

铸件超声检测的测量不确定度分析

潘浩^{1, 2}, 刘尚瑀^{1, 2}, 赵鹏飞^{1, 2}, 庞致远³

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022; 2. 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022; 3. 空军装备部驻辽阳地区军事代表室, 辽宁沈阳 110034)

摘要: 随着无损检测技术的发展, 对于检测结果的测量不确定度越来越重要。测量不确定度不仅是实验室测量能力的体现, 更是实验室间能力交流和比较的依据, 同时也是中国合格评定国家认可委员会 (CNAS) 和顾客的需要。本研究依据JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》, 针对铸件的超声检测进行不确定度分析与评定; 采用距离波幅曲线 (DAC) 法进行超声纵波直探头检测铸件, 针对性地考虑铸件特征, 对铸件的超声检测缺陷深度和缺陷当量的不确定度进行分析和评定。对于使用超声探伤仪检测其他试样需要评定测量不确定度时, 本文给出了一种参考。

关键词: 无损检测; 铸件检测; 超声检测; 测量不确定度

中图分类号: TG115.28⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0277-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0038

Analysis of Measurement Uncertainty in Ultrasonic Testing of Castings

PAN Hao^{1, 2}, LIU Shang-yu^{1, 2}, ZHAO Peng-fei^{1, 2}, PANG Zhi-yuan³

(1. China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, China;

3. Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Liaoyang, Shenyang 110034, Liaoning, China)

Abstract: With the development of nondestructive testing technology, the measurement uncertainty of testing results is becoming increasingly important. Measurement uncertainty not only reflects the measurement capability of a laboratory but also serves as the basis for the exchange and comparison of capabilities among laboratories. It is also a requirement of the "China National Accreditation Service for Conformity Assessment" (CNAS) and customers. In this study, based on JJF1059.1-2012 "Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement", an uncertainty analysis and evaluation of ultrasonic testing of castings were carried out. Using the "distance-amplitude curve" (DAC) method for ultrasonic longitudinal wave straight probe testing of castings, and taking the characteristics of castings into account in a targeted manner, the uncertainty of defect depth and defect equivalent in ultrasonic testing of castings were analyzed and evaluated. This paper provided a reference for the evaluation of measurement uncertainty in the testing of other samples using ultrasonic flaw detectors.

Key words: nondestructive testing; casting inspection; ultrasonic testing; measurement uncertainty

铸件作为现代工业的关键基础部件, 其内部质量直接决定了重大装备的运行安全与寿命^[1-6]。超声检测以其穿透能力强、检测灵敏度高和对人体无害等独特优势, 已成为铸件内部缺陷 (如缩松、气孔和夹杂等) 质量控制不可或缺的核心手段^[7-10]。然而, 超声检测结果并非一个绝对的“真值”, 它受到超声在材料的声速、标准试块的准确度、超声探伤仪的精度、材料的表面粗糙度及测量重复性等多重因素的复杂影

响^[11-12], 本质上是一个包含固有分散性的“估计值”。因此, 检测结果的可靠性不仅在于其数值本身, 更在于对其可信程度的科学量化。测量不确定度, 作为国际公认的用于定量表征测量结果质量和可信度的核心指标, 在此背景下显得至关重要, 同时中国合格评定国家认可委员会 (CNAS) 也要求评定不确定度^[13]。目前, 在铸件超声检测领域, 国内外学者已认识到不确定度评定的重要性, 并开展了一定的研究工作。但

基金项目: 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司技术发展基金 (200221ZS01)。

收稿日期: 2025-09-01 收到初稿, 2026-01-09 收到修订稿。

作者简介: 潘浩 (1995-), 男, 一级注册计量师、工程师, 主要研究方向为无损检测及校准领域。E-mail: 1378140975@qq.com

引用格式: 潘浩, 刘尚瑀, 赵鹏飞, 等. 铸件超声检测的测量不确定度分析 [J]. 铸造, 2026, 75 (3): 277-282.

