

文章编号:1674-8190(2018)04-617-06

航空发动机 W 形封严环封严效果影响因素分析

陈京名¹, 王云¹, 李齐飞², 力宁²

(1. 南昌航空大学 飞行器工程学院, 南昌 330063)

(2. 中国航空发动机集团公司 湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

摘要:在一定气压差和封严面的机械表面形态下, W形封严环的封严效果和其与法兰之间的封严面积密切相关, 合理选择封严环结构参数并提升封严环与法兰之间的封严面积, 可以达到提升封严性的目的。使用有限元分析软件 ABAQUS 模拟在预紧工况下, 封严环主要结构参数、预压紧量对 W形封严环与法兰之间封严面积的影响规律。结果表明: 选取较大的外半径, 预压紧量和壁厚可使零件与法兰封严面积增大, 壁厚与外半径对封严环与法兰接触面积影响较大, 在设计过程中应综合考虑封严效果和刚度弹性, 合理选择壁厚和外半径的大小。

关键词:航空发动机; W形金属封严环; 封严效果; 封严面积

中图分类号: V232; TH136

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.04.022

Analysis of Influence Factors on Sealing Effect of W-shaped Metal Seal Ring in Aero Engine

Chen Jingming¹, Wang Yun¹, Li Qifei², Li Ning²

(1. School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: In a certain pressure difference and the seal surface of the mechanical surface hologymorp, the W-shaped seal ring sealing effect is closely related with the flange seal area. Reasonable select the seal ring structure parameters and increase the area between seal ring and flange can achieve the purpose of improving seal effect. By using the finite element analysis software ABAQUS the influence of main structural parameters and pre-tightening amount on the sealing area of W-ring and flange are simulated. Results show that the outer radius, pre-tightening amount and wall thickness can influence the sealing area between the parts and flange. The wall thickness and the outer radius of the seal ring are of greater influence for the contact area between the seal ring and flange. In the design process the seal effect and stiffness elasticity should be considered and the wall thickness and outer radius size should be reasonable selected.

Key words: aero engine; W-shaped metal seal ring; seal effect; seal area

0 引言

航空发动机气体封严技术对发动机的性能具有重要影响, 国内外大部分传统发动机使用 O 形、C 形、U 形的封严环作为封严零件, 但当前世界先进的航空发动机普遍采用 W 形封严环封严技

术^[1-3], W 形封严环具有薄壁、大变形、精密等优势, 故设计制造难度较大, 目前只有美国、加拿大等少数发达国家掌握其核心技术, 我国对 W 形封严环的封严性能设计分析及设计准则研究尚属空白, 需要从结构原理方面进行系统分析, 为相关设计准则研究提供支持。

李玉婷等^[4]采用 ABAQUS 软件计算了 U 形环初始密封压缩量、工作压力温度等操作参数对零件力学性能的影响; 龚雪婷等^[5]采用 ANSYS 软件在给定工况下对 W 形环的塑性变形进行分析, 研

收稿日期: 2018-01-18; 修回日期: 2018-03-08

通信作者: 王云, wangyun66@126.com

究了密封环操作参数和结构参数对塑性变形的影响;N. Sarawate 等^[6]模拟了燃气轮机中 W 形封严环的工况,对 W 形封严环的泄漏量进行了测量;王晨曦等^[7]研究了 W 形封严环的压缩回弹性能和密封性能;索双富等^[8]对 W 形封严环的轴向刚度、强度、压缩回弹特性和泄漏量等进行了研究。

目前国内外关于封严环的文献多是研究其力学性能,而对于影响其密封性的封严面积的研究则很少,给 W 形封严环泄漏量定量分析模型的建立带来困难。为此,本文借助 ABAQUS 有限元分析软件,建立预紧状态下不同结构参数的有限元模型,通过对 W 形封严环外半径、壁厚和预压缩量等参数的变化分析,对比其在相同预紧状态下封严面积的变化情况,并进行有限元计算,以此对 W 形封严环截面的轮廓结构参数进行优化,以期提高其封严性能,使其更符合工况要求。

