结果及分析

3.2.1 抛光结果

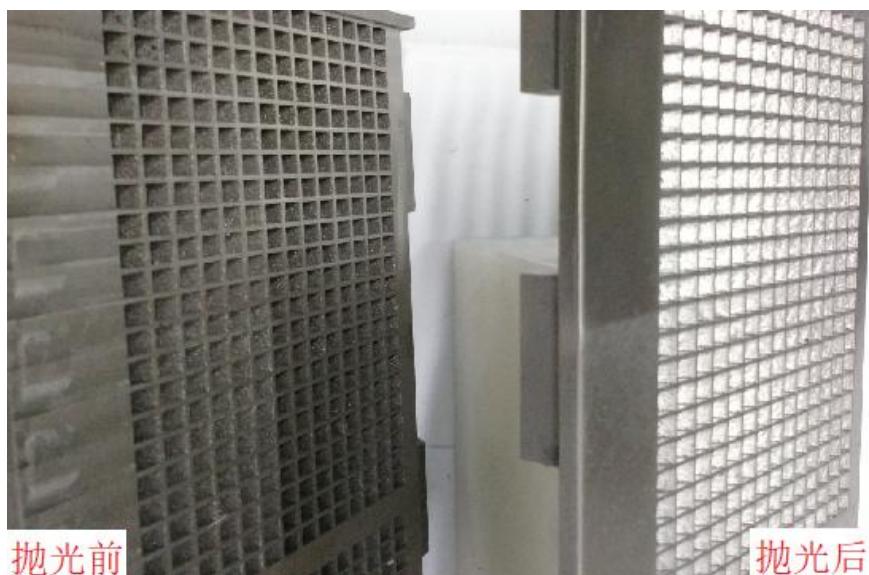


图 3.5 抛光前后对比

Fig. 3.5 Comparison before and after polishing

在经过磨粒流加工后，格栅表面的整体抛光效果如图 3.5 所示。由图可以看出来，在经过磨粒流抛光后，格栅表面的粉末粘附效应已经被去除，完全解决了格栅表面的毛刺问题，格栅孔壁面的阶梯效应也已经完全消失。抛光后，格栅表面可呈现出明亮的金属光泽，表面质量得到很大程度的提高。在沿着磨料介质流动方向，格栅表面呈现出均匀的“流线型”抛光纹理。

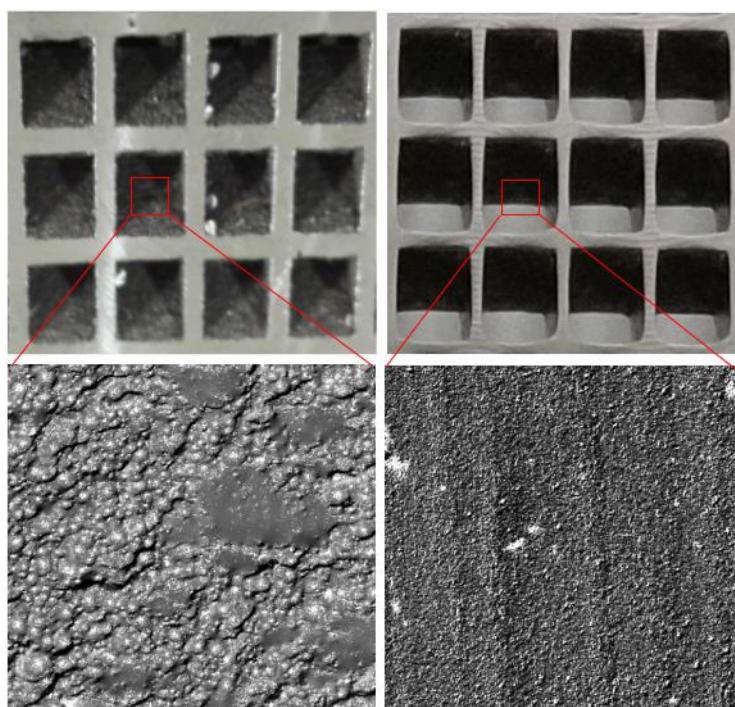


图 3.6 抛光细节对比
Fig. 3.6 Comparison of polished details

格栅在抛光前后的细节对比如图 3.6 所示，可以看出来，格栅孔原本非常粗糙的表面在抛光后已经变得非常平整，原本不均一的表面组织也变得非常均匀。经过测量，在沿垂直于纹理方向的格栅表面，其表面平均粗糙度为 $Ra1.23\mu m$ ，粗糙度降低幅度达到了 92%，沿抛光纹理方向的格栅表面平均粗糙度为 $Ra0.19\mu m$ ，粗糙度降低幅度达到了更高水平。

3.2.2 材料去除分析

(1) 阶梯效应去除分析

增材制造零表面质量的改善是在大量磨粒的作用下共同完成的，现在以去除阶梯效应为例进行说明，利用磨粒流加工去除阶梯效应时其机理如图 3.7 所示，为了研究方便，

现将工件沿着磨料介质流动方向水平放置。由图可以看出来，在阶梯状的增材制造零件表面，不同位置的磨粒所受到的法向分力 P_n 大致相同（这里假设磨粒大小和形状基本相同）。由于磨粒所处位置的不同造成其前后两端所受压力面积都减小，从而前后压差减小，使得磨粒所受到的切向分力 P_t 也相应减小。另一方面，阶梯状的零件表面在“阶梯”的顶端强度较小、底端强度较大。因此“阶梯”的顶端在磨粒的作用下更容易发生材料的变形并被逐渐切除，磨料介质大量磨粒的作用使得“阶梯”顶端材料去除的速度比低端要快很多，使得工件表面逐渐趋于平坦。

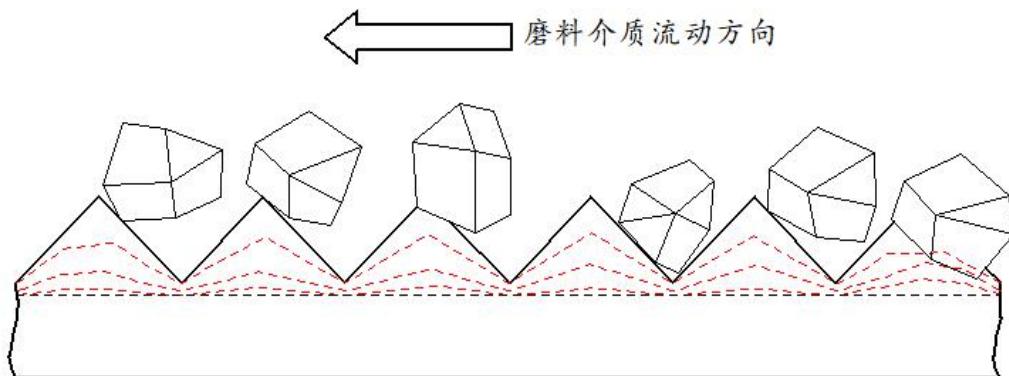


图 3.7 阶梯效应去除机理示意图

Fig. 3.7 Schematic diagram of ladder effect removal mechanism

其材料去除规律如图 3.7 中虚线所示，在开始阶段，“阶梯”顶端材料去除的速率较快，随着时间的推移逐渐变慢。这与磨粒流抛光时工件表面粗糙度的变化规律是一致的，即在工件表面粗糙度达到一定程度时，便很难再得到提高，通过改变压力、磨料介质等工艺参数可在一定程度上改善，但并不能得到质的提升。

(2) “月牙形”现象分析

在采用磨粒流抛光格栅零件时，其格栅孔表面质量的提高在于格栅壁面的材料去除，这势必会出现格栅壁面的减薄，如图 3.8 所示。当然，在格栅制造时已经考虑到了此问题并准备了抛光余量，然而随着磨粒流加工时间的增加，发现了这样一个问题：在格栅孔的一个壁面表现出微量的“月牙形”棱边，即格栅壁此部位的材料去除较多些，经过仔细观察，格栅孔的四个壁面均会出现“月牙形”，只是其中一边更加明显，与此边相临的两边弱之，与其相对的那边及其微弱，肉眼基本看不出来此形状。为研究此现象，现对格栅零件的材料去除进行分析研究。

