

引文格式: 刘雨, 刘诚, 王新艳, 等. 金属基复合材料颗粒增强相空间分布的超声背散射评价方法[J]. 航空制造技术, 2026, 69(19): 25020391.

LIU Yu, LIU Cheng, WANG Xinyan, et al. Ultrasonic backscattering evaluation method for spatial distribution of particle reinforcement in metal matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(19): 25020391.

金属基复合材料颗粒增强相空间分布的超声背散射评价方法

刘雨¹, 刘诚², 王新艳³, 辛运涛⁴, 张超³, 郭佩文³, 张书增⁵

(1. 三峡大学, 宜昌 443002;

2. 中航通飞华北飞机工业有限公司, 石家庄 051430;

3. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

4. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110034;

5. 中南大学, 长沙 410075)

[摘要] 颗粒增强金属基复合材料因其优异的力学性能而被广泛应用, 其中SiC增强相的分布状态是决定其性能的关键因素。与仅能反映声波传播路径上平均特性的声速法和衰减法不同, 超声背散射法能够解析材料内部特定空间点位的微观结构信息。基于此, 研究提出一种基于时间相关综合背散射强度的金属基复合材料增强相分布评价方法, 可实现增强相颗粒的层析成像。基于超声散射理论, 给出了综合背散射强度的计算方法, 并建立了空间点位与背散射强度之间的映射关系。以SiC_p/Al复合材料为研究对象开展试验验证, 结果表明, 与金相法和CT成像结果相比, 所提方法能够有效识别材料内部的点状团聚、局部富集等不均匀分布形态; 同时, 相较于声速法与衰减法, 背散射法具有更高的敏感性。

关键词: 金属基复合材料; 材料均匀性; 颗粒团聚; 超声背散射法; 超声成像

中图分类号: V257; TG115.28

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020391

Ultrasonic Backscattering Evaluation Method for Spatial Distribution of Particle Reinforcement in Metal Matrix Composites

LIU Yu¹, LIU Cheng², WANG Xinyan³, XIN Yuntao⁴, ZHANG Chao³, GUO Peiwen³, ZHANG Shuzeng⁵

(1. China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. CAIGA North China Aircraft Industry Co., Ltd., Shijiazhuang 051430, China;

3. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

4. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China;

5. Central South University, Changsha 410075, China)

[ABSTRACT] Particle-reinforced metal matrix composites are widely used due to their exceptional mechanical properties. Among these, the distribution of silicon carbide reinforcing particles plays a critical role in determining their overall performance. Unlike ultrasonic velocity and attenuation methods, which can only capture the average characteristics along the acoustic wave propagation path, the ultrasonic backscattering method enables the resolution of microstructural information to be resolved at specific spatial points within the material. Based on time-dependent

收稿日期: 2025-12-05; 退修日期: 2026-01-28; 录用日期: 2026-03-25

基金项目: 湖北省自然科学基金(2025AFB066); 国家自然科学基金(52475582)

通信作者: 王新艳, 工程师, 博士, 研究方向为超声无损检测。

integrated backscattering intensity, this study proposes an evaluation method for characterizing the distribution of reinforcing particles in metal matrix composites, which enables the tomographic imaging of reinforcement particles. The calculation of the integrated backscattering intensity is derived from ultrasonic scattering theory, and a mapping relationship between spatial locations and backscattering intensity is established. Experimental verification is conducted using SiC_p/Al composites as the research subject. The results show that, compared with metallographic and CT imaging results, the proposed method can effectively identify inhomogeneous distribution patterns within the material, such as point-like agglomerations and local enrichments. Furthermore, the backscattering method demonstrates higher sensitivity than the velocity and attenuation methods.

Keywords: Metal matrix composites; Material homogeneity; Particle clustering; Ultrasonic backscattering method; Ultrasonic imaging

金属基复合材料因其可设计性强、比强度和比模量高、耐热性好等综合优势,在航空航天、国防军工及高端装备制造等领域展现出巨大的应用潜力^[1-2]。其中,颗粒增强铝基复合材料(Particulate reinforced aluminum matrix composites, PRAMCs)兼具铝基体的良好塑性,以及SiC颗粒的高硬度和高刚度,表现出优异的力学性能和物理性能^[3-4]。然而,PRAMCs的宏观性能,包括弹性模量、强度及热物理性质,不仅由各组分的体积分数决定,还显著受增强相颗粒的空间分布状态影响^[2,5]。在实际制备过程中,由于颗粒-基体间的润湿性差异及工艺扰动,极易出现SiC颗粒的局部团聚。这种微观结构的不均匀性不仅会成为应力集中源,导致材料过早失效,更会引入显著的宏观各向异性,使材料性能呈现强烈的方向依赖性,严重制约其可靠性与服役安全^[6]。因此,对PRAMCs中SiC颗粒的分布状态进行准确、可靠的定量评价,成为优化制备工艺与保证构件性能一致性的核心环节。

