

SLM 增材制造弯管磨粒流抛光防过磨 创新结构与试验研究

王坤^{1*}, 李方祺¹, 吕伊凡^{1,2}, 朱伟光¹, 张松泽¹

(1. 内蒙古工业大学 机械工程学院, 呼和浩特 010010;
2. 飞而康快速制造科技有限责任公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: **目的** 针对磨粒流抛光直角弯处因磨料惯性力梯度变化导致肘部流道外侧过磨问题, 提出一种带有创新保护结构的弯管设计方法。**方法** 以不均匀增厚、条状凸起和半球凸起结构弯管为实验对象, 通过数值模拟和磨粒流实验相结合的方法, 研究 3 种创新结构设计弯管内表面在磨粒流光整工艺加工下各样点压力与流道形状对弯管肘部材料去除量的影响。**结果** 仿真和实验结果揭示了各结构弯管的压力变化趋势, 以及去除量的分布特征。在 10 MPa 的加工压力和 100 次的循环加工次数下, 不均匀增厚弯管在入口倒角处存在压力增大突变, 所以在倒角处、弯管段去除量最大, 比普通弯管增加了 20.7%。2 种凸起结构在弯管段外侧压力随凸起结构的阻滞作用加剧而突变增大, 随形磨削导致外侧凸起结构处去除量变化波动加剧, 相比普通弯管分别增加了 67.2% 和 47.5%, 内侧去除量相比普通弯管也显著提升, 分别提升 172% 和 151%。**结论** 不均匀增厚弯管可以显著减少肘部过磨, 保持内壁表面连续均匀的梯度变化, 而凸起结构导致去除量波动, 虽然可以减少过磨但难以控制稳定的表面粗糙度, 所以不均匀增厚弯管结构对肘部流道外侧过磨问题具有较好的工程应用价值。

关键词: 增材制造; 磨粒流加工; 弯管过磨; 弯管结构设计; 数值模拟; 试验分析

中图分类号: TG580.692 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)06-0162-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.06.015

Design and Experimental Study of Innovative Anti-wear Structure for SLM Additive Manufacturing Bend Pipe by Abrasive Flow Polishing

WANG Kun^{1*}, LI Fangqi¹, LYU Yifan^{1,2}, ZHU Weiguang¹, ZHANG Songze¹

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010010, China;
2. Falcon Tech Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214000, China)

ABSTRACT: As an advanced surface treatment technology, abrasive flow technology has demonstrated excellent results in 3D printing application. It can remove surface burrs and improve accuracy and surface quality, with environmental protection and

收稿日期: 2024-07-17; 修订日期: 2024-12-30

Received: 2024-07-17; Revised: 2024-12-30

基金项目: 2021 年内蒙古工业大学科研启动金项目 (DC2200000931); 2023 年内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目 (JY2023003)

Fund: Scientific Research Start-Up Fund Project of Inner Mongolia University of Technology in 2021 (DC2200000931); Basic Scientific Research Fund Project of Universities Directly under the Inner Mongolia Autonomous Region in 2023 (JY20230003)

引文格式: 王坤, 李方祺, 吕伊凡, 等. SLM 增材制造弯管磨粒流抛光防过磨创新结构与试验研究[J]. 表面技术, 2025, 54(6): 162-172.

WANG Kun, LI Fangqi, LYU Yifan, et al. Design and Experimental Study of Innovative Anti-wear Structure for SLM Additive Manufacturing Bend Pipe by Abrasive Flow Polishing[J]. Surface Technology, 2025, 54(6): 162-172.

*通信作者 (Corresponding author)

energy saving advantages. However, during the processing of complex internal flow channel surfaces, uneven processing phenomena can occur. Therefore, the work aims to address the issue of excessive wear on the exterior of the elbow runner at right angles, which is caused by variations in the gradient of abrasive inertia force during abrasive flow polishing, and enhance the uniformity of processing in elbow components. To achieve this, three innovative structural designs for elbows were proposed by modifying the geometry of the flow channel. The effects of various point pressures and flow channel shapes on material removal and surface quality were studied through numerical simulation and experimental analysis. A 3D-printed aluminum alloy bend pipe was used as the test object. The process parameters were determined through tests, and the abrasive flow processing was simulated with the Carreau-Yasuda equation for non-Newtonian fluids. The simulation parameters of the outer pressure in the bend pipe were obtained and divided into two groups for comparison. The pipe bending was modeled with SolidWorks software, and the model was then imported into Fluent for simulation. The simulation results showed that the pressure of the non-uniform thickening type was larger than that of the ordinary type, and the pressure trend of the bar type and the half ball type was almost the same. During the machining test, the removal amount on the outer side of the bend was measured, and the sample points where the cutting amount changed were analyzed. Finally, the shape accuracy of the bend pipe was analyzed by 3D scanner. Under a processing pressure of 10 MPa and after 100 processing cycles, the removal amount for both ordinary and uneven thickened bend pipes initially increased and then decreased. The uneven thickened bend exhibited the greatest removal at the chamfer and the bend section, increasing by 20.7% compared to the ordinary bend. Due to the increased processing allowance of the uneven thickened protection structure, the overall surface consistency of the inner wall of the bend was better. The cutting amount for strip and hemispherical bend pipes increased sharply at the protruding structures, with increase of 67.2% and 47.5% respectively compared to ordinary bend pipes. The protruding part deformed after processing, which affected the practical use. The inner removal for strip and hemispherical bend pipes was significantly improved compared to ordinary bend pipes, increasing by 172% and 151% respectively. The process parameters of machining pressure and machining times are determined by experiments, and the surface quality after bending with three optimized structure designs is explored. It is found that the surface quality of the bend pipe with the uneven thickening design is superior, offering theoretical guidance for further optimization of bend pipe structures and abrasive flow machining experiments.

KEY WORDS: additive manufacturing; abrasive flow machining; over-machining of bend pipes; structural design of bend pipe; numerical simulation; experimental analysis

随着金属 3D 打印技术的发展,许多复杂的一体成型件开始使用激光选区熔化(SLM)技术来制造^[1],但其打印的工件会出现表面粗糙度差、球化效应等问题,零件初始表面十分粗糙,无法直接投入生产使用。特别是在内流道制件的成型过程中,由于逐层叠加的打印方式,表面容易出现明显的“阶梯效应”,内部辅助支撑和粉末黏附残留物去除困难^[2-3]。磨粒流抛光技术是一种特种加工技术,用于对复杂几何部件、难以抛光材料制成的零件进行抛光、倒圆和去毛刺^[4-7],也可以对不同形状的流道进行抛光^[8],复杂结构零件的加工精度能达到 $0.05\ \mu\text{m}$ ^[9]。磨粒流加工本质上是固体颗粒和液体介质共同流动的复杂现象,在许多工业制造过程中都涉及两相流引起的磨损问题^[10]。国内外学者系统研究了磨粒流加工工艺参数^[11-12]、磨料介质配方^[13]和磨料介质滑移特性^[14]等,得出了磨粒流加工中材料去除的基本原理以及工艺参数对加工性能的影响。王坤等^[15]、李映^[16]、殷华锋等^[17]分别研究了固液两相流对异径管、离心泵、搅拌罐的侵蚀磨损问题。王坤等^[18]研究了仿形工装对磨粒流加工的影响规律,通过单因素实验确定了在仿形流道间隙为 5