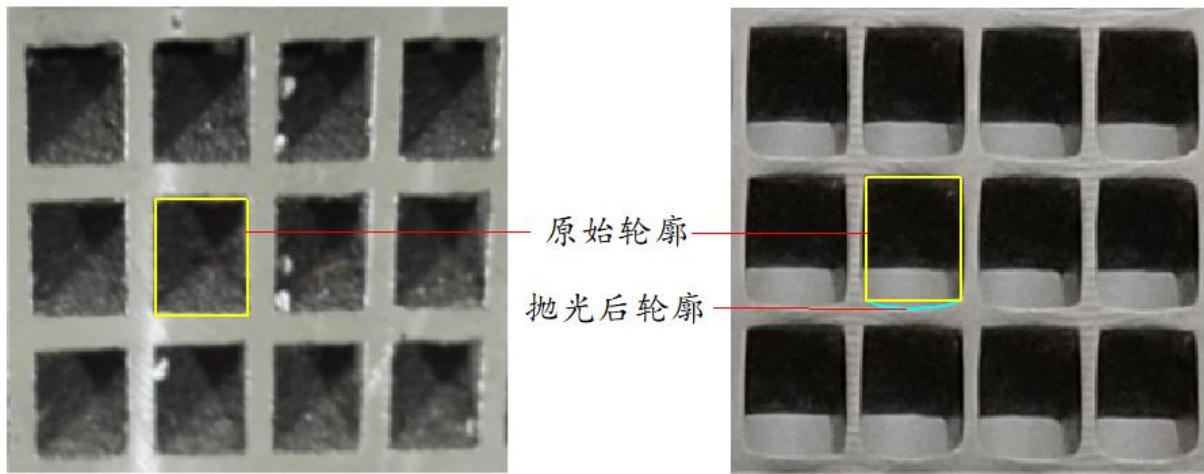


图 3.8 格栅壁面抛光前后对比
Fig. 3.8 Comparison of grating wall before and after polishing

因为格栅孔是均匀阵列分布的，每个格栅孔的情况相同，现以其中一个进行分析，磨粒流抛光格栅孔的示意图如图 3.9 所示，其方向为沿着流道的垂直方向。在进行磨粒流加工时，格栅孔内充满着磨料介质，在磨料介质的作用下，磨粒对格栅壁面产生切削作用。在靠近格栅孔两边交叉的角落位置，因流道尺寸的逐渐收缩，使得此位置的磨料介质流速下降，从而材料去除相对减小，格栅壁中间位置的磨料介质流速最大，因而材料去除速率最大。从格栅壁中间至角落因磨料介质的流速变化是连续的，使得格栅壁面的材料去除也是连续变化的，从而造成格栅壁在加工后呈现出“月牙形”流线。同时，磨料介质中较大的磨粒难以到达格栅孔角落，而小磨粒的材料去除速率较低，也会促使“月牙”现象的产生。

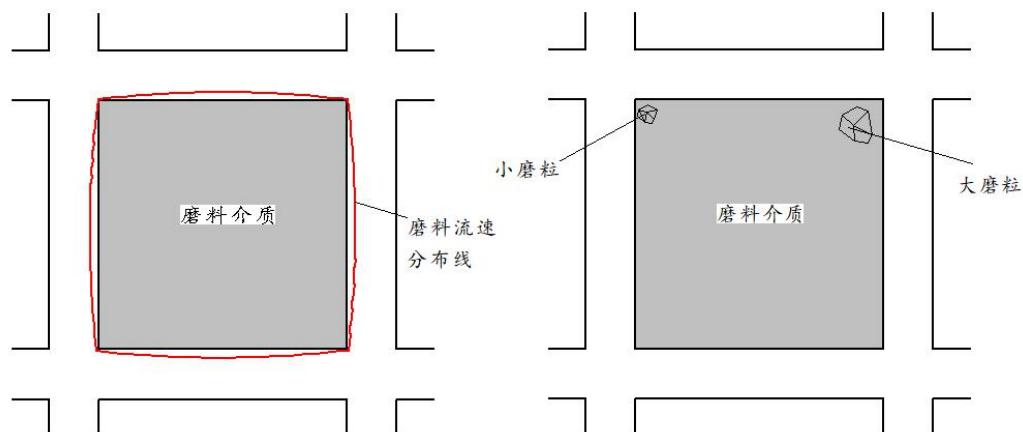


图 3.9 格栅壁面材料去除分析
Fig. 3.9 Analysis of material removal of grating wall

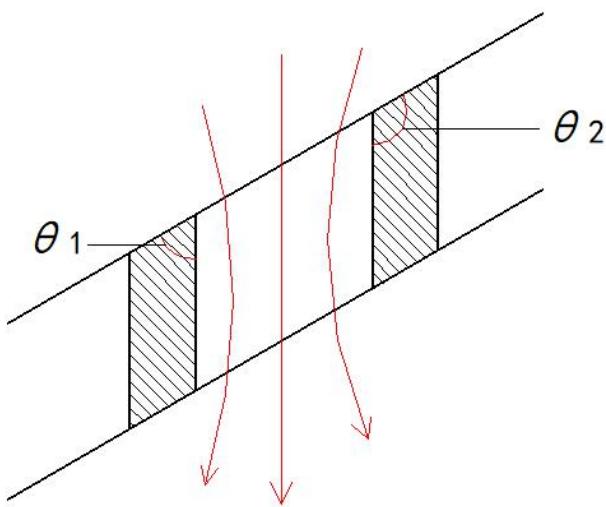


图 3.10 格栅侧壁结构示意图

Fig. 3.10 Schematic diagram of grid side wall structure

此外，格栅孔与格栅整体并不是相互垂直或者相互平行的，呈现出一个角度，如图 3.10 所示。此时格栅壁在入口以及出口处的边缘形成不同的夹角，格栅孔左侧格栅壁与格栅整体的夹角成锐角，其棱边的结构强度降低，在磨粒流加工时此处的材料比较脆弱，更容易发生断裂，因而材料去除较多，呈现出更大的“月牙”。格栅孔右侧格栅壁与格栅整体的夹角成钝角，其棱边强度增强，在磨粒流加工时此处的材料表现得更为坚挺，材料去除速率减小，从而呈现出更小的“月牙”，以至于肉眼很难观察到。与这两边相邻的另外两个格栅壁棱边，因为其结构强度介强弱之间，因此此部位的“月牙”程度比锐角边小很多，比钝角边稍加明显。当磨料介质流动方向改变时，格栅下面的格栅孔棱边也会出现类似的情况。

总体来说，格栅零件在磨粒流加工时出现“月牙形”抛光现象是难以避免的，如果此处要求严格，可以在格栅上下两侧增加与格栅孔相同的盖板，保护格栅棱边材料不被过度去除。一般情况下格栅对此部位的要求比较一般，并且格栅的“月牙”流线，可以在一定程度上减小空气流动时的阻力，因此在用磨粒流加工时没有必要对格栅增加保护盖板。

3.2.3 抛光规律研究

为了研究磨粒流加工对增材制造钛合金格栅零件的抛光性能，现探究其抛光规律，即不同加工时间对格栅孔表面质量的影响。图 3.11 为增材制造钛合金格栅零件在超景深显微镜下拍摄的格栅孔倾斜表面的原始微观表面。

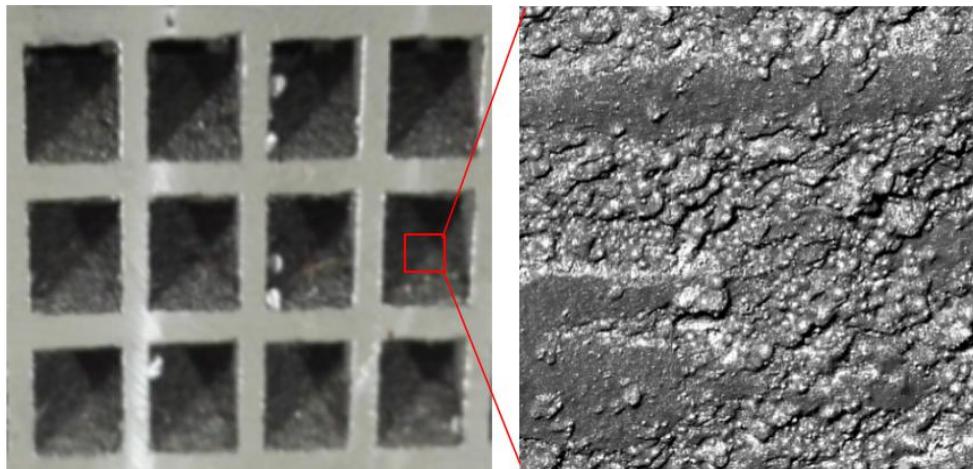


图 3.11 格栅原始表面
Fig. 3.11 Original surface of grating

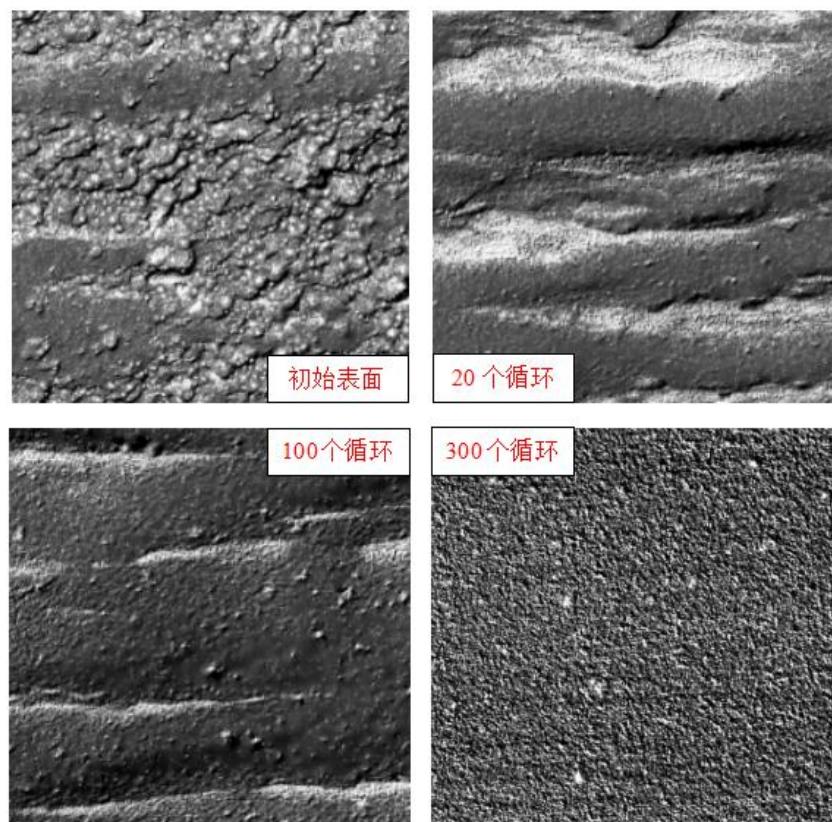


图 3.12 不同抛光循环对比
Fig. 3.12 Comparison of different polishing cycles

图 3.12 中分别为格栅未经抛光以及在经过磨粒流加工 20 个循环、100 个循环和 300 个循环后，在超景深显微镜下拍摄的格栅孔倾斜表面的微观对比图。由图可以看出来，

