航空发动机离子火焰探测器探管裂纹故障分析

刘军和，巩孟祥，魏　涛，曹家洺
（空军装备部驻沈阳地区第二军事代表室，沈阳 110043）

摘要：某航空发动机试车后连续出现2起离子火焰探测器探管根部焊缝处裂纹故障，为查明故障原因，从外观检查、断口分析、产品结构、加工过程等方面进行分析，确定了探管裂纹为疲劳裂纹，经分析确定2件故障产品焊缝处疲劳裂纹产生的原因分别为：焊探管时2次手工氩弧焊堆焊时送丝速度不均匀造成焊趾凹凸不平；焊趾处为探管端熔合线，引起应力集中、探管材料表面存在突起物造成。在发动机试车时，离子火焰探测器探管在热冲击、振动等交变应力作用下，从探管强度薄弱部位形成疲劳源，最终导致裂纹沿径向贯穿探管壁厚，沿圆周方向继续扩展产生疲劳断裂。提出了明确焊缝表面形状、保证填料位置和速度、增加抛光后荧光检查、增加探管焊缝放大镜检查、外场普查等预防和改进措施。

关键词：焊缝裂纹；故障分析；离子火焰探测器；探管；航空发动机
中图分类号：V233.7　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.S1.012

Analysis on Crack Failure of Ion Flame Detector of Aeroengine

LIU Jun-he，GONG Meng-xiang，WEI Tao，CAO Jia-ming
（Air Force Equipment Department Second Military Representative Office in Shenyang，Shenyang 110043，China）

Abstract：There were two consecutive cracks at the root weld of the probe tube of the ion flame detectorafter the test run of an aeroengine. In order to find out the cause of the fault，the appearance inspection，fracture analysis，product structure and processing process were analyzed and the crack of the probe tube was determined as fatigue crack.After analysis，the causes of fatigue cracks at the weld joint of the two faulty products were determined as follows：uneven wire feeding speed during two times of manual argon arc welding and overlaying welding，resulting in uneven weld toe. The weld toe was the fusion line at the end of probe pipe，which caused stress concentration and protrusion on the surface of probe pipe. During the engine test，the probe tube of ion flame detector formed fatigue source from the weak part of the probe tube under the action of alternating stress such as thermal shock and vibration，which eventually caused the crack to penetrate the wall thickness of the probe tube along the radial direction and continued to expand along the circumferential direction，resulting in fatigue fracture. Some preventive and improvement measures are put forward，such as defining the shape of weld surface，ensuring the position and speed of filler，increasing the fluorescence inspection after polishing，increasing the magnifying glass inspection of probe pipe weld，field survey and so on.

Key words：crack of weld seam；failure analysis；ion flame detector；probe tube；aeroengine

0　引言

航空发动机管路断裂故障率高，而引起外部管路断裂的原因主要包括加工、装配、温度和振动，其中振动是主要因素[1-3]，航空发动机管路的结构完整性直接影响了发动机使用的可靠性[4]。

某型航空发动机离子火焰探测器（005和001号）探管根部在试车后2次分别发现裂纹，均在探管焊缝处且产品结构、加工过程均类似，本文将2件产品合并进行裂纹失效分析，以确定裂纹的性质和产生的原因。

1　外观检查

对005和001号离子火焰探测器进行外观检查，内容如下：

（1）对005号故障件进行外观检测，产品表面无明显的磕碰伤，探管为正常使用的氧化色，探管上焊缝边缘有裂纹，长约13 mm，开裂区域约占圆周方向

收稿日期：2020-12-18
作者简介：刘军和（1974），男，硕士，高级工程师，主要从事航空发动机质量监督工作；E-mail：279905525@qq.com。

引用格式：*刘军和，巩孟祥，魏涛，等. 航空发动机离子火焰探测器探管裂纹故障分析[J]. 航空发动机，2021，47（增刊1）：64-68.LIU Junhe，GONG Mengxiang，WEI Tao，et al.Analysis on crack failure of ion flame detector of aeroengine[J]. Aeroengine，2021，47（S1）：64-68.*