1 封严环的几何模型及主要参数

封严环是由高温合金薄钢板通过挤压成型而制成,常见的有 W 形、C 形、U 形等,本文只研究 W 形封严环。某型号 W 形封严环的截面模型形状如图 1 所示。图中标出的具体初始结构参数如表 1 所示。

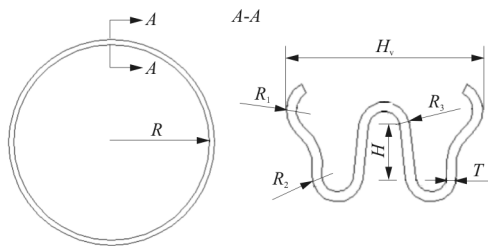


图 1 W 型封严环结构简图

Fig. 1 Structure of metallic W-ring

表 1 W 封严环初始结构参数

Table 1 Original section structure parameters of the metallic W-ring

W 形封严环结构参数	初始参数值/mm
封严环半径 R	247.43
自由高度 H_v	5.00
封严环外半径 R_1	0.76
壁厚 T	0.25
波谷半径 R_2	0.65
波峰半径 R_3	0.65
波高 H	1.24

W 形封严环的工作环境温度高达 650 °C 以上,外形呈波浪状,是一种轴对称的薄壁管状构件。零件所用材料为沉淀强化镍基高温合金 GH4169,该材料的工作温度可达 650 °C 以上,在高温下仍可保证较高强度,是制造 W 形封严环的优良材料。在实际工作情况下,一般对零件表面硬度有一定要求,因此需要对材料进行热处理,热处理后的高温镍基合金材料 GH4169 的基本力学性能参数如表 2 所示。

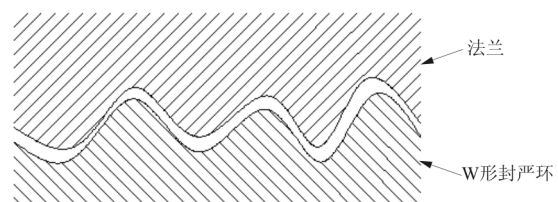
表 2 热处理后 GH4169 的力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameter of GH4169 after heat treatment

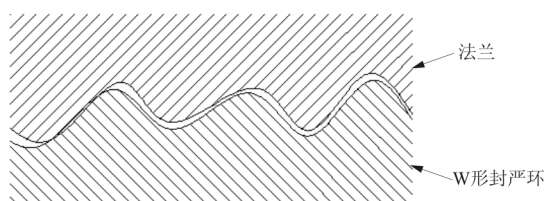
温度 $\theta/^\circ\text{C}$	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 σ_c/MPa	弹性模量 E/GPa
20	1560	1450	203
650	1195	1090	153

2 封严机理

W 形封严环初始封严步骤如图 2 所示,图 2(a)中,法兰与 W 形封严环接触面均为粗糙表面,预紧力尚未加载,两个封严面只有对应的粗糙峰相互接触,封严面之间间隙很大,微泄露通道尺寸很大,无封严能力;图 2(b)中,随着预紧量出现,粗糙峰发生变形,粗糙峰开始嵌入彼此波峰波谷,封严面间隙逐渐减少直到形成贴合^[9],使光滑加工表面相互接触,由于表面粗糙度存在,接触区域也仅仅是一部分,仍旧存在微泄漏通道,此时,流体在通道中做泄漏流动,微泄漏通道尺寸减小使阻力增大,泄漏量减少到合理的范围,完成初始封严。分析可知,零件接触面粗糙度和封严面接触面积等因素决定金属封严性能。零件封严接触表面粗糙度越小,泄漏量越小,其微观凹凸不平越易被填平。



(a) 未施加预紧量时密封面状态



(b) 施加预紧量时密封面状态

图 2 封严面微观封严过程

Fig. 2 Sealing surface micro-sealing process

泄漏通道尺寸越小,流动阻力越大,使得泄漏大为减少,但在实际使用中,摩擦不可避免,因此在接触面表面粗糙度达到规定范围时,封严面接触面积成为提高封严性的重要参数。封严面接触面积决定微泄漏通道长度,介质泄漏量随封严面接触面积增加而减少,封严面接触面积主要是由法兰与封严件接触压缩变形决定的。

