DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.05.002

基于低频振动辅助制孔工艺的 TC6 与 TC4 钛合金断屑排屑特性对比研究

朱强[1,2],王德善[3],仲庆龙[3],陈燕[1],杨浩骏[2],杨宗辉[1]

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016;
2. 江苏集萃精密制造研究院有限公司,江苏 南京 211800;
3. 中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心,江苏 南京 210061)

摘　要:为解决钻削钛合金难断屑的问题,开展 TC6 与 TC4 钛合金低频振动辅助制孔试验,对比分析材料属性和加工参数对钛合金断屑和排屑特性的影响规律。结果表明:与 TC4 相比,TC6 的断屑和排屑相对困难。对于 TC4 钛合金,当振幅与进给量的比值高于 0.5 时即可实现良好的断屑和排屑;对于 TC6 钛合金,振幅与进给量的比值则需提升至 0.8 才可实现有效断屑和顺畅排屑。

关键词:TC6;TC4;低频振动制孔;断屑排屑特性
中图分类号:TG52　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5276(2026)05-0017-05

Comparative Study on Chip Breaking and Chip Evacuation Characteristics of TC6 and TC4 Titanium Alloys Based on Low-Frequency Vibration-Assisted Drilling Process

Zhu Qiang[1,2], Wang Deshan[3], Zhong Qinglong[3], Chen Yan[1], Yang Haojun[2], Yang Zonghui[1]

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Jiangsu Jicui Precision Manufacturing Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211800, China; 3. Aviation Industry Corporation of China Jincheng Nanjing Electromechanical Hydraulic Engineering Research Center, Nanjing 210061, China)

Abstract: To address the difficulty of chip breaking in drilling titanium alloys, experiments on low-frequency vibration-assisted drilling of TC6 and TC4 are conducted. Comparative analyses were performed on the influences of material properties and machining parameters on the chip breaking and chip evacuation characteristics. The results indicates that compared with TC4, chip breaking and evacuation are relatively more difficult for TC6. For TC4 titanium alloy, a ratio of amplitude to feed rate greater than 0.5 achieves good chip breaking and evacuation. For TC6 titanium alloy, this ratio needs to be increased to 0.8 to achieve effective chip breaking and smooth chip evacuation.

Keywords: TC6; TC4; low-frequency vibration drilling; chip breaking and evacuation characteristics

0　引言

为降低机身质量,提升航空飞行燃油经济性,航空航天工业对高比强度材料存在迫切需求。钛合金作为高比强度金属材料的典型代表,兼具优异的抗断裂韧性和较高的耐腐蚀性,在高温下仍能保持良好的力学性能。因此在航空航天领域应用广泛;且随着技术更新迭代,钛合金的用量占比逐渐攀升,其应用水平也代表着装备的先进程度[1]。其中 α-β 型钛合金兼具较高强度与良好韧性,在航空结构件应用最为广泛,例如 TC4、TC6 等。TC4 是国内外应用广泛的钛合金种类之一,占航空航天工业钛合金的半成品总产量的 80%以上[2]。TC6 属于马氏体 α-β 型钛合金,由于材料中含有同晶型 β 稳定元素 Mo 和共析型 β 稳定元素 Cr、Fe、Si,与 TC4 相比,TC6 钛合金的室温强度更高,且具有更高的热强性能,是一种理想的航空材料,被广泛应用于航空发动机压气机盘、叶片及机载零部件。

由于钛合金材料韧性较大、线膨胀系数和比热容较低,其导热率约为铝合金的 1/15、钢的 1/5,导致其具有切削加工抗力大、刀尖温度高的特点,属于典型难加工材料。尤其它在钻削加工过程中,会形成炽热的连续切屑,导致其与已加工孔壁发生强烈的摩擦效应。其结果轻则损伤孔壁、降低制孔精度,重则导致刀具崩刃,甚至折断。

基金项目:国家自然科学基金项目(51875284)
第一作者简介:朱强(1994—),男,山东泰安人,博士研究生,研究方向为高效精密制孔,zhuqchn@ nuaa.edu.cn。

因此钛合金的高效精密孔加工技术,一直是研究的热点方向,形成了包括钻头结构优化、工艺革新、工艺参数优化、冷却润滑形式优化等诸多研究方向,并逐步形成了以断屑、排屑状态为主要评价指标的工艺优化思路。