的2/3,裂纹位于离子火焰探测器上中心电极(材料为GH3044合金)和探管(材料GH2747合金)焊缝的焊趾处,部分裂纹位于探管上,如图1所示。

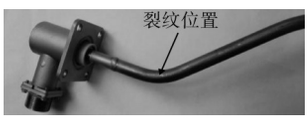

图1　005号离子火焰探测器探管上裂纹位置

将探管裂纹处置于LEICAMZ75体视显微镜下放大观察,裂纹位于焊缝处探管侧的焊趾部位,焊趾部位形状不规则,边缘存在尖角。裂纹一部分沿焊趾圆周方向分布,一部分与探管轴线约45°方向上向探管基体扩展。沿焊趾方向的裂纹长度约占圆周的1/2,较细,两边金属相匹配。其中沿焊趾方向的裂纹放大形貌如图2、3所示。

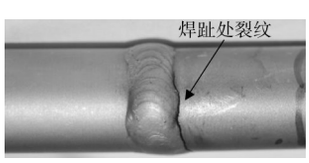

图2　沿焊趾方向的裂纹形貌

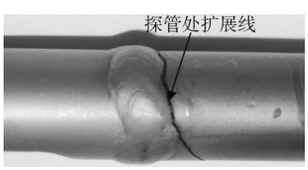

图3　沿焊趾方向的裂纹形貌(另一侧)

(2)对001号故障件进行外观检测,产品表面无明显的磕碰伤,探管为正常使用的氧化色,焊缝边缘探管上有裂纹,长约14 mm,开裂区域约占圆周方向的3/5,裂纹基本位于探管上,具体如图4所示。

图4　001号离子火焰探测器探管上裂纹位置

将探管裂纹处置于LEICAMZ75体视显微镜下观察,裂纹位于探管基体上,沿探管轴线约60°方向上向两侧基体扩展,较细,两边金属相匹配。人为沿裂纹将其轻轻打开,裂纹一侧向焊接熔合区扩展,另一侧沿探管圆周方向扩展,其中裂纹中间部分形貌如图5所示。位于中心电极窗口对应部位,裂纹向焊接熔合区扩展的形貌如图6所示,裂纹沿探管圆周方向扩展的形貌如图7所示。

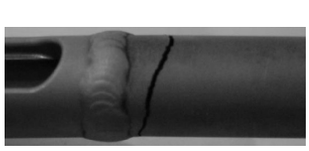
图5　探管裂纹中间部分形貌

图6　裂纹向焊接熔合区扩展形貌

2　断口分析

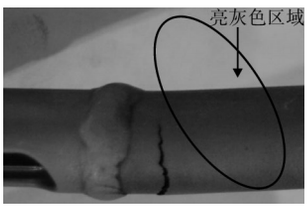

图7　裂纹沿探管圆周扩展形貌

为查找裂纹原因,需要进行断口分析。通过宏观观察初步判断裂纹的起源和扩展方向以及断口性质;通过微观观察,即利用电子显微镜或光学显微镜观察判定裂纹类型及机理[5-6]。

2.1　005号离子火焰探测器

2.1.1　宏观观察

人为将裂纹打开,断裂成2部分,一部分为中心电极端,另一部分为探管端。中心电极端焊趾形貌如图8所示。

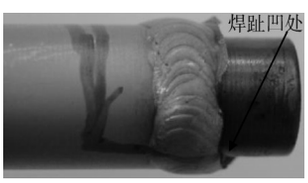

图8　中心电极端焊趾处形貌

对探管端断口进行观察发现,裂纹沿径向贯通探管的壁厚,打开的断口大部分区域无明显塑性变形痕迹,较粗糙,呈金属黑灰色,长约30 mm;人为打开端局部有明显塑性变形痕迹,较细腻,呈正常金属断裂的亮灰色,如图9所示。

