

航天用钨渗铜产品水浸超声检测研究

康 达 张 宏 马兆光 李士琦 林珊珊

(北京动力机械研究所, 北京 100074)



摘要: 针对钨渗铜材料在烧结成型、熔渗等过程中可能出现的孔洞、夹杂、渗铜不均等缺陷, 采用水浸超声波检测方法对其进行内部质量检测, 并分析检测结果; 在此基础上, 将部分典型缺陷 C 扫描检测结果同射线检测结果进行对比, 从而验证水浸超声检测方法的可行性与适用性, 达到快速、便捷检测的目的。同时, 水浸超声检测方法还能够实现对缺陷位置和尺寸的定量, 为后续强度分析、寿命预测提供数据参考。

关键词: 钨渗铜; 水浸超声检测; C 扫描图像; 射线检测; 缺陷定量

Water-immersion Ultrasonic Testing of Copper Infiltrated Tungsten Material Used in Aerospace

Kang Da Zhang Hong Ma Zhaoguang Li Shiqi Lin Shanshan

(Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074)

Abstract: To solve the problems of defect, holes, and inclusions in the process of sintering forming and melting infiltration of copper-tungsten materials, the water-immersion ultrasonic testing method was used to conduct internal quality inspection. Based on the results, the comparison was made between ultrasonic C scan result and X-ray results to verify the reliability and feasibility of water-immersion ultrasonic testing method. Meanwhile, the water-immersion ultrasonic testing method can provide quantitative results of location and size, so as to provide data reference for subsequent strength analysis and life prediction.

Key words: copperinfiltrated tungsten; water-immersion ultrasonic testing; C-scan imaging; X-ray testing; defect quantify

1 引言

钨铜合金材料是仅次于硬质合金的第二大类钨的深加工制品^[1]。钨铜合金中钨渗铜材料是通过高温烧结加熔渗工艺制成, 首先, 钨粉经等静压成型, 并在还原气氛中烧结成具有多孔结构的钨骨架; 其次, 经过毛细原理将液态金属铜渗入上述多孔结构钨骨架; 最终, 形成钨渗铜原材料制品, 作为一种军用耐高温复合材料广泛应用于航天、兵器等关键领域^[2~4]。

2 国内外研究现状

钨渗铜产品主要包括喷管喉衬、燃气舵、前舵面等, 产品材料质量直接决定产品使用性能, 如: 战略、战术固体火箭发动机中使用的喷管喉衬在点火启动时, 工作环境十分恶劣, 燃烧温度甚至达到 3000℃以上, 而裂纹、渗铜不均等自然缺陷将直接导致喷管烧穿, 引起飞行事故^[5]; 燃气舵式推矢装置应用在多型号空空导弹上, 燃气舵的性能直接取决于原材料质量, 自然缺陷的存在将直接导致空空导弹变向失败, 使得导弹飞行路径达不到预定目标^[6]; 导弹前舵面, 作为方向控制关键部件, 承受高温冲刷, 材料的内部缺陷将直接导致飞行偏离预定目标。因此, 利用无损检测方法对钨渗铜产品检测具有十分重要意义。

作者简介: 康达 (1991), 硕士, 材料科学与工程专业; 研究方向: 发动机关键部件无损检测研究。

收稿日期: 2018-11-06

由于钨渗铜产品大多应用于武器装备关键构件之上，国外几乎没有对于该类型产品检测相关研究报道。国内对于钨铜合金产品检测相关研究报道也较少，针对钨铜合金产品的无损检测方法主要集中于射线检测和超声检测两种方法。目前，射线检测^[6]根据不同产品类型采用的检测标准主要依照 GJB6488—2008、GJB2299A—2005，而对于超声检测没有统一的检测方法规定。中国工程物理研究院王增勇等^[7, 8]针对钨铜合金法兰部件进行常规超声纵波+横波互补检测，设计了专用对比试块，并在此基础之上，调整检测灵敏度，最终实现了对部件内部孔隙类缺陷的有效检出及定位，但常规超声波检测缺陷显示判读困难，不直观。西安理工大学陈文革等^[9]利用超声波对钨铜合金零件内部质量进行初步评价，结果表明，超声波散射波的波形在一定程度上反应零件中孔隙的数量和状态，且超声波声速和孔隙率存在一定的线性关系，可为材料质量评价提供一定参考。