3 有限元模型建立及计算

3.1 W 形封严环有限元模型简化

有限元模型计算应遵循两个基本原则,既要保证计算结果的精度又要能控制模型的规模。在保证精度的前提下,减少模型规模是必要的,可在有限条件下使得计算更快更好地完成。由于 W 形封严环结构以及受力都具有关于中轴线对称的特性,选用轴对称模型空间建立模型,在有限元分析的过程中,假设材料同向性、无材料缺陷、无残余应力、W 形封严环成型过程中薄壁厚度均匀。

3.2 有限元单元选择与网格划分

对模型进行网格划分时,应先进行网格收敛性分析,根据零件尺寸和计算条件,通过经验估计划分网格并进行有限元计算,记录 W 形封严环的最大 Von-mises 应力值;然后将网格密度增大到原来的两倍再进行计算并提取结果,如表 3 所示,可以看出:分别用三种网络尺寸划分时,计算出零件最大 Von-mises 应力值相对误差均在 5% 以内,则视为该网格更接近现实情况,即三种网格尺寸设置均合理。

表 3 网格收敛性分析结果

Table 3 Grid convergence analysis results

序号	最大 Von-mises 应力/MPa	最大值相对误差/%
1	1 278	0
2	1 309	2.3
3	1 333	1.8

本文选用第三种设置。由于法兰与零件外半径接触,应对接触的部位进行网格细化。采用标准化网格划分技术对各个部件进行网格划分,划分好后的轴对称有限元模型如图 3 所示,单元类型为 CAX4R(四节点双线性轴对称四边形减缩积分单元)。

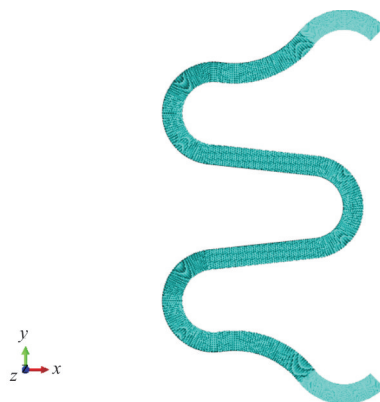


图 3 仿真模拟模型建立以及网格划分

Fig. 3 Model building and meshing

3.3 加载及其边界条件

在模拟计算中,W 形封严环轴向两端分别设置两块可变形实体单元,模拟 W 形封严环在法兰中的工作环境。法兰与 W 形封严环之间选用面与面接触,接触考虑摩擦选用库伦摩擦,摩擦系数 0.15。上法兰片施加轴向位移载荷,下法兰片完全固定,分析步选择非线性计算。通过改变封严环外半径、预压缩量和壁厚等封严环参数和工作参数来观察其与法兰接触面积的大小关系。

3.4 预压紧状态下最大 Von-mises 应力状况

利用 ABAQUS 的有限元分析功能对建立好的 W 形封严环有限元模型进行模拟分析,可以得到预紧量作用下的 W 形封严环的最大 Von-mises 应力以及总接触面积。原始尺寸的零件在预压紧量为 0.4 mm 时,最大 Von-mises 应力云图如图 4

