DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2029

铝合金机匣预埋管处渗漏机理分析及解决措施

丁清伟[1],汪春能[2],眭怀明[3],赵引红[3],陈冬梅[3]

(1. 中国航发南方工业有限公司,湖南 株洲 412000; 2. 空装驻株洲地区军事代表室,湖南 株洲 412000; 3. 扬州峰明光电新材料有限公司,江苏 扬州 225117)

摘　要:为解决采用预埋管成型的某航空发动机铝合金机匣管路密封性试验时出现的渗漏问题,分别通过高、低倍组织观察和X射线实时成像技术(DR)分析了该渗漏问题产生的机理,并制定了解决措施。通过组织和工艺特征分析,明确了渗漏由预埋不锈钢管与铝基体之间存在的间隙及铝基体自身存在的冶金缺陷共同导致,然而受制于当前X射线检测能力,该冶金缺陷无法通过常规无损检测识别。最后,针对该渗漏问题,通过铸造工艺方案优化,解决了该机匣管路的渗漏问题。

关键词:铝合金机匣;熔模铸造;渗漏;冶金缺陷

中图分类号:TG146.2+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)09-0873-04

Leakage Mechanism and Solutions at Embedded Pipes in Aluminum Alloy Casing

DING Qingwei[1], WANG Chunneng[2], SUI Huaiming[3], ZHAO Yinhong[3], CHEN Dongmei[3]

(1. China Aero Engine South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China; 2. Airload Military Representative Office of Zhuzhou Region, Zhuzhou 412000, China; 3. Yangzhou Fengming Photoelectric New Materials Co., Ltd., Yangzhou 225117, China)

Abstract: To solve the leakage problem during the sealing test of an aero-engine aluminum alloy casing formed by an embedded pipe, the mechanism of the leakage was analysed by micro/macro structure observation and digital X-ray real-time imaging (DR) technology, and then the solution measures were formulated. With the analysis of the structure and process characteristics, it is clear that the leakage is caused by the gap between the embedded stainless steel tube and the aluminum matrix and the metallurgical defects of the aluminum matrix. However, limited by the X-ray detection capability, this metallurgical defect cannot be identified by conventional nondestructive testing. Finally, the optimization of the casting process has been taken to solve the leakage problem of the casing.

Key words: aluminum alloy casing; investment casting; leakage; metallurgical defects

铸造成型的金属整体结构件因为铸件整体为铸态组织,其内部往往存在疏松、气孔、夹渣等冶金缺陷。这些冶金缺陷的存在会对铸造成型的金属整体结构件密封性产生极大的影响,导致铸件在使用过程中发生渗漏[1]。航空发动机用铝合金机匣采用多功能集成的一体化设计以实现发动机的进气、供油、减重等目标,基于该设计理念下的铝合金机匣结构极其复杂,通常采用砂型铸造和熔模铸造成型。因要实现供油功能,机匣内部的油管路在铸件或机加工阶段需要进行密封性试验以保证发动机的服役安全,这也是航空发动机多油管路复杂机匣的重要技术指标之一。管路成型可采用在铸型中预埋型芯(砂芯或陶瓷芯)直接铸造成型和预埋金属管(多为不锈钢管或钛管)在铸件凝固后形成管路的方式。相比于管路直接铸造成型的方式,由于预埋管多为拉拔成型,致密性较铸态组织高很多,故采用预埋金属管的方式成型的油管路密封性和可靠性均更好[1-5]。某航空发动机铸造铝合金机匣采用了预埋金属管的工艺,但在产品开发初期,对铸件进行密封性实验时在管路处发现了大量渗漏的问题。本文对该

收稿日期:2022-02-09

作者简介:丁清伟,1989年生,工程师,工学博士.主要从事铝合金材料制备技术及组织调控机理研究方面的工作.
Email: dingqingwei226@163.com

引用格式:丁清伟,汪春能,眭怀明,等.铝合金机匣预埋管处渗漏机理分析及解决措施[J].铸造技术,2023,44(9):873-876.
DING Q W, WANG C N, SUI H M, et al. Leakage mechanism and solutions at embedded pipes in aluminum alloy casing[J]. Foundry Technology, 2023, 44(9): 873-876.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

