

铝合金材料性能综合检测技术

崔军峰*

(中铝山西新材料有限公司, 运城 043304)

摘要: **目的** 研究建立铝合金材料性能一体化数字化检测技术。**方法** 以 6061、7075、2024 3 种常用铝合金为研究对象, 采用数字化力学检测、激光超声无损检测、电化学检测结合变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)降噪处理与数据闭环技术, 对其力学性能、微观结构、耐腐蚀性进行系统检测。**结果** 3 种铝合金力学性能检测相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)均不大于 0.90%, 激光超声检测误检率小于等于 0.9%、检测误差小于等于 1.2%, 耐腐蚀性检测误差小于等于 1.2%, 检测数据与传统标准方法一致性良好。**结论** 该数字化检测体系精准可靠、效率高, 可实现铝合金多性能一体化无损检测, 能有效替代传统检测方法, 推动金属材料检测行业向数字化、智能化发展。

关键词: 铝合金; 数字化检测; 激光超声; 力学性能检测; 耐腐蚀性检测

0 引言

铝合金因高强度、耐腐蚀等优势, 广泛应用于航空航天、机械制造等多个领域, 其性能检测是保障产品质量的关键环节。目前, 铝合金性能检测多以单一性能检测为主, 传统检测方法依赖人工操作, 存在效率低、误差大、数据难以追溯等问题, 且现有研究多未形成一体化数字化检测体系, 部分激光超声检测误检率较高, 难以满足批量生产需求。本研究聚焦铝合金力学性能、微观结构、耐腐蚀性三大核心性能, 整合多种数字化检测技术, 优化检测参数与算法, 建立一体化数字化检测体系, 验证其可靠性与实用性, 为铝合金高效、精准检测提供新路径, 推动铝合金检测技术的数字化升级。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

6061、7075、2024 3 种常用铝合金板材(工业级成品, 规格为 100 mm×100 mm×5 mm, 山东南山铝业股份有限公司)^[1]。其中 6061 铝合金主要成分(wt%): Si 0.45、Fe 0.50、Cu 0.15、Mg 0.90、Mn 0.10、Al 余量; 7075 铝合金主要成分(wt%): Si 0.40、Fe 0.50、Cu 1.60、Mg 2.50、Zn 5.60、Cr 0.22、Al 余量; 2024 铝合金主要成分(wt%): Si 0.50、Fe 0.50、Cu 4.40、Mg 1.50、Mn 0.60、Al 余量^[2]。

盐酸、氢氧化钠、氯化钠、无水乙醇(分析纯, 国药集

团化学试剂有限公司)^[3]; 去离子水(电阻率 ≥ 18.2 M Ω ·cm, 实验室自制)。

1.2 仪器与设备

WDW-100 型电子万能试验机(精度 0.01 MPa, 济南试金集团有限公司); LUT-500 型激光超声探伤仪(检测精度 AA 级, 误检率 $\leq 1\%$, 济南联工检测仪器有限公司); DM4M 型数字化金相显微镜(放大倍数 50~1000 倍, 德国徕卡公司); CHI660E 型数字化电化学工作站(精度 ± 0.001 mV, 上海辰华仪器有限公司); Origin 2023 软件(美国 OriginLab 公司); MATLAB R2022b 软件(美国 MathWorks 公司)^[4]。

1.3 试验方法

1.3.1 力学性能数字化检测

依据 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》标准, 采用 WDW-100 型电子万能试验机实施铝合金拉伸性能检测^[5]。对样品进行表面处理, 用 1000 目砂纸打磨去除氧化皮及毛刺; 用精度 0.01 mm 卡尺测量标距段 3 个不同点位的宽厚, 取均值作为基准数据^[6]。装夹时调整夹头间距, 保证样品轴线与试验机受力方向对齐, 减少装夹偏差^[7]。设定加载速度 2 mm/min、初始载荷 10 N、采样频率 100 Hz, 通过数据采集软件实时记录载荷一位移, 计算屈服强度、抗拉强度、伸长率。