PAN Hao, LIU Shangyu, ZHAO Pengfei, et al. Analysis of measurement uncertainty in ultrasonic testing of castings [J]. Foundry, 2026, 75 (3): 277-282.

其不确定度评定研究仍相对薄弱。存在的主要问题包括：铸件材料本身声学特性的不均匀性，缺陷定性定量的模型存在较大偏差，现有评定方法多侧重于仪器校准环节，而对材料结构和检测工艺选择等关键影响因素的考量不足。

本研究旨在系统性地分析与评价铸件超声检测的测量不确定度，重点围绕识别铸件超声检测中的主要不确定度来源分析，构建适用于铸件特点的测量不确定度评定模型，并通过试验进行验证。依据JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》^[14]，针对某铸钢件试样采用距离波幅曲线（DAC）法进行超声纵波直探头检测，并对超声检测缺陷深度和缺陷当量进行不确定度分析与评定。

1 试验及过程

1.1 概述

环境条件：环境温度22℃，相对湿度48%。测量标准：标准试块（缺陷尺寸分别为 $\Phi 6.4$ mm×埋深50 mm、 $\Phi 6.4$ mm×埋深100 mm、 $\Phi 6.4$ mm×埋深150 mm）、PXUT-330N型超声波探伤仪、B2S $\Phi 24$ 直探头。被测对象：铸钢件试样。

1.2 测量过程

以检测铸钢件为例，先用厚度为50 mm的试块（与标准试块同材质、无缺陷）调整超声波探伤仪，对声速及零点进行校准，所有测量采用80%波高显示。然后用超声波探伤仪对标准试块进行测量校正，并形成距离波幅曲线（DAC），如图1所示。最后用超声波探伤仪对铸件试样进行测量，由曲线得到待测铸件试样的缺陷深度及当量^[15]。

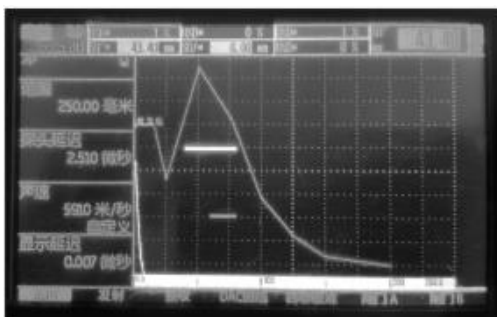


图1 距离波幅曲线（DAC）

Fig. 1 Distance-amplitude curve (DAC)

2 测量原理及不确定度分析

2.1 缺陷深度的测量原理

用超声波探伤仪对标准试块测量标定，并形成

DAC曲线。之后，用超声波探伤仪对铸件试样进行测量，由曲线得到待测铸件试样缺陷深度。

2.2 缺陷当量的测量原理

缺陷当量一般由“尺寸”+“分贝”的方式来表示。尺寸的数据直接由标准试块的缺陷尺寸获得，分贝的数据由超声探伤仪对铸件试样测量时得到。

2.3 不确定度分量的来源分析

2.3.1 缺陷深度测得值的不确定度分量来源

(1) 声速及零点调整引入的不确定度分量 u_1 。 u_1 包括：

a. 试块厚度误差引入的不确定度 u_{1a} ；b. 声速及零点测量重复性引入的不确定度 u_{1b} 。

(2) 标准试块缺陷埋深误差引入的不确定度分量 u_2 。

(3) 探伤仪水平线性（时基线性）误差引入的不确定度分量 u_3 。

(4) 铸件试样表面粗糙度引入的不确定度分量 u_4 。

(5) 铸件试样与标准试块声速差引入的不确定度分量 u_5 。

(6) 铸件试样缺陷深度测量重复性引入的不确定度分量 u_6 。

2.3.2 缺陷当量测得值的不确定度分量来源

(1) 缺陷当量尺寸部分不确定度分量 u_7 。

(2) 缺陷当量分贝部分不确定度分量 u_8 。 u_8 包括：

a. DAC曲线拟合引入的不确定度 u_{8a} ；b. 衰减器引入的不确定度 u_{8b} ；c. 超声波探伤仪垂直线性（幅度线性）误差引入的不确定度 u_{8c} ；d. 分贝值测量重复性引入的不确定度 u_{8d} 。

