

复杂空心精铸叶片残芯检测技术

杨 壮, 董 茵, 梁晓锋, 王 斌, 池海峰

(中国航发动力股份有限公司, 陕西西安 710021)

摘要: 空心涡轮发动机叶片中的残芯直接影响叶片的散热, 进而影响到发动机的性能和安全, 残芯检测技术是发动机制造的关键技术之一。本文针对具有复杂内部气冷通道的航空发动机整铸涡轮工作叶片存在型芯残留难以检测的问题, 对冷光源、柔性光纤内窥镜、水流、X射线、中子成像法、工业CT、叶片内腔填充金属粉结合X射线及示踪剂X射线检测技术进行了应用研究及评价。

关键词: 空心叶片; 残芯; 检测

航空发动机内部零件的工作环境十分恶劣, 尤其是涡轮叶片所处的部位温度最高、应力最为复杂, 服役环境极为苛刻。所以涡轮叶片一直被列为航空发动机的关键构件。近些年为了提高发动机叶片的冷却效率, 其内部的冷却通道设计变得越来越复杂, 叶片的生产过程也变得越来越复杂, 采用预制的陶瓷型芯成形内部复杂冷却通道已经成为高效气冷叶片制造过程中不可缺少的环节, 但由于陶瓷型芯结构复杂且化学性能稳定造成了脱芯困难的问题。未脱净的型芯残留在叶片冷却通道内部容易造成局部堵塞、妨碍冷却通道的畅通甚至形成热点造成局部温度过高, 严重影响发动机的工作和飞行安全^[1-2]。

1 研究对象

整铸盖板高温合金涡轮工作叶片内腔结构复杂, 见图1所示。与以往涡轮叶片内腔相比, 叶片型腔具有“U”形回转体、悬臂梁, 其内腔结构类似于盲孔, 且各腔之间存在180°回转, 造成脱芯过程中陶芯难以顺利脱出腔体, 后续常规目视检测和传统X射线检测不易发现残留在腔壁的残芯, 导致无法判别残余型芯是否存在。

2 检测方法

在空心叶片内部残芯的检测中, 应用最多的方法是冷光源目视检测、柔性光纤内窥镜检测法、X射线检测法、水流法、工业CT透照检测法、内腔填充金属粉结合X射线及处于研究阶段的中子成像照相法和示踪剂结合X射线检测法。

2.1 冷光源目视检查法

将冷光源光纤从叶片各孔伸入叶片内腔, 借助冷光源, 从叶片其他孔腔目视观察叶片内腔是否有残留型芯, 从所有能进入叶片内腔的孔口进入逐一检查。冷光源法的优点是简便易操作, 检测成本低, 高效。缺点是对叶片盲腔及细小狭窄区域, 冷光源光纤不能进入, 即使能进入, 目视也不能观察到该区域是否存在残芯。

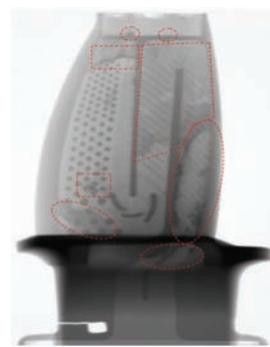


图1 叶片内腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the blade cavity

作者简介:

杨壮(1981-), 男, 工程师, 主要从事涡轮叶片精铸及机械加工工作。电话:

13572493178

通讯作者:

董茵, 女, 研高。电话:

13488225845, E-mail:

13488225845@163.com

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

11-1437-04

收稿日期:

2023-06-25 收到初稿,

2023-07-18 收到修订稿。

2.2 柔性光纤内窥镜检查法

利用内窥镜可以对叶片内腔进行目视检查，以图2所示叶片结构为例，具体方法为：将直径为0.5 mm的柔性镜头装在工业内窥镜上，打开内窥镜光源，目视检查内腔是否存在残芯。

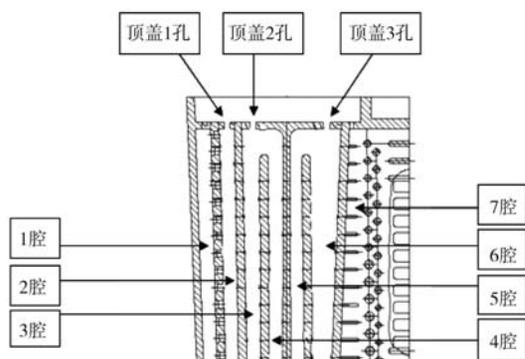


图2 叶片内腔流道示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the inner cavity of the blade

检查步骤：从底端下孔将柔性线镜头伸进，从镜头目视检查1腔内是否有残芯；从顶盖1号孔将柔性线镜头伸进，从镜头目视检查2腔内是否有残芯；从顶盖2号孔将柔性线镜头伸进，从镜头目视检查3腔内是否有残芯；从底端下孔将柔性线镜头伸进，从镜头目视检查4腔内是否有残芯；从底端下孔将柔性线镜头伸进，从镜头目视检查5腔内是否有残芯；从顶盖3号孔将柔性线镜头伸进，从镜头目视检查6腔内是否有残芯；逐一从排气边尾缝孔将柔性线镜头伸进，从镜头目视检查7腔内是否有残芯。