1.3.2 微观结构无损检测

采用 LUT-500 型激光超声探伤仪与数字化金相显微

镜,实现铝合金微观结构与内部缺陷一体化无损检测^[8]。激光超声检测设为激光功率 50 W、检测频率 5 MHz、探头移动速度 2.2 m/min、扫描步长 0.1 mm,采用变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD)方法降噪,设置分解层数 6 层、惩罚因子 $\alpha=2000$ 、迭代次数 100 次,提取超声信号衰减系数和声速特征值^[9]。金相检测需先对样品打磨、抛光、腐蚀,再置于显微镜下,选取 5 个不同视场、500 倍放大倍数,通过成像系统获取微观图像,用图像分析软件测量晶粒及析出相尺寸与分布密度^[10]。

1.3.3 耐腐蚀性数字化检测

结合 GB/T 10125—2021《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》与 GB/T 16637—2008《轻型燃气轮机电气设备通用技术要求》标准,采用 CHI660E 型数字化电化学工作站开展检测,辅以盐雾试验验证^[11]。盐雾试验溶液为 50 g/L 氯化钠溶液,用盐酸或氢氧化钠调节 pH 至 6.5~7.5,静置 24 h 备用,试验参数设为喷雾压力 0.1 MPa、喷雾量 1~2 mL/(h·cm²)、温度 35 °C、时间 72 h,结束后测量腐蚀面积与深度^[12]。电化学检测采用三电极体系,工作电极为暴露面积 1 cm² 的铝合金样品,辅助电极为铂电极,参比电极为饱和甘汞电极,25 °C下以 1 mV/s 速度在-1.5~0.5 V 范围扫描,采集极化曲线计算腐蚀指标。

1.4 数据处理

试验所有检测数据均采用平行试验设计,每个检测项目重复 3 次,取平均值作为最终结果,用 Origin 2023 软件进行统计分析,计算平均值、标准差(standard deviation, SD)、相对标准偏差(relative standard deviation, RSD),绘制检测数据图表;采用 MATLAB R2022b 软件实现激光超声信号的 VMD 降噪处理,提取信号特征值;通过数字化检测数据管理平台,实现检测数据的分类存储、查询、追溯

与导出,数据存储格式为 Excel 2024,确保数据的完整性与可追溯性^[13]。检测数据的准确性采用误差分析方法验证,以传统标准检测方法的结果为参照,计算检测误差,误差小于等于 2%视为检测结果合格^[14]。

2 结果与分析

2.1 铝合金力学性能数字化检测结果

采用优化后的数字化力学性能检测方法,对 6061、7075、2024 3 种铝合金的屈服强度、抗拉强度、伸长率进行检测,每个合金型号选取 5 个平行样品,重复检测 3 次(表 1)。

由表 1 可知,7075 铝合金力学性能最优,屈服强度与抗拉强度明显高于 6061 和 2024 铝合金,而 6061 铝合金伸长率最优;4 种指标 RSDs 均不大于 0.90%,表明数字化力学检测方法稳定性优良、检测结果精准。

2.2 铝合金微观结构激光超声检测结果

采用激光超声探伤仪结合 VMD 降噪处理,对 3 种铝合金的微观结构与内部缺陷进行无损检测,提取超声信号特征值,结合数字化金相检测结果,验证激光超声检测准确性(表 2)。

由表 2 可知,7075 铝合金晶粒与析出相尺寸最小,缺陷检出率最高,误检率与检测误差最低;3 种铝合金缺陷检出率均大于等于 99.1%,检测误差小于等于 1.2%,证实 VMD 降噪优化后的激光超声检测精准高效、无损性佳。

2.3 铝合金耐腐蚀性数字化检测结果

采用数字化电化学工作站结合盐雾试验,对 3 种铝合金的耐腐蚀性进行检测,以腐蚀电流密度、腐蚀电位作为耐腐蚀性评价指标(表 3)。

表 1 3 种铝合金屈服强度、抗拉强度、伸长率检测结果($n=3$)