2.4 标准不确定度的评定

2.4.1 缺陷深度测得值的不确定度评定

(1) 声速及零点调整引入的不确定度 u_1 。

a. 试块厚度误差引入的不确定度 u_{1a} 。用于调整声速及零点的试块经检测合格，根据检测报告可知，试块厚度50 mm，公差（即最大允许误差）为 ± 0.10 mm，按均匀分布考虑，半宽度 $a=0.10$ mm，取 $k=\sqrt{3}$ ，其不确定度 $u=0.1/\sqrt{3}=0.0578$ mm。则试块厚度误差引入的相对不确定度为：

$$u_{1a} = \frac{u}{50 \text{ mm}} = \frac{0.0578 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 0.12\% \quad (1)$$

b. 声速及零点测量重复性引入的不确定度。用厚度为50 mm试块对超声波探伤仪进行声速及零点调整，记录声速及零点，该过程重复10次，10次数据、平均值、标准偏差如表1所示。

实际检测过程中，只进行单次测量，重复性引入

表1 声速及零点数据记录表
Tab. 1 The table of sound speeds and zero point data records

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值	标准差 s
声速 $v/(m \cdot s^{-1})$	5 881	5 886	5 894	5 899	5 892	5 888	5 895	5 897	5 893	5 894	5 891.9	5.43
零点 $t/\mu s$	3.25	3.30	3.25	3.29	3.27	3.32	3.30	3.27	3.32	3.31	3.288	0.026 6

的不确定度 u =标准差 s ，所以，声速测量重复性引入的相对不确定度：

$$u_v = \frac{s}{v} = \frac{5.43}{5\,891.9} = 0.092\% \quad (2)$$

零点测量重复性引入的不确定度：

$$u_t = \frac{s}{t} = \frac{0.026\,6}{3.288} = 0.809\% \quad (3)$$

则声速及零点测量重复性引入的不确定度：

$$u_{1b} = \sqrt{0.092\%^2 + 0.809\%^2} = 0.814\% \quad (4)$$

所以，声速及零点调整引入的不确定度为

$$u_1 = \sqrt{u_{1a}^2 + u_{1b}^2} = \sqrt{0.12\%^2 + 0.814\%^2} = 0.823\% \quad (5)$$

(2) 标准试块缺陷埋深误差引入的不确定度分量 u_2 。标定DAC曲线时，需要标准试块的缺陷埋深。标准试块经检测合格，根据检测报告可知，标准试块缺陷埋深的公差均为 ± 0.10 mm，按均匀分布考虑，半宽度 $a=0.10$ mm，取 $k=\sqrt{3}$ ，其不确定度 $u=0.1/\sqrt{3}=0.057\,8$ mm，试验时，DAC曲线拟合时用到的标准试块缺陷埋深分别为50 mm、75 mm、100 mm、125 mm、150 mm和200 mm。