经过分析，认为该检测方法能够直观检测内腔具体情况，如果能够将目镜观测改为显示器观测，可大大提高效率，从而进行工程化应用推广。

2.3 水流通检测法

利用流体在空腔内流动性的特点，对叶片进行水流通检查试验。该方法操作便捷：将叶片榫头专用皮套套在水管上，将叶片叶盆朝上，榫头放入皮套，双手用力并使之紧密接触，打开水管阀门，观察叶片排气边出水情况，如果排气边喷出连续均匀水幕，如图3所示，则证明叶片内腔、排气尾缝无堵芯情况；若排气边喷出水幕存在分叉、断流、薄厚不一等情况，则证明叶片内腔存在堵芯情况，该叶片检测不合格。经过分析，该方法检测效率高，检测结果直观，适应叶片工程化生产需求，可以作为判断是否存在残芯堵塞气流通道的办法。但该方法不能准确判定残余陶瓷型芯的位置，对于附着在叶片内腔的薄片状陶芯也不能有效检出。



图3 水流通道检测

Fig. 3 Flow channel detection

2.4 工业CT透照检测法

采用工业CT检测整铸盖板高压涡轮工作叶片，叶片成像清晰，且能准确判断出残余陶瓷型芯的位置，如图4所示，工业CT检测时间较长，每个叶片大约需要40 min，单个叶片检测成本较高。现在只在检测单晶高压涡轮工作叶片时采用这种方法。

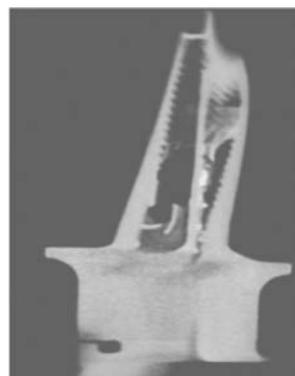


图4 残余陶瓷型芯

Fig. 4 Residual ceramic core

2.5 X射线检测法

X射线法具有设备简单，检测效率高，检测费用低且放射性小等优点。但是在叶片内腔拐角处，因其X射线底片清晰度不足，加上残芯体积较小较薄，难以确认叶片内腔拐角等细节处是否存在残余型芯，容易漏检。

2.6 中子成像检测法

中子成像检测的优点是对金属的穿透能力更强，可以检测原子序数相近的物质，成像清晰度更好。国外对发动机涡轮叶片残芯的检测多采用中子成像照相技术^[3]，并且在检测过程中进行了氧化钆掺杂或渗透以提高中子成像的检测灵敏度。相较于国外，我国在该方面研究由于受限于国内中子源数量较少的制约，导致国内对中子成像检测方面的研究进展缓慢。国内发动机叶片制造行业对于残芯的

检测仍然主要依赖X射线检测，为了提高X射线检测能力，国内采取的主要方式有填充金属粉，改变工艺参数及图像处理，添加X射线示踪剂^[4]三种。但是目前为止，无论是中子成像示踪剂还是X射线示踪剂在国内发动机叶片检测中都尚未得到实际的工程应用。

2.7 内腔填充金属粉结合X射线检测法

对于内腔结构复杂肋条纵横交错的燃机叶片，见图5，用X光检测，受结构影响，很难发现残留的陶芯。在叶片内填充金属粉，并震实，使其在X光片上与叶片合金呈现的颜色灰度接近，如果叶片内腔有残留陶芯，该区域与金属叶片及填充的金属粉灰度差异较大，利用该原理，可以大大增强X射线对于残留陶芯的检出率。

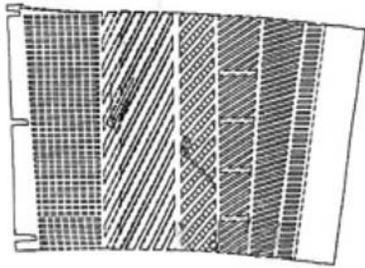


图5 燃机叶片内腔示意图

Fig. 5 Sketch of the inner cavity of the gas turbine blade

2.8 示踪剂X射线检测法

对于双层壁冷叶片，冷光源及内窥镜光纤不能插进叶片内腔细窄缝隙处，使检测区域受限。采用填充金属粉，灌装效率很低，且存在检测完粉料不能完全排出，如残留粉料，会给叶片后面工序及使用过程带来很大风险。国际上有一种采用X射线检测空心铸件内部残留型芯的新方法，该方法主要通过将一种密度远高于陶瓷型芯和叶片材料的X射线示踪剂加入陶瓷型芯中，之后再对残芯进行检测。常用的示踪剂有 HfO_2 和 Na_2WO_4 两种，经实际生产检验，添加示踪剂后的检测灵敏度得到大幅度提高^[5]。