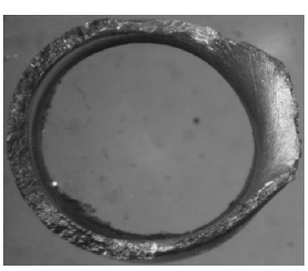
图9　探管端断口宏观形貌

2.1.2　微观观察

将人为打开的裂纹探管端断口用丙酮超声波清洗后置于VEGA Ⅱ LMH扫描电镜下观察,断口电镜形貌如图10所示。

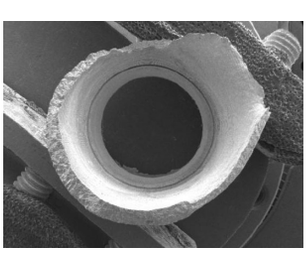
图10　探管端断口电镜形貌(15倍)

对断口上金属黑灰色部位进行观察发现,断口可分为疲劳源区、扩展区和瞬断区。源区位于探管焊趾凹的外圆面,线源,其微观形貌有较明显的摩擦痕迹和覆盖物,无摩擦和覆盖物区域呈金属准解理特征,如图11所示;扩展区面积较大,贯穿整个探管壁厚,大部分区域表面有黑色覆盖物,无覆盖物区域靠近人为撕裂部位其微观形貌为疲劳条带,其中左上部微观形貌如图12所示,右下部微观形貌如图13所示;瞬断区位于断口上亮灰色区域,微观形貌为韧窝[7],如图14所示。

2.2　001号离子火焰探测器

2.2.1　宏观观察

人为将裂纹打开,断裂成2部分,一部分为中心

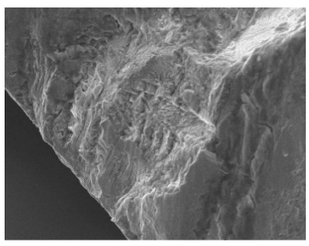

图11 探管端断口源区形貌（1000倍）

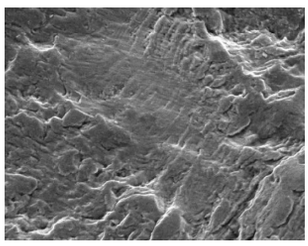

图12 探管端断口左上部疲劳条带形貌（2000倍）

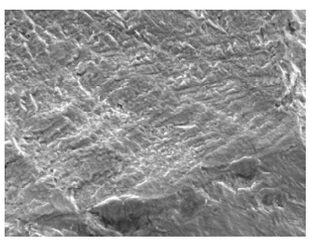

图13 探管端断口右下部疲劳条带形貌（2000倍）

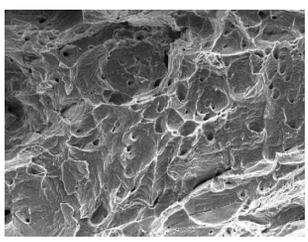

图14 探管端断口瞬断区形貌（1000倍）

电极端，另一部分为探管端。

对中心电极端断口进行观察发现，裂纹沿径向贯通探管的壁厚，打开的断口大部分区域无明显塑性变形痕迹，较粗糙，呈金属黑灰色；人为打开端局部有明显塑性变形痕迹，较细腻，呈正常金属断裂的亮灰色。形貌如图15所示。

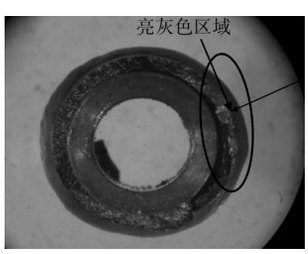

图15 中心电极端断口宏观形貌

2.2.2 微观观察

将中心电极端探管断口用丙酮超声波清洗后置于VEGA Ⅱ LMH扫描电镜下观察。断口电镜形貌如图16所示。

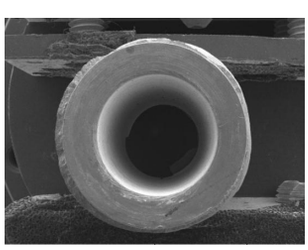

图16 中心电极端探管断口电镜形貌（13倍）

对断口上金属黑灰色部位进行观察发现，断口分为疲劳源区、扩展区和瞬断区。源区位于探管的次表层面，点源，微观形貌有明显的河流形貌，如图17所示；扩展区面积较大，贯穿整个探管壁厚且沿圆周方向向两侧扩展，大部分区域表面有黑色覆盖物，无覆盖物区域微观形貌为疲劳条带，其中左上部微观形貌如图18所示，右下部微观形貌如图19所示；瞬断区位于断口上亮灰色区域，微观形貌为韧窝特征[7]，如图20所示。