倍 SiC 颗粒直径、工作压力为 2 MPa、加工时间为 45 min、使用双向磨粒流工艺时,磨粒流抛光效果最优。流体在流动方向上的突然转向会引起固体颗粒分布的巨大变化,研究表明,弯头部位的磨损速率约为直管磨损的 50 倍^[19]。因此,对弯管肘部进行结构设计,来保护弯管尺寸,对于预防零件流道壁面磨损、减少零件不良率有着积极的意义。王景坡等^[20]通过实验研究了磨粒流光整工艺在提升航空油路中多通管接头内壁加工效果方面的应用,发现通过优化加工时间和加工流道可显著改善管道内壁的粗糙度、材料去除量和表面质量一致性,其中单出口流道加工方式在提升内壁表面质量一致性方面表现更佳。李俊桦等^[21]研究了磨粒流加工非线性管零件,实验证明通过优化磨粒粒径、磨料浓度、挤压力和加工时间等关键工艺参数,能有效改善非直线管零件的表面质量,从而提高非直线管零件的工作可靠性和耐久性。综上可知,利用磨粒流加工技术能够显著提升管道零件的表面质量。研究人员为了对弯管处进行保护,设计了许多弯管创新结构, Li 等^[22]通过在弯管段设计单排半圆凸起结构和多排凸起结构,来减小弯管段的冲蚀率,数值模拟

结果指出对于单排凸起,当凸起半径 $r=D/6$,凸起位置 $\theta=30^\circ$ 时,最大冲蚀率较普通弯头降低36.59%;当采用多排凸起且凸起半径 $r=D/8$ 时,最大侵蚀率降低了39.09%。孙鸿志^[23]通过分析贝壳的纹路,在弯管段设计了一种半圆柱肋条的结构,数值模拟表明肋条弯头的耐冲蚀磨损性能较光滑弯头有了明显提高。

Furumoto 等^[24-25]为了提高磨粒流抛光效率与抛光均匀性,以增材制造注塑成型模具的随形水冷流道内表面为研究对象,在其内表面设置“凸起”结构,研究“凸起”结构对流道内表面抛光的影响,证明了该结构对流道内表面抛光的改善作用。Lv 等^[26]以3D打印铝合金直角弯头为实验对象,将Jain提出的切削量公式作为基础,通过模拟流道压力与加工周期得出修正系数,建立了材料切削量数学模型,并通过实验验证了模型的有效性。

目前3D打印弯道结构优化防止过磨的研究只限于仿真研究,工程实验进行较少,本研究通过SLM技术制造出带有特殊结构的弯道,对比原始弯道,分析特殊弯道对壁厚保护的积极作用。首先通过加工试验获得合适的加工参数,并分析在该参数下加工后的弯管壁厚以及切削量。其次通过流变仪获取磨料参数,并将拟合出的Carreau-Yasuda模型导入Fluent,对设计的3种保护结构进行仿真分析,最后使用SLM

技术制造出设计的弯管,进行加工试验,分析不同形状流道的去除量,旨在为后续弯管设计与磨粒流加工弯管试验提供理论指导。

1 试验

1.1 保护结构设计

将肘部流道外侧(图1a中的红色实线)围绕旋转点顺时针旋转 3° ,靠近入口处的壁厚增加2 mm,而靠近出口处的壁厚不变,同时对入口处的增厚位置做倒角处理,倒角深度为7.35 mm,倒角角度为 70° ,获得不均匀增厚的流道。根据前人的研究设计了2种保护外侧管道结构,分别建立 $R2=0.75$ mm的条状凸起弯管(图2a)与 $R3=D/8$ 的半球凸起弯管(图2b),保护结构条数均为3条。

1.2 确定工艺参数

使用SolidWorks软件建立 90° 弯管, $L1$ 为入口段,长80 mm, $L2$ 为出口段,长55 mm, $R1$ 为30 mm的圆弧,孔径 $D2$ 为19 mm,如图3a所示。同时为了保证弯管部位有良好的形状精度,设计图3b的打印支撑,并在弯管外侧、内侧以及侧壁设计了测量条带方便超声波测厚。

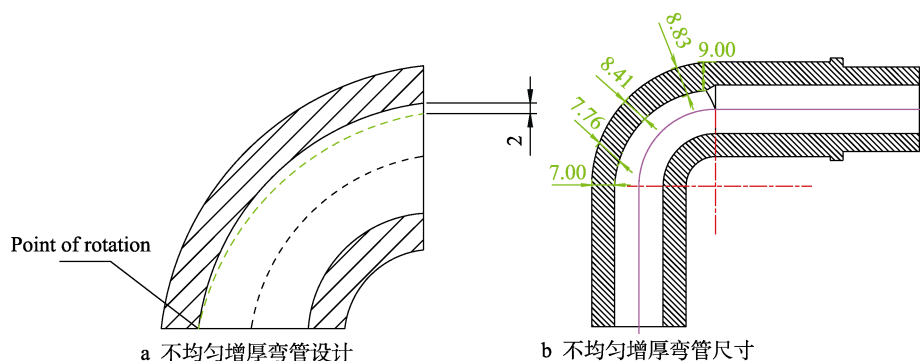


图1 不均匀增厚弯管设计图

Fig.1 Design diagram of unevenly thickened bend pipe: a) design of unevenly thickened bend pipes; b) dimensions of unevenly thickened bend pipes

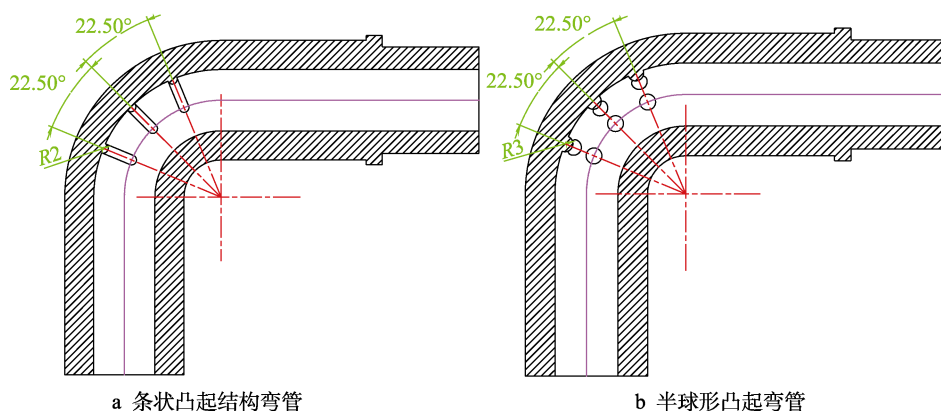


图2 凸起结构弯管设计图

Fig.2 Design diagram of bend pipe with protruding structures: a) bend pipe with strip-shaped protruding structures; b) bend pipe with hemispherical protruding structures