当用磨粒流加工格栅 20 个循环后，格栅孔倾斜表面的表面质量相对于原始表面反而变的更差；抛光到 100 个循环时，其表面质量得到提高；继续抛光至 300 个循环后其表面质量得到了显著提高，格栅孔倾斜表面的表面质量基本不再发生变化。

在经过加工 20 个循环后，格栅孔倾斜表面的表面变差，这是由于增材制造钛合金格栅零件在完成制造后，其表面会附着一层松动层，在磨粒流加工的前几个循环中，格栅表层的松动层迅速脱落，逐渐露出其“真实表面”。当松动层被完全去除后继续抛光时，格栅表面质量变化的趋势与其他零件变化趋势相同，即表面质量随加工时间逐渐提升，并最终趋于稳定。由此可以得出，在加工 300 个循环后，格栅基本已经达到最佳的抛光效果，继续增加抛光时间意义不大，反而影响了加工效率，造成资源浪费，增加成本。

3.3 本章小结

采用增材制造成型的格栅零件要求表面质量良好以满足其使用需求，本章对增材制造钛合金格栅零件开展了磨粒流加工的相关研究，设计了钛合金格栅零件的专用夹具，进行了抛光实验研究，分析了格栅斜孔棱边的“月牙形”抛光现象，探索了格栅零件的抛光规律：

(1) 磨粒流加工可以对增材制造钛合金格栅零件进行抛光，能够去除增材制造的“阶梯效应”与“粉末粘附”等不良影响。抛光后格栅表面质量明显提高，表面粗糙度值降低幅度可达 90% 以上。

(2) 通过对格栅斜孔“月牙形”流线的理论分析，得出此现象产生的原因为格栅孔棱边磨料流速不同以及格栅零件结构特征造成的局部强度差异，并提出了进一步的解决方案。

(3) 通过研究增材制造钛合金格栅在不同加工时间的抛光效果，得出此零件在进行磨粒流加工时其表面质量表现为先增大后减小并最终趋于稳定的趋势。格栅表面呈现出先去除松动层，后提高质量的抛光规律。

4 增材制造涡流器零件磨粒流加工研究

4.1 涡流器抛光实验设计及方案

4.1.1 增材制造涡流器零件分析

增材制造涡流器的零件实物图如图 4.1 所示，涡流器用于保证燃烧室内的燃油与空气充分混合并完全燃烧^[65]，其用途主要有^[66]：

- (1) 使得进入燃烧室的气流产生旋转，增加油雾与空气的相对运动速率，使油雾颗粒继续细化，促进油雾与空气的充分混合。
- (2) 高速气流在经过涡流器时产生的旋流使得中心区域形成低速的回流区，用于稳定火源。
- (3) 为燃烧室的前部提供一定量的空气，确保此部位的余气系数能够在合理的范围内。



图 4.1 涡流器

Fig. 4.1 Swirler

因为涡流器的结构比较复杂而且紧凑，通常采用增材制造技术进行生产，本实验所抛光的涡流器为增材制造不锈钢零件。由于增材制造技术的特征，涡流器内部流道的叶片等结构表面比较粗糙，其表面质量会对气流产生一定的影响。并且受到增材制造技术

成型精度的限制，为了确保涡流器在使用时流量不会过大或者过小从而影响性能，一般会在其制造时预留一定的余量通过后期处理完成较为精准的流量控制。双级涡流器的气量分配对燃烧室的熄火现象有着重要影响^[67]，当双级涡流器的一级与二级流量比不在确定的范围时不仅会影响喷雾角度^[68]，也会影响回流区的面积，不利于稳定火源^[69]，也不利于保证燃烧室前部的余气系数。文氏管对涡流器的性能也有重要影响^[70]，在文氏管的末端，要保证其端面不被倒圆，否则可能会影响气流的分布。

(1) 零件结构分析

增材制造涡流器的结构图如图 4.2 所示，此涡流器为双级轴流涡流器。涡流器有内外两级涡流器，内圈为一级涡流器，外圈为二级涡流器，在正对涡流器入口时，一级涡流器的叶片左旋，二级涡流器的叶片右旋，气流在涡流器中的运动方向如图中的箭头所示。一级涡流器的内部为喷嘴出口，二级涡流器的外部是套筒，一级与二级涡流器通过文氏管隔开，文氏管的出口端面距离套筒末端有一定的距离，套筒的最末端呈收扩形出口。套筒的外部有一圈用于固定的环以及一片防止涡流器旋转的凸起。

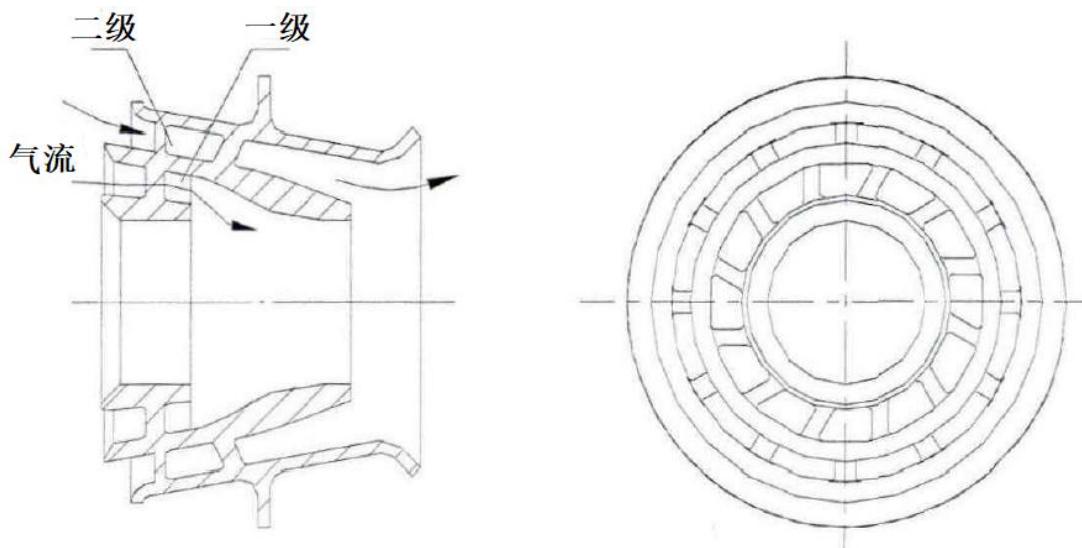


图 4.2 涡流器结构简图^[66]
Fig. 4.2 Structure diagram of Swirler^[66]

由于一级涡流器与二级涡流器旋向相反，气流在经过涡流器时会变成两股旋向相反的旋流，气流主要依靠一级涡流器与二级涡流器的叶片作用产生方向的偏转，因此叶片的粗糙度对旋流的效率影响较大。喷油嘴喷出的燃油在一级涡流器产生的气流冲击下发生第二次雾化，形成更小颗粒的油雾，从而有利于燃油与空气充分接触，文氏管的内表

面也会附着一层比较薄的油薄膜。由于二级旋流器的通道截面较大，由其产生的气体旋流比一级涡流器产生的旋流稍弱，此旋流的主要作用是对回流区的面积进行控制，避免混合后的油气混合物冲向燃烧室壁面，同时，此旋流在控制燃烧室前部气流的流动状态中占据主导地位。一级涡流器与二级涡流器的通道流通面积是影响旋流缓急的主要原因，在实际测验中，通过测试它们的流通面积评价加工质量。本实验所抛光的涡流器的一级涡流器理想的流通面积为 52mm^2 ，二级涡流器理想的流通面积为 142mm^2 。涡流器的套筒在出口处呈复合收扩状，即先收缩后开阔，此设计的目的在于增强空气旋流与燃油混合效果。

