

连接梁断裂失效分析

镇咸生¹, 胡鉴², 曾鲸力¹, 孙登霞¹, 孙锦¹, 谢廷勋¹, 张静¹

1. 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司 贵州贵阳 550000

2. 中国人民解放军93147部队 贵州贵阳 550000

摘要: 为探究某型航空发动机收扩喷口作动筒活塞杆端连接梁的断裂原因, 结合断口, 对装配过程、服役状态进行分析。结果表明: 故障连接梁材质未见异常, 其断裂模式为过载断裂。同时, 发现与梁连接的作动筒外加螺母保险锁紧不佳, 发生周向松动, 导致衬筒内壁与活塞出现异常偏磨。综合分析表明: 故障件活塞与衬筒发生异常偏磨引起活塞杆运动卡滞, 故障组件外放喷口时活塞杆无法收缩, 与之相连的梁中部因受到异常大的应力而发生断裂。

关键词: 过载断裂; K424合金; 活塞杆; 偏磨

Analysis of machine beam fracture fault

ZHEN Xiansheng¹, HU Jian², ZENG Jingli¹, SUN Dengxia¹, SUN Jin¹, XIE Tingxun¹, ZHANG Jing¹

1. AECC Guizhou Liyang Aviation Power Co., Ltd., Guiyang 550000, Guizhou, China

2. Chinese People's Liberation Army 93147 Unit, Guiyang 550000, Guizhou, China

Abstract: In order to investigate the cause of beam fracture in the piston rod end connection of a certain type of aircraft engine's intake and expansion nozzle actuator, combined with the fracture surface, assembly process, and service status, an analysis was conducted. The results showed that the material of the faulty beam was not abnormal, and its fracture mode was overload fracture. At the same time, it was found that the external nut safety lock of the actuator connected to the beam was not tight enough, causing circumferential loosening, resulting in abnormal eccentric wear between the inner wall of the lining cylinder and the piston. The comprehensive analysis results show that the abnormal eccentric wear between the faulty piston and liner causes the piston rod to move and become stuck. When the faulty component is discharged from the nozzle, the piston rod cannot contract, and the middle part of the beam connected to it is subjected to abnormal large stress, resulting in fracture.

Keywords: overload fracture; K424 alloy; piston rod; eccentric wear

1 序言

故障梁为整体精铸件, 材质为K424合金。K424合金是镍基沉淀硬化型铸造高温合金, 具有优异的高温强度和良好的工艺性, 服役温度可达 950℃ 以上, 大范围应用于航空航天发动机尾喷口调节片、涡轮叶片及导向器等高温结构部件^[1-3]。链环通过作动筒活塞运动控制梁的收敛或扩张, 梁的动力来源于作动筒的力, 不受其他力的作用。活塞作动筒广

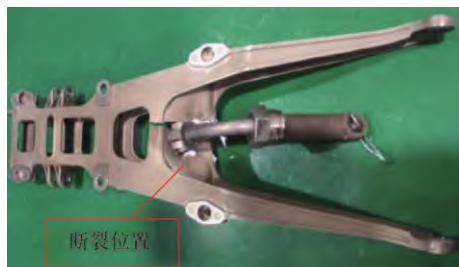
泛应用于军民航空发动机尾喷口、起落架、减速栏等构件动力系统^[4, 5]。故障作动筒材质为GH4169高温合金^[6, 7], 内壁进行渗铝处理, 服役过程中渗铝层会起到润滑作用^[8], 以防作动筒内壁与活塞杆因阻力较大而发生卡滞。

2 试验过程

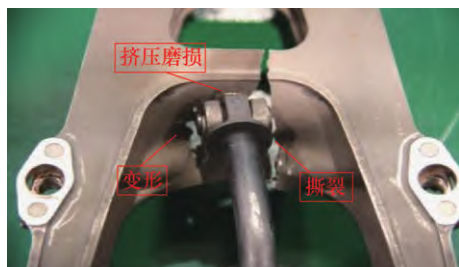
2.1 宏观观察

故障梁组件宏观形貌如图1所示。由图1可知,

断裂位置位于梁与活塞杆铰链连接处，故障梁在中部位置存在明显的变形、撕裂，以及挤压磨损等特征。从喷口作动原理及梁的损伤变形方向来看，梁的损伤发生在链环收回过程。使用线切割取样，观察故障梁断口，断口外侧（与活塞杆相邻一侧）存在挤压磨损，外侧可见明显的擦痕，断裂方向由外向内，与活塞杆作用力方向一致。梁断口形貌如图2所示。