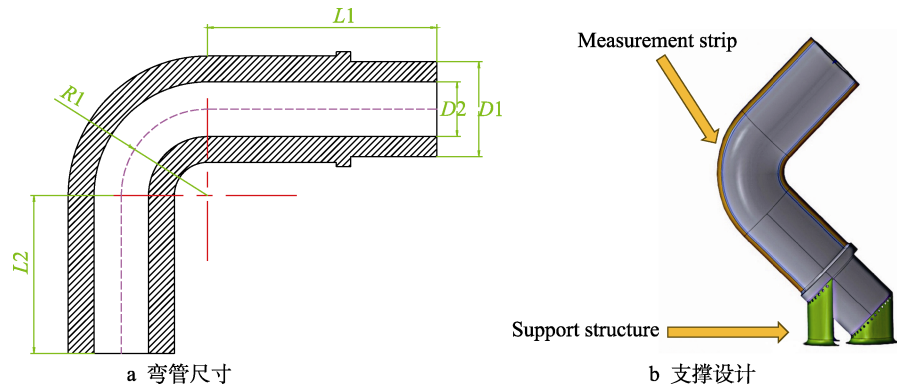


图 3 弯管建模

Fig.3 Bend pipe modeling: a) bend size; b) support design

本研究所使用的所有工件均由华曙高科（型号 FS421）设备打印，打印粉末为 AISi10Mg。磨粒流试验所使用的是 SMK 单向磨粒流机床。如图 4 所示，该机床工作原理为液压推动活塞，挤压流体磨料，磨料流经工件表面后重新挤出回到料缸中，形成循环。在此过程中，磨粒对工件表面进行微量的切除，从而达到抛光的目的。磨粒流机床可设置的主要参数有：压力、加工时间、循环次数等。由于不同结构的流道可能造成加工时间不一致，因此本研究选用循环次数来加工不同的弯管。根据加工经验，铝合金的硬度相对磨料较低，所以设置加工压力为 10 MPa，加工循

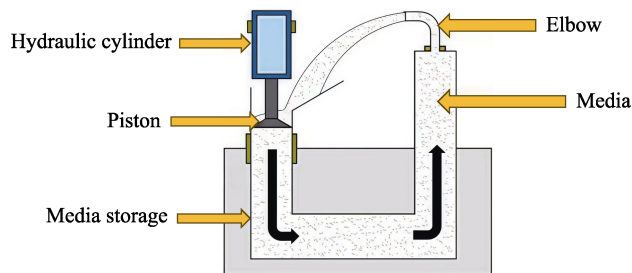


图 4 磨粒流加工设备原理

Fig.4 Principles of abrasive particle flow machining equipment

环次数分别为 40、60、80、100、120、140 次，在室温下对 SLM 制造的普通弯管进行加工。加工后对入口及出口处的流道粗糙度进行分析，以获取合适的工次数。

在上述不同循环次数下，使用手持式粗糙度测量仪对普通弯管的磨料入口处与出口处进行粗糙度测量，并绘制表面粗糙度随循环次数的变化点线图。如图 5 所示，流道的表面粗糙度随着循环次数的增加而下降。入口承受的切削力最强，因此在 0~20 次这个阶段，粗糙度下降速度极快，此时入口处 Ra 为 $0.296 \mu\text{m}$ 、出口处 Ra 为 $2.097 \mu\text{m}$ ，分别下降 97%与 72%。随着循环次数的上升，在加工 20~60 次时入口处粗糙度有上升的趋势，这可能是由于在过高的加工次数下，磨粒的无序运动产生了新的划痕或凹坑，导致粗糙度上升。加工 60~100 次时，进出口处的粗糙度均在下降，100 次时进口处 Ra 为 $0.307 \mu\text{m}$ 、出口处 Ra 为 $0.395 \mu\text{m}$ ，这时进出口粗糙度接近，已相对较低。在加工 100~140 次时，进出口的粗糙度重新开始上升。综上所述，在 10 MPa 下，经过 100 次加工循环的弯管粗糙度最优，因此选择此参数进行试验探究。

本研究使用的为机器配套的磨料，由碳化硅颗粒（36 目）、聚合物基体及加工油组成，磨料介质表现

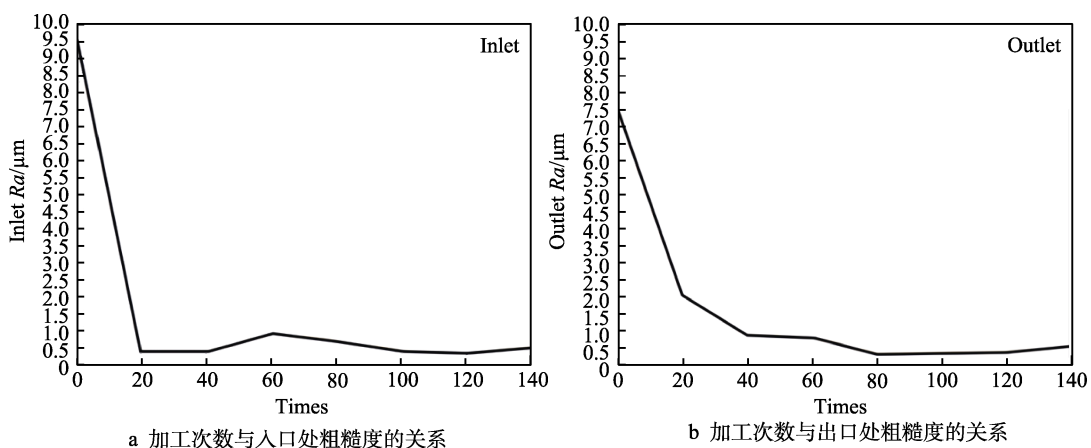


图 5 加工次数与粗糙度的关系

Fig.5 Relationship between machining times and roughness: a) relationship between machining times and inlet roughness; b) relationship between machining times and outlet roughness

出一种特殊的流变特性,即黏弹性,介质的流变行为是影响仿真准确性的主要因素之一。采用安东帕 MCR92 流变仪与 $\phi 25\text{ mm}$ 转子,在 1 mm 磨料介质厚度下进行流变实验。得出在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,磨料的储能模量 G' 、耗能模量 G'' 与复数黏度 η^* ,如图 6 所示。

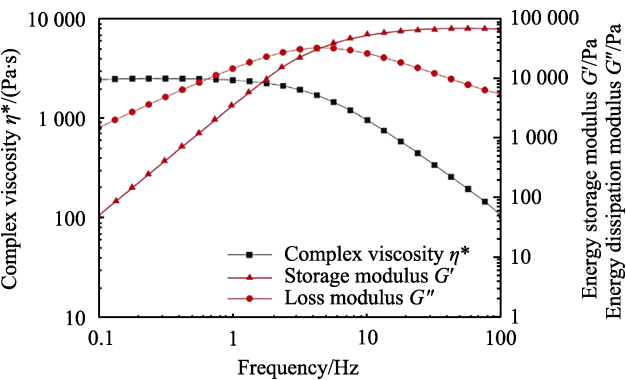


图 6 25 °C 磨料参数
Fig.6 Abrasive parameters at 25 °C

根据图 6 的检测结果,可以发现磨料在低频下储能模量 G' 小于耗能模量 G'' ,磨料介质具有较好的流动性;而在高频时,储能模量 G' 大于耗能模量 G'' ,磨料更偏向弹性固体。因此本研究所使用的磨料具有典型的黏弹性,且黏度随着频率增高逐渐降低,发生剪切稀化现象。为了模拟这种流变行为,采用非牛顿流体 Carreau-Yasuda 为介质的流体模型。式 (1) 为 Carreau-Yasuda 非牛顿流体模型方程:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\gamma \lambda)^{\alpha}]^{(n-1)/\alpha} \tag{1}$$