低频振动辅助制孔技术指钻头在进给的同时施加轴向振动,从而实现钻头与被加工表面的周期性分离,从运动学上实现强制性断屑,且在二者分离过程中,刀具得以冷却,这有效降低钻削温度,提高刀具使用寿命。目前该技术已在航空航天领域得到广泛应用,Pecat 等[3]对 TC4 进行了低频振动辅助制孔和传统制孔加工对比研究。结果表明,在一定参数条件下采用低频振动可实现良好的断屑和排屑,钻削温度下降约 43%;且在钻削碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)/TC4 叠层材料时,实现 TC4 层良好断屑,避免了连续、锋利且炽热的钛合金切屑对 CFRP 造成严重划伤,使 CFRP 孔壁表面的加工质量显著改善。Li 等[4]针对 CFRP/TC4 叠层材料,展开不同的钻削加工技术研究[5-8],发现低频振动辅助制孔技术能起到良好断屑效果并提供了较好的排屑环境,减少了排屑过程中切屑与孔壁的摩擦,加工过程稳定性增加,有利于减少刀具磨损和崩刃现象的发生。Xu 等[9]发现低频振动辅助制孔技术所获得的孔的圆柱度均优于传统钻削加工,这是因为断续钻削加工产生的不连续切屑减少了对孔的几何精度影响。

尽管低频振动辅助制孔技术可实现刀具往复振动,从而达到断续钻削目的,然而其必须在合适的工艺参数组合下,才能实现良好的断屑和排屑。Yang 等[10]在钻削 TC4 材料时发现,采用低频振动辅助制孔可获得单片扇形切屑,这并非排屑顺畅的充分条件,提出可通过提高振幅、降低进给量等方式,有助于获得扇形角更小的切屑,进而利于排屑。然而振幅并非越高越好,Hussein 等[11]为此展开研究结果,表明振幅过高易产生较高的冲击和热能。Jiao 等[12]也指出,过大的振幅易使轴向力增加,从而导致钻削加工过程不稳定,并缩短刀具使用寿命。此外,Pecat 等[13]指出针对不同被加工材料进行低频振动辅助制孔所获得的断屑效果、切屑弧度及表面加工质量也存在较大差异。

鉴于 TC6 材料在航空航天领域应用日益广泛的现状与钻削加工领域研究资料相对匮乏的矛盾,本文选择 TC4 作为参照材料进行研究,进而探究低频振动辅助制孔工艺下,两种材料在不同加工参数情况下的切屑形貌及排屑特性,最终以材料钻削排屑顺畅为目标,给出加工工艺参数的优选范围。本文的研究结论可补充 TC6 钻削加工的基础数据,为提高加工质量、加工效率提供了指导性参数范围。

1 试验设备及工件

选用厚度均为 20 mm 的 TC6 和 TC4 板材进行低频振动辅助制孔试验,对比两种钛合金的断屑与排屑效果,材料的化学成分和力学性能分别如表 1 和表 2 所示。采用三轴数控加工中心 DMG CMX 1100Vc 进行钻削试验,其刀具最大转速为 20 000 r/min。低频振动发生器采用某公司生产的 PG8040 系列振幅可调式振动刀柄,频转比为 1.5 osc/rev,振幅在 5~250 μm 内离线调节,钻头采用直径为 6.35 mm 硬质合金双顶角钻头,具体工装和刀具形貌如图 1 所示。

为提升加工区域的冷却润滑效果,加工过程采用冷却液内冷方式,其压力设置为 20 bar。切屑形貌采用三维视频显微镜进行观测。全部试验中的切削速度和频转比均保持不变,分别为 20 m/min和 1.5 osc/rev,调整进给量和振动振幅进行全因素试验,具体加工参数如表 3 所示。