a) 断裂位置

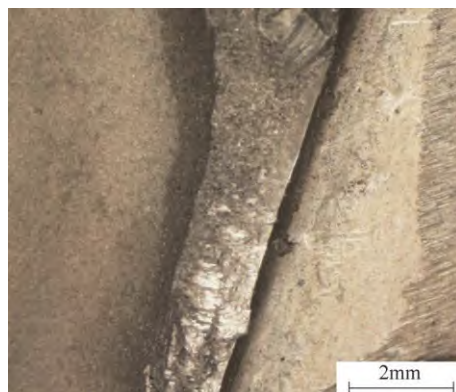


b) 断裂位置放大

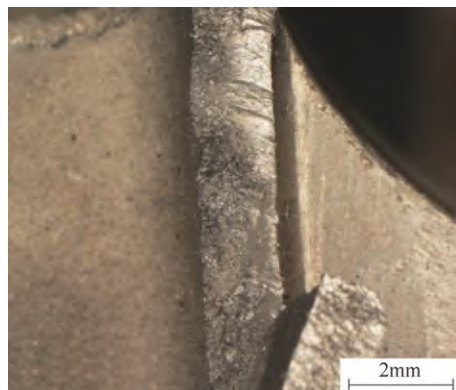
图1 故障梁组件宏观形貌

在故障件衬筒底部一侧，观测到明显的凹陷变形，压痕呈扇形，另一侧存在轻微的磨损痕迹，如图3所示。分解故障衬筒，衬筒内孔相对约 180° 两侧均存在轴向磨损痕迹，一侧距端面 $6\sim 8\text{mm}$ ，磨损较为严重，磨损痕迹最大宽度 2.5mm ，面积约 20mm^2 ，磨损痕迹内存在一条长 11.5mm 、宽 0.1mm 、深 0.02mm 的周向压痕，压痕边界清晰，轮廓与活塞边缘形貌相匹配，如图4所示。

故障活塞杆弯曲方向耳环一侧存在翘曲变形，在活塞杆与活塞连接位置，活塞杆弯曲方向一侧与活塞贴合较为紧密，圆周方向存在较深的压痕，压痕痕迹与外加螺母接触位置相吻合；弯曲反方向一侧活塞与活塞杆存在较为明显的缝隙；活塞整体呈灰黑色，局部位置因偏磨而呈银白金属色，偏磨位置表现为 180° 角向对应外圆面上下端的特征，2处偏磨痕迹弧长均约为 $1/4$ 圆周，一侧磨损痕迹位于活塞底端，另一侧位于活塞顶端，如图5所示。活塞两