缺陷埋深50 mm标准试块缺陷埋深误差引入的相对不确定度为：

$$u_{50\,mm} = \frac{0.057\,8\,mm}{50\,mm} = 0.12\% \quad (6)$$

缺陷埋深75 mm标准试块缺陷埋深误差引入的相对不确定度为：

$$u_{75\,mm} = \frac{0.057\,8\,mm}{75\,mm} = 0.077\% \quad (7)$$

缺陷埋深100 mm标准试块缺陷埋深误差引入的相对不确定度为：

$$u_{100\,mm} = \frac{0.057\,8\,mm}{100\,mm} = 0.058\% \quad (8)$$

缺陷埋深125 mm标准试块缺陷埋深误差引入的相对不确定度为：

$$u_{125\,mm} = \frac{0.057\,8\,mm}{125\,mm} = 0.046\% \quad (9)$$

缺陷埋深150 mm标准试块缺陷埋深误差引入的相对不确定度为：

$$u_{150\,mm} = \frac{0.057\,8\,mm}{150\,mm} = 0.039\% \quad (10)$$

缺陷埋深200 mm标准试块缺陷埋深误差引入的相对不确定度为：

$$u_{200\,mm} = \frac{0.057\,8\,mm}{200\,mm} = 0.029\% \quad (11)$$

则标准试块缺陷埋深误差引入的不确定度为：

$$u_2 =$$

$$\sqrt{0.12\%^2 + 0.077\%^2 + 0.058\%^2 + 0.046\%^2 + 0.39\%^2 + 0.029\%^2} = 0.168\%$$

(3) 探伤仪水平线性（时基线性）误差引入的不确定度 u_3 。根据JJG746-2024《超声波探伤仪检定规程》，经溯源合格的数字超声波探伤仪水平线性（时基线性）误差最大为 $\pm 0.5\%$ ^[16]。按均匀分布计算，半宽度 $a=0.5\%$ ，取 $k=\sqrt{3}$ ，则探伤仪水平线性（时基线性）误差引入的相对不确定度为：

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 2.289\% \quad (12)$$

(4) 铸件试样表面粗糙度引入的不确定度 u_4 。根据标准试块的检测报告，它的表面粗糙度 ≤ 3.2 μm ，标准试块的表面粗糙度对超声波信号的影响基本可以忽略。而铸件试样的表面粗糙度一般较大，根据铸件的相关检测标准，机加工后的铸件试样的表面粗糙度 R_a 最大不超过12.6 μm ^[15]。根据相关文献，表面粗糙度 ≤ 12.6 μm 对超声波信号影响估计为0~6 dB^[17]。实际检测过程中，会对超声波探伤仪进行传输修正，一般会将增益调为4 dB，所以修正后，铸件试样的表面粗糙度对超声波信号影响估计为-4~2 dB，对结果影响不超过 $\pm 1\%$ 。按均匀分布考虑，半宽度 $a=1\%$ ，取 $k=\sqrt{3}$ ，则铸件试样与标准试块不同材质声速差引入的不确定度为：

$$u_4 = \frac{a}{k} = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.578\% \quad (13)$$

(5) 铸件试样与标准试块不同材质声速差引入的不确定度 u_5 。选用的标准试块与被检铸件的材料相同或相近，但仍存在一些声速差异，估计声速差不超过50 m/s，其对超声波信号影响不超过 $\pm 1\%$ 。按均匀分布考虑，半宽度 $a=1\%$ ，取 $k=\sqrt{3}$ ，则铸件试样与标准试块不同材质声速差引入的不确定度为：

$$u_5 = \frac{a}{k} = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.578\% \quad (14)$$

(6) 铸件试样缺陷深度测量重复性引入的不确定度 u_6 。超声波探伤仪的DAC曲线完成后，对铸件试样进行缺陷深度测量，重复测量10次，数据见表2。

实际检测过程中，只进行单次测量，缺陷深度测量重复性引入的不确定度为：

$$u_v = \frac{s}{h} = \frac{0.638}{84.14} = 0.811\% \quad (15)$$

表2 缺陷深度测量数据记录表
Tab. 2 The table of defect depth measurement data record

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值	标准差s
缺陷深度h/mm	83.6	82.9	83.7	83.9	84.3	84.5	84.3	84.6	84.4	85.2	84.14	0.638

2.4.2 缺陷当量测得值的不确定度评定

(1) 缺陷当量尺寸部分不确定度 u_7 。缺陷当量尺寸部分直接由标准试块缺陷尺寸确定，标准试块缺陷尺寸均为 $\Phi 6.4$ mm，缺陷当量尺寸部分结果也等于 $\Phi 6.4$ mm，其不确定度也等于标准试块的不确定度，查标准试块检测报告，缺陷尺寸公差见表3。