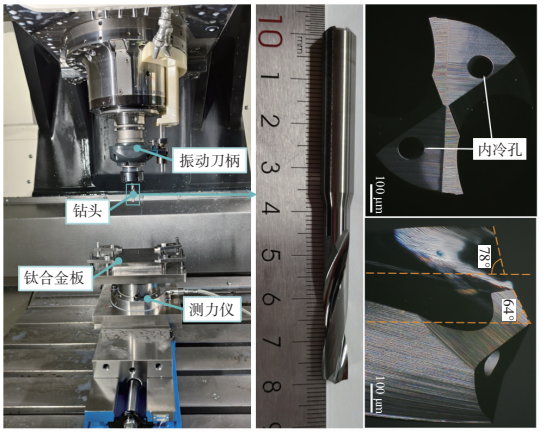


图 1 试验工装和制孔刀具

表 1 TC4 和 TC6 化学组成成分[14] 单位:%

材料	Ti	V	Al	Fe	N	H	C	Mo	Cr	Si
TC4	余量	4.40	6.15	0.09	0.01	0.005	0.05	2.71	1.42	0.33
TC6			6.29	0.42						

表 2 TC4 和 TC6 力学性能[15-16]

材料	密度 ρ/(g/cm^3)	弹性模量 E/GPa	抗拉强度 σ_b/MPa	延伸率 δ/%
TC4	4.44	109	930	8
TC6	4.50	113	980	10

表 3 试验加工参数

参数变量	数值
切削速度 Vc/(m/min)	20
频转比 ω/(osc/rev)	1.5
进给量 f_r/(mm/r)	0.04/0.06/0.08/0.10
振幅 A/mm	0.02/0.04/0.06/0.08

2 实验结果

2.1 断屑情况分析

图 2 为 TC6 和 TC4 在不同振幅和进给量条件下所获得切屑的形貌(本刊为黑白印刷,有疑问请咨询作者),可以发现即使引入低频振动也会存在连续型切屑状况,这是由于在低频振动辅助制孔中存在临界断屑振幅 A_{crit}[17],理论上仅当实际振幅高于或等于 A_{crit} 时才可实现良好断屑,由图 2(a)和图 2(b)可以发现本次试验中两种钛合金的实际断屑振幅与理论断屑模型基本一致,提升振幅、降低进给量利于实现断屑。A_{crit} 的表达式如下

$$A_{crit}=f_r/(2\cdot N_z\cdot|\sin(\omega\cdot\pi/N_z)|)$$

式中:f_r、N_z 和 ω 分别是进给量(mm/r)、钻头切削刃的数量和振动频转比(osc/rev)。在本试验条件下,$A_{crit}/f_r=0.35$。

在一定参数条件下低频振动所产生的钻削轨迹如图 3 所示,刀具与被加工材料表面出现周期性分离利于实现断屑,由于钛合金延伸率较高,最大相对空切高度越大时断屑效果越好。由图 4 仿真结果可知最大相对空切高度随振幅增大呈逐渐上升趋势,且当振幅由 0.02 mm 增加至 0.08 mm 时,相对空切高度增加 0.112 mm;最大相对空切高度随进给量增大呈逐渐降低趋势,进给量由 0.04 mm增大至 0.08 mm,相对空切高度降低 0.033 mm。结合图 2(a)和图 2(b)可发现 TC6 和 TC4 的断屑效果随加工参数变化,均随振幅提高和进给量降低表现出良好断屑效果。结合图 2(a)和图 2(b)中两种材料的切屑形貌可知,实际钻削加工 TC6 时存在较多断屑效果不佳的状况,这一方面是由于 TC6 材料的延伸率相对较高导致断屑相对困难易产生螺旋形、漏斗形或锥形切屑,另一方面与 TC6 较高的抗拉强度相关,此外,Mo 元素可有效提高钛合金材料的位错迁移率,表现出更高的冲击韧性[18],因此在对两种材料进行低频振动辅助制孔时,TC6 表现出较差的断屑性能。