超声无损检测方法对材料内部微观结构特征(如晶粒尺寸、晶体取向、第二相含量及分布等)具有高度敏感性,且具备操作简单、安全性好、材料适应性强等优点,在工业领域得到广泛应用^[7-9]。其评价微观结构主要思路是将超声波响应,如波速、衰减系数和背散射强度与材料微观特征进行关联分析^[10-11]。例如,孙广开等^[12]利用超声衰减系数对不同SiC体积分数的PRAMCs试样进行成像,发现衰减法主要适用于颗粒分布均匀的定性表征。Liu等^[13]同时利用纵波和横波声速评价镁基复合材料中的增强相含量,结果表明双模态声速评价结果比单一模态更为可靠。Podymova等^[14]则建立了铝基复合材料中孔隙率与相速度之间的关系模型,并将其用于孔隙率的定量评价。综上所述,声速法和衰减法虽可用于PRAMCs中SiC颗粒分布的成像评估,但仍存在以下不足:其一,声速与衰减反映

的是声波传播路径上的整体平均效应,难以实现材料内部具体空间位置的高分辨率成像;其二,声速和衰减对SiC含量、孔隙率等体积分参数较为敏感,但对SiC颗粒分布状态的识别能力相对不足。

超声背散射方法为材料微观结构表征提供了一种有效的替代方法。与衰减法和声速法相比,背散射法能够实现沿声波传播路径的连续或逐点空间信息解析。例如,Du等^[15]利用不同模态的背散射波表征了镍基高温合金材料的各向异性。Liu等^[16]基于积分背散射强度实现了电弧增材制造铝合金微观结构不均匀性的量化与分布成像。Sotelo等^[17]利用背散射强度表征了增材制造420不锈钢中由孔隙、织构和晶粒所引起的微观结构不均匀性。上述研究表明,超声背散射方法在评价PRAMCs中SiC颗粒团聚分布方面展现出显著潜力。然而,目前针对PRAMCs的超声无损检测研究仍主要集中在缺陷检测或增强相含量评估上^[18-20],如何充分利用背散射方法的空间解析优势来系统评价增强相颗粒的团聚分布,仍有待深入探索。

本文提出了一种基于超声背散射信号的金属基复合材料增强相分布评价方法。与现有方法相比,该方法不仅能够实现SiC颗粒三维空间分布的层析成像,还可对材料整体的不均匀程度进行定量评估。

1 材料与方法

1.1 试块制备

颗粒增强金属基复合材料制备工艺多样,其中以粉末冶金法和搅拌铸造法最为常见。粉末冶金法是将基体合金粉末与SiC颗粒按设计比例混合均匀,再经冷压和真空热压烧结成形。搅拌铸造法则借助高速搅拌使熔融合金与SiC颗粒充分混合,随后浇注入模、冷却固化。然而,无论采用何种工艺,均存在SiC颗粒发生团聚的可能。例如,粉末合金法的混合工艺不合理,可能

导致SiC未能均匀分散在基体中;搅拌铸造法在高速搅拌过程中,由于熔融铝对SiC颗粒的润湿角较大、界面能高,SiC颗粒易相互聚集。

本研究以SiC增强铝基复合材料作为研究对象,利用粉末合金法共制备3组不同批次试块。3组试块选用的SiC颗粒尺寸均为7 μm ,体积分数为15%,基体材料为2009Al。为便于对试块进行金相、工业CT和超声表征,所有试块均经过研磨处理,平均外形尺寸为100 mm×100 mm×35 mm。

1.2 典型微观结构

为研究3组试块的显微结构,分别开展了金相试验。图1为3组试块部分区域的金相图。其中黑色区域为SiC颗粒,灰色区域为Al合金基体。可以看出,No.1和No.2试块中SiC颗粒在铝合金基体中分布相对均匀,没有出现大范围、肉眼可见的颗粒贫瘠区或密集团聚区,颗粒之间被铝基体有效隔开。同时,SiC颗粒与铝基体的界面清晰,没有观察到明显的孔隙、微裂纹或过厚的界面反应层,表明颗粒与基体之间的界面结合质量较好。但No.1和No.2试块中存在局部的点状团聚,No.3试块存在几处明显的条状团聚。由于团聚体形状不规则、轮廓不清晰,难以用单一的几何参数进行精准的统计描述。