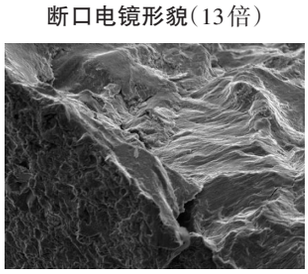

图17 探管端断口源区形貌（1000倍）

对靠近源区部位探管表面形貌进行观察发现，大部分区域表面完整，靠近源区撕裂棱收敛处有一突起物，该突起物末端和探管表面结合在一起，形貌如图21所示。

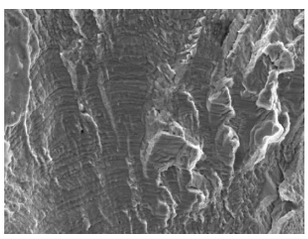

图18 探管端断口左上部疲劳条带形貌（2000倍）

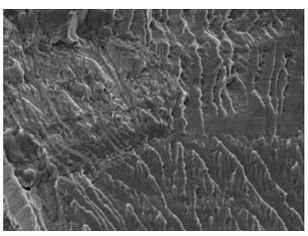

图19 探管端断口右下部疲劳条带形貌（2000倍）

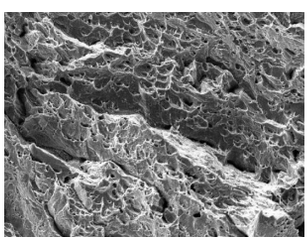

图20 探管端断口瞬断区形貌（1000倍）

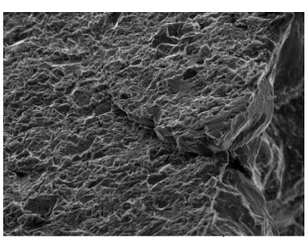

图21 探管端断口源区撕裂棱处形貌（1000倍）

用INCAEnergy250X射线能谱仪分别对突起物和正常探管基体进行能谱分析，突起物分析结果为：Cr15.6；Ni44.7；Al3.2；C<0.1；Mn0.8；Fe余量；正常探管分析结果为：Cr16.1；Ni45.1；Al3.1；C<0.1；Mn0.7；Fe余量。2处成分分析结果符合GH2747合金相关标准，未发现异常，因此裂纹故障与冶金缺陷及材质无关[8-9]。

2.3 断口分析小结

根据上述分析可知，005号产品沿裂纹打开的断口上有疲劳源区、扩展区和瞬断区，说明断口呈疲劳断口特征，属于疲劳裂纹[4]。疲劳源区位于焊接探管端的焊趾处，该处凹凸不平，其凹处为应力集中部位，焊趾处为探管端融合线，该处受焊接应力和组织应力等的作用，容易产生裂纹[10]。

001号产品沿裂纹打开的断口上有疲劳源区、扩展区和瞬断区，说明断口呈疲劳断口特征，靠近疲劳源区有一突起物，疲劳源位于次表层，且断口处晶粒较粗大，形成应力集中点。在发动机进行试车时，离子火焰探测器探管在热冲击、振动等交变应力作用下，缺陷部位随着试车时间的延长在疲劳源处形成裂

纹并不断扩展,最终导致裂纹沿径向贯穿探管壁厚,沿圆周方向继续扩展,最终导致开裂。

3　原因分析

3.1　产品结构及功能

火焰探测器主要由探管、绝缘体组件、壳体、插座组件等组成,连接套与中心电极采用电子束焊接成一体,中心电极组件的表面通过金属化钎焊固定,形成绝缘体组件,探管、绝缘体组件、壳体采用氩弧焊焊接成一体,形成产品。