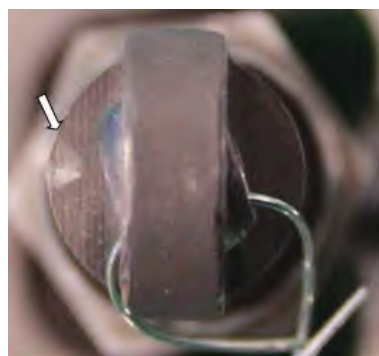


a) 断口形貌1

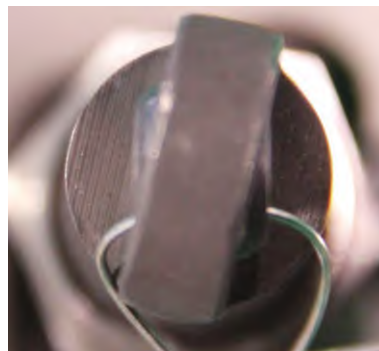


b) 断口形貌2

图2 梁断口形貌



a) 底部端面一侧



b) 底部端面另一侧

图3 故障衬筒底部端面两侧磨损状态对比

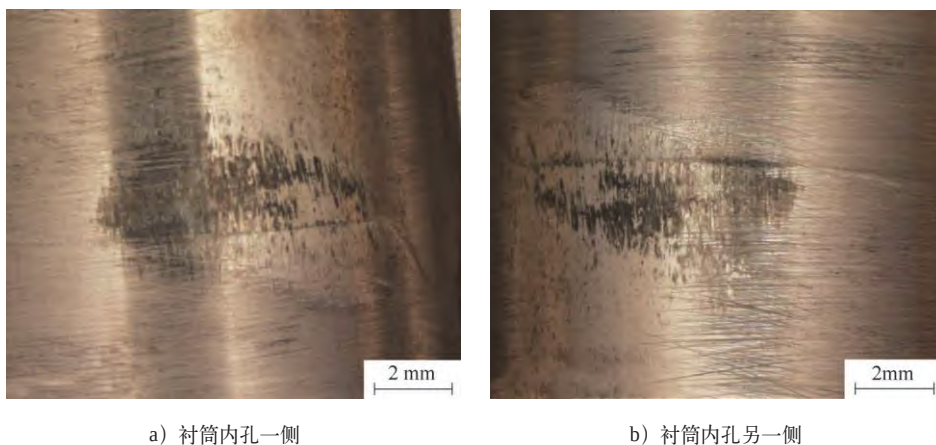


图4 故障衬筒内孔磨损较严重区域形貌

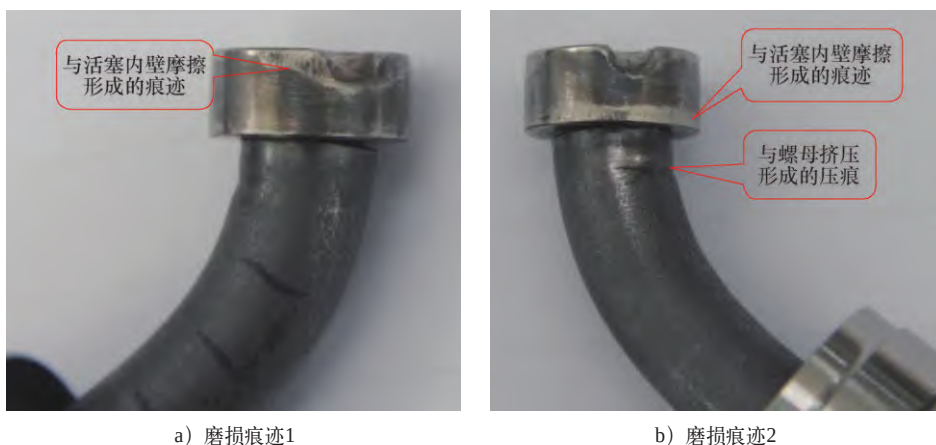


图5 活塞圆周磨损痕迹

侧的磨损痕迹与衬筒内孔两侧的磨损痕迹相匹配。

现场检查发现，故障外加螺母周向松动约4mm。观察故障活塞组件外加螺母螺孔，螺孔一侧磨损严重，磨损区域与活塞杆弯曲一侧相邻，在螺孔磨损严重一侧可见明显的轴向磨痕，原始周向加工刀痕模糊；另一侧磨损较轻微的区域，同样可见轴向磨痕，局部原始周向加工刀痕较为清晰，如图6所示。对比正常螺母冲点及故障螺母冲点，故障螺母冲点形状不规则且直径较小，为1.8mm，正常螺母冲点形状规则且直径较大，为6.5mm，如图7所示。

2.2 电镜观察及能谱分析

在扫描电镜下观察断口，未见疏松、夹杂等冶金缺陷，整体微观形貌为韧窝+少量准解理特征，与人为过载断口对比，微观形貌特征一致，如图8所示。观测衬筒内孔，可见磨损痕迹位于压痕下方随压痕变形，在原始加工刀痕内侧可见黑色残留物



图6 故障外加螺母偏磨位置

(见图8)；活塞及活塞杆表面可见到与衬筒内孔黑色残留物形貌相似的物质，如图9所示。对断口、衬筒内孔黑色残留物、活塞杆表面干膜润滑剂进行能谱成分分析，结果见表1。由表1可知，梁的成分与K424铸造高温合金相符，故障衬筒表面原始加工刀痕内部黑色残留物与活塞杆表面干膜润滑剂主要成