问题进行系统的研究与分析，阐明了采用预埋管成型管路的铸件渗漏机理，并制定了相应解决措施。

1 机匣预埋管处渗漏机理研究

1.1 问题概述

某航空发动机铸造铝合金(牌号为 ZL105)机匣采用熔模铸造成型，其支板处内嵌 1 根引气管，如图 1 所示。该引气管采用预埋不锈钢管(壁厚 1 mm、ϕ6 mm 冷拉拔钢管，牌号为 1Cr18Ni9Ti)的方式在浇注后镶嵌于机匣支板中。该机匣加工后需要在专用打压工装下进行密封性试验，要求在 0.6 MPa 压力下保持 5 min 不渗漏。因气管两端无法装夹封堵，故将整个机匣封堵起来进行密封性试验。对机匣进行密封性试验时，在预埋不锈钢管支板侧壁发现有渗漏的情况，如图 2 所示。

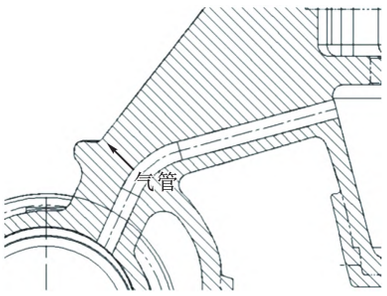

图 1 机匣支板上的气管
Fig.1 Pipe on the support plate of the casing

图 2 机匣打压渗漏
Fig.2 Leakage of the casing

1.2 原因分析

铸造铝/镁合金机匣管路及内腔密封性试验出现渗漏一般由管壁或内腔壁冶金组织不良造成，机匣铸件中存在的气孔、夹杂、疏松等缺陷都会成为渗漏通道，造成密封性试验不合格[6-7]。但本文所述机匣管路采用预埋管方式，预埋管为冷拉拔的不锈钢管，组织致密且密封性良好，不锈钢管并不会发生渗漏。为分析机匣在密封性试验时发生渗漏的原因，分别对预埋管与铝基体的结合性及铝基体的冶金质量进行分析。

1.2.1 预埋管与铝基体结合性分析

浇注过程中，铸造铝合金熔体经浇道进入模壳型腔。当熔体进入预埋不锈钢管所在支板处时，在熔体凝固过程中，铝基体和不锈钢管是否会发生冶金结合决定了两者之间的结合性。为观察预埋不锈钢管与铝基体的结合性，采用型号为 4XC 金相显微镜进行观察分析，结果如图 3 所示。从图中可以看出不锈钢管和铝基体未形成冶金结合。由于零件浇注不是在真空状态下进行，因此在铸件凝固过程中不锈钢管表面存在的氧化膜会导致不锈钢管和铝基体难以实现冶金结合。对比两种材料的物理特性(表 1)可以看出，不锈钢和铝基体的熔点及热膨胀系数差异较大，铝基体的熔点远低于不锈钢，这也导致两种金属在铝合金浇注温度(700～720 ℃)下难以实现冶金结合。同时，由于两种金属的热膨胀系数差异较大，铸件凝固过程中的收缩不一致，导致未形成冶金结合的界面拉扯、扩大，进而形成间隙。

表1 不锈钢管与铝基体物理特性[8]
Tab.1 Physical properties of the stainless steel tube and aluminum matrix[8]

材料	热膨胀系数 /(10^{-6}·℃$^{-1}$)	熔点 /℃
1Cr18Ni9Ti	16.6～18.6	1 400～1 425
ZL105	23.1～24.0	577~627

根据以上分析可知，铸件在进行密封性试验时，由于不锈钢管和铝基体之间存在间隙，测试用的防锈液会进入不锈钢管和铝基体的间隙中。若此时支板处铝基体存在疏松、气孔等冶金缺陷并形成渗漏通道，则会导致机匣铸件在密封性试验时出现渗漏。