离子火焰探测器安装在发动机加力燃烧室壳体上,火焰探测器的探管深入加力燃烧室流道内[11],用于感受加力燃烧室内产生的火焰。

3.2　加工和装配过程

005号和001号离子火焰探测器探管裂纹加工主要为探管加工和装配焊接,探管加工材料为φ12×1高温合金GH2747管料,主要加工过程为备料、灌铅、弯形、校正、除铅、热处理、抛光、检验;探管装配加工过程主要工序有:装配校正→焊探管(点焊→自动回转焊→手工加高温合金焊丝填充)→去应力→着色检查→校正→检验。

3.3　故障分析

根据以上过程分别对005、001故障件建立故障树并对可能的原因逐一分析。

(1)005号离子火焰探测器的故障树如图22所示。

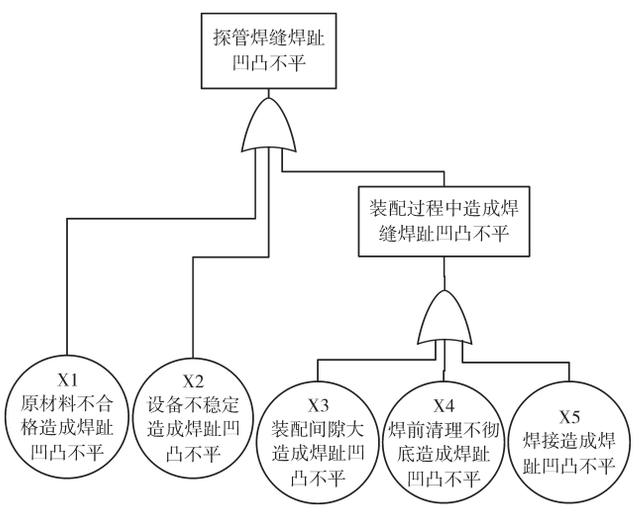

图22　005号离子火焰探测器探管焊缝裂纹故障树

自动焊接作为一种先进的制造技术,具有焊接质量稳定、生产效率高、改善加工环境等特点[12]。氩弧焊是最常用的金属焊接技术之一,在焊接过程中利用惰性气体氩气做保护气,将焊接区域与周围空气隔绝开,以防止焊接部位氧化,提高焊接质量[13]。根据现有条件及加工过程方法可以将原材料不合格、设备不稳定、装配间隙大、焊前清理不彻底造成焊趾凹凸不平的4个故障因素排除。

在分析焊接过程造成焊趾凹凸不平因素时,焊接探管时分为2次焊接,第1次焊接为不加焊料自动回转氩弧焊,第2次为填料手工氩弧焊。在焊接过程中第1次自动回转氩弧焊前要先找正中心,并用焊针对正焊缝,回转1周确认对正后才能正式焊接,焊接后焊缝基本与母材持平,焊趾平整。为提高焊缝强度,对焊缝进行2次堆焊,经复查在堆焊过程中存在送丝速度不均匀的问题,可能导致焊趾凹凸不平[14]。因此,焊接造成焊趾凹凸不平因素不能排除。