1.3 超声背散射评价方法

当超声波在PRAMCs中传播时,会与材料内部的晶

粒及SiC颗粒发生相互作用。由于相邻晶粒之间存在结晶学取向差异,晶界处的声阻抗发生变化,导致超声波在晶界处产生散射^[21-22]。同时,分布于晶界处的SiC颗粒因其局部弹性模量与基体不同,也会引起超声波的散射。散射波在材料内部呈多向传播,当部分散射波沿入射路径返回并被超声探头接收时,该部分信号即为背散射波^[23]。需要注意的是,背散射信号幅值明显低于底面回波信号幅值,需对信号进行放大处理,以确保背散射信号准确测量。

如图2所示,背散射波信号记录了散射波传播路径上的材料信息,当超声波遭遇SiC颗粒团聚体时,背散射波会出现异常的高幅值信号。根据异常信号的传播时间和幅值,一方面可以定位SiC团聚体的位置,另一方面可以量化材料整体不均匀程度。为了分析背散射信号强度,通过定义焦点位置的综合背散射强度 $\bar{V}$ 来反映空间位置的不均匀性。

$$\bar{V} = \int_{t_1}^{t_2} |V(t)| dt \quad (1)$$

式中, (t_1, t_2) 为由脉冲宽度决定的时间窗; $V(t)$ 为随时间变化的背散射信号; $|\cdot|$ 为在时间窗内对波形进行整流,将射频信号转换为全波信号。式(1)描述了单个检测点的材料深度信息。当超声探头进行二维扫描时,可获得整个检测区域的完整数据集。通过提取同一时间窗口内所有扫描点背散射信号的综合强度值,并将

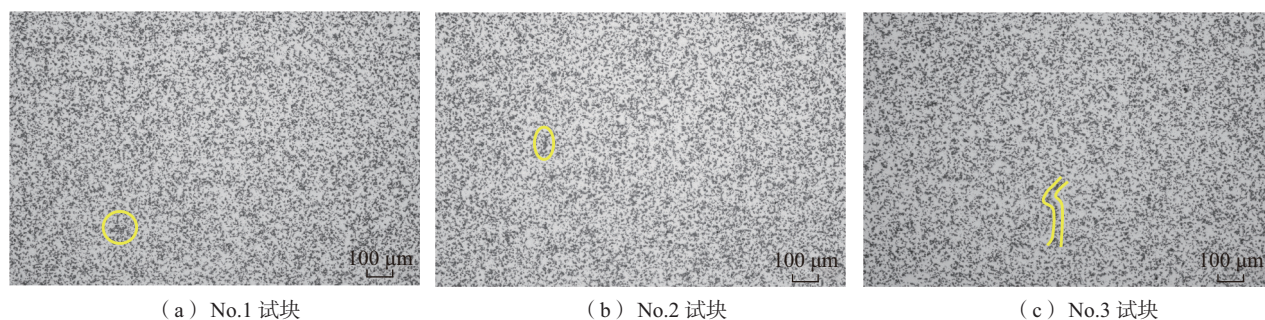


图1 所选试块金相图

Fig.1 Metallographic images of the selected specimens

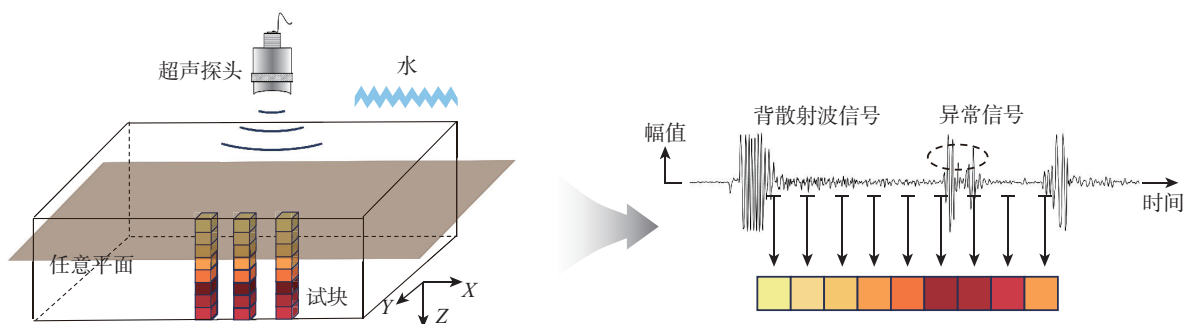


图2 超声背散射方法原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the ultrasonic backscattering method