式中: n 为非牛顿指数(对于剪切变稀流体 $n < 1$); η_{∞} 为在高剪切速率下的黏度; η_0 为在 0 m/s 剪切速率下的黏度; λ 为介质的松弛时间; α 为 Yasuda 指数; γ 为剪切速率。

图 7 显示了介质黏度随剪切速率的变化曲线,基于此,确定了 Carreau-Yasuda (式 (1)) 模型的本构参数。仿真参数见表 1,其中弯管入口为压力入口,压力值为 10 MPa ,出口为压力出口,压力值为 0 MPa ,仿真条件与实验条件一致。

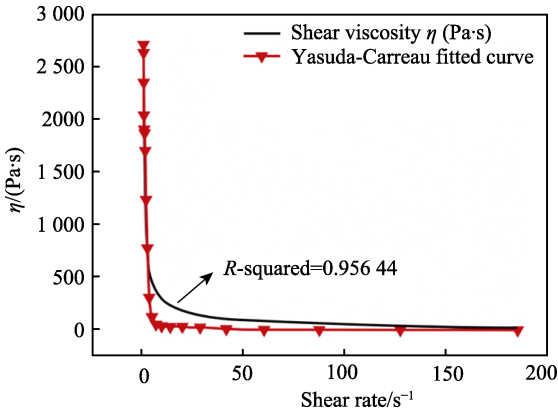


图 7 Carreau-Yasuda 模型拟合
Fig.7 Carreau-Yasuda model fitting

表 1 仿真参数设置
Tab.1 Simulation parameter settings

Category	Title	Parameter
Mathematical model	Multiphase Viscous	Mixture
	Primary phase	Laminar Media
Material properties	Secondary phase model	SIC
	Infinite-shear viscosity, η_{∞}	Carreau-Yasuda
	Zero shear viscosity, η_0	4.156 Pa·s
	Relaxation coefficient, λ	2 713.9 Pa·s
	Power constant, n	4.025 s
Boundary condition	Shear-thinning parameter, α	0.420
	Diameter of SIC	3.505
	Inlet	0.6 mm
	Outlet	10 MPa
	Wall	0 MPa
Solve settings		No slip
	Scheme	SIMPLEC

2 结果与分析

2.1 基于数值模拟的各结构弯管压力对比分析

如图 8 所示,分别在入口段和出口段各取 100 个点,在弯管段取 350 个点,每个形状的弯管取 1 100 个数值点。根据流道的形状, B 型(不均匀增厚)比 A 型(普通弯管)多了增厚层, A 型与 B 型流道相似,所以将 A 型与 B 型分为一组讨论; C 型(条状凸起)和 D 型(半球凸起)弯管同在流道内设计了不同形状的结构,所以将 C 型与 D 型弯管分为一组讨论。

由图 9a 可知,在点 0~470 范围内 A 型弯管压力小于 B 型弯管。这是由于不均匀增厚结构的流道直径小于普通弯管。A 型弯管(普通弯管)在弯管段外侧(点 150~450)存在压力突变,同时 B 型弯管(不均匀增厚)在入口倒角处(点 110~150)存在压力突变,磨料流经弯管段时也会对弯管段进行冲击,因此 B 型弯管段也存在一定的过磨现象。B 型弯管在入口段压力高于 A 型弯管,在经过倒角后,内侧壁面压力快速下降,低于 A 型弯管内侧压力。从图 8b 内侧压力曲线发现, A、B 型弯管在弯管段内侧呈现出压力一直下降的趋势。在一定条件下,磨粒流加工时的去除量可以用 Preston^[27] 方程来表示:

$$\Delta z = \int_0^t k_p v dt \tag{2}$$

式中: Δz 为磨粒流切削量; t 为加工时间; v 为磨料速度; P 为壁面压力; k_p 为比例常数,与磨料本身属性有关。

由 Preston 方程可知,磨粒流的去除量与压力相关,结合压力曲线图与压力云图可以预测加工后, A 型弯管在弯管段外侧存在过磨现象, B 型弯管在倒角处、弯管段去除量最大,且内侧容易出现加工不均匀现象。A、B 型弯管压力分布见图 10。

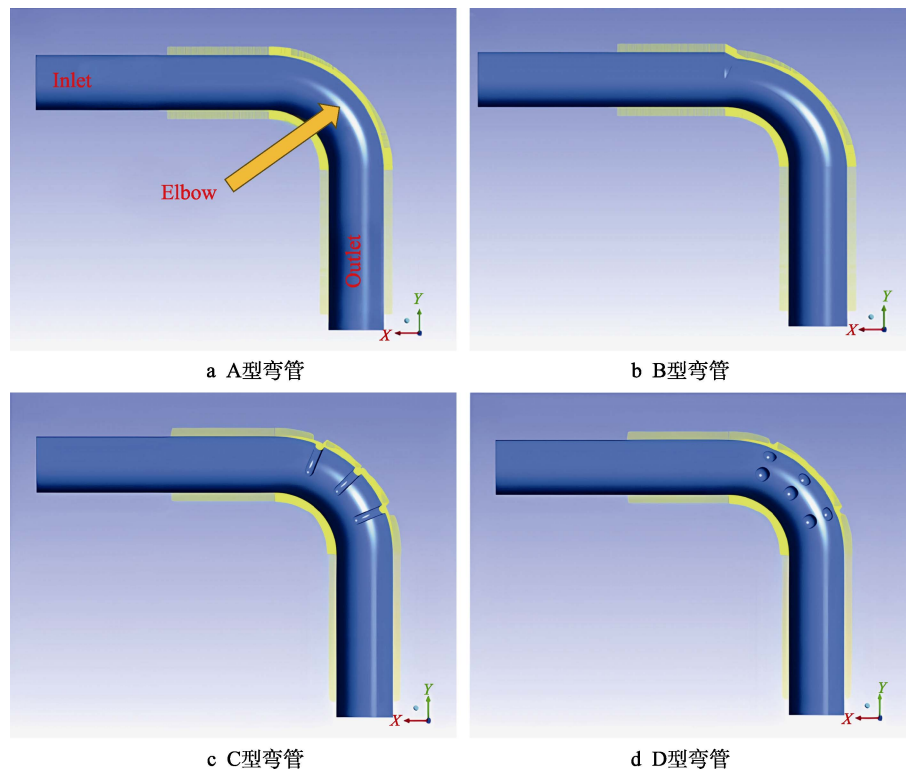


图 8 弯管仿真取点

Fig.8 Data point acquisition in bend pipe simulation: a) type A bend pipe; b) type B bend pipe; c) type C bend pipe; d) type D bend pipe