(2) 零件初始表面质量分析

通常涡流器外部比较规则的表面可经过精车等加工工艺改善其表面质量，而叶片等部位只能依靠磨粒流加工提高表面质量，涡流器的原始表面如图 4.3 所示。

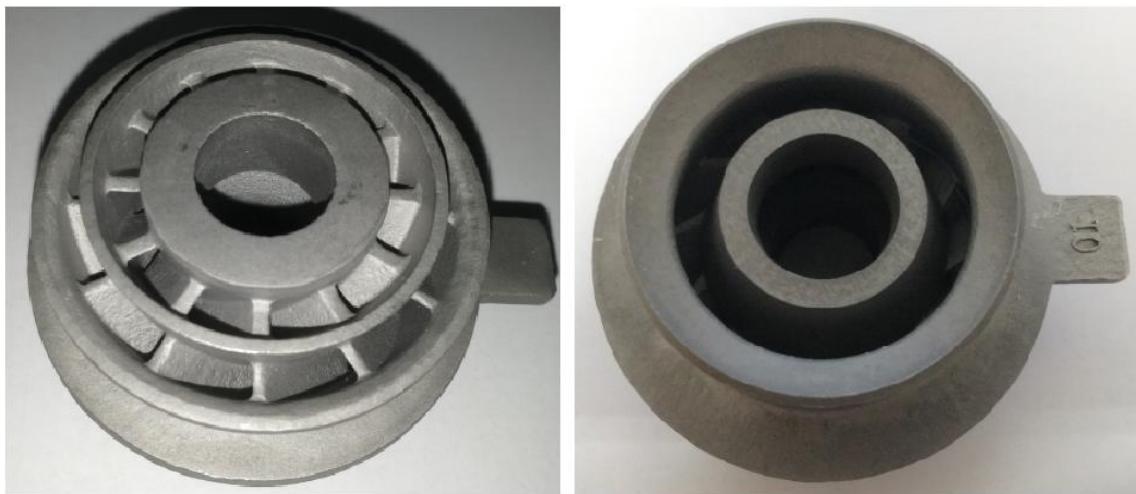


图 4.3 涡流器原始表面
Fig. 4.3 Raw surface of Swirler

经过精车等加工工艺后涡流器的外观如图 4.4 所示，由图可以看出来，圆形以及平面等比较规则的涡流器外表面在经过精车后外观极大改善，而面对涡流器叶片等复杂表面束手无策，只能依靠磨粒流加工等方法进行加工。叶片初始表面的超景深拍摄图片如图 4.5 所示。涡流器的主要工作表面为一级涡流器与二级涡流器的叶片以及套筒的内表面，由图可以看出，在抛光前，一级涡流器与二级涡流器叶片的表面粗糙度值较大，直观感觉是表面非常粗糙。此外，涡流器表面不同位置的粗糙度有较大差别，其表面的均一性不好。



图 4.4 涡流器精车之后形貌
Fig. 4.4 Appearance of Swirler after turning

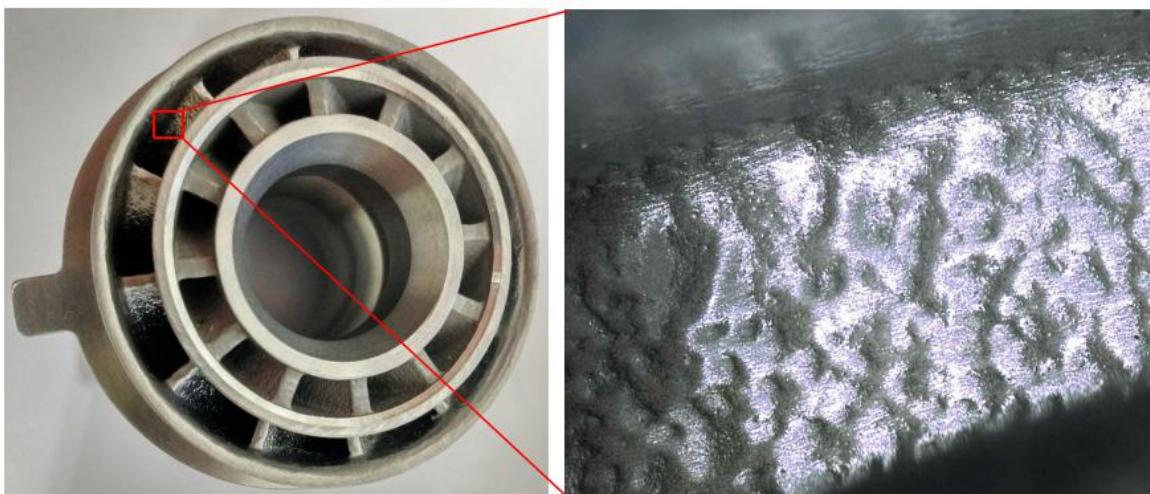


图 4.5 叶片形貌放大图
Fig. 4.5 Enlarged view of blade appearance

4.1.2 涡流器夹具设计

涡流器的主要抛光区域为一级涡流器和二级涡流器的内部流道以及套筒内壁，因此考虑将磨料介质优先通过这些通道。根据涡流器的结构特点，其燃油喷嘴口位于涡流器

的正中间，直径也比较大，由于此处与涡流器套筒的末端整体贯通，磨料介质在此处的阻力要比其他位置小得多。而一级涡流器与二级涡流器的流道复杂，流通阻力较大，当采用磨粒流抛光涡流器时，磨料介质会优先通过涡流器中央的贯通通道，这就造成流经一级涡流器与二级涡流器的磨料介质流速会明显降低，使得此区域的抛光效率也会严重下降，甚至会影响抛光质量。因此，涡流器夹具在此部位设计了一个中心堵轴，可以阻止磨料介质从此通过，转而只能流过一级涡流器与二级涡流器的通道，从而提高涡流器的加工效率。

涡流器的文氏管对涡流器的性能有着重要影响，在文氏管的末端要保证其端面的两个棱边不能被倒圆。但是在磨粒流抛光工件表面时，磨料介质并不能像控制机床刀具或磨床砂轮那样能够形成较为准确的运动轨迹，只要经过的表面必然会产生材料的去除。对于文氏管末尾的端面，磨料介质在此位置的流道发生突变，其棱边被去除的材料将会比较多。为了防止文氏管末端的棱边不被倒圆，就需要增加挡片对其加以保护。此外，文氏管内部是一级涡流器，在加工一级涡流器时磨料介质需要从文氏管内部的空腔中流出，此时文氏管挡片在保护文氏管端面棱角的同时也阻止了一级涡流器内部的磨料介质。为了保证磨料介质的流通性，需将文氏管挡片中央打通孔至上盖板。为了保证文氏管挡片对端面的保护比较稳定，其设计结构细节如图 4.6 所示。

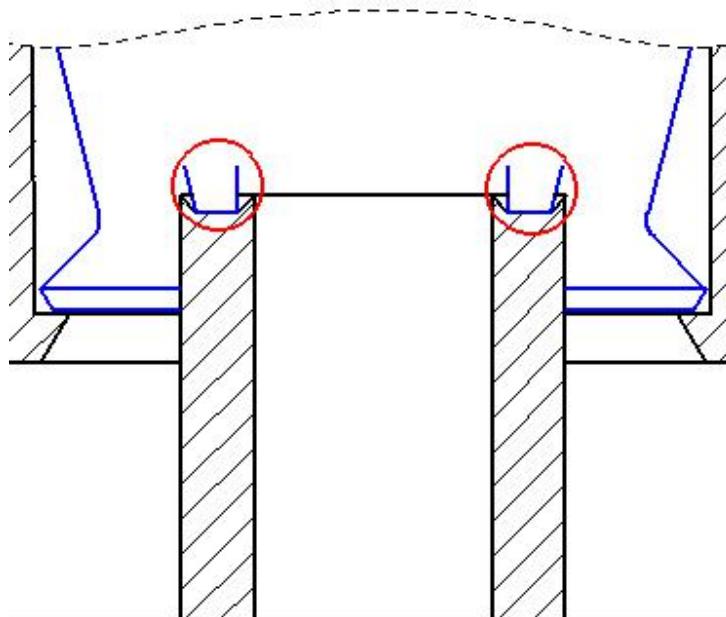


图 4.6 文氏管出口端面保护

Fig. 4.6 End face protection of venturi outlet

此外，在抛光一级涡流器与二级涡流器时，因为一级涡流器与二级涡流器的流通面积不同，也会造成磨料介质的流速有些差别，从而造成加工速率不同。同时，由于增材制造技术的误差，一级涡流器与二级涡流器的实际流通面积与设计值存在偏差，为了保证不至于过大，一般增加余量再通过后期处理。磨粒流加工可以在提高表面质量的同时满足其扩大其流通面积的需求。在提高流通面积时，一级涡流器与二级涡流器需要达到各自标准。因此，一级涡流器与二级涡流器需要分别抛光，此时夹具需要单独设计两个可以分别拆装的挡片，用于各级涡流器的分别限流。其示意图如图 4.7 所示。