该值映射为图像像素强度(图2彩条所示,颜色越深表示综合强度值越大),即可实现指定深度层面内SiC颗粒分布的可视化。

进一步地,定义综合背散射强度变异系数作为材料整体不均匀性程度量化指标:

$$C_v = \sigma/\mu \times 100\% \quad (2)$$

式中, σ 和 μ 分别为综合背散射强度的标准差和均值。

2 试验与结果

2.1 超声背散射试验

如图3所示,试验采用专用的水浸超声C扫描系统进行数据采集,该系统主要由超声激励与接收单元、运动控制单元、数据采集单元及水浸环境构成。核心组件包括:JSR DPR 300型超声脉冲发生/接收器,用于激励探头并接收原始信号;ADLINK PCIe-9852高速数据采集卡(采样频率200 MHz),负责信号的数字化转换与记录;搭载DMC2610 PCI总线控制卡的CYS-1100型6自由度运动平台,用于图3实现探头的精确空间定位;Olympus生产的V319-SU-F3.0超声纵波探头,其中心频率为15 MHz,焦距为76.2 mm,声斑直径为0.6 mm。

为提高C扫描图像的空间分辨率,将扫描步长设定为0.5 mm。该值虽小于超声声斑直径,会导致相邻测量点发生声束重叠,但SiC颗粒的尺寸(7 μm)远小于扫描步长,因此每个步长点所采集到的背散射信号都聚焦在不同的SiC颗粒上。试验增益设置为56 dB,电压为900 V。

通过调整水声距,将超声探头的焦点设定在试块深度5 mm处,水声距计算方法为

$$W_p = F_0 - \frac{c_L}{c_w} M_p \quad (3)$$

式中, W_p 为水声距; F_0 为探头焦距; c_L 为超声波在材料中传播速度; c_w 为超声波在水中传播速度; M_p 为聚焦于材料中的深度。此外,根据所用探头波形持续时间,将式(1)中时间窗长度设定为1 μs 。

2.2 试验结果

图4给出了背散射试验的测量结果,与之对应的背散射信号示意图如图5所示。图4(a)~(c)显示的是图5中时间窗1内($\Delta t=10 \mu\text{s}$)的最大背散射信号响应强度。基于式(1),其余各分图为厚度方向上不同深度的背散射强度平面成像。例如,Plane 5 mm和Plane 10 mm分别表示距离试块上表面5 mm和10 mm处的切片成像,该结果是利用图5中时间窗2($\Delta t=1 \mu\text{s}$)和时间窗3($\Delta t=1 \mu\text{s}$)内的最大背散射信号响应强度计算得出的。

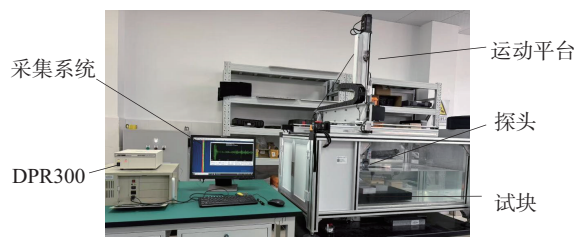


图3 超声试验装置

Fig.3 Ultrasonic experimental setup

从图4和图5可以看出,3组试块的综合背散射强度在空间分布上均呈现显著的非均匀性。高强度区域(红色调区域)集中分布于材料的特定位置,表明该处SiC颗粒聚集程度较高;而低强度区域(蓝色调区域)则对应颗粒相对稀疏的区域。No.1试块内部以局部团聚为主,No.2试块内部相对均匀,仅伴随点状团聚,而No.3试块内部存在显著团聚且以大尺寸团聚为主。此外,通过观察同一试块在不同深度平面如No.1试块Plane 5 mm和Plane 10 mm的成像结果,可以发现,SiC颗粒分布在材料厚度方向上也存在显著不同。总的来说,3组试块中SiC颗粒在三维空间中呈复杂的非均匀层状结构。超声背散射强度成像可以有效揭示SiC/PRAMCs中增强相颗粒的空间分布。进一步地,利用综合背散射强度的变异系数作为不均匀程度的量化指标,结果如表1所示。可以发现,3组试块平均不均匀程度从大到小依次为No.3>No.2>No.1。