按照传统的设计思想，选择重原子金属元素作为示踪剂。哈尔滨工业大学对钨酸钠示踪剂、制备工艺及应用效果进行了研究。钨酸钠不含铅元素，而且钨是高熔点金属元素，不会与叶片材料形成低熔点的“侵蚀点”。由于钨酸钠能较好地溶解于水，因此，可以选择水作为溶剂，形成钨酸钠水溶液，利用钨酸钠水溶液作为示踪剂，可以利用浸泡的方法，对带有残芯的叶片进行浸泡，通过示踪剂的渗透和扩散将钨酸钠渗透到残芯中，或者将散落的砂粒浸润、包裹，利用钨酸钠对X射线的遮挡效应，较好地将对残芯示踪

出来。

3 残芯检测技术评价

(1) 冷光源目视检测法便捷高效、成本低，适合内腔结构简单、气流孔及工艺孔孔径大、孔道弯曲少、便于目视观察内腔的铸件使用，在工程化大批量生产中应用非常广泛。

(2) 柔性光纤内窥镜检测研究方法操作便捷，能够直观检测内腔情况，检验效率高，但目镜观测效率低、精度差，如果配备显示器观测，适合工程化推广应用。柔性内窥镜光纤法适用于内腔较复杂，孔道弯曲少、孔径不小于0.5 mm的叶片。

(3) 水流通试验研究方法操作便捷、检测效率高，且检测结果直观，适应现场工程化生产模式。但是对于非堵塞、非块状的片状残芯，尤其是附着在叶片内腔壁上的残芯无法检出。

(4) 内腔填充金属粉结合X射线检查的检测方法可以直观判断内腔是否存在残余陶芯，该方法在内腔为交叉筋的叶片残芯检测中已经广泛应用，但高温合金涡轮叶片内腔结构复杂，存在填充盲点，填充物无法完全充满型腔，导致难以判别残芯状况。对于整铸盖板叶片及双层壁冷叶片，填充的金属粉不易排出，该方法不适用。

(5) 工业CT透照检测方法研究不仅可以直观地显示出叶片的内腔结构，也可以准确定位残余陶瓷型芯的位置，但由于其单叶片检测所需时间过长，效率低，成本高，不适合在工程化应用推广。

(6) 中子成像法和示踪剂X射线法。中子成像法和示踪剂X射线法因其穿透能力更强、成像效果更好，可以检测各种内腔结构的叶片内残芯。但是所用设备昂贵、材料特殊，有些材料还具有放射性，处于试验阶段，不适合工程化生产应用。

4 结束语

(1) 对于复杂空心涡轮叶片，采用哪种残芯检测方法要根据叶片结构来选择，选择原则为经济、高效、易检出。可以几种方法结合使用。比如脱芯后先用冷光源目视检测，然后采用水流通试验对叶片内腔进行初步检查，筛选掉排气边出水不均匀的叶片，然后进一步采用柔性光纤内窥镜对叶片内腔进行检查是比较合理的检测方法。

(2) 因叶片的内部冶金质量采用X光射线检测，残芯检测可以结合叶片冶金质量一并进行，高温合金单晶叶片壁厚测量采用工业CT，也可以增加陶芯容易残留特殊区域的检测，以便于同时检测出残芯。对一些内腔结构复杂，无法添加填充物的涡轮叶片，不能

有效检出薄壁残余型芯，可以采用X射线结合内窥镜等其他辅助方法进行检测。

(3) 示踪剂X射线法不受叶片结构、设备及中子

源限制，能增强图像显示，提高残芯的检出率，在双层壁冷等复杂结构空心叶片中应用前景广阔，应该加快其研究进展。

参考文献:

- [1] 熊建平, 赵国庆, 戴斌煜, 等. 陶瓷型芯在航空发动机叶片生产中的应用与发展 [J]. 江西科学, 2007, 25 (6): 801-806.
- [2] 李彪. 高温合金空心叶片用氧化铝基陶瓷型芯脱芯研究现状 [J]. 铸造, 2014 (3): 232-236.
- [3] 陈启芳. 涡轮叶片残芯检测中子照相检测 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- [4] 李航. 镍合金中铝基残芯的中子标记成像检出灵敏度 [J]. 核技术, 2012 (1): 17-20.
- [5] 杨芬芬. 空心叶片内部微量残芯的检测方法及工艺 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

Residual Core Detection Technology for Complex Hollow Precision Casting Blades

YANG Zhuang, DONG Yin, LIANG Xiao-feng, WANG Bin, CHI Hai-feng
(China Aviation Power Co., Ltd., Xi'an710021, Shaanxi, China)

Abstract:

Residual cores in hollow turbine engine blades directly affect the heat dissipation of the blades, thereby affecting the performance and safety of the engine. Residual core detection technology is one of the key technologies in engine manufacturing. This article focuses on the problem of difficult detection of core residues in integral cast turbine blades of aircraft engines with internal gas cooling channels. The application research and evaluation of cold light sources, flexible fiber optic endoscopes, water flow, X-ray, neutron imaging methods, industrial CT, metal powder filling in the blade cavity combined with X-ray and tracer X-ray detection technology were conducted.

Key words:

hollow blade; residual core; detection