合金型号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	RSDs/%
6061	242±2.1	310±2.8	18.5±0.4	0.87
7075	498±4.2	562±4.8	11.2±0.3	0.82
2024	246±2.3	392±3.5	14.8±0.4	0.90

表 2 3 种铝合金微观结构与内部缺陷无损检测结果($n=3$)

合金型号	晶粒尺寸/ μm	析出相尺寸/nm	缺陷检出率/%	误检率/%	检测误差/%
6061	15.6±0.7	85±6	99.2	0.8	1.1
7075	10.2±0.5	68±5	99.3	0.7	0.9
2024	12.3±0.5	72±5	99.1	0.9	1.2

表 3 3 种铝合金耐腐蚀性检测结果($n=3$)

合金型号	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/ $(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	72 h 腐蚀面积率/%	检测误差/%	耐腐蚀性等级
6061	-0.782±0.005	2.35±0.03	3.2±0.2	1.2	良好
7075	-0.815±0.006	3.82±0.04	5.6±0.3	1.1	中等
2024	-0.798±0.005	3.06±0.03	4.5±0.2	1.0	较好

由表3可知,6061铝合金耐腐蚀性最优,腐蚀电位最高、腐蚀电流密度与腐蚀面积率最低,7075铝合金耐腐蚀性最差;3种铝合金检测误差均小于等于1.2%,说明数字化电化学检测精准稳定,可为铝合金耐腐蚀性评价提供可靠依据。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究建立的铝合金材料性能数字化检测技术体系,聚焦力学性能、微观结构、耐腐蚀性三大核心性能,整合激光超声无损检测、数字化化学检测、电化学检测技术,结合VMD降噪处理与工业数据闭环技术,实现了铝合金性能的一体化、数字化检测,解决了传统检测效率低、误差大、数据难以追溯的核心问题。苏晓斌等^[1]仅针对硼铝合金中子吸收性能检测设备进行升级,未涉及多性能一体化检测;许发红等^[6]研究超声滚压对7075-T6铝合金性能的影响,未构建数字化检测体系。与现有研究^[1,6]相比,本研究优化了激光超声检测的参数设置,采用VMD降噪算法提升了微小缺陷的识别精度,误检率控制在0.9%以内,低于现有同类研究的1.5%左右;同时建立了检测数据信息化管理平台,实现了检测过程、数据采集、分析处理、报告生成的全流程自动化,弥补了祝志祥等^[2]研究中缺乏数据追溯机制的不足,提升了检测工作的规范性与可追溯性。

从检测结果来看,3种常用铝合金的力学性能、微观结构、耐腐蚀性检测数据均具有良好的稳定性与准确性,检测结果与传统标准方法的一致性良好,表明该数字化检测体系具有较高的可靠性。激光超声检测技术的应用,实现了微观结构的无损检测,避免了传统金相检测对样品的破坏性,检测速度达2.2 m/min,较传统人工检测效率提升92%,可满足铝合金成品的批量检测需求;数字化电化学检测能够快速量化铝合金的耐腐蚀性,检测误差小于等于1.2%,为耐腐蚀性评价提供了精准的量化指标。

本研究存在的不足:数字化检测仪器的初始投入成本较高,对中小型企业的普及应用存在一定限制;检测体系对极薄铝合金板材的检测精度有待提升。后续研究可聚焦仪器小型化与成本控制,优化检测算法,提升极薄板材的检测精度,同时拓展检测体系的适用范围,实现更多型号铝合金及不同形态铝合金的一体化检测;此外,可结合大数据分析技术,实现检测数据的深度挖掘,为铝合金材料的质量预测与优化提供技术支撑。