2.3 结果验证

为验证超声背散射成像结果的有效性,从No.3试块中截取20 mm $\times$ 10 mm $\times$ 17 mm的长方体样本进行工业CT扫描。图6展示了该样本内部SiC颗粒分布的三维重构图像及粒径分布统计结果。受限于CT设备在扫描该尺寸样本时的分辨率,本次检测可识别的最小SiC颗粒尺寸为47 μm ,这远大于颗粒最初尺寸7 μm ,足以判断颗粒团聚尺寸。CT结果清晰表明,No.3试块内部存在大量大尺寸颗粒团聚现象,最大团聚体尺寸可达0.3 mm。

进一步地,为了验证超声背散射成像结果的可靠性,对图4(f)中红色线框所标识区域进行了金相显微观察,结果如图7所示。金相图像清晰地显示,在超声检测所标记的对应位置,其微观组织由灰白色基体与大量SiC颗粒组成,且该区域明显存在异常大尺寸SiC颗粒,这与超声成像结果一致。但是,需要指出的是,由于晶粒和颗粒对超声波存在不可避免的散射衰减效应,当前的超声检测方法主要用于定性定位异常区域,而无法对这些团聚体的尺寸进行定量分析。

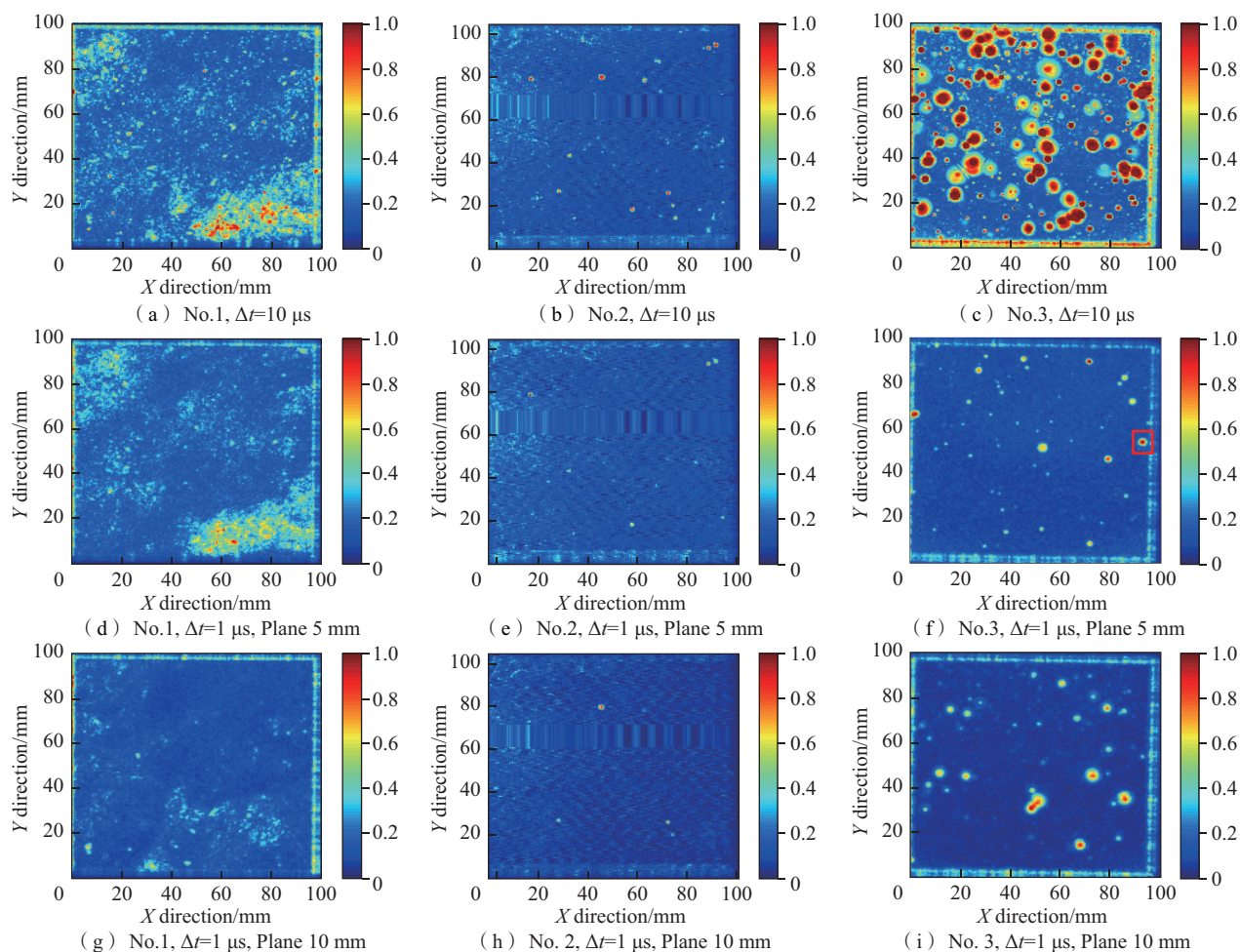


图4 背散射强度测量结果(聚焦深度5 mm)

Fig.4 Measurement results of backscattering intensity (focusing depth of 5 mm)

3 讨论与对比

3.1 聚焦深度影响