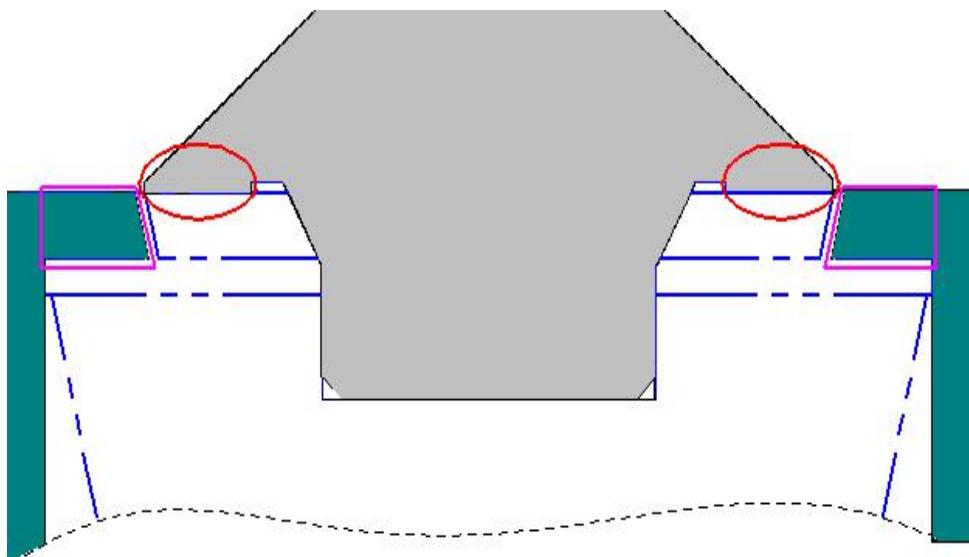


图 4.7 限流圈示意图

Fig. 4.7 Sketch map of current limiter

由于中心堵轴以及文氏管挡片位于夹具的中心位置，而磨料介质需要通过夹具进入涡流器再从涡流器流出，因此用于支撑中心堵轴和文氏管挡片的夹具部分需要做成留有磨料通道。在夹具上打孔充当流道是一种简单容易的办法，但是采用打孔的办法磨料介质流道较小，对磨料的阻力较大，影响磨粒流加工效果。为了尽可能减小夹具本身对磨料介质流动性产生的负面影响，将夹具的上下两个盖板通过线切割做成镂空状，只留几根筋板对中心堵轴和文氏管挡片起到支撑作用，夹具的总体外观如图 4.8 所示。

夹具的密封与定位主要采取止口的形式，中心堵轴通过螺钉固定在上盖板上，防止在加工时产生窜动。



图 4.8 涡流器夹具
Fig. 4.8 Fixture of Swirler

4.1.3 涡流器磨粒流加工参数

(1) 磨料介质

加工涡流器时所用的磨料介质与格栅零件有所不同，因为涡流器流道复杂，阻力较大，故采用粘度稍低的磨料介质。选用的磨粒粒度为 80#，磨粒的质量分数为 60%，磨料介质的总质量为 25kg。

(2) 加工时间

由于涡流器总的通道截面较小，每个抛光循环能去除更厚的表面材料，经过抛光实验，涡流器磨粒流抛光在经过 15 个循环后表面质量的变化已经不明显，达到比较好的抛光效果。

(3) 加工压力

经过权衡选择，涡流器的磨粒流加工压力确定为 4.5MPa，夹紧压力为 6.5MPa，因为涡流器的长径比很小，沿程损失造成的加工误差可忽略不计，为提高加工效率，采用无背压的加工条件。

4.1.4 涡流器清洗

在抛光后，从夹具取出的涡流器内部残留着许多磨料介质，因此必须对其进行清洗。

首先是进行初步清洗，可先用风枪将大块磨料进行简单去除，然后放入轻油中进行浸泡，浸泡时间大约为 12 小时。浸泡的目的在于溶解磨料介质中的高分子材料基体，因为基体具有一定的粘性，风枪不易吹去。在经过 12 小时的轻油后取出涡流器将其吹干即完成了初步清理。

因为涡流器的使用要求较为苛刻，在经过荧光检测后，发现涡流器表面仍然残留着一些化合物，因此必须进行进一步的深度清理。初步考虑荧光检测不通过的原因是轻油的溶解性较差，也可能是因为有部分黏附在工件表面高分子材料发生变质从而不宜被去除。

因为超声清洗有着诸多优点，故采用此方法进行清洗。将涡流器放入盛有无水乙醇的烧杯中，将此烧杯放入超声清洗机中进行 5 分钟的清洗，然后再经过 3 分钟的低压水射流冲洗即可完成清洗。经检测，此方法的清洗效果良好，显然能够成为无毒无污染的友好清洗方法。

4.2 抛光结果及分析

在经过上述的加工参数进行磨粒流加工并清洗后后，涡流器抛光后的整体效果如图 4.9 所示，左侧为未加工的涡流器，右侧为加工过的涡流器。

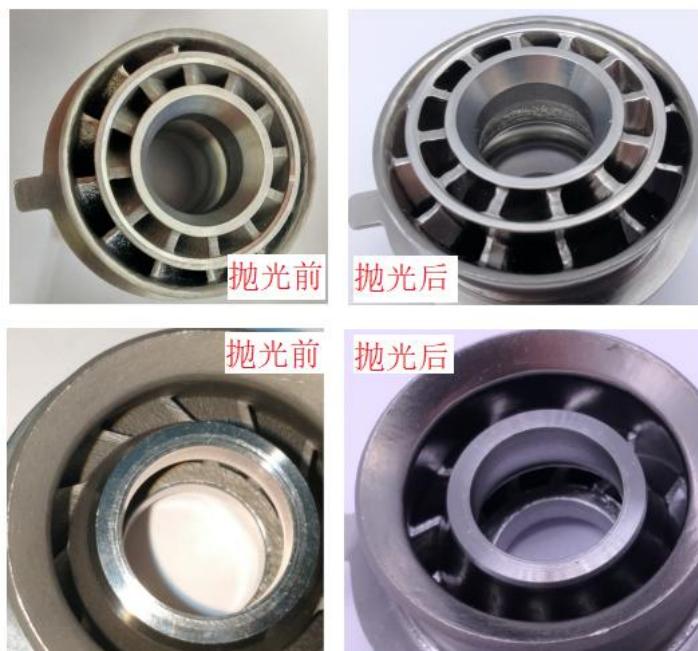


图 4.9 整体抛光对比
Fig. 4.9 Overall Polish contrast

由图可以看出来，经过抛光的一级涡流器与二级涡流器叶片表面质量得到了明显提高，其表面原有的缺陷层已经被完全去除，不规则的凹凸表面已经变得非常平整。经过抛光后的涡流器套筒出口处，其内表面也已经变得非常光滑，并呈现出较为明亮的金属光泽。经过观测，涡流器文氏管末端的圆形棱边保存良好，与磨粒流加工之前相比没有发生变化，没有出现“倒圆”现象。涡流器喷嘴出口处不需要抛光，由于其在加工中被堵住没有磨料流动，故没有出现加工现象，仍保持着原来的锥形。

可以发现，采用磨粒流加工的涡流器表面，不论是涡流器叶片表面还是套筒内壁表面，都会呈现出沿磨料介质流向的加工纹理，此纹理是由磨粒流加工的特性决定的，由于此纹理非常微弱，并且纹理方向与气流经过涡流器的方向是一致的，因此并不会对涡流器的正常使用造成影响。