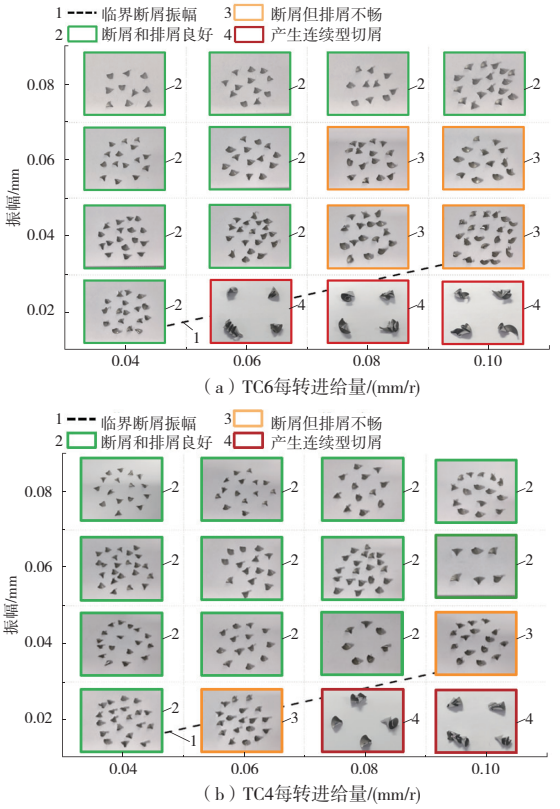


图 2 低频振动辅助制孔下获得的切屑形貌

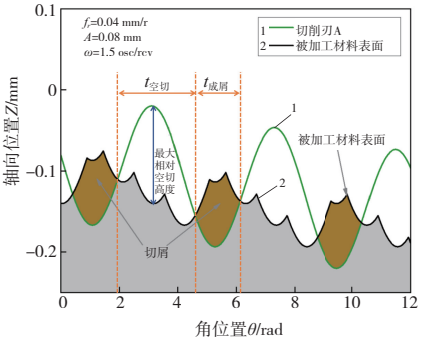
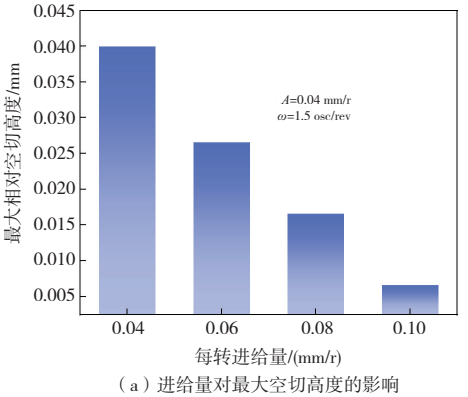
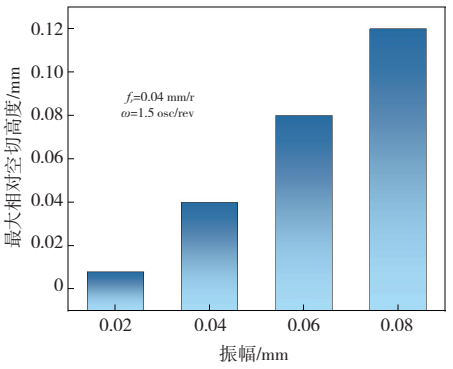