所示,可以看出:波峰部位应力不大,最大应力集中在两个波谷,即波谷靠近 180° 的位置。

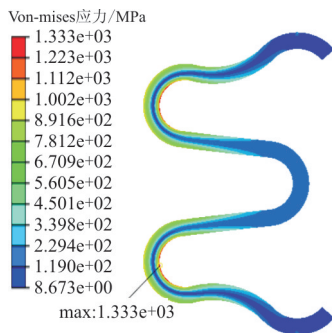


图 4 预紧工况下 Von-mises 应力分布
Fig. 4 Distribution of Von-mises stress

4 加载状态下接触面积的影响因素分析

4.1 预紧工况下接触面积变化历程

在预压缩量的作用下 W 形封严环与法兰接触面积随时间的变化历程如图 5 所示,可以看出:随着预压紧量的增大,法兰与零件的接触面积也随之增大,但 W 形封严环在压缩过程中接触面积呈不光滑的阶梯性变化,其原因是接触面摩擦粘滑效应所致;W 形封严环在压缩变形过程中,环件的接触部位相对于法兰会产生轻微滑动,在滑动的过程中由于摩擦粘滑效应产生粘滞,随着压缩量增加,静摩擦力逐渐增至一定值时界面就发生一次滑移,随后又进入一次静摩擦力重新增长的滑过程,导致摩擦力随时间关系曲线是锯齿状变化,接触面积随压缩量呈阶梯式增长的现象。

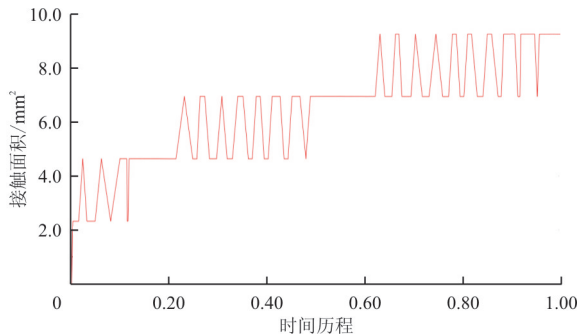


图 5 预紧工况下封严接触面积变化历程
Fig. 5 Pre-compacting conditions of contact area changes

4.2 预压缩量变化对接触面积的影响

W 形封严环预压缩量对封严接触面积的影响

如图 6 所示,可以看出:随着预压紧量的增大,法兰与零件的接触面积也随之增大,封严面增大使泄漏减少,封严性增强。理论上讲,预压缩量越大接触面积越大封严性越好,但在施加预压缩量形成初始封严时应考虑零件材料本身的最大强度极限,若预压缩量过大使零件超出其使用材料的最大强度极限则会使零件完全塑性变形,进而造成回弹力过小引起封严失效,也不可过小造成法兰与 W 形封严环封严表面微凸峰无法相互填满,形成泄露通道。

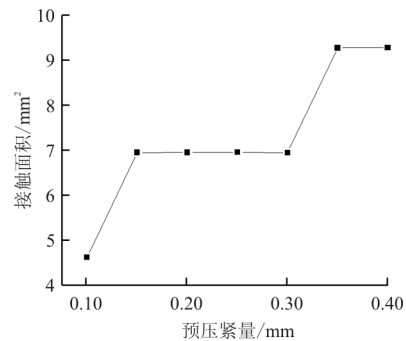


图 6 W 形封严环预压缩量对封严接触面积的影响
Fig. 6 Contact area between the parts and upper flange of different compacting of W-ring

4.3 外半径变化对接触面积的影响

模拟过程中,通过改变 W 形封严环的外半径,并在施加同样预压紧量的情况下观察 W 形封严环与上法兰的接触面积,如图 7 所示。

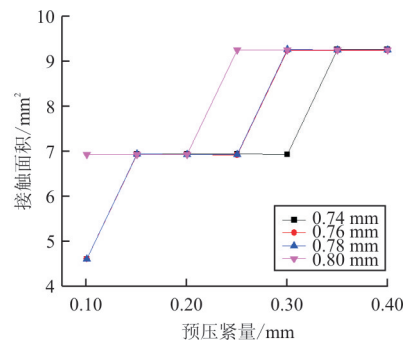


图 7 W 形封严环外半径对封严接触面积的影响
Fig. 7 Contact area between the part and the flange at different outer radius of W-ring

从图 7 可以看出:当 W 形封严环的外半径变大,其接触部位趋势更趋于平缓,在相同预压紧量作用下外半径越大,W 形封严环的外半径曲率半径会变小,零件外半径形状更趋于平直,因此 W 形

封严环与法兰接触面积增大,同时增大外半径可以使W形封严环与法兰接触面积变化趋势更加平缓,可以更快地达到较大的接触面积;在预压紧量作用下,可选择增大W形封严环的外半径使其与法兰的接触面积变大,达到使其封严性提高的目的,因为外半径增加接触区域更趋于平缓,只是考虑装配性,略微收口即可。