涡流器在超景深显微镜下观察的前后对比图如图 4.10 与图 4.11 所示，显然，经过抛光后涡流器表面的组织已经变得十分均匀，抛光前高低起伏状的轮廓已经被消除。

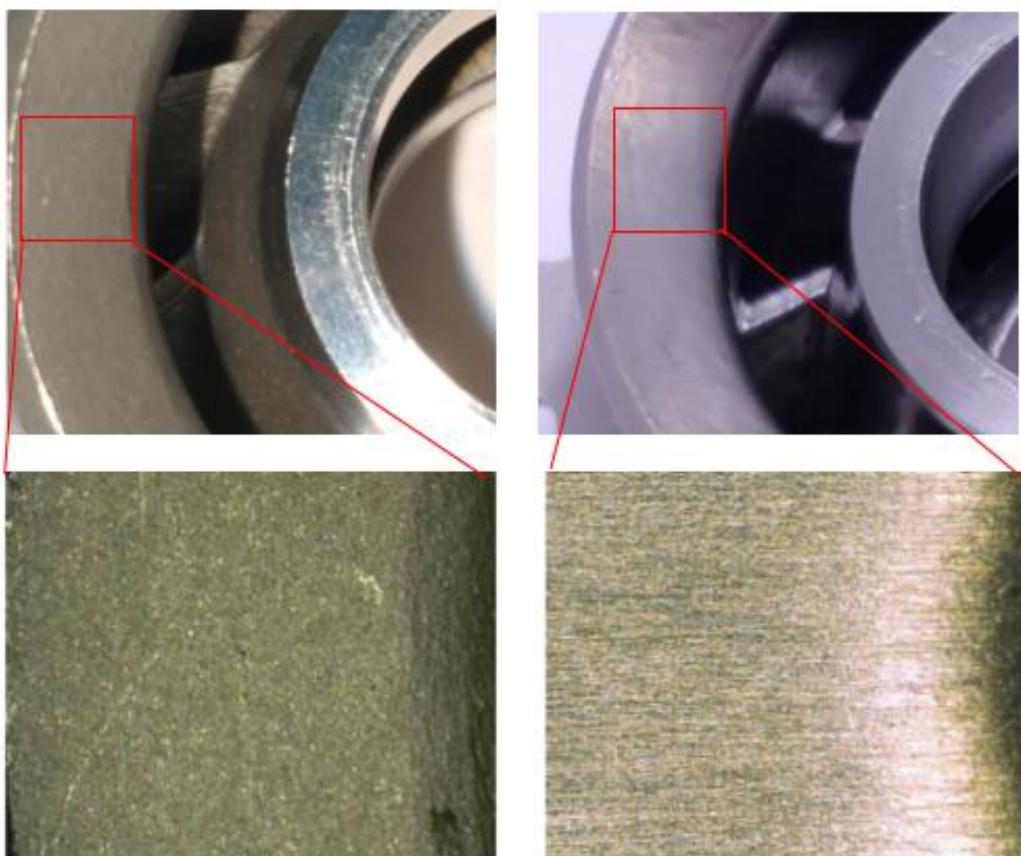


图 4.10 套筒内壁抛光对比
Fig. 4.10 Comparison of sleeve wall polishing

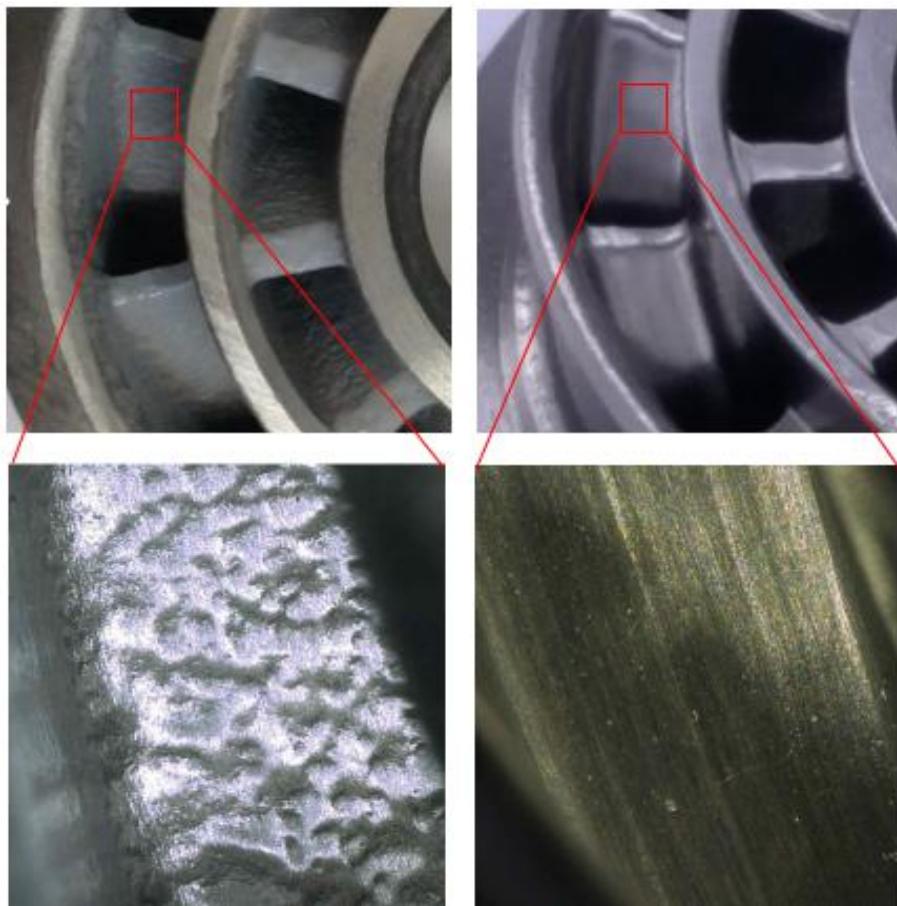


图 4.11 叶片抛光对比
Fig. 4.11 Comparison of blade polishing

4.3 流通面积加工规律研究

增材制造涡流器在成型后由于技术原因，使得其流通面积与理想值并不一致，因此想要达到一致的流通面积需要通过其他方法进行加工，磨粒流加工在抛光之余也可作为增加涡流器流通面积的重要手段。涡流器在经过磨粒流加工达到抛光效果后，却并不一定能够达到较为理想的流通面积，为了满足流通面积需求，可继续进行磨粒流加工用于去除多余材料，从而分别提高一级涡流器与二级涡流器的流通面积。

想要比较准确的使得涡流器的流通面积达到要求，就需要确定相对精确的加工时间，即磨粒流加工循环次数。此外，涡流器的初始流通面积并不相同，这就使得每个涡流器需要不同的加工循环次数，即涡流器经磨粒流加工后的流通面积与初始流通面积以及加工循环次数的对应关系。

由于未经抛光的涡流器表面较为粗糙，表面含有缺陷层，抛光材料去除率存在较大的波动，而且此时的流通面积测试也可能受到涡流器表面粗糙度的影响，因此利用抛光之后的涡流器进行实验。其初始的流通面积如表 4.1 所示。

表 4.1 初始流通面积

Tab. 4.1 Initial circulation area

涡流器编号	一级流通面积/mm ²	二级流通面积/mm ²
1	50.34	136.91
2	50.29	135.71
3	50.12	134.77
4	49.82	136.15
5	50.63	135.67
6	51.02	138.62
7	49.37	132.58
8	50.05	135.29

当这 8 个涡流器的一级涡流器经过 20 个循环的磨粒流加工，二级涡流器经过 40 个循环的磨粒流加工后，其流通面积均产生一定程度的增加，磨粒流加工后各涡流器的流通面积如表 4.2 所示。

表 4.2 加工后流通面积

Tab. 4.2 Circulation area after processing

涡流器编号	一级流通面积/mm ²	二级流通面积/mm ²
1	60.88	145.43
2	60.75	144.19
3	60.50	143.01
4	59.98	144.51
5	61.17	144.11
6	61.64	147.22
7	59.57	140.74
8	60.37	143.73

表 4.3 每个循环流通面积增加量

Tab. 4.3 Increase of circulation area per cycle

涡流器编号	一级流通面积增加量/mm ²	二级流通面积增加量/mm ²
1	0.527	0.213
2	0.523	0.212
3	0.519	0.206
4	0.508	0.209
5	0.527	0.211
6	0.531	0.215
7	0.510	0.204
8	0.516	0.211

根据增加的差值，可分别算出每次磨粒流加工循环分别对一级涡流器与二级涡流器的流通面积的增加量为 0.520mm^2 和 0.211mm^2 ，如表 4.3 所示。根据涡流器初始的流通面积与理想流通面积的差值，即可计算出每个涡流器需要的加工时间。为了检验此计算方法的偏差，现以 5 个涡流器进行抛光验证，其抛光前的流通面积以及需要抛光的循环次数如表 4.4 所示。

表 4.4 加工循环次数

Tab. 4.4 Number of processing cycles

涡流器编号	一级涡流器原始 流通面积/mm ²	一级涡流器加工 循环次数(取整)	二级涡流器原始 流通面积/mm ²	二级涡流器加工 循环次数(取整)
1	50.22	3	135.72	30
2	50.59	3	134.75	34
3	50.08	4	136.88	24
4	49.83	4	135.79	29
5	51.06	2	131.34	51

加工后的流通面积如表 4.5 所示，由此表可知二级涡流器在经过磨粒流加工后其实际流通面积已经十分接近理想的流通面积，而一级涡流器在经过磨粒流加工后的实际流通面积与理想的流通面积差值稍大。这是由于一级涡流器的平均流通面积比二级涡流器小很多，涡流器的每个加工循环所增加的流通面积更大些，且一级涡流器初始流通面积与理想流通面积的总差值较小，当精确至整数的循环次数时，一级涡流器计算误差也较

大，二级涡流器计算误差较小。因此，二级涡流器在磨粒流加工后因误差因素造成的差值也就会一级涡流器更小，磨粒流加工后的实际流通面积也就更接近理想值。

表 4.5 流通面积验证
Tab. 4.5 Verification of circulation area

涡流器编号	一级涡流器抛光后流通面积/mm ²	二级涡流器抛光后流通面积/mm ²
1	51.65	142.12
2	52.26	141.96
3	52.34	142.07
4	51.97	141.88
5	52.15	142.15

若要提高一级涡流器实际流通面积与理想理论面积的差值，可通过减小磨料介质的总质量来缓解，这是因为当减小料缸中磨料介质总质量时，每个循环所去除的材料也随之减小，减小了每个循环流通面积的增加值。这样操作会有一个弊端，就是会在一定程度上降低加工效率，也会使得磨料介质的温升变高。事实上，在磨粒流加工时，参与循环的磨料介质并非加入料缸的所有磨料，因为通常情况下，在机床与工件表面之间会有一定量的磨料空余无法参与加工，当加入的磨料介质越少时，此部分所占的比例就会越大，对加工效率的影响也会越大。

此外，在涡流器进行磨粒流加工时，其每个循环所增加的流通面积是受到多方面影响的。假使通道的截面为多边形，则随着加工循环次数的增加，多边形的面积也会增加，从而实际参与到加工中的工件表面面积也有相应的增加，使得加工速率变快，使得流通面积的增加速度变快。但另一方面，通道的截面增加会使得磨料介质的流量增加，在每个循环内流过单位面积工件表面的磨料减少，使得流通面积的增加速度变慢。如要探究实际的流通面积增加趋势，需要考虑哪个因素占据主导地位。实际上，这些因素对于整个通道来说变化相对较小，在计算涡流器流通面积变化时为简化计算进行了忽略。