本文针对典型钨渗铜产品进行水浸超声波检测，并将典型缺陷 C 扫描检测结果同射线检测底片结果进行对比分析，进而对水浸超声检测方法的可行性及检测结果的可靠性进行了有效验证。同时，该方法实现了对孔洞类缺陷位置和尺寸的定量表征。

3 水浸超声检测系统

水浸超声检测是通过水作为耦合介质，通过超声主机激发水浸聚焦探头实现声束发射和接收，其扫查过程通过自动化运动系统控制^[10]，同时采集超声波检测信号，最终进行 A 扫查、B 扫描、C 扫描成像，其组成示意图如图 1 所示。

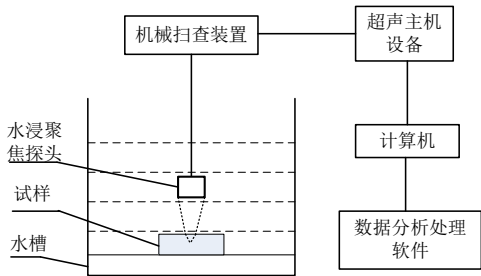


图 1 水浸超声波检测系统组成示意图

水浸超声波检测优势在于通过机械装置进行扫查，扫查速度及精度得到了保证，有效克服了手动扫查过程中压紧力度及速度的问题；同时 B 扫描、C 扫

描检测结果通过检测图像可视化显示，有利于缺陷的识别与判读，进一步消除了人为因素带来的干扰。此外，通过数据处理软件还可实现对于产品内部缺陷的定位及定量。

4 实验及分析讨论

4.1 实验

检测采用 FOCUS LT 相控阵超声检测仪，5MHz，水浸聚焦探头，晶片尺寸 10mm，焦距 50mm，步进间隔为 0.2mm。按照 GJB 1580A—2004 要求制作检测用对比试块，试块材质为钨渗铜，其中平底孔直径为 1.2mm。利用上述水浸超检测系统对标准试样中平底孔进行检测，并调整检测灵敏度，平底孔检测结果如图 2 所示。