图 3 切削轨迹



(a) 进给量对最大空切高度的影响

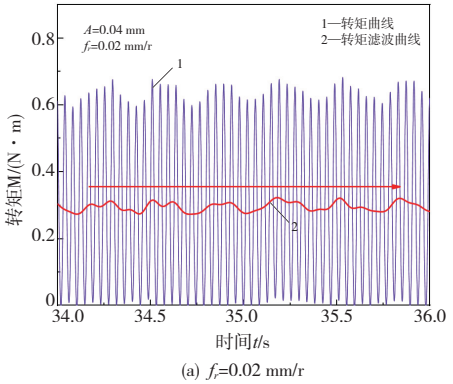


（b）振幅对最大空切高度的影响

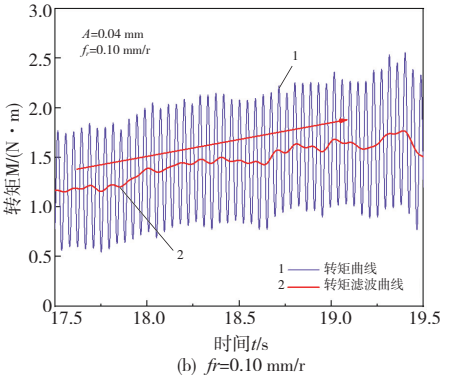
图 4　不同加工参数对最大相对空切高度的影响

2.2　排屑特性研究

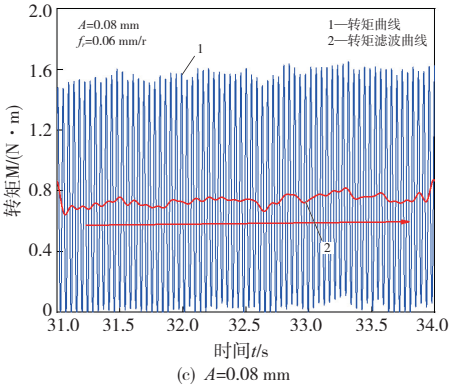
切屑阻塞会导致钻削转矩变化曲线呈整体上升趋势,本文以转矩出现明显增大作为排屑不畅的判断依据,所产生切屑的形貌如图 2 边框 3 所示。由图 2 可以发现在振幅相同特别是处于相对较低水平,随着进给量由 0.04 mm/r 增大,会逐渐出现排屑不畅现象;而当进给量保持不变且处于相对较高水平时,随振幅不断提高,逐渐由堵屑向顺畅排屑转变,表明进给量和振幅对排屑效果影响较大。以 TC6 钛合金为例,对比分析四组参数下的转矩变化曲线如图 5 所示。由图 5(a)和图 5(b)可知,固定振幅为 0.04 mm,当进给量为 0.02 mm/r 时获得平稳的转矩曲线,表明该参数组合下排屑顺畅;而当进给量为 0.10 mm/r 时,所获得的转矩整体呈逐渐上升趋势,表明此时排屑效果相对较差。如图 5(c)所示当进给量和振幅分别设为 0.06 mm/r 和 0.08 mm 时,钻削过程中断屑良好且转矩信号变化平稳,表明该参数组合加工状况下可顺畅排屑。而当振幅降为 0.02 mm 时,排屑相对困难,表现为转矩信号出现逐渐上升趋势,具体如图 5(d)所示。



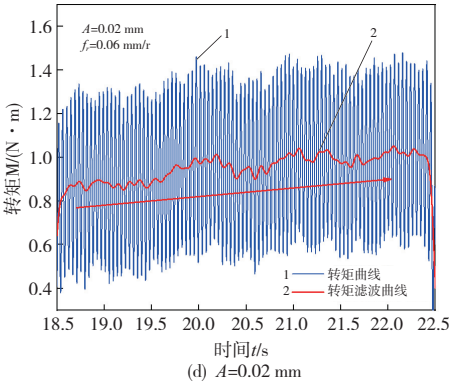
(a) f_r=0.02 mm/r



(b) f_r=0.10 mm/r



(c) A=0.08 mm

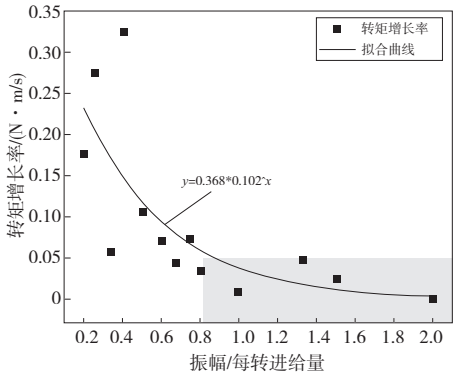


(d) A=0.02 mm

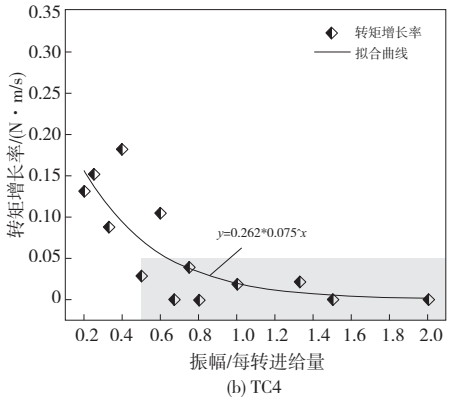
图 5　不同加工参数下 TC6 稳定钻削阶段的转矩信号

由图 2 和图 5 可知,振幅和进给量在实际加工过程中对排屑具有较大影响,提高振幅、降低进给量有利于获得良好的排屑效果。为此,本文将两种型号钛合金在钻削试验中所获得的转矩增长率 K_M(堵屑阶段转矩随时间的增量)与振幅和进给量的比值(下文以 C_{A/f_r}表示)建立关联,不同加工参数下材料转矩增长率的变化规律如图 6(a)、图 6(b)所示。可以发现两种材料的转矩增长率均随 C_{A/f_r}增大而明显降低,即提高 C_{A/f_r}后转矩信号趋于平稳,表明排屑过程通畅。这里以转矩增长率为 0.05 作为排屑是否顺畅的判定阈值,可发现图 6(a)中有较少的点落在排屑理想区间,对于 TC4 钛合金而言,当 C_{A/f_r}高于 0.5 时会实现良好