4.4 壁厚变化对接触面积的影响

壁厚增大使零件刚度增大,在预压紧量相同的情况下,需要更大的接触压力才能使W形封严环达到相同的预压缩量。选取不同壁厚的W形封严环在受到预压紧量作用时,零件与法兰接触面积关系如图8所示。

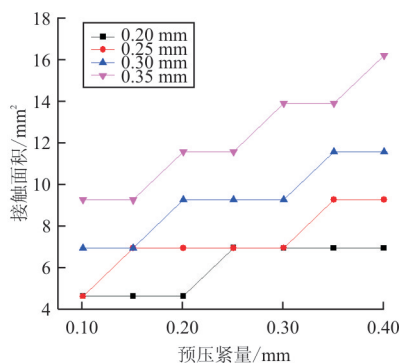


图8 W形封严环壁厚对封严接触面积的影响

Fig. 8 Contact area between the part and the flange at different wall thicknesses of W-ring

从图8可以看出:随着壁厚增大,零件与上法兰接触面积也随之增大,但是增大壁厚会使零件受到的应力变大,从而影响零件结构,使其波谷处易发生屈服塑性变形,失去封严作用,因此应结合预压紧量来选择合适的壁厚,壁厚可取最小值,但不能过小否则柔性过大回弹力过小易发生失稳,若增加零件刚度,壁厚可取最大值,但不能过大,否则造成安装困难,划伤法兰表面,应根据具体工作条件要求选择合理的壁厚。

5 结论

(1) W形封严环在预压紧量作用下会相对于法兰产生轻微滑动,在滑动的过程中由于摩擦粘滑效应,随着压缩量增加,静摩擦力逐渐增至一定值时界面就发生一次滑移,随后又进入一次静摩擦力重新增长的滑过程,导致接触面积出现阶梯式增长

的现象。

(2) 增加预压紧量可增大接触面积,但同时会增大零件所受应力,若应力过大,会造成整个零件结构破坏,封严性失效,因此应根据具体情况增加预压紧量,以增强零件封严性。

(3) 增加W形封严环外半径大小可以提高零件与上法兰的接触面积,因为外半径增加,接触区域更趋于平缓,只是考虑装配性,略微收口即可。

(4) 对于壁厚来说,增加壁厚可有效增大封严宽度,但增大壁厚会使零件刚度增大,因此应结合预压缩量来选择合适的壁厚。但壁厚不能过小,否则柔性过大、回弹力过小,易发生失稳。

参考文献

- [1] 张文良,王雪,刘继文,等.弹性金属密封技术[J].液气驱动与密封,2009(3):4-7.
Zhang Wenliang, Wang Xue, Liu Jiwen, et al. Elastic metal seal technology[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2009(3): 4-7. (in Chinese)
- [2] 任宁,欧开良,王长路,等. Ω 形波纹管的轴向刚度研究[J].机械强度,2011,33(5):719-723.
Ren Ning, Ou Kailiang, Wang Changlu, et al. Research on the axial stiffness of shaped bellows[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(5): 719-723. (in Chinese)
- [3] 励行根,蔡仁良,杭建伟,等.反应堆压力容器“C”形密封环的研制[J].压力容器,2013(5):74-79.
Li Xinggen, Cai Renliang, Hang Jianwei, et al. Manufacture of C-type ring for reaction pressure vessels[J]. Pressure Vessel Technology, 2013(5): 74-79. (in Chinese)
- [4] 李玉婷,廖日东,辛婷,等.低温U形金属密封环密封性能有限元分析[J].润滑与密封,2014,39(7):60-66.
Li Yuting, Liao Ridong, Xin Ting, et al. Analysis of sealing performance and improving design of U-shaped metal sealing ring[J]. Lubrication and Sealing, 2014, 39(7): 60-66. (in Chinese)
- [5] 龚雪婷,蔡纪宁,张秋翔,等.金属W形密封环弹塑性接触有限元分析[J].润滑与密封,2011,35(11):82-85.
Gong Xueting, Cai Jining, Zhang Qiuxiang, et al. Elastoplastic contact finite element analysis of metal W-sealing ring[J]. Lubrication and Sealing, 2011, 35(11): 82-85. (in Chinese)
- [6] Sarawate N, Wolfe C, Sezer I, et al. Characterization of me-tallicin industrialgas turbines [C] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, Copenhagen, Denmark, 2012: 1855-1862.
- [7] 王晨曦,杨义勇,索双富,等.W形金属密封环回弹与密封性能研究[J].润滑与密封,2016,41(1):50-54.
Wang Chenxi, Yang Yiyong, Suo Shuangfu, et al. Research on compression resilience and sealing performance of metallic W-ring[J]. Lubrication and Sealing, 2016, 41(1):