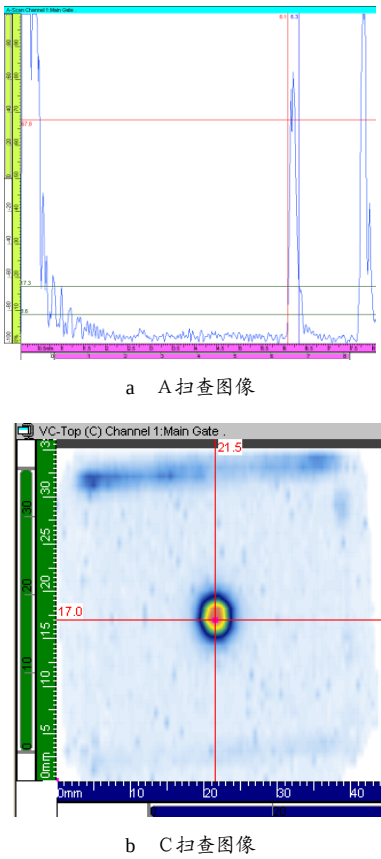


图 2 平底孔缺陷成像

在上述基础之上，利用水浸超声检测系统对钨渗铜产品燃气舵不同舵面进行检测，不同产品典型缺陷检测 C 扫描图像如图 3 所示。

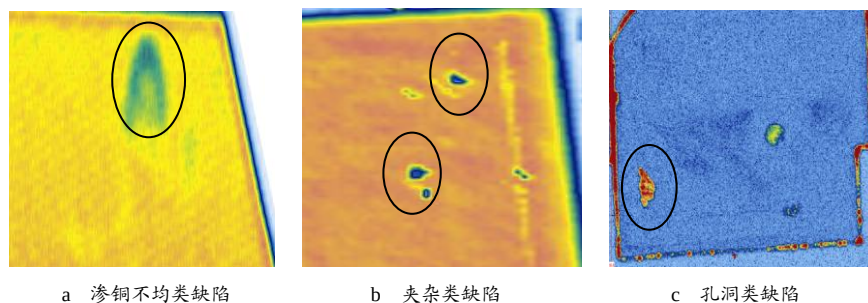


图3 水浸超声 C 扫描检测结果

由图 3 可知，渗铜不均、夹杂及孔洞等缺陷在 C 扫描图像上呈不同形态分布，通过对检测图像的判别可较为准确的实现缺陷识别。

针对部分典型缺陷产品进行了射线检测，检测底片如图 4 所示，由图可知，不同类型缺陷在射线底片上黑度及缺陷形貌存在一定差异^[6]，利用上述特点可有效识别缺陷。

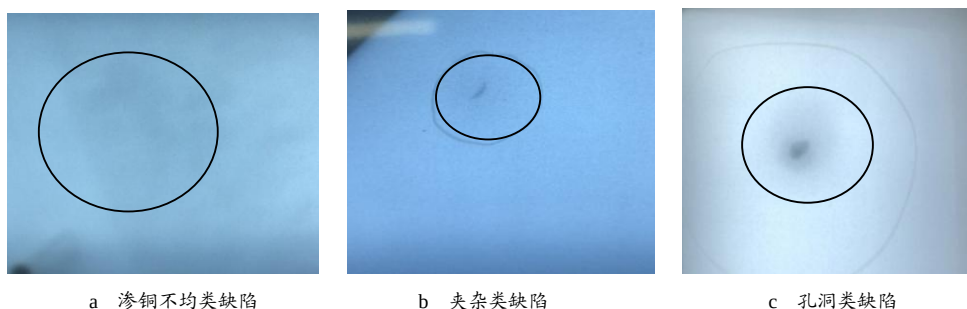


图4 射线检测底片结果

4.2 分析讨论

孔洞、夹杂类缺陷是钨渗铜材料中未被钨和铜填充的区域，渗铜不均是在熔渗过程中铜的分布不均匀所致。水浸超声 C 扫描检测本质上是利用声波在传播过程中遇到异质界面会发生不同程度反射，利用水浸聚焦探头通过机械结构运动采集不同位置数据，最终合成多视图扫描图像。当声波遇到夹杂、孔洞类缺陷，该类缺陷声阻抗与钨渗铜基体存在较大差异，造成检测回波信号幅值较大，缺陷图像显示清晰，缺陷较为容易识别；而对于渗铜不均类缺陷，其声阻抗与基体相差不大，在检测信号上表现为底波信号幅值出现不

同程度降低，而 C 扫描检测的优势则是可通过底波幅值变化对检测结果进行分析。同时，通过对深度方向数据采集，可合成 B 扫描图像，能够实现对于产品内部缺陷深度定位需求。

通过将水浸超声 C 扫描检测结果同射线检测结果对比可知，两种方法均能够实现对不同类型缺陷的有效检出，但射线检测需要辐射安全防护，底片结果判读存在一定困难，而水浸超声扫描检测无需防护，操作方便快捷，能够实现对于不同类型缺陷有效识别及定位、定量。在一定程度上其能够有效代替射线检测完成实际检测需求。

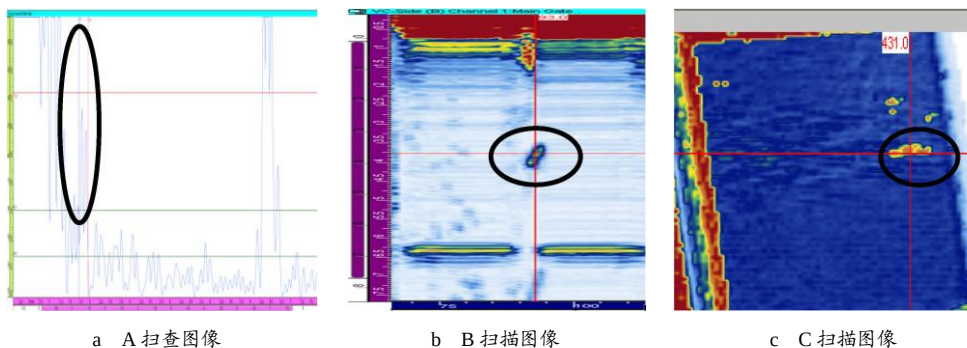


图5 孔洞类缺陷水浸超声多视图显示

此外, 超声检测还能够实现缺陷定量, 图 5 给出了孔洞类缺陷检测 A 扫、B 扫和 C 扫查图像及定量结果。利用数据分析处理软件可从图 5 中读取缺陷的尺寸信息, 经过换算可知, 缺陷深度为 14.96mm, 缺陷尺寸为 10.73mm。