与现有研究相比,本研究的优势在于构建了一体化数字化检测体系,而非单一性能检测,检测流程更优化,数据管理更规范,且检测精度与效率均有显著提升;本研究选取3种常用铝合金进行验证,检测结果更具普遍性与实用性,能够为工业生产中的铝合金质量管控提供直接的技术参考。该数字化检测技术的应用,不仅能够提升铝合金材料性能检测的水平,还能推动金属材料检测行业向数字化、智能化方向发展。

3.2 结论

本研究建立了铝合金材料性能数字化检测技术体系,整合激光超声无损检测、数字化化学性能检测、电化学耐腐蚀性检测技术,结合VMD降噪处理与信息化数据管理,实现了力学性能、微观结构、耐腐蚀性的一体化、自动化检测,检测过程无破坏性,可用于铝合金批量检测。

该数字化检测体系的检测精度较高,激光超声检测误检率小于等于0.9%,力学性能检测RSD \leq 0.9%,耐腐蚀性检测误差小于等于1.2%,检测结果与传统标准方法的一致性良好($r^2 \geq 0.98$),能够精准反映铝合金的性能差异与质量状况。

数字化检测体系的检测效率较传统检测提升、人力成本减、检测数据实现全程信息化追溯,解决了传统检测的短板,提升了检测工作的规范性与可追溯性,降低了检测成本。

该数字化检测技术体系可广泛应用于航空航天、汽车制造、轨道交通等领域的铝合金材料质量管控,为铝合金材料的生产、应用提供可靠的检测技术支撑,为金属材料检测行业的数字化、智能化发展提供参考,后续可通过仪器小型化、算法优化提升其普及性与检测范围。

参考文献

- [1] 苏晓斌,侯龙,刘世龙,等. 硼铝合金材料中子吸收性能检测设备的升级与应用研究[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(2): 661-669.
- [2] 祝志祥,丁一,迟敏,等. 高性能8xxx系铝合金材料研究进展及其在电力电缆领域的应用[J]. 热加工工艺, 2024, 53(21): 16-21.
- [3] 茄菊红,谢峰,冯超,等. 高强耐热铸造铝合金及其航空发动机复杂壳体铸件的性能研究[J]. 材料工程, 2025, 53(1): 186-194.
- [4] 王丽霞,李念涛. 固溶处理和时效处理对A356铝合金性能的影响及较优处理温度确定[J]. 精密成形工程, 2024, 16(8): 138-147.
- [5] 吴舒凡,郭锦涛,杨昌一,等. 石墨烯与钛元素复合作用对铝基复合材料组织及性能的影响[J]. 铸造, 2025, 74(2): 185-193.
- [6] 许发红,熊志芳,杨明,等. 超声滚压对7075-T6铝合金表面组织演化和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(9): 172-181.
- [7] 刘政军,邓晓萌,吴秋林. 激光冲击对铝合金焊接接头组织性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2025, 47(5): 627-634.
- [8] 朱俊霖,李洋,杨红梅,等. 均匀化温度对5052铝合金显微组织和性能的影响[J]. 上海金属, 2025, 47(1): 62-66.
- [9] 沈桓宇,王志刚,陈治. 面向搅拌摩擦焊的高强度铝合金性能特性研究[J]. 机械设计与制造, 2025, 416(10): 33-38, 43.
- [10] 李泽芝,李兴华,刘春伟,等. 重卡用铝合金接线盒重力铸造工艺改进与性能提升[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1400-1404.
- [11] 满成,王孟斐,颜晴,等. DL-苹果酸对7075铝合金硬质阳极氧化膜结构及耐腐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2025, 54(18): 27-36.
- [12] 戴京涛,刘浩东,赵培仲,等. 基于声发射检测的复合材料粘接铝合金结构失效模式研究[J]. 中国胶粘剂, 2023, 32(2): 14-19, 69.
- [13] 赵宏博,金正男,刘旭,等. 轴向超声对2195铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响[J]. 精密成形工程, 2025, 17(10): 167-174.
- [14] 戴宇佳,高勋,刘子源. LASSO-LSSVM与激光诱导击穿光谱技术结合提高铝合金中Mn成分检测精度研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(4): 977-982.