1.2.2 铝基体冶金质量分析

为进一步确认机匣铸件在密封性试验时产生渗漏的机理，截取支板截面进行低倍组织和显微金相

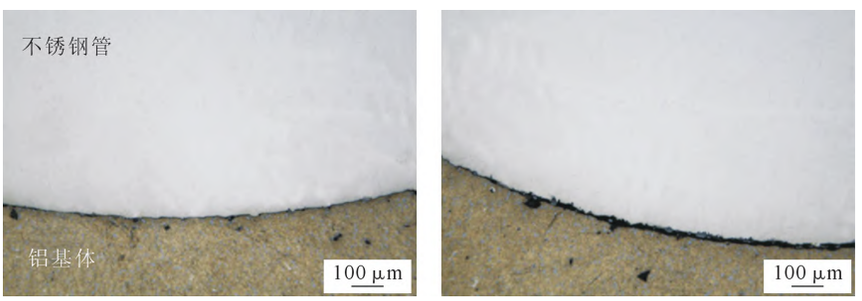

图 3 预埋不锈钢管与铝基体金相组织
Fig.3 Metallographic structure of the embedded stainless steel tube and aluminum matrix

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

组织观察,结果如图 4 所示。从图 4(a)低倍组织看出，不锈钢管一侧的铝基体存在明显的冶金缺陷。如图 4(b)所示,进一步明确该冶金缺陷为冷隔、疏松和气孔缺陷[9]。由此可以推断,机匣进行密封性试验时,进入机匣支板处不锈钢管和铝基体间间隙的防锈液会通过钢管一侧铝基体中的冷隔、疏松和气孔等冶金缺陷渗出,产生渗漏,造成机匣铸件密封性试验不合格。从图 4(b)看出,铝合金熔体在浇注充型过程中,两股熔体分别从不锈钢管外缘的两侧汇流于图中所示位置。此时,一方面靠近钢管的熔体温度较低(受钢管激冷作用);另一方面,在汇流处出现憋气的现象,导致机匣铸件在此处产生冷隔、疏松和气孔缺陷。

1.2.3　铝合金机匣预埋管处渗漏机理

通过对机匣铸件渗漏处支板内不锈钢管和铝基体结合性分析以及不锈钢管外侧支板铝基体的冶金质量分析,可以明确铝合金机匣预埋管处渗漏的机理为:①不锈钢管和铝基体由于钢管表面存在氧化膜及两种金属材料膨胀系数的差异使得铸件凝固后不锈钢管和铝基体结合不紧密，存在间隙;②机匣进行密封性试验时，防锈液被压入该间隙，并通过钢管外侧铝基体中在铸造凝固过程中产生的冷隔、疏松和气孔等冶金缺陷渗出,产生渗漏。除上述原因之外，经过对机匣铸件进行 X 射线实时成像检测(型号为 XYG-3205/2),如图 5 所示,可以发现不锈钢管在支板中偏心导致钢管靠下方一侧的铝基体偏薄,也对机匣铸件的渗漏产生影响。

在机匣铸件生产工艺流程中，铸件交付前需要进行 X 射线检查,确保其冶金质量合格。在本文所讨论的机匣铸件中,铸件经 X 射线检查合格,但铸件的剖切低倍和高倍检查结果表明铸件在支板内靠近钢管处的铝基体中存在冶金缺陷(图 4)。这主要是因为 X 射线检查有一定的局限性,若从图 4 所示的横向透射,由于该方向上铸件过厚(约 20 mm),透射效果不佳;若从纵向透射,图 4 所示铸件中的冶金缺陷处于不锈钢管的下方,钢管的密度远大于铝基体,故在 X 射线透射时,由于两种材料对 X 射线的吸收情况存在明显差异，使得铝基体中的冶金缺陷难以分辨[10]。因此,上述原因会导致钢管一侧铝基体成为 X 射线检测盲点，使得铸件存在的冶金缺陷未能被检出,并流入后工序,在机匣铸件进行密封性试验时出现渗漏。