排屑,而 TC6 若实现良好排屑,则需 C_{A/f_r}高于 0.8,表明 TC6 钛合金排屑过程相对困难。



(a) TC6



(b) TC4

图 6 不同振幅与进给量的比值对转矩增长率的影响规律

3 结语

本研究在不同参数下对 TC6 和 TC4 钛合金进行了低频振动辅助制孔试验,主要探究不同材料属性和参数变量对断屑效果及排屑状态的影响规律,研究结果如下:

1)本次试验获得的断屑效果与理论断屑模型基本吻合,提高振幅、降低进给量有利于实现良好排屑和断屑。与 TC4 相比,TC6 具备更高的抗拉强度和延伸率,导致其断屑性能相对较差。

2)TC6 的转矩增长率相对较高,当 $C_{A/fr}$大于 0.8 时可实现良好断屑和排屑,而 TC4,在 $C_{A/fr}$高于 0.5 时即处于稳定断屑和排屑状态。

参考文献:

[1] 蒲昌兰,陈清良,苏宏华,等. 砂带磨削钛合金磨削加工性能研究[J]. 机械制造与自动化,2023,52(3):25-28,44.

[2] 赵永庆. 新型合金材料——钛合金[M]. 北京:中国铁道出版社,2017.

[3] Pecat O, Brinksmeier E. Low damage drilling of CFRP/titanium compound materials for fastening[J]. Procedia CIRP, 2014, 13: 1-7.

[4] Li C, Xu J Y, Chen M, et al. Tool wear processes in low frequency vibration assisted drilling of CFRP/Ti_6Al_4V stacks with forced air-cooling[J]. Wear, 2019, 426: 1616-1623.

[5] Qiu X Y, Yu Z, Li C P, et al. Influence of main cutting edge structure on hole defects in CFRP/titanium alloy stacks drilling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 69: 503-513.

[6] Ge J, Reji R, Feist T, et al. Investigating hole making performance of Al_{2024}-T3/Ti-6Al-4V alloy stacks: A comparative study of conventional drilling, peck drilling and helical milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(7): 5027-5040.

[7] Waqar S, Asad S, Ahmad S, et al. Effect of drilling parameters on hole quality of Ti-6Al-4V titanium alloy in dry drilling[J]. Materials Science Forum, 2016, 880: 33-36.

[8] Rodríguez A, Calleja A, de Lacalle L N L, et al. Drilling of CFRP-Ti_6Al_4V stacks using CO_2-cryogenic cooling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 58-66.

[9] Xu J Y, Li C, Chen M, et al. A comparison between vibration assisted and conventional drilling of CFRP/Ti_6Al_4V stacks[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(10): 1182-1193.

[10] Yang H J, Chen Y, Xu J H, et al. Chip control analysis in low-frequency vibration-assisted drilling of Ti-6Al-4V titanium alloys[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(4): 565-584.

[11] Hussein R, Sadek A, Elbestawi M A, et al. Low-frequency vibration-assisted drilling of hybrid CFRP/Ti_6Al_4V stacked material[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(9): 2801-2817.

[12] Jiao F, Li Y X, Niu Y, et al. A review on the drilling of CFRP/Ti stacks: Machining characteristics, damage mechanisms and suppression strategies at stack interface[J]. Composite Structures, 2023, 305: 116489.

[13] Pecat O, Paulsen T, Katthöfer P, et al. Vibration assisted drilling of aerospace materials[J]. SAE Technical Paper Series, 2016, 1: 2016-1-2136.

[14] Li M Q, Xiong A M, Huang W C, et al. Microstructural evolution and modelling of the hot compression of a TC6 titanium alloy[J]. Materials Characterization, 2002, 49(3): 203-209.