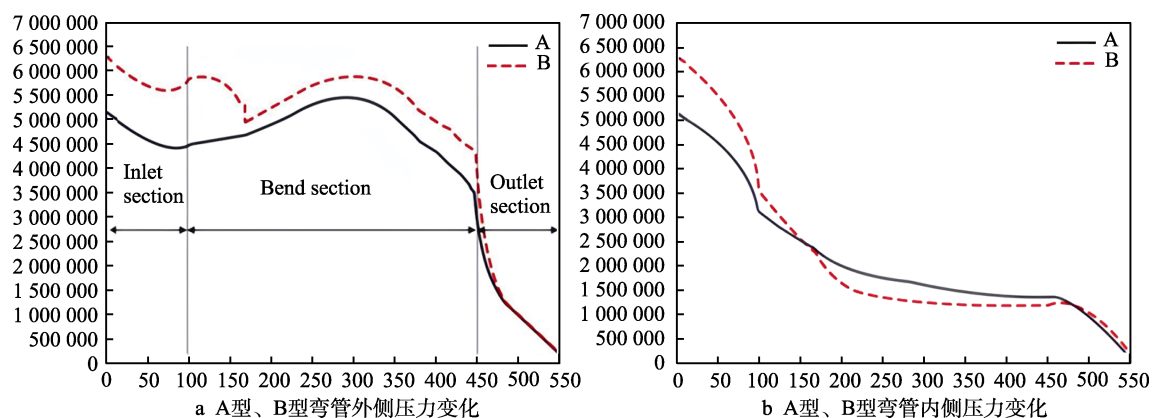


图 9 A、B 型弯管内外侧压力变化曲线

Fig.9 Pressure variation curves on the inner and outer sides of type A and type B bend pipes: a) pressure variation on the outer side of type A and type B bend pipes; b) pressure variation on the inner side of type A and type B bend pipes

从图 11a~b 可以发现 C 型与 D 型弯管整体压力趋势基本一致, 压力在条状凸起与半球凸起迎向磨粒流的一侧远高于凸起结构另一侧, 导致压力变化波动较大, 同时在弯管段中间位置凸起结构两侧的压力差值达到最大, 结合 Preston 公式与图 11c~d 可以预测出加工过后的结果: C 型与 D 型弯管中的弯管段凸起结构在迎向磨粒流一侧加工后会存在严重变形, C 型、D 型弯管段内侧比 A 型弯管段内侧去除量高。

2.2 不同流道样点处去除量变化规律

增材制造工艺打印件存在一定误差, 将上述 B、C、D 型弯管各打印一件, 在 10 MPa、100 次循环次

数的工艺参数下加工弯管工件, 通过测量仪测得加工前后壁厚, 得出切削去除量。使用线切割机床剖开加工后弯管工件如图 12 所示。并在零件内、外侧各选取 11 个测量点, 入口段分布 3 个点, 弯管段分布 4 个点, 出口段分布 4 个点, 外侧样点为①~⑪号, 内侧样点为⑫~⑳号, 如图 13 所示。

使用影像测量仪对 11 个点处的壁厚进行测量, 获得内外侧去除量如图 14 所示。图 14a 为 A 型和 B 型弯管的外侧去除量, 从图 14a 可以发现, 在 A 型弯管的点 5 处, 磨料由于惯性力对该点造成冲击, 使该点处的去除量最大, 之后随着压力的降低, 去除量整体呈下降的趋势。同时值得注意的是, B 型弯管在点

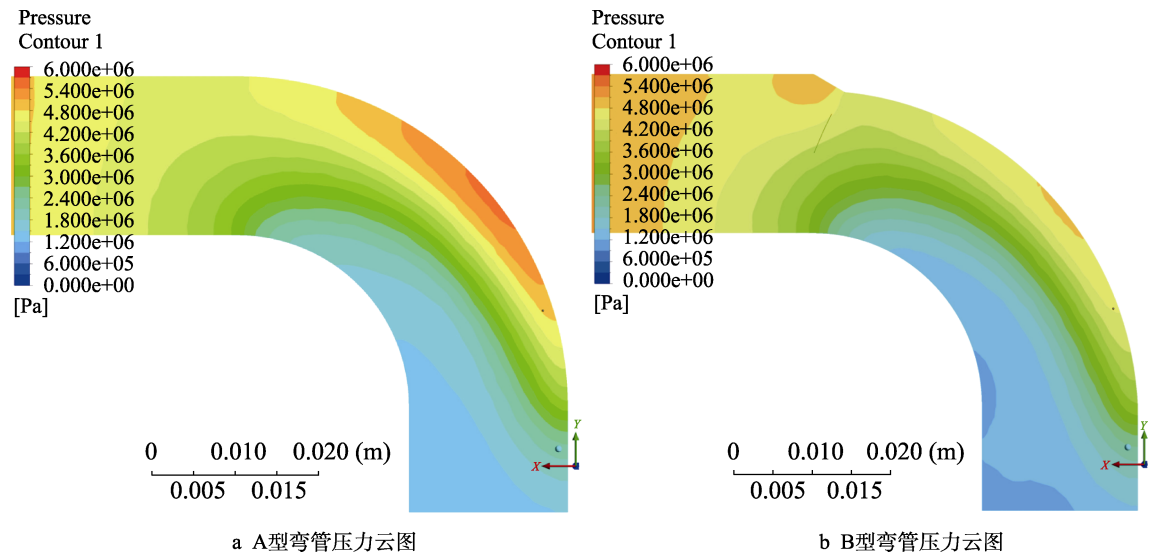


图 10 A、B 型弯管压力分布
Fig.10 Pressure distribution of type A and type B bend pipes: a) pressure contour map of type A bend pipe; b) pressure contour map of type B bend pipe