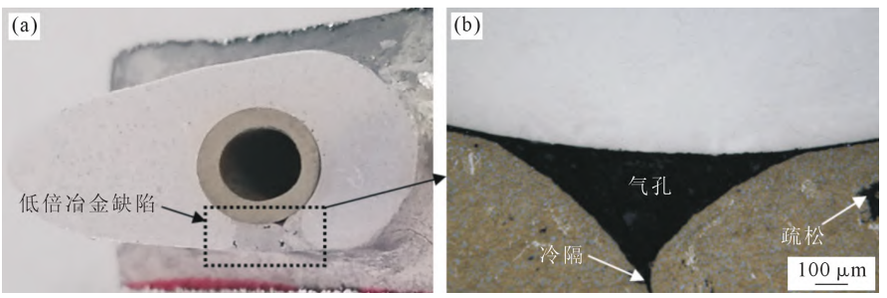

图 4　支板截面组织:(a) 低倍组织,(b) 金相组织

Fig.4　Sectional structure of the support plate: (a) macrostructure, (b) OM image

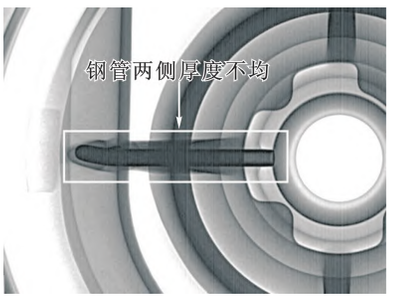

图 5　机匣铸件 DR 检查结果

Fig.5　DR (X-ray digital radiographic imaging) inspection results of casing

2　解决措施

铸件渗漏主要由铸件本体冶金缺陷导致的,故要解决铸件的渗漏问题,需从改善铸件本体组织着手。但是,对于结构复杂的铸件,要使铸件本体致密度符合防渗漏的要求,难度较大。因此,除了改善铸件本体冶金质量之外,还可以采用如浸渗、氩弧焊补焊等修复技术来解决铸件的渗漏问题[11-16]。浸渗是将浸渗剂通过一定的工艺渗入铸件疏松、气孔等内部缺陷中,浸渗剂固化后填充铸件本体中的微孔,达到密封承压的目的。补焊是将有缺陷的铸件本体打磨去除,然后通过氩弧焊将焊丝熔融填充到铸件本体缺陷处获得合格的本体组织。

如图 6 所示，通过在机匣支板外侧容易产生冷隔、疏松和气孔缺陷处设置排气柱来解决这一问题。当铝合金熔体充型至机匣支板处时，熔体充型过程中卷入的气体会随着熔体引至支板上预设的排气柱上。这一方案可将熔体充型末端由机匣支板本体迁移至支板预设的排气柱上，使原本出现在机匣支板本体中的缺陷转移至排气柱上。在铸件成型后再将

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

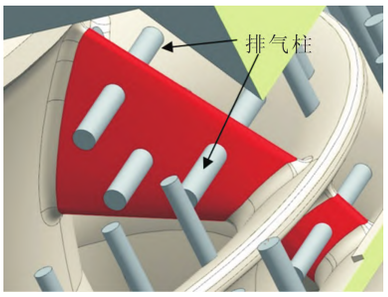

图 6 机匣支板上设置的排气柱
Fig.6 Exhaust column set on the casing support plate

支板上多余的排气柱去除，既提高了支板处铝基体的冶金质量，又获得了该有的铸件结构，从根本上解决了渗漏问题。

3 结语

在预埋不锈钢管的铝合金铸件中，由于不锈钢管和铝基体结合不紧密，存在间隙，机匣进行密封性试验时，防锈液被压入该间隙，并通过钢管外侧铝基体在铸造凝固过程中产生的冷隔、疏松和气孔冶金缺陷渗出，产生渗漏。通过在缺陷处设计排气引流系统，将缺陷迁移至排气引流系统末端，消除了零件本体的组织缺陷，解决了零件的渗漏问题。

参考文献：

[1] 韩丽华. 悬缸基座铸件渗漏原因分析及判定方法探究[J]. 铸造技术，2012, 33(12): 1471-1472.
HAN L H. Leakage reason analysis of base castings in somehow tramcar and judging methods of qualified castings [J]. Foundry Technology, 2012, 33(12): 1471-1472.