4.4 本章小结

采用增材制造成型的涡流器对表面质量以及各分级的流通面积有较高要求。本章对增材制造涡流器开展了磨粒流加工的相关研究，设计了涡流器磨粒流加工专用夹具，进行了抛光实验研究，得到了较好的抛光效果，研究了磨粒流加工时间对涡流器流通面积的影响规律：

(1) 磨粒流加工可以使得增材制造涡流器获得较好的表面质量，在抛光后，其一级涡流器叶片、二级涡流器叶片以及套筒出口处的表面质量得到了明显提高，表面组织也更加均匀，没有出现明显的表面划伤。对涡流器文氏管出口端面棱边的保护较为良好，没有出现“倒圆”现象。

(2) 通过实验研究了涡流器流通面积随磨粒流加工循环次数变化的规律，并进行了实验验证，为涡流器采用磨粒流加工实现理想流通面积的加工时间提供依据。

5 结论与展望

5.1 结论

面对增材制造金属零件，本文研究了其两种零件的磨粒流加工技术，对增材制造钛合金格栅以及增材制造涡流器进行了磨粒流加工实验研究。主要得出了以下结论：

(1) 分析了磨粒流加工技术的原理和特点，阐述了磨粒流加工磨料介质的选配方法，研究了磨粒流加工专用夹具的设计思路与要求，分析了夹具控流、密封等关键指标的设计方法。

(2) 设计了增材制造钛合金格栅零件的磨粒流加工专用夹具，通过实验研究发现磨粒流加工对格栅零件的抛光效果良好。分析了格栅斜孔经过磨粒流加工出现“月牙形”现象的成因是格栅零件结构差异引起的，并对此提出了解决方案。对格栅零件的磨粒流加工抛光规律进行了研究，发现磨粒流加工格栅零件时零件表面质量的变化规律为先恶化后逐渐变好，其原因是增材制造钛合金零件表面存在缺陷层。

(3) 针对增材制造涡流器确定了磨粒流加工工艺，设计了涡流器的磨粒流加工专用夹具，进行了涡流器磨粒流加工实验研究，提出了涡流器磨粒流加工后的清洗工艺。实验发现磨粒流加工对增材制造涡流器的抛光效果较好，并能成功实现文氏管出口处端面棱边的保护使其不被“倒圆”。研究了磨粒流加工对涡流器流通面积的影响规律，通过实验研究了涡流器流通面积随磨粒流加工循环次数变化的规律并进行了验证，为涡流器实现理想流通面积提供依据。

5.2 展望

增材制造技术作为后起之秀由于独特的优势发展迅速，已经应用于航空航天、模具制造以及生物医学等领域并将应用于更多领域，本文对增材制造的格栅和涡流器进行了磨粒流加工实验研究。面对日趋复杂化的增材制造金属零件，磨粒流加工技术仍然有许多值得研究的方面：

(1) 本文采用磨粒流加工进行抛光的增材制造钛合金格栅零件的格栅孔大小适中，而对于更加微小孔以及空间错位网状的增材制造零件并没有开展，其抛光效果有待进一步的研究。

(2) 本文所研究的增材制造格栅零件因格栅孔倾斜导致其结构强度不一定会出现“月牙”现象，而对更加复杂的曲面零件，因结构强度差异导致的磨粒流加工影响有待研究和论证。

(3) 本文研究的涡流器为三入口单一出口的增材制造零件，而对于多入口多出口的交叉孔等结构更加复杂的增材制造零件，其磨粒流加工工艺以及抛光质量有待更加全面、更加深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 张洪宝, 胡大超. 增材制造技术的应用及发展[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2016,16(1): 93-98.
- [2] HUANG S H, HUANG S H, LIU P, et al. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013,67(5): 1191-1203.
- [3] AMBROSI A, PUMERA M. 3D-printing technologies for electrochemical applications[J]. Chemical Society Reviews, 2016,45(10): 2740-2755.
- [4] 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学:信息科学, 2015,45(09): 1111-1126.
- [5] DING H Y, QIU P K, HAN Y F, et al. Influence of Post Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Property of Ti6Al4V Parts Produced by Selective Laser Melting[J]. Materials Science Forum, 2017,898: 1312-1317.
- [6] YUAN L, DING S, WEN C. Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review[J]. Bioact Mater, 2019,4(1): 56-70.
- [7] REJESKI D, ZHAO F, HUANG Y. Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2018,19: 21-28.
- [8] CHU M Q, WANG L, DING H Y, et al. Additive Manufacturing for Aerospace Application[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015,798: 457-461.
- [9] 周梦, 成艳, 周晓晨, 等. 基于增材制造技术的钛合金医用植入物[J]. 中国科学:技术科学, 2016,46(11): 1097-1115.
- [10] JAVAID M, HALEEM A. Current status and applications of additive manufacturing in dentistry: A literature-based review[J]. J Oral Biol Craniofac Res, 2019,9(3): 179-185.
- [11] HALEEM A, JAVAID M, KHAN R H, et al. 3D printing applications in bone tissue engineering[J]. Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma, 2020,11: S118-S124.
- [12] VISHNU PRASHANT REDDY K, MEERA MIRZANA I, KOTI REDDY A. Application of Additive Manufacturing technology to an Aerospace component for better trade-off's[J]. Materials Today: Proceedings, 2018,5(2): 3895-3902.
- [13] SEGONDS F. Design By Additive Manufacturing: an application in aeronautics and defence[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2018,13(4): 237-245.
- [14] 郑莹. 3D 打印技术在模具中的应用[J]. 科技创新导报, 2017,14(34): 110-111.
- [15] HALEEM A, JAVAID M. Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review[J]. Journal of Industrial Integration and Management, 2019,04(04): 1930001.
- [16] SHUKLA M, TODOROV I, KAPLETIA D. Application of additive manufacturing for mass customisation: understanding the interaction of critical barriers[J]. Production Planning & Control, 2018,29(10): 814-825.
- [17] LEAL-JUNIOR A, CASAS J, MARQUES C, et al. Application of Additive Layer Manufacturing Technique on the Development of High Sensitive Fiber Bragg Grating Temperature Sensors[J]. Sensors, 2018,18(12): 4120.

- [18] SHANMUGAM S, NAIK A, SUJAN T, et al. Developing Robust 3D Printed Parts For Automotive Application Using Design For Additive Manufacturing And Optimization Techniques[J]. INCOSE International Symposium, 2019,29(S1): 394-407.
- [19] BRÄUNIG J, TÖPPEL T, MÜLLER B, et al. Advanced Material Studies for Additive Manufacturing in terms of Future Gear Application[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015,6: 741083.
- [20] 卢秉恒. 创新驱动增材制造的发展[J]. 改革与开放, 2014(15): 2-3.
- [21] 苏亚东, 吴斌, 王向明. 增材制造技术在航空装备深化应用中的研究[J]. 航空制造技术, 2016(12): 42-48.
- [22] DHANDAPANI R, KRISHNAN P D, ZENNIFER A, et al. Additive manufacturing of biodegradable porous orthopaedic screw[J]. Bioactive Materials, 2020,5(3): 458-467.
- [23] 宋彬, 及晓阳, 张红昌, 等. 3D 打印增材制造技术在鼓式制动器轮缸模具制造中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2016(15): 4-7.
- [24] 伍仕雄, 杨安民. 金属增材制造技术在模具开发中的应用[J]. 模具制造, 2017,17(03): 68-71.
- [25] 董洁, 龙玲, 殷国富. 增材制造技术在汽车行业的应用研究[J]. 机械, 2019,46(02): 41-45.
- [26] FRAZIER W E. Metal Additive Manufacturing: A Review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014,23(6): 1917-1928.
- [27] 龚运息, 陈晨, 夏名祥, 等. FDM 3D 打印模型表面阶梯效应的分析[J]. 制造技术与机床, 2016(04): 27-30.
- [28] BHADURI D, PENCHEV P, BATAL A, et al. Laser polishing of 3D printed mesoscale components[J]. Applied Surface Science, 2017,405: 29-46.
- [29] MUMTAZ K, HOPKINSON N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2009,15(2): 96-103.
- [30] 吴伟辉, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型过程的球化现象[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010,38(5): 110-115.
- [31] PYKA G, BURAKOWSKI A, KERCKHOFS G, et al. Surface Modification of Ti6Al4V Open Porous Structures Produced by Additive Manufacturing[J]. Advanced Engineering Materials, 2012,14(6): 363-370.
- [32] 吴伟辉, 杨永强, 毛星, 等. 激光选区熔化增材制造零件侧壁成型精度分析: 2015 光学精密工程论坛[C], 中国吉林长春, 2015.
- [33] HAN X. Study micromechanism of surface planarization in the polishing technology using numerical simulation method[J]. Applied Surface Science, 2007,253(14): 6211-6216.
- [34] FURUMOTO T, UEDA T, AMINO T, et al. A study of internal face finishing of the cooling channel in injection mold with free abrasive grains[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2011,211(11): 1742-1748.
- [35] BASHA S M, BHUYAN M, BASHA M M, et al. Laser polishing of 3D printed metallic components: A review on surface integrity[J]. Materials Today: Proceedings, 2020.
- [36] PENG C, FU Y, WEI H, et al. Study on Improvement of Surface Roughness and Induced Residual Stress for Additively Manufactured Metal Parts by Abrasive Flow Machining[J]. Procedia CIRP, 2018,71: 386-389.