50-54. (in Chinese)

- [8] 索双富, 邢敏杰, 薛庆, 等. W形金属密封环轴向刚度影响因素研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(2): 15-17.
Suo Shuangfu, Xing Minjie, Xue Qing, et al. Research on effect factors of axial stiffness of metallic W-ring[J]. Lubrication and Sealing, 2016, 41(2): 15-17. (in Chinese)
- [9] 崔晓杰. 金属密封技术的研究进展及密封机理分析[J]. 石油机械, 2011, 39(增刊1): 102-105, 108.
Cui Xiaojie. Metal sealing technology research progress and sealing mechanism analysis[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(S1): 102-105, 108. (in Chinese)

(上接第 584 页)

- [15] 李锋, 白鹏. 飞行器低雷诺数空气动力学[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2017.
Li Feng, Bai Peng. Aerodynamics of aircraft at low Reynolds number [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2017. (in Chinese)

作者简介:

孙凯军(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器气

作者简介:

陈京名(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空密封与润滑。

王云(1966—),男,博士,教授。主要研究方向:宇航推进理论。

李齐飞(1988—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机密封设计、试验。

力宁(1967—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机密封设计、试验。

(编辑:马文静)

作者简介:

(编辑:赵毓梅)

(上接第 602 页)

- [11] Alemi-Ardakani M, Milani A S, Yannacopoulos S. A rapid approach for predication and discrete lay-up optimization of glass fiber/polypropylene composite laminates under impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015 (84): 134-144.
- [12] 黄博生, 商和财, 彭亚萍. 碳/玻混杂纤维的混杂效应及其受力性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(6): 39-41.
Huang Bosheng, Shang Hecai, Peng Yaping. Study on the hybrid effect of fibers and the load-carrying capacity of concrete component wrapped with HFRP[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(6): 39-41. (in Chinese)
- [13] Reddy P R S, Reddy T S, Madhu V, et al. Behavior of E-glass composite laminates under ballistic impact[J]. Materials and Design, 2015, 84: 79-86.
- [14] Jia Xin, Huang Zhengxiang, Zu Xudong, et al. Effect of mesoscale and multiscale modeling on the performance of

动布局设计、螺旋桨设计。

包晓翔(1990—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器气动布局设计。

付义伟(1980—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器气动布局设计。

Kevlar woven fabric subjected to ballistic impact: a numerical study[J]. Applied Composite Materials, 2013, 20(6): 1195-1214.

作者简介:

陈战辉(1977—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器复合材料结构设计。

万小鹏(1962—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构设计等。

王文智(1984—),男,博士,副教授。主要研究方向:复合材料结构设计等。

李沛城(1987—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器复合材料结构设计。

(编辑:马文静)

(上接第 610 页)

methods of composite scarf repair for primary-load bearing structures[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 88: 27-38.

作者简介:

刘星(1990—),男,硕士,助教。主要研究方向:飞行器设计和结构的力学性能测试技术。

刘斌(1986—),男,博士,助理研究员。主要研究方向:复合

材料胶接及胶接修理。

卢智先(1959—),男,高级实验师。主要研究方向:材料力学性能试验技术、疲劳与断裂。

赵桐(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:高能束流加工技术。

(编辑:赵毓梅)