[2] 尹志鹏，赵远征，王渤. 铝合金缸盖渗漏原因分析及应对措施[J]. 特种铸造及有色合金，2014, 34(10): 1109-1110.
YIN Z P, ZHAO Y Z, WANG B. Origination of aluminum alloy cylinder head leakage and its countermeasures[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(10): 1109-1110.

[3] 李宏兴，焦玉胜. 解决油缸渗漏缺陷的铸造工艺方案[J]. 铸造，2010, 59(5): 516-517.
LI H X, JIAO Y S. Foundry technique to solve leakage of cylinder [J]. Foundry, 2010, 59(5): 516-517.

[4] 谢正茂，阎顺祥，赵小军，等. NT 缸体渗漏缺陷成因探究[J]. 热加工工艺，2017, 46(7): 258-261.
XIE Z M, YAN S X, ZHAO X J, et al. Research on causes of leakage defects of nt cylinder block[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(7): 258-261.

[5] 冯义宏，云雪峰，霍志刚，等. 薄壁铝合金壳体铸件渗漏问题的工艺改进[J]. 特种铸造及有色合金，2017, 37(10): 1143-1145.
FENG Y H, YUN X F, HUO Z G, et al. Process improvement of air leakage in the aluminum alloy shell castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(10): 1143-1145.

[6] 胡慧，徐华苹，宋高峰，等. AC4D 铸铝合金气缸盖渗漏故障成因分析[J]. 铸造技术，2008, 29(1): 68-71.
HU H, XU H P, SONG G F, et al. Cause analysis for seepage of auto-cylinder head of AC4D casting alloy [J]. Foundry Technology, 2008, 29(1): 68-71.

[7] 孙洪强. 铝合金缸盖铸造中常见缺陷及铸造技术分析[J]. 现代工业经济和信息化，2018, 8(5): 76-77.
SUN H Q. My opinion on common defects in casting of aluminum alloy cylinder head and analysis of casting technology [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2018, 8(5): 76-77.

[8] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册[M]. 北京：中国标准出版社，2001.
Editorial committee of china aeronautical materials handbook. China aeronautical materials handbook[M]. Beijing: Standards Press of China, 2001.

[9] 陈国桢，肖柯则，姜不居. 铸件缺陷和对策手册[M]. 北京：机械工业出版社，1996.
CHEN G Z, XIAO K Z, JIANG B J. Casting defects and countermeasures handbook[M]. Beijing: China Machine Press, 1996.

[10] 刘贵明，马丽丽. 无损检测技术[M]. 北京：国防工业出版社，2010.
LIU G M, MA L L. Nondestructive testing technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[11] 史晓平，李逍翔. 铸造生产中浸渗剂及浸渗技术的选用[J]. 铸造，2012, 61(2): 211-213.
SHI X P, LIU X X. Selection of impregnant and impregnation technology in casting production[J]. Foundry, 2012, 61(2): 211-213.

[12] 张震. 热处理与补焊工艺对 ZL114A 机匣组织性能影响研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2021.
ZHANG Z. Effect of heat treatment and repair welding process on microstructure and properties of ZL114A gearbox[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[13] 齐建，李菲. 缸体缸盖几种修复工艺的应用[J]. 中国铸造装备与技术，2022, 57(4): 53-58.
QI J, LI F. Application of several repairing techniques for cylinder block and cylinder head[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2022, 57(4): 53-58.

[14] 刘凯旋，孙转平，杨新岐，等. 铝合金搅拌摩擦焊缝摩擦塞补焊组织与力学性能[J]. 焊接学报，2019, 40(6): 118-125, 166.
LIU K X, SUN Z P, YANG X Q, et al. Microstructure and mechanical properties of friction plugwelding for friction stir welded aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 118-125, 166.

[15] PETRIE E M. Modern porosity sealing and its use in industrial processes[J]. Metal finishing, 2008, 106(1): 34-39.

[16] 兰银在，吴志强，梁栋，等. 浸渗技术在铝合金机体铸件中的应用[J]. 铸造技术，2011, 32(11): 1557-1559.
LAN Y Z, WU Z Q, LIANG D, et al. Application of vacuum impregnation technology in aluminum alloy cylinder block [J]. Foundry Technology, 2011, 32(11): 1557-1559.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net