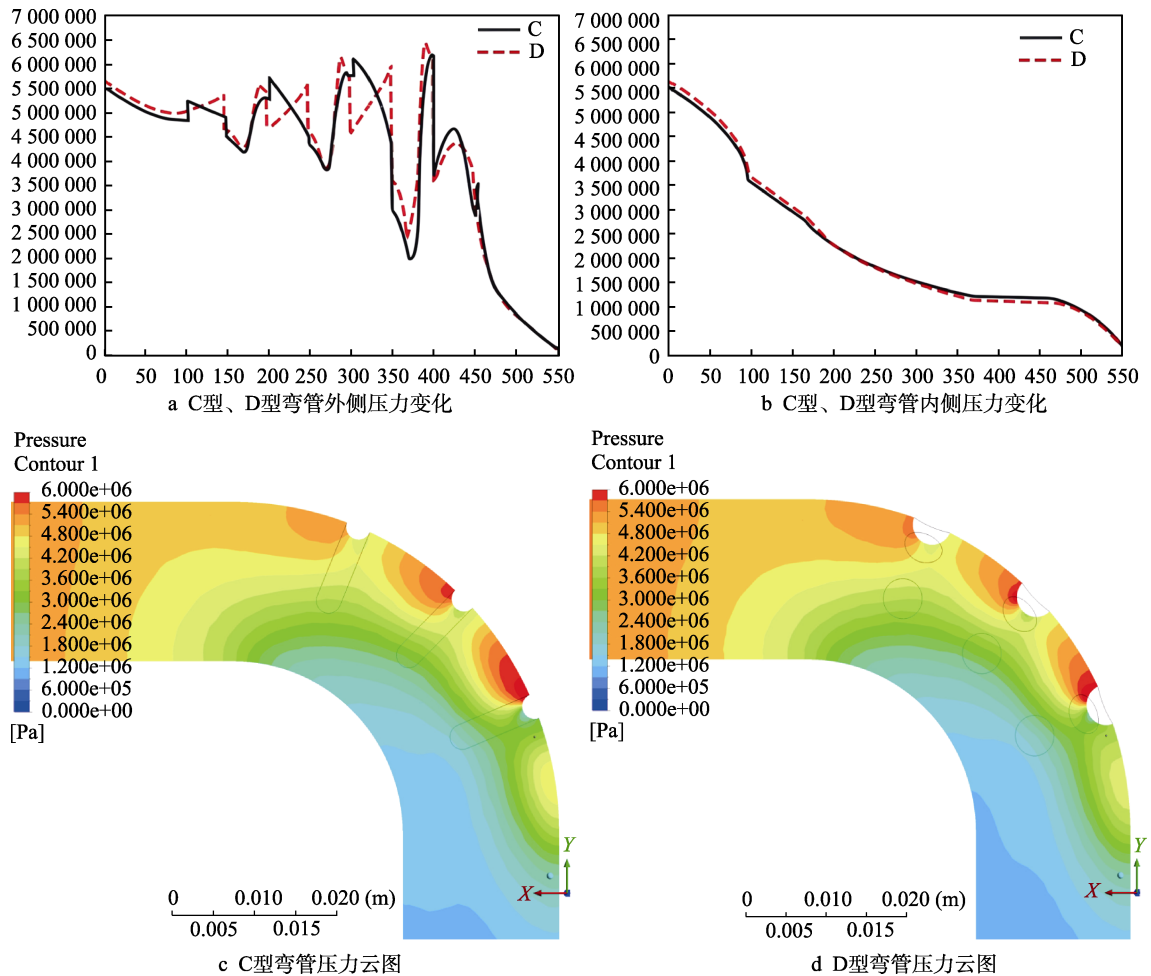


图 11 C、D 型弯管内外侧压力对比
Fig.11 Pressure variation curves on the inner and outer sides of type C and type D bend pipes: a) pressure variation on the outer side of type C and type D bend pipes; b) pressure variation on the inner side of type C and type D bend pipes; c) pressure contour map of type C bend pipe; d) pressure contour map of type D bend pipe

5 处由于厚度的增加，流道直径小于 A 型弯管，磨料直接冲击到增厚处的倒角位置，因此该点处的去除量

显著增加，比普通弯管去除量增加 20.7%，之后的去除量也呈整体下降的趋势，内壁表面去除量呈连续均

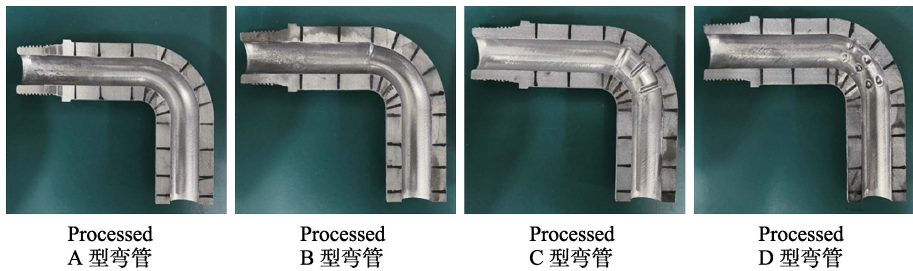


图 12 磨粒流加工后弯管
Fig.12 Bend pipe after abrasive flow machining

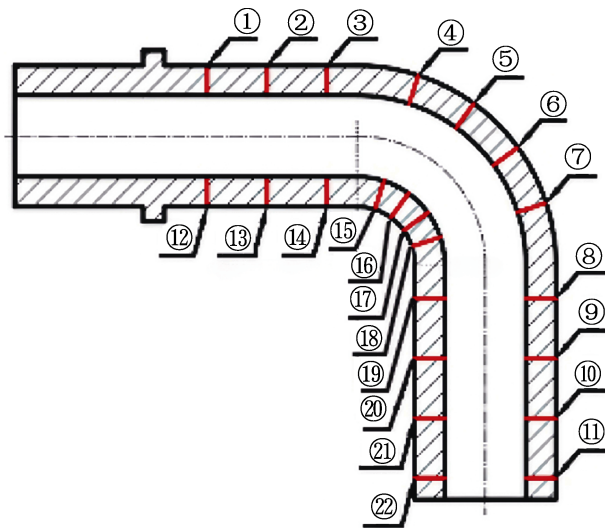


图 13 弯管测量样点分布
Fig.13 Distribution of measurement sampling points on bend pipes

匀的梯度变化。图 14b 为 A 型和 B 型弯管的内侧去除量, 可以看出 A 型和 B 型弯管的内侧去除量整体趋势相似, 且 B 型弯管的内侧去除量略微低于 A 型弯管, 其在点 4 处的去除量最高, 随后大幅降低, 这是因为磨料由于惯性力作用, 只有少部分磨料沿着内侧流动, 所以内侧去除量较少。

图 15a 为 C、D 型弯管的外侧去除量。与 A、B

型弯管不同的是, C 型和 D 型弯管在点 3 处就出现了去除量的突变, 这是因为由于凸起结构的设置, 阻碍了磨料的流动, 因此对点 3 附近的管壁去除量较大, 特别是 C 型弯管, 阻碍的面积大于 D 型弯管, 所以 C 型弯管该点的去除量显著大于 D 型, 去除量相比普通弯管分别增加了 67.2%和 47.5%。同时在点 6 到点 7 处, 去除量又开始上升, 可能是因为磨料从布满凸起的弯管外侧流入出口直管段, 流道截面积不再发生大的改变, 因此去除量有增大的现象。但由于 C 型和 D 型弯管增加了特殊结构, 改变了磨料的流向, 所以 C 型和 D 型凸起结构的周围都有很大的去除量波动, 虽然可以减少过磨但难以控制稳定的表面粗糙度。

图 15b 为 C 型和 D 型弯管的内侧去除量, 其中 C 型和 D 型弯管在内侧的去除量与 A 型和 B 型的趋势不同, 这是因为弯管处凸起的结构迫使磨料压向内侧, 导致弯管肘部内侧 (点 5~7 处) 的去除量相比 A 型弯管有显著提升, 分别提升 172%和 151%, 同时可以观察到 C 型弯管内侧的去除量要高于 D 型弯管, 这是因为部分磨料从 C 型弯管凸起结构之间的缝隙流过, 于是被压向内侧的磨料增加, 所以 C 型弯管段内侧去除量更高。