5 结束语

本文对钨渗铜产品缺陷产生机理及水浸超声波检测原理进行分析,从理论上论证了水浸超声波检测钨渗铜产品的可行性。在上述基础之上,利用水浸超声波检测系统对上钨渗铜产品燃气舵内部质量进行检测,实现了产品内部孔洞、夹杂、渗铜不均等缺陷的检出;利用射线底片与水浸超声 C 扫描检测结果互补验证,结果表明,水浸超声检测能够有效识别缺陷,同时还能够实现对缺陷位置和尺寸的定量评价。

参考文献

- 1 陈伟, 邝用庚, 周武平. 中国高温用钨铜复合材料的研究现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(1): 11~14

（上接第 21 页）

4.6 表面完整性分析结论

通常情况下工件的残余压应力绝对值越大, 疲劳强度越高。工件的疲劳断裂从最弱的点开始, 因而疲劳断裂不是应力的平均值, 而是应力的极限值。表面粗糙度值大的其残余压应力绝对值也较大, 工件仍可拥有高的疲劳强度, 这主要归因于残余应力使得金属内点阵紧缩, 原子之间力场作用增强, 可闭合工件表面空穴, 即使对于表面粗糙度差一些的零件, 仍然可提高疲劳强度。因此, 依据残余应力测试结果所示三种不同加工条件下均可提高材料疲劳寿命。

5 试验验证

采用新工艺方案完成两个批次零件的加工,从中抽取 23 件检测硬铣后表面粗糙度值为 $R_a 0.198 \sim 0.23 \mu\text{m}$, 内孔圆柱度为 $\Phi 0.008 \text{mm}$, 九孔位置度为 $\Phi 0.02 \sim 0.05 \text{mm}$, 较原工艺转子九孔位置度 $\Phi 0.07 \sim 0.11 \text{mm}$ 有了大幅提高,能满足设计各项技术指标要求。

硬态铣削后的转子结合生产进行装调,经测试,油泵出口流量较原工艺方案生产的转子有明显提升。

- 2 吕大铭,周武平. 中国钨基高密度合金的发展[J]. 中国钨业, 2009, 24(5): 107~110
- 3 马运柱,黄伯云,刘文胜. 钨基合金材料的研究现状及其发展趋势[J]. 粉末冶金工业, 2005, 15(5): 49~57
- 4 周武平,吕大铭. 钨铜材料应用和生产的发展现状[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2005, 10(1): 21~25
- 5 肖军,杨晓光,林学书. 空空导弹推矢燃气舵用钨渗铜材料与工艺[J]. 航空兵器, 2009(6): 61~64
- 6 付英. 钨渗铜制品X射线检测的缺陷判读经验[C]. 见: 湖北省科学技术协会编. 武汉NDT学术年会论文集, 2007: 3~5
- 7 王增勇,徐彦霖,张保朝,等. 高密度钨基合金部件超声检测技术[J]. 无损检测, 2004, 26(4): 173~176
- 8 王增勇,李建文,汤光平,等. 超声检测用钨合金棒材试块设计[J]. 无损检测, 2015, 37(7): 11~14
- 9 陈文革,安发顺. 钨铜合金的超声波无损检测分析[J]. 电工材料, 2006(1): 14~16
- 10 郭伟灿. 超声波 C 扫描水浸聚焦技术在叶轮钎焊质量检验中的应用[J]. 无损检测, 2001, 23(9): 391~395

新工艺方案油泵九个柱塞吸排油相互叠加的均匀性有所提高,减少了因流量不均匀产生的内部损耗,涨圈与转子柱塞孔的密封情况得到改善,降低了涨圈部位的泄漏量,因此油泵出口流量更加接近于理论值。

6 结束语

通过精密小直径深长孔系硬态铣削技术研究，突破了高强度淬硬材质传统工艺方法，解决了长期以来困扰机加生产线小直径深长孔系完全依赖手工研加工方式，降低了工人的劳动强度，提高了精密元件的加工质量及加工效率。同时产品装调性能显著提高，满足了产品质量及可靠性要求，提升了企业的核心制造能力。

参考文献

- 1 陈宏钧. 实用机械加工工艺手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016
- 2 赵如海. 金属机械加工工艺设计手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010
- 3 马逢时, 周晔, 刘传冰. 六西格玛管理统计指南[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2018