(2)001号离子火焰探测器的故障树如图23所示。

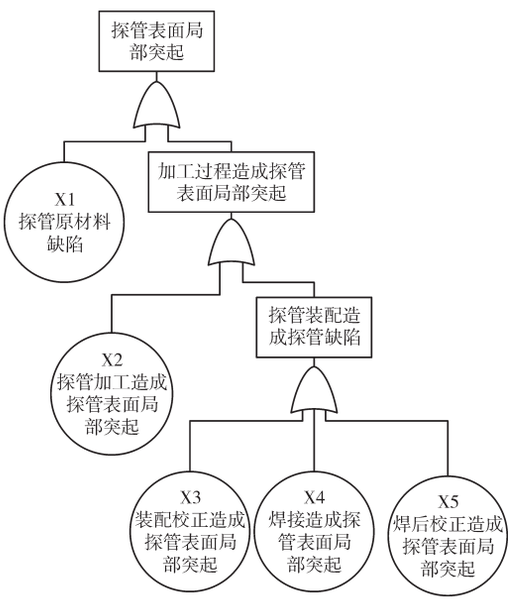

图23　001号HTQ-17B探管裂纹故障树

根据现有条件及加工过程方法将探管加工、焊接、焊后校正造成表面局部突起的3个故障因素排除。

对于高温合金GH2747管材的技术标准Q/GYB 512-2011中规定,高温合金管表面允许有轻微矫正痕迹和深度不超过0.05 mm的局部擦伤及个别压痕和拉痕存在,但清除后不得使外径和壁厚超过负偏差范围。在001号离子火焰探测器裂纹源区出现的凸起约0.05 mm,符合标准中的外观质量要求,但不能排除表面出现局部突起的原材料缺陷因素。

在焊接探管前,因每件产品有装配差异,为保证焊接后变形量最小,需对每件产品装配的探管和组件

进行调配，会对部分装配后有差异的探管进行局部校正，用半模装夹探管使用心杆进行校正，在校正过程中可能造成被校正的探管被夹伤，产生局部表面突起。装配校正造成表面局部突起因素不能排除。

4 总结和措施

根据以上分析，005号离子火焰探测器探管焊缝裂纹的原因是焊探管时2次手工氩弧焊堆焊时送丝速度不均匀造成焊趾凹凸不平，焊趾处为探管端熔合线，引起应力集中；001号离子火焰探测器探管裂纹是探管材料表面存在突起物造成。在发动机试车时，离子火焰探测器探管在热冲击、振动等交变应力作用下，从探管强度薄弱部位形成疲劳源，最终导致裂纹沿径向贯穿探管壁厚，沿圆周方向继续扩展产生疲劳断裂[12-13,15]。

根据离子火焰探测器探管裂纹的故障原因，制定如下改进措施：

（1）明确手工氩弧焊后焊缝表面形状，并规定焊趾部位不能存在尖角；

（2）采用自动氩弧焊机来保证填料位置和速度，杜绝手工氩弧焊造成填料不均匀，焊趾不平整；

（3）对探管增加抛光后荧光检查，杜绝材料表面缺陷和加工产生表面缺陷；

（4）增加检查要求，出厂前对探管焊缝20 mm距离以内用20倍放大镜检查表面有无突起。

（5）对使用中的离子火焰探测器制定普查计划，每半年进行火探器普查，发现问题立即更换。

参考文献：

[1] 王国鹏，万利，周杨娜. 航空发动机管路振动故障研究[J]. 振动工程学报，2008，21（增刊1）：191-194.
WANG Guopeng，WAN Li，ZHOU Yangna. Vibration failure of the aero-engine tube [J]. Journal of Vibration Engineering，2008，21（S1）：191-194.（in Chinese）

[2] 彭刚，于乃江，贾文强. 航空发动机外部管路的结构与动力学特征参数分析[J]. 航空发动机，2017，43（5）：1-6.
PENG Gang，YU Naijiang，JIA Wenqiang. Analysis of structural and dynamical characteristic parameters of external pipes for aeroengine[J]. Aeroengine，2017，43（5）：1-6.（in Chinese）

[3] 刘涛，张荫鳌，田金光，等. 某发动机外部管路振动应力测试研究[J]. 中国新技术新产品，2014（10）：30.
LIU Tao，ZHANG Yin′ao，TIAN Jinguang，et al. The test research of vibration stress in external pipelines of an aeroengine [J]. China New Technologies and Products，2014（10）：30.（in Chinese）

[4] 胡安辉，周立江，高伟，等. 发动机燃油管断裂故障分析[J]. 失效分析与预防，2012，7（3）：192-196.
HU Anhui，ZHOU Lijiang，GAO Wei，et al. Failure analysis of fuel oilpipe in an areoengine[J]. Failure Analysis and Prevention，2012，7（3）：192-196.（in Chinese）