2.3 流道形状对弯管形状精度的影响

使用便携式三维扫描仪对加工后的弯管进行扫

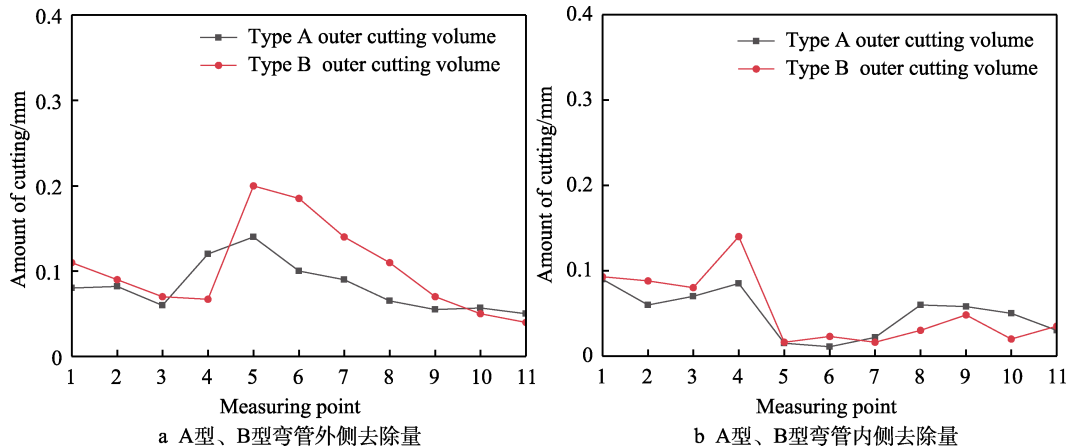


图 14 A、B 型弯管内外侧去除量对比
Fig.14 Comparative analysis of material removal on the inner and outer sides of type A and B bend pipes: a) material removal on the outer side of type A and B bend pipes; b) material removal on the inner side of type A and B bend pipes

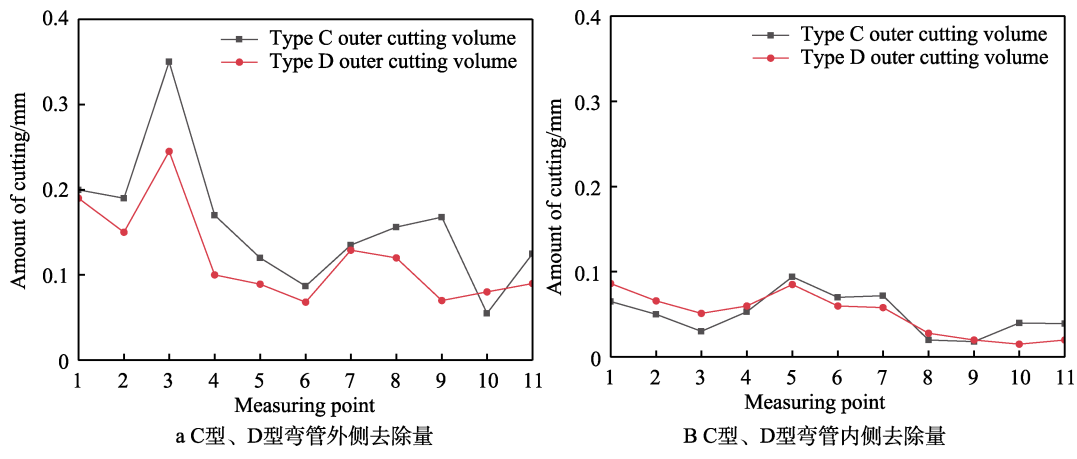


图 15 C、D 型弯管内外侧去除量对比

Fig.15 Comparative analysis of material removal on the inner and outer sides of type C and D bend pipes: a) material removal on the outer side of type C and D bend pipes; b) material removal on the inner side of type C and D bend pipes

描，随后在 Geomagic Control X 软件中以流道为基准面进行拟合，并导出模型偏差云图附在实验弯管的主要磨损部位。由于打印误差与线切割的误差不可避免，所以模型拟合也存在一定误差，图 16 中深蓝色块代表毛坯比加工后弯管少的部分，红色色块代表毛坯比加工后零件多的部分，即红色部分为去除掉的材料，蓝色部分为误差值，误差范围为-0.04~0.02 mm。

图 16a 为 A 型管的拟合偏差云图，图 16b 为 B 型管的拟合偏差云图。对比发现，A 型和 B 型的内侧流道去除量接近。其中内侧拟合偏差分别为，A 型弯

管：0.068、0.034、0.057、0.064、0.053、0.041、0.048；B 型弯管：0.076、0.047、0.045、0.054、0.059、0.047、0.043，A 型弯管弯道内侧前段去除量低于 B 型弯管，中间比 B 型弯管略高，后半段与 B 型弯管接近。可以发现实际加工结果与仿真结果接近，A 型弯管在弯管段外侧存在过磨现象，B 型弯管在倒角处、弯管段去除量最大。不均匀增厚相当于增加了加工余量，所以 B 型管更容易保证加工后精度。C、D 型弯管在凸起结构部分去除量过多，凸起结构迎向磨粒流的一侧均出现了严重过磨现象，造成流道形状变形，影响了使用精度。

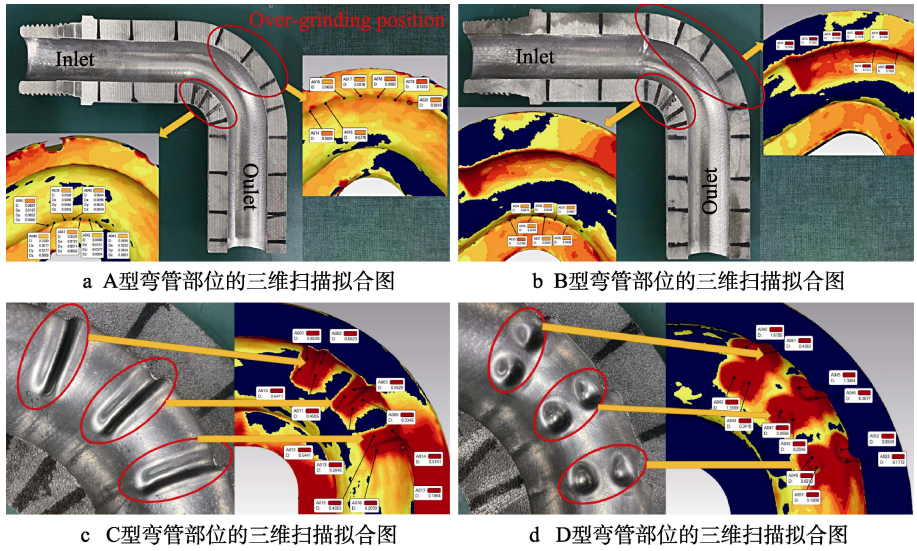


图 16 弯管三维扫描拟合图

Fig.16 3D scanning fitting diagram of bend pipe: a) 3D scanning fitting of type A bend pipe; b) 3D scanning fitting of type B bend pipe; c) 3D scanning fitting of type C bend pipe; d) 3D scanning fitting of type D bend pipe

3 结论

1) 通过数值模拟和实验相结合的方法，对比分析了 3 种创新结构弯管在肘部弯的压力和去除量的

变化关系，揭示了 3 种创新结构对肘部弯过磨的影响规律，研究表明，普通弯管和 3 种创新结构弯管压力都在弯管段外侧达到最大，不均匀增厚弯管在倒角处存在压力增大突变，导致在该处的去除量增大。不均