表3 标准试块缺陷尺寸公差表
Tab. 3 The table of dimensional tolerances for defects in standard test blocks

型号	公差	半宽a	分布	k	不确定度
$\Phi 6.4$ mm	± 0.05 mm	0.05 mm	均匀	$\sqrt{3}$	0.03 mm

故缺陷当量尺寸部分不确定度为：

$$u_7 = \frac{a}{k} = \frac{0.05 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ mm} \quad (16)$$

(2) 缺陷当量分贝部分不确定度分量 u_8

a. DAC曲线拟合引入的不确定度 u_{8a} 。超声波探伤仪进入DAC曲线校正程序，对标准试块每个试块测量一次，形成DAC曲线。各点数据如表4所示。

表4 DAC曲线数据
Tab. 4 DAC curve data

声程/mm	50	75	100	125	150	200
分贝/dB	26.3	23.5	22.1	20.5	19.0	17.6
判定系数 R^2	0.996					

将DAC曲线数据按照对数拟合，结果如图2所示。

曲线拟合最大相对误差为 $1-R^2=0.004$ ，按均匀分布计算，则DAC曲线拟合引入的不确定度：

$$u_{8a} = \frac{1-R^2}{k} = \frac{0.04}{\sqrt{3}} = 0.23\% \quad (17)$$

式中： R^2 为判定系数，表示回归平方和占总误差平方和的比例。

b. 衰减器引入的不确定度 u_{8b} 。根据JJG746-2024《超声波探伤仪检定规程》，溯源合格的超声波探伤

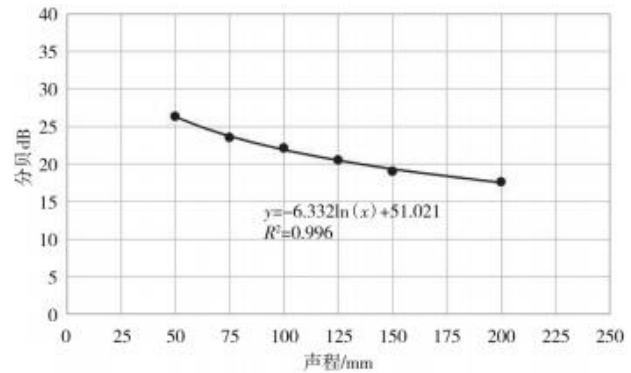


图2 DAC曲线拟合图

Fig. 2 DAC curve fitting graph

仪，衰减器每20 dB衰减量的误差不超过 ± 1 dB^[16]。按均匀分布计算，半宽度 $a=1$ dB，取 $k=\sqrt{3}$ ，可得：

$$u_{8b} = \frac{a}{k \times 12 \text{ dB}} = \frac{1 \text{ dB}}{\sqrt{3} \times 12 \text{ dB}} = 0.048\% \quad (18)$$

c. 超声波探伤仪垂直线性（幅度线性）引入的不确定度 u_{8c} 。波高读数受超声探伤仪的垂直线性（幅度线性）影响，根据JJG746-2024《超声波探伤仪检定规程》，溯源合格的超声波探伤仪，垂直线性（幅度线性）误差最大不超过4%^[16]。按均匀分布计算，半宽度 $a=2\%$ ，取 $k=\sqrt{3}$ ，则超声波探伤仪垂直线性（幅度线性）误差引入的不确定度为：