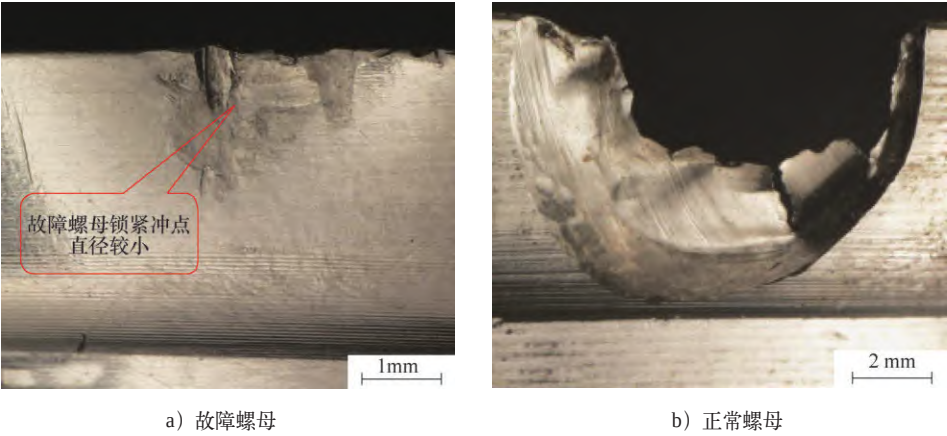


图7 故障螺母冲点与新品冲点对比

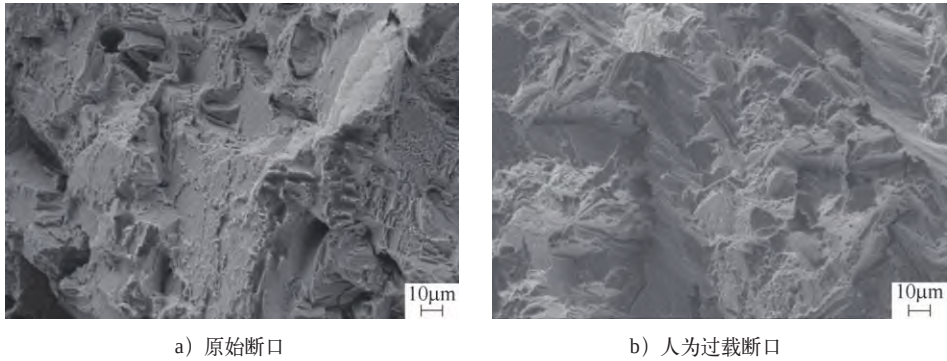


图8 断口微观形貌

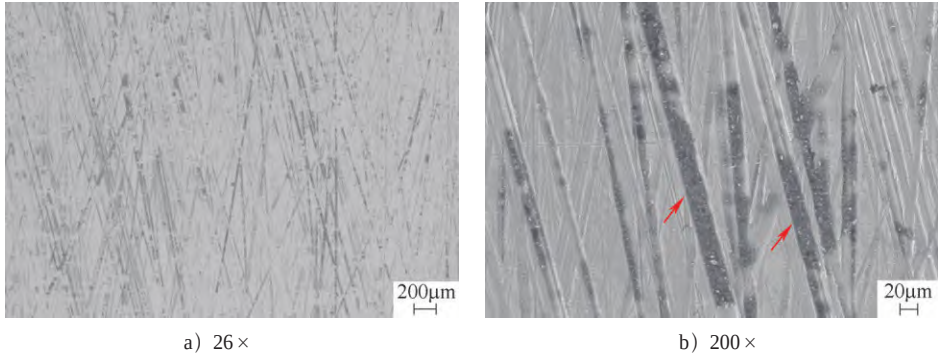


图9 故障衬筒内孔原始加工刀痕内的黑色残留物

表1 能谱分析结果（质量分数）（%）

元素	Al	Ti	V	Cr	Co	Ni	Zr	Nb	Mo	W
断口外侧	3.70	8.92	0.97	8.33	11.43	55.58	—	3.78	4.02	3.25
断口内侧	4.50	9.16	1.11	8.69	11.40	53.27	—	3.96	4.40	3.49

元素	C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Cd	W
衬筒内孔残留物	55.34	10.95	—	6.51	2.51	0.32	0.12	0.21	0.15	0.37	2.41	1.13	1.36	16.4	1.33	0.9
活塞杆表面	86.95	5.85	0.1	0.11	5.17	0.09	0.12	0.11	0.1	—	—	0.12	—	0.7	0.53	0.06