[5] Derek Hull. 断口形貌学观察、测量和分析断口表面形貌的科学[M]. 李晓刚，董超芳，杜翠微，等译. 北京：科学出版社，2009：55-67.
Derek Hull. Fractography：observing，measuring and interpretingfracture surface mopography[M]. Translated by LI Xiaogang，DONGChaofang，DU Cuiwei，et al. Beijing：Science Press，2009：55-67.（in Chinese）

[6] 佟文伟. 某燃气涡轮发动机螺栓断裂失效分析[J]. 航空发动机，2013，39（4）：67-71.
TONG Wenwei. Fracture failure analysis of bolt in a gas turbine engine [J]. Aeroengine ，2013，39（4）：67-71.（in Chinese）

[7] 王洪伟，陈 荣 ，宋 科 ，等. 某型发动机导管焊缝裂纹失效分析[J]. 金属热处理，2011，36（增刊1）：32-34.
WANG Hongwei，CHEN Rong，SONG Ke，et al. Failure analysis of aero-engine turbine pipe[J]. Heat Treatment of Metals，2011，36（S1）：32-34.（in Chinese）

[8] 李洋，佟文伟，韩振宇，等. 发动机引气管卡箍断裂原因分析[J]. 失效分析与预防，2013，8（3）：167-172.
LI Yang，TONG Wenwei，HAN Zhenyu，et al. Fracture analysis ofaero-engine cited trachea clamp [J]. Failure Analysis and Prevention，2013，8（3）：167-172.（in Chinese）

[9] 佟文伟，王理，张开阔，等. 某型航空发动机散热器支架断裂失效分析[J]. 航空发动机，2011（6）：43-46.
TONG Wenwei，WANG Li，ZHANG Kaikuo，et al. Fracture failureanalysis of radiator support for an aeroengine [J]. Aeroengine，2011（6）：43-46.（in Chinese）

[10] 张栋，陶春虎. 失效分析[M]. 北京：国防工业出版社，2005：133-140.
ZHANG Dong，TAO Chunhu. Failure analysis [M]. Beijing：National Defence Industry Press，2005：133-140.（in Chinese）

[11] 韦周庆，魏 霞，任志远，等. 某型发动机加力接通延迟故障与分析[J]. 中国新技术新产品，2017，10：14-15.
WEI Zhouqing，WEI Xia，REN Zhiyuan，et al. Analysis on afterburner failure of an aeroengine[J]. China New Technologies and Products，2017，10：14-15.（in Chinese）

[12] 胡保花. 环形焊缝未焊透未检出的分析与探讨[J]. 测控技术，2018，37（增刊1）：312-319.
HU Baohua. Analysis and discussion of incomplete penetration and undetection of circumferential welds[J]. Measurement & Control Technology，2018，37（S1）：312-319.（in Chinese）

[13] 杨华，邓广平，蔡永军. 氩弧焊焊接缺陷产生原因及对策[J]. 科学技术创新，2018，19：179-180.
YANG Hua，DENG Guangping，CAI Yongjun. Cause analysis and countermeasure of argon arc welding defect[J]. Scientific and Technological Innovation，2018，19：179-180.（in Chinese）

[14] 马世仓. 氩弧焊接工艺对焊接质量影响研究[J]. 无锡商业职业技术学院学报，2016，16：82-85.
MA Shichang. A research into the effects of argon arc welding process on welding quality[J]. Journal of Wuxi Institute of Commerce，2016，16：82-85.（in Chinese）

[15] 罗 杉，滕 江，谢革新，等. 某型发动机Ⅱ区加力燃油总管换段维修技术研究[J]. 航空维修与工程，2017，4：83-85.
LUO Shan，TENG Jiang，XIE Gexin，et al. Maintenance technology research on 2nd afterburner fuel manifold of a certain type of aeroengine [J]. Aviation Maintenance & Engineering，2017，4：83-85.（in Chinese）

（编辑：程 海）