$$u_{8c} = \frac{a}{k} = \frac{2\%}{\sqrt{3}} = 1.155\% \quad (19)$$

d. 分贝值重复性测量引入的不确定度。超声波探伤仪的DAC曲线完成后，对铸件试样进行缺陷当量分贝值的测量，重复测量10次，数据见如表5所示。

实际检测过程中，只进行单次测量，故分贝值测量重复性引入的不确定度为：

$$u_{8d} = \frac{s}{\sqrt{dB}} = \frac{0.063}{4.18} = 1.51\% \quad (20)$$

2.5 合成标准不确定度的评定

缺陷深度测得值的合成标准不确定度 u_{c1} 为：

表5 铸件试样重复测量数据表
Tab. 5 The table of casting sample repeated measurement data

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值	标准差s
分贝值/dB	4.3	4.2	4.2	4.1	4.2	4.1	4.2	4.2	4.1	4.2	4.18	0.063

$$u_{c1} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} = \sqrt{0.823\%^2 + 0.168\%^2 + 0.289\%^2 + 0.578\%^2 + 0.578\%^2 + 0.811\%^2} = 1.45\% \quad (21)$$

缺陷当量尺寸部分测得值的合成标准不确定度 u_{c2} 为:

$$u_{c2} = u_7 = 0.03 \text{ mm} \quad (22)$$

缺陷当量分贝部分测得值的合成标准不确定度为:

$$u_{c3} = \sqrt{u_{8a}^2 + u_{8b}^2 + u_{8c}^2 + u_{8d}^2} = \sqrt{0.23\%^2 + 0.048\%^2 + 1.155\%^2 + 1.51\%^2} = 1.92\% \quad (23)$$

2.6 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度 $U=k \times u_c$ 。缺陷深度测得值的相对扩展不确定度为:

$$U_r = k \times u_{c1} = 2 \times 1.45\% = 2.9\% \quad (24)$$

缺陷当量尺寸部分测得值的扩展不确定度为:

$$U_r = k \times u_{c2} = 2 \times 0.03 \text{ mm} = 0.06 \text{ mm} \quad (25)$$

缺陷当量分贝部分测得值的相对扩展不确定度为:

$$U_r = k \times u_{c3} = 2 \times 1.92\% = 3.84\% \approx 3.8\% \quad (26)$$

表6 不确定度各分量表
Tab. 6 The table of uncertainty components

分量类别	来源	不确定度分量	
缺陷深度测量不确定度	u_1	声速及零点调整引入的不确定度	0.823%
	u_2	标准试块缺陷埋深误差引入的不确定度	0.168%
	u_3	超声探伤仪水平线性(时基线性)误差引入的不确定度	0.289%
	u_4	铸件试样表面粗糙度引入的不确定度	0.578%
	u_5	铸件试样与标准试块声速差引入的不确定度	0.578%
	u_6	铸件试样缺陷深度测量重复性引入的不确定度	0.811%
缺陷当量尺寸部分测量不确定度	u_7	标准试块缺陷尺寸引入的不确定度	0.03 mm
缺陷当量分贝部分测量不确定度	u_{8a}	DAC曲线拟合引入不确定度	0.23%
	u_{8b}	衰减器引入的不确定度	0.048%
	u_{8c}	超声探伤仪垂直线性(幅度线性)误差引入的不确定度	1.155%
	u_{8d}	分贝值测量结果重复性引入的不确定度	1.51%

3 结论

(1) 根据测量结果的不确定度分析, 使用超声探伤仪检测铸钢件时, 检测结果的不确定度为: 缺陷深度测得值的相对扩展不确定度 $U_r=2.9\%$, $k=2$; 缺陷当量尺寸部分测得值的扩展不确定度 $U=0.06 \text{ mm}$, $k=2$; 缺陷当量分贝部分测得值的相对扩展不确定度 $U_r=3.8\%$, $k=2$ 。

(2) 通过对各不确定度的来源和大小进行分析讨论, 对于缺陷深度测量不确定度, 不确定度分量影响主要是由声速及零点调整引入和测量重复性引入; 对于缺陷当量尺寸部分测量不确定度, 不确定度分量影响最主要是由标准试块缺陷尺寸引入; 对于缺陷当量分贝部分测量不确定度, 不确定度分量影响最主要是