分一致，为C、O、Si元素。

3 金相检查

对故障活塞杆、正常活塞杆横截面，以及故障衬筒压痕位置和其他位置进行金相检查。故障活塞杆与正常活塞杆晶粒组织均为9级+6级双重晶组

织，平均晶粒度为8级，如图10所示。

故障衬筒未见缩孔、夹杂等冶金缺陷，内侧压痕位置与其他位置渗铝层厚度基本一致，为30~40 μ m，压痕位置渗铝层厚度与压痕变形趋势一致，如图11所示。

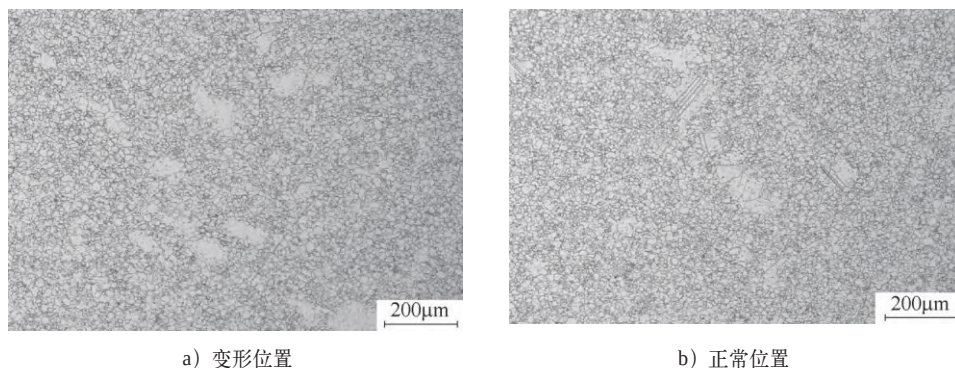


图10 活塞杆晶粒组织

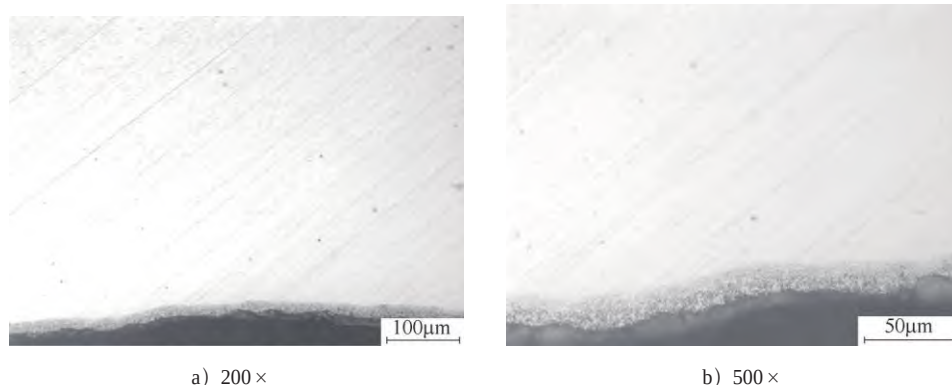


图11 衬筒内侧压痕位置金相组织

4 硬度检测

对故障活塞衬筒、活塞杆及正常活塞杆位置进行维氏硬度检测，加载时间10s，加载载荷300g（2.94N），硬度检测结果见表2。从表2可看出，故障活塞衬筒、活塞杆，正常活塞杆未变形位置硬度分别为340HV_{0.3}、353HV_{0.3}、343HV_{0.3}，未见明显差异。

表2 维氏硬度检测结果 (HV_{0.3})

检测位置	1	2	3	4	5	平均值
衬筒	310	344	355	342	347	340
活塞杆弯曲部位	356	337	360	347	367	353
活塞杆未变形部位	339	346	345	369	318	343

5 综合分析

送检故障连接梁成分与K424合金相符，断口整体未见疲劳特征，未见疏松、夹杂等冶金缺陷，断裂性质为过载断裂。故障活塞杆弯曲部位与未变形部位硬度分别为340HV_{0.3}、353HV_{0.3}，未见明显差异；晶粒组织均为9级+6级双重晶组织，平均晶粒度为8级，即故障活塞杆硬度、组织均未见异常。故障活塞组件衬筒底部端面与安装座相邻位置，一侧可见凹陷变形，压痕为扇形，另一侧存在轻微的磨损痕迹，说明衬筒工作时受力不均且发生倾斜。衬筒内孔原始加工刀痕内存在活塞涂层残留物塞积，在角向位置存在明显的偏磨特征，偏磨痕迹与活塞轮廓相符。衬筒内孔压痕位置渗铝层厚度均匀且走向随形，说明压痕产生于渗铝工艺之后，结合上述观察，压痕为活塞与衬筒内壁异常接触造成的积压