- [37] CHEN S C, TU G C, HUANG C A. The electrochemical polishing behavior of porous austenitic stainless steel (AISI 316L) in phosphoric-sulfuric mixed acids[J]. Surface and Coatings Technology, 2005,200(7): 2065-2071.
- [38] 刘薇娜, 孙冉, 张雪瑶, 等. 复杂曲面软性磨粒流抛光可行性研究[J]. 机械工程师, 2017(04): 36-38.
- [39] HAN S, SALVATORE F, RECH J, et al. Abrasive flow machining (AFM) finishing of conformal cooling channels created by selective laser melting (SLM)[J]. Precision Engineering, 2020,64: 20-33.
- [40] BAGEHORN S, WEHR J, MAIER H J. Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts[J]. International Journal of Fatigue, 2017,102: 135-142.
- [41] UKAR E, LAMIKIZ A, LACALLE L N L D, et al. Laser polishing parameter optimisation on selective laser sintered parts[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2010,8(3/4): 417.
- [42] MA C P, GUAN Y C, ZHOU W. Laser polishing of additive manufactured Ti alloys[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017,93: 171-177.
- [43] ZHIHAO F, LIBIN L, LONGFEI C, et al. Laser Polishing of Additive Manufactured Superalloy[J]. Procedia CIRP, 2018,71: 150-154.
- [44] YUNG K C, WANG W J, XIAO T Y, et al. Laser polishing of additive manufactured CoCr components for controlling their wettability characteristics[J]. Surface and Coatings Technology, 2018,351: 89-98.
- [45] YUNG K C, XIAO T Y, CHOY H S, et al. Laser polishing of additive manufactured CoCr alloy components with complex surface geometry[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018,262: 53-64.
- [46] 李健, 杨叶, 金卫凤, 等. 激光抛光表面形貌的误差复映规律[J]. 表面技术, 2020,49(02): 309-315.
- [47] PYKA G, KERCKHOFS G, PAPANTONIOU I, et al. Surface Roughness and Morphology Customization of Additive Manufactured Open Porous Ti6Al4V Structures[J]. Materials, 2013,6(10): 4737-4757.
- [48] CHANG S, LIU A, ONG C Y A, et al. Highly effective smoothening of 3D-printed metal structures via overpotential electrochemical polishing[J]. Materials Research Letters, 2019,7(7): 282-289.
- [49] DONG G, MARLEAU-FINLEY J, ZHAO Y F. Investigation of electrochemical post-processing procedure for Ti-6Al-4V lattice structure manufactured by direct metal laser sintering (DMLS)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,104(9-12): 3401-3417.
- [50] HABIBZADEH S, LI L, SHUM-TIM D, et al. Electrochemical polishing as a 316L stainless steel surface treatment method: Towards the improvement of biocompatibility[J]. Corrosion Science, 2014,87: 89-100.
- [51] URLEA V, BRAILOVSKI V. Electropolishing and electropolishing-related allowances for powder bed selectively laser-melted Ti-6Al-4V alloy components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017,242: 1-11.
- [52] KUMAR S S, HIREMATH S S. A Review on Abrasive Flow Machining (AFM)[J]. Procedia Technology, 2016,25: 1297-1304.

- [53] 汤勇, 周德明, 夏伟, 等. 磨料流加工壁面滑动特性的研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001,29(1): 34-37.
- [54] JAIN R K, JAIN V K. Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001,41(12): 1689-1704.
- [55] 王伟, 刘小君, 刘焜, 等. 利用摩擦学系统理论对磨粒流加工过程的分析[J]. 现代制造工程, 2011(12): 6-9.
- [56] WILLIAMS R E, MELTON V L. Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes[J]. Rapid Prototyping Journal, 1998,4(2): 56-67.
- [57] DUVAL-CHANEAC M S, HAN S, CLAUDIN C, et al. Experimental study on finishing of internal laser melting (SLM) surface with abrasive flow machining (AFM)[J]. Precision Engineering, 2018,54: 1-6.
- [58] UHLMANN E, SCHMIEDEL C, WENDLER J. CFD Simulation of the Abrasive Flow Machining Process[J]. Procedia CIRP, 2015,31: 209-214.
- [59] 高航, 李世宠, 付有志, 等. 金属增材制造格栅零件磨粒流抛光[J]. 航空学报, 2017,38(10): 231-239.
- [60] 高航, 彭灿, 王宣平. 航空增材制造复杂结构件表面光整加工技术研究及进展[J]. 航空制造技术, 2019,62(09): 14-22.
- [61] FURUMOTO T, UEDA T, AMINO T, et al. Finishing performance of cooling channel with face protuberance inside the molding die[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012,212(10): 2154-2160.
- [62] 付有志. 粘性挤压磨料流加工边缘效应及抑制策略[D]. 大连理工大学, 2018.
- [63] 董志国, 车刚, 李元宗. 高粘弹性流体磨料光整加工的材料去除率模型[J]. 兵工学报, 2013,34(12): 1555-1561.
- [64] 张麦秋, 董卫国, 何鹏飞. 静密封新技术及应用[J]. 化工设计通讯, 2010,36(02): 53-54.
- [65] 汤蛟. 双级径向叶片式涡流器优化设计及试验研究[D]. 上海交通大学, 2017.
- [66] 成胜军. 双级涡流器出口流场的 PIV 试验研究[D]. 湖南大学, 2011.
- [67] 谢法, 黄勇, 苗辉, 等. 气量分配对双轴向旋流器燃烧室贫熄性能影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2011,37(11): 1456-1460.
- [68] COHEN J M, ROSFJORD T J. Influences on the Sprays Formed by High-Shear Fuel Nozzle/S wirler Assemblies[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993,9(1): 16-27.
- [69] IBRAHIM I A, FARAG T M, ABDEL-BAKY M E, et al. Experimental study of spray combustion characteristics of air-blast atomizer[M]. 2020: 209-215.
- [70] ATESHKADI A, McDONELL V G, SAMUELSEN G S. Effect of hardware geometry on gas and drop behavior in a radial mixer spray[J]. Symposium (International) on Combustion, 1998,27(2): 1985-1992.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

1 增材制造金属零件抛光加工技术研究进展. 王宣平, 段合露, 孙玉文, 高航. 表面技术, 2020, 49 (4) : 1-10. 主办单位: 中国兵器工业第五九研究所。 (本硕士学位论文第一章和第二章)

致 谢

时间一分一秒的向前流去，感叹岁月总是那样悄无声息，悄悄然，三年的硕士生涯已经迈入最后征程。三年来，我见证了母校在七十周年校庆之际所展现的蓬勃发展，见证了现代制造技术研究所向高性能制造研究所的转变，见证了各位老师与同学攀登科学高峰的决心与毅力。有幸的是，我也在这片求真的土地上见证了自己。这三年的硕士生涯，我在学习和生活收获颇丰，从专业知识到做人的道德品质，从实践能力到人际交流，这一切都归功于这片土地上所有帮助过我的老师和同学。

首先需要感谢的是我的导师王宣平副教授，在他的悉心指导下，我完成了本论文的撰写。他平日里不厌其烦的指导使得我在学习的途中获得了丰富的知识与技能，他严格的科研态度一直影响着我在做科研的道路上始终保持着一颗严谨认真且务实的心。王老师胆大心细的科研作风感染着我不断的提升自我创新能力，每当我遇到困难时，王老师都会作为我最强有力的后盾在背后默默支持者我奋力前行。

感谢高航老师、王一奇老师、鲍永杰老师在课题组内给予我的支持。高航老师知识渊博、经验丰富，在学术方面造诣颇深，是我在科研道路上的指路明灯。王一奇老师恪尽职守、兢兢业业，堪称学者典范。鲍永杰老师不拘一格，在科研面前不惧困难勇往直前，同样是值得我学习的楷模。

感谢机械工程学院给我提供宝贵的科研平台，感谢司立坤老师在测量设备的使用给予我的帮助，让我得以顺利进行试验研究，感谢王瑞利老师在实验室管理提供的帮助，给我营造了一个安全的实验室环境。

感谢教研室的师兄弟以及师姐师妹在我研究生期间给予我的帮助。感谢彭灿师兄、魏海波师兄、王海全师兄、付有志师兄在科研道路上对我的指导与帮助，感谢所有同学以及师弟师妹对我的论文提出的宝贵建议。

感谢父母兄长等众多亲人多年来对我的教育与支持，无论我身处何方，他们始终给予我最强大的前行动力，给了我在面对任何困难时都不曾退缩的勇气，这股动力和勇气，将依然推动我在接下来的人生道路上更加坚定前行。

三年时间如脱弦之箭，刹那间便已远去，而自从踏入校门的那一刻起，许多场景依旧如初遇，感谢这片热土给予我人生的又一篇章。

最后，感谢参加评审的各位专家学者在百忙之中抽出时间来查阅我的论文，并对论文提出宝贵意见。

大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目：增材制造零件异形内表面磨粒流抛光实验研究
作者签名：段含露 日期：2020年6月6日