由超声探伤仪垂直线性(幅度线性)误差引入的和测量重复性引入。所以, 在超声检测过程中, 为了减小这些主要来源的不确定度, 可以采取一些措施, 例如在重复测量时多重测量几次取平均值作为结果, 或使用精度高的超声探伤仪和标准试块。

(3) 对于铸钢件以外的其他合金系超声检测的测量不确定度, 评定过程可以参照本文, 但与铸钢件的评定过程有细微差别, 某些不确定度来源要根据其他相应合金的属性进行替换。其中评定“声速及零点调整引入的不确定度分量”时, 铸钢件的声速替换为其他相应合金的超声波声速; 评定“铸件试样表面粗糙度引入的不确定度分量”时, 铸钢件的表面粗糙度替换为其他相应合金的表面粗糙度; 其他不确定度来源可按照本文的评定过程进行分析评定。

参考文献:

- [1] 刘清梅, 张福明. 中国钢铁制造流程发展与关键问题 [J]. 钢铁, 2025, 60(1): 15-28.
- [2] 孙宝德, 王俊, 康茂东, 等. 高温合金超限构件精密铸造技术及发展趋势 [J]. 金属学报, 2022, 58(4): 412-427.
- [3] XIE B C, LUO Y, WANG Q Q, et al. A novel strategy

- for ingot cogging without homogenization: Dynamical recrystallization and nucleation mechanisms associated with as-cast dendrites of nickel-based superalloys [J]. J. Mater. Sci. Technol., 2025, 220: 78-91.
- [4] DU Dafan, AN Jiatuo, DONG Anping, et al. A review of the

- progress and challenges of counter-gravity casting [J]. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2025, 216: 1–26.
- [5] LIN Guobiao, ZHU Fuhu, LIU Jingyu, et al. Integral casting of Ni-based superalloy melt and Nb-pretreated SiC_p/SiC composite [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2025, 35 (8) : 2652–2665.
- [6] 储清泉, 侯星宇, 程印, 等. 铸造缺陷对一种高温合金可焊性的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2025, 54 (8) : 1917–1925.
- [7] 李振杰, 蔡桂喜, 张博, 等. 金属圆棒超声螺旋扫查检测的合成孔径成像技术 [J]. *金属学报*, 2024, 60 (4) : 559–568.
- [8] 张伟, 樊俊铃, 詹绍正, 等. 航空装备超声原位无损检测技术研究进展 [J]. *航空材料学报*, 2025, 45 (6) : 1–12.
- [9] ZHANG Li, LI Xiaoqian, GE Shang, et al. Microstructure, mechanical properties, and formability of 1030B Al strip manufactured by ultrasound-assisted continuous casting direct rolling [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2025, 35 (5) : 1381–1393.
- [10] 刘佳磊, 李昭东, 曹燕光, 等. 超声法对不同强度低合金钢板残余应力测试 [J]. *材料工程*, 2025, 53 (08) : 157–165.
- [11] 梁维中, 董蕊蕊, 王国新, 等. 基于深度学习铝合金压铸件表面缺陷检测方法 [J/OL]. *中国有色金属学报*, 1–20[2026-01-23].
- [12] 孟丽丽, 支明亮, 温金龙, 等. 基于CWD-SPI的铸件表面缺陷检测系统 [J]. *钢铁*, 2025, 60 (8) : 238–251.
- [13] 中国合格评定国家认可委员会. CNAS-CL01-G003: 2021测量不确定度的要求 [M]. 北京: 中国合格评定国家认可委员会, 2021
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1059.1-2012测量不确定度评定与表示 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
- [15] 国家标准化管理委员会. GB/T 7233.1—2023铸钢件超声检测第1部分 一般用途铸钢件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. JJG746-2024超声探伤仪检定规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024
- [17] 李华德, 张利, 赵艳红, 程辉. 铝合金锻件表面粗糙度对超声波探伤缺陷评定的影响 [J]. *轻合金加工技术*, 2008 (4) : 26–29.