损伤。

故障件衬筒外加螺母一侧压窝冲点保险锁紧不佳,外加螺母在周向能够转动4mm,根据外加螺母的外径计算螺母的旋转角度 n 为0.0605圈、螺纹间距 l 为1.5mm,计算出轴向移动长度 $L = nl = 0.0605 \times 1.5\text{mm} = 0.0907\text{mm}$ 。外加螺母与衬筒螺纹连接,如果螺纹装配至限位处,因螺纹有自动定心作用,在外加螺母端面与活塞端面的作用下,活塞轴线与衬筒轴线基本处于平行状态,运动时为面接触,受力均匀。当外加螺母松动,螺母公差 $1.5^{+0.15}_{-0}$ mm,衬筒公差 $1.5^{+0}_{-0.207}$ mm,在极限状态时,将产生0.357mm的间隙,该间隙的存在导致外加螺母端面与轴线不平行,产生倾斜,如图12所示。

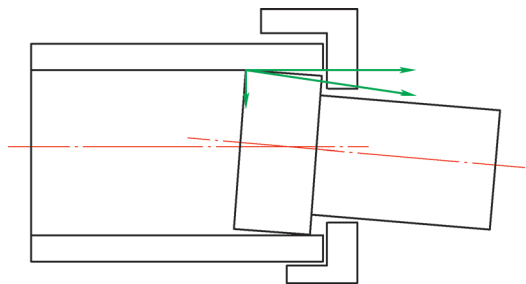


图12 故障活塞杆在衬筒中运动受力示意

当作动筒工作,活塞移动至最大极限位置时,由于螺母松动,因此活塞杆与衬筒内孔相对倾斜。当活塞收缩时,活塞杆与衬筒内壁为线接触,因受力不均而发生偏磨,渗铝层局部磨损加剧,反复运动后活塞与衬筒的配合间隙越来越大,形成恶性循环。当量变到达质变时,偏心力产生的力矩超过活塞杆屈服强度,导致活塞变形,活塞杆回收卡滞,最终在连接梁向外扩张时,活塞杆无法收缩,致使与之相连的梁发生断裂。

综上所述,送检故障连接梁成分与K424合金相符,断口未见冶金缺陷,断裂性质为过载断裂。异常偏磨会破坏衬筒内壁局部表面完整性,并引起活塞杆运动卡滞,活塞杆受力发生弯曲,与之相连的梁因受到反作用力而导致过载断裂。

6 结束语

本文系统分析了连接梁断裂失效原因,可知这起连接梁断裂故障,是典型的“小疏忽”引起的“大麻烦”。航空发动机制造是一项复杂的系统工

程,在质量管控中,每一个环节都至关重要,若是忽视一些加工细节,则很可能引发大故障,因此质量问题必须从每一个细节抓起。

参考文献:

- [1] 逯红果,王光华,田立敏,等. K424高温合金显微组织和力学性能分析[J]. 铸造技术, 2021, 41 (9): 820-830.
- [2] 赵展,董建新,张麦仓,等. K424高温合金凝固特征及冷却速度对其影响规律[J]. 工程科学学报, 2018, 40 (11): 1332-1341.
- [3] 袁晓飞,吴剑涛,李俊涛,等. K424合金超温后的显微组织与典型性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (6): 1779-1785.
- [4] 陈文振,孙同明,祖挥程,等. 某型飞机舱门作动筒外筒失效故障分析[J]. 航空维修与工程, 2023 (8): 73-77.
- [5] 吴恒壮,孙甲强,李明,等. 飞机起落架舱门作动筒信号器壳体断裂故障研究[J]. 航空维修与工程, 2021 (10): 99-100.
- [6] 谭海波,孙亚利. 热处理工艺对 GH4169 高温合金锻件组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51 (2): 114-117.
- [7] 李荣之,曹征宽,欧红燕,等. 固溶时效工艺对 GH4169 高温合金组织和性能的影响[J]. 四川冶金, 2021, 43 (4): 34-37.
- [8] 董瑞华,李木森,王修春,等. 机械转动在机械能助渗铝技术中的作用[J]. 山东大学学报(工学版), 2008 (6): 91-94.

MW 20240306