匀增厚弯管可以显著减少肘部过磨,保持内壁表面连续均匀的梯度变化,而2种凸起结构导致随形去除量波动,虽然可以减少过磨但难以控制稳定的表面粗糙度。

2) 通过加工试验,得到了各弯管磨粒流加工时内部去除量在标定测量点的变化规律。实验结果表明,加工后3种结构弯管的形状精度从大到小依次为:不均匀增厚>半球凸起>条状凸起。不均匀增厚型弯管由于厚度增加,流道直径变小,倒角位置的去除量显著增加,比普通弯管去除量增加20.7%。普通弯管和不均匀增厚弯管内侧去除量整体趋势相似。带有凸起结构的弯管由于凸起结构的设置,阻碍了磨料的流动,因此在凸起结构管壁附近去除量较大,条状凸起弯管去除量显著大于半球形凸起弯管,去除量相比普通弯管分别增加了67.2%和47.5%,同时,弯管肘部内侧的去除量相比普通弯管和不均匀增厚弯管均有显著提升,分别提升172%和151%。

3) 不均匀增厚弯管可以作为参考,通过对旋转角度、倒角深度、倒角角度的参数优化,并结合冲蚀磨损模型,对不均匀增厚结构进行改进,从而起到保护弯管且不影响流道尺寸的作用。同时,可以通过双向磨粒流加工方法,来进行弯管加工实验,验证对弯管过磨的优化效果。

参考文献:

- [1] 杨永强,陈杰,宋长辉,等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 9-21.
YANG Y Q, CHEN J, SONG C H, et al. Current Status and Progress on Technology of Selective Laser Melting of Metal Parts[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 9-21.
- [2] 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.
- [3] OLAKANMI E O, COCHRANE R F, DALGARNO K W. A Review on Selective Laser Sintering/Melting (SLS/SLM) of Aluminium Alloy Powders: Processing, Microstructure, and Properties[J]. Progress in Materials Science, 2015, 74: 401-477.
- [4] 李琛, 计时鸣, 谭大鹏, 等. 软性磨粒流加工特性及近壁区域微切削机理[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 161-168.
LI C, JI S M, TAN D P, et al. Study of near Wall Area Micro-Cutting Mechanism and Finishing Characteristics for Softness Abrasive Flow Finishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 161-168.
- [5] PETARE A C, JAIN N K. A Critical Review of Past Research and Advances in Abrasive Flow Finishing Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1): 741-782.
- [6] CHOOPANI Y, KHAJEHZADEH M, RAZFAR M R. Using Inverse Replica Fixture Technique for Improving Nano-Finishing of Hip Joint Implant in Abrasive Flow Finishing Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(11): 3035-3050.
- [7] FENG Z. Research Progress of Magnetorheological Finishing Technology at CIOMP[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 092202.
- [8] MALI H S, MANNA A. Current Status and Application of Abrasive Flow Finishing Processes: A Review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(7): 809-820.
- [9] JI S M, XIAO F Q, TAN D P. Analytical Method for Softness Abrasive Flow Field Based on Discrete Phase Model[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(10): 2867-2877.
- [10] 尹洪超, 刘霄, 翟镇德, 等. 多角度弯曲管磨粒流加工数值模拟研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(11): 1299-1306.
YIN H C, LIU X, ZHAI Z D, et al. Numerical Simulation of Abrasive Flow Machining in Multi-Angle Elbows[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(11): 1299-1306.
- [11] JAIN V K, ADSUL S G. Experimental Investigations into Abrasive Flow Machining (AFM)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(7): 1003-1021.
- [12] 邓彝. 钛合金人工关节曲面磨粒流精密加工技术[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015: 1-11.
DENG B. Precision Machining Technology of Abrasive Flow on Titanium Alloy Artificial Joint Surface[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015: 1-11.
- [13] KAR K K, RAVIKUMAR N L, TAILOR P B, et al. Performance Evaluation and Rheological Characterization of Newly Developed Butyl Rubber Based Media for Abrasive Flow Machining Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(4): 2212-2221.
- [14] 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.
TANG Y, ZHOU D M, XIA W, et al. Some Investigation on the Characteristic of Wall Sliding in Abrasive Flow Machining[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2001, 29(1): 34-37.

- [15] 王坤, 胡杰珍, 王贵, 等. 管流式冲蚀装置异径管固液两相流场数值分析[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(9): 831-837.
WANG K, HU J Z, WANG G, et al. Erosion-Corrosion of Solid-Liquid Phase Flow-Field in Heterodiameter Pipeline: A Simulation and Experimental Study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(9): 831-837.
- [16] 李昉. 离心泵内部固液两相流动数值模拟与磨损特性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
LI Y. Numerical Simulation of Solid-liquid Two-phase Flow in Centrifugal Pump and Study on Wear Characteristics[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014.
- [17] 殷华锋, 徐小兵, 涂亚东, 等. 搅拌罐内固液两相流数值模拟研究现状[J]. 化学工程与装备, 2017(11): 213-214.
YIN H F, XU X B, TU Y D, et al. Research Status of Numerical Simulation of Solid-Liquid Two-Phase Flow in Stirred Tank[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2017(11): 213-214.
- [18] 王坤, 吕伊凡, 李方祺, 等. 3D 打印膝关节曲面磨粒流抛光数值模拟及实验研究[J]. 表面技术, 2024, 53(22): 149-160.
WANG K, LYU Y F, LI F Q, et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Abrasive Flow Machining of 3D Printed Knee Joint Surfaces[J]. Surface Technology, 2024, 53(22): 149-160.
- [19] ZOLFAGHARNASAB M H, SALIMI M, ZOLFAGHARNASAB H, et al. A Novel Numerical Investigation of Erosion Wear over Various 90-Degree Elbow Duct Sections[J]. Powder Technology, 2021, 380: 1-17.
- [20] 王景坡, 宋超, 凌洋, 等. 多通管接头磨粒流光整均匀性研究[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 299-307.
WANG J P, SONG C, LING Y, et al. The Uniformity of the Abrasive Flow Machining of Multi-Way Pipe Joint[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 299-307.
- [21] 李俊焯, 许颖, 杨立峰, 等. 非直线管零件的磨粒流加工实验研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(13): 1729-1734.
LI J Y, XU Y, YANG L F, et al. Research on Abrasive Flow Machining Experiments of Non-Linear Tubes[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(13): 1729-1734.
- [22] LI R, SUN Z Q, LI A J, et al. Design Optimization of Hemispherical Protrusion for Mitigating Elbow Erosion via CFD-DPM[J]. Powder Technology, 2022, 398: 117128.
- [23] 孙鸿志. 管道弯头仿生表面耐冲蚀磨损性能及机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
SUN H Z. Study on Erosion Resistance and Mechanism of Bionic Surface of Pipeline Elbow[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [24] 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.
- [25] 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 Technology, 2011, 211(11): 1742-1748.
- [26] LV Y F, WANG K, LI F Q, et al. Research on the Prediction of Material Removal and Over-Grinding Optimization for Abrasive Flow Machining of 3D Printed Right-Angle Bends[J]. physscr, 2024, 99(12): 125913.
- [27] PRESTON F W. Glass technology[J]. Journal of the Society of Glass Technology, 1927, 11: 277-281.