[15] Nie X F, He W F, Zhou L C, et al. Experiment investigation of laser shock peening on TC6 titanium alloy to improve high cycle fatigue performance[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 594: 161-167.

(下转第 53 页)

4　结语

本文通过数值仿真研究,对导弹用基于NACA进口的埋入式进气道的气动特性进行分析,并研究了5种导流板角度对进气道气动性能的影响,得出以下结论:

1)改变NACA进气道导流板角度对进口性能产生关键影响,侧棱的斜率决定了侧棱涡强度,导流角度改变后,进气口内部面积扩张比同步发生改变,侧棱涡在发展过程中与面积扩张比呈负相关,侧棱涡能量会因扩张比过大而产生损失,进而对卷吸来流有一定的影响。

2)埋入式进气道的气动性能对导流板角度变化较为敏感,进气口垂向压力梯度的大小是驱使来流涌入通道内部的关键因素,导流板角度大有利于引入来流,但自由来流在内通道前会因扩压比过大而产生一定的能量损失。

3)导流板角度为12°的进气道在匹配点低于0.31时,气动性能表现较好,方便发动机起动,大于0.31时,总压恢复系数较低且畸变指数增大,导流板角度为14°则相反;导流板角度为11°的进气道性能最低,导流板角度为15°次之,导流板角度为13°的气动性能表现在匹配点下较为平均。

参考文献:

[1] Harloff G J, Smith C F, Bruns J E, et al. Navier-stokes analysis of three-dimensional S-ducts[J]. Journal of Aircraft, 1993, 30(4): 526-533.

[2] Anderson B H, Reddy D R, Kapoor K. Study on computing separating flows within a diffusion inlet S-duct[J]. Journal of Propulsion and Power, 1994, 10(5): 661-667.

[3] Lee C, Boedicker C. Subsonic diffuser design and performance for advanced fighter aircraft[C]//Aircraft Design Systems and Operations Meeting. Colorado Springs, CO, USA: AIAA, 1985: AIAA-1985-3073.

[4] Mossman E A, Randall L M. An experimental investigation of the design variables for NACA submerged duct entrances[R]. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1948. NACA-RM-A7I30.

[5] Sacks A H, Spreiter J R. Theoretical investigation of submerged inlets at low speeds: NACA TN 2323[R/OL]. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1951[2019-06-25]. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc53583/m2/1/high_res_d/19890067876.pdf.

[6] Frank J L, Taylor R A. Comparison of drag, pressure recovery, and surface pressure of a scoop-type inlet and an NACA submerged inlet at transonic speeds[R]. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1951. NACA-RM-A51H20a.

[7] Rolls L S. A flight comparison of a submerged inlet and a scoop inlet at transonic speeds[R]. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1953. NACA-RM-A53A06.

[8] Pignier N J, O'Reilly C J, Boij S. Aerodynamic and aeroacoustic analyses of a submerged air inlet in a low-Mach-number flow[J]. Computers & Fluids, 2016, 133: 15-31.

[9] Miansari M, Ghezelsofloo S, Toghraie D. Numerical investigation of geometrical design effect on the submerged inlet aerodynamics characteristics[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2020, 21(1): 25-38.

[10] Kucuk U C. Application of response surface methodology to optimize aerodynamic performance of NACA inlet[C]//53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Atlanta, GA, USA: AIAA, 2017: AIAA-2017-4991. DOI: 10.2514/6.2017-4991.

[11] 唐宜文,钟易成,万齐仁. 某型无人机进气道扩压器设计与优化[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):44-47.

[12] 王云飞,沈天荣,宁啸天,等. 几何参数对S弯进气道气动特性的影响研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(4):128-132.

收稿日期:2024-04-25

(上接第21页)

[16] Bai D S, Sun J F, Chen W Y, et al. Wear mechanisms of WC/Co tools when machining high-strength titanium alloy TB6(Ti-10V-2Fe-3Al)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9): 2863-2874.

[17] Yang H J, Chen Y, Xu J H, et al. Tool wear mechanism in low-frequency vibration-assisted drilling of CFRP/Ti stacks and its individual layer[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5): 2539-2551.

[18] Huang S X, Zhao Q Y, Zhao Y Q, et al. Toughening effects of Mo and Nb addition on impact toughness and crack resistance of titanium alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 79: 147-164.

收稿日期:2024-05-15