式(3)的计算表明,受限于探头固定焦距及材料与水的巨大声速差异,深部聚焦会导致水声距过小,存在探头碰撞风险。因此,对比试验选择10 mm作为安全且有效的聚焦深度。对比发现,图8给出的No.3试块成像结果与图4(c)、(f)和(i)吻合度较好,仅存在极少量的局部强度波动。统计结果表明,两平面的变异系数分别为28.26%和61.85%,与表1结果相比,最大偏差仅为2.06%。尽管探头聚焦位置的改变会影响沿深度方向的绝对声压分布,但本文提出的方法仍显示出较强的鲁棒性。这主要是因为探头的声场聚焦特性并非汇聚于理想几何单点,而是形成一个长柱状的聚焦区域。在该区域内,超声波束保持较窄的束宽和较高的能量密度,从而确保了信号具有优异的横向分辨率与信噪比。综上所述,只要将聚焦深度设置在能保证声束有效穿透的合理范围内,聚焦深度的调整不会改变对颗粒团聚分布特征的定性判断及统计规律的定量表征。

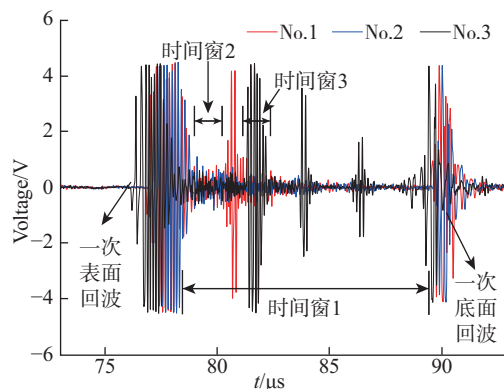


图5 背散射信号示意图

Fig.5 Schematic diagram of the backscattering signal

表1 不同平面综合背散射强度的变异系数

Table 1 Coefficient of variation of comprehensive backscattering intensity in different planes %

平面	No.1	No.2	No.3
Plane 1	12.44	7.48	26.20
Plane 2	7.48	17.28	63.23

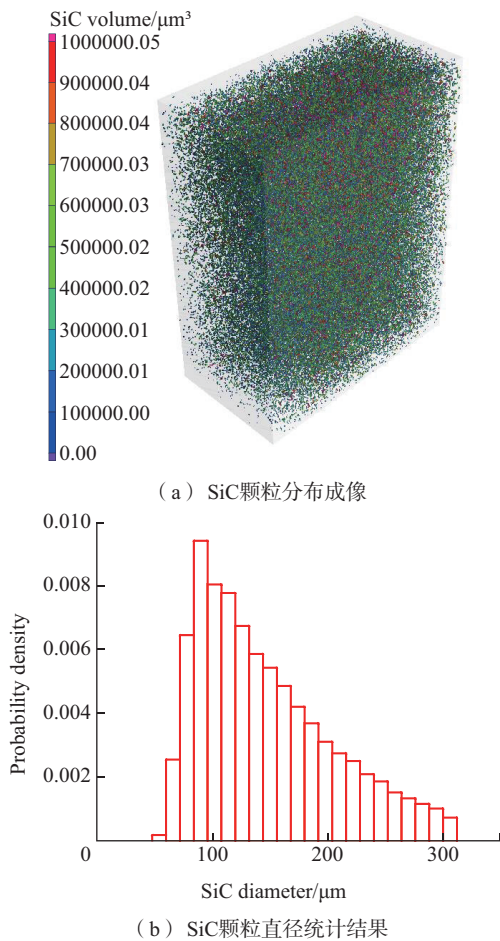


图6 CT检测结果
Fig.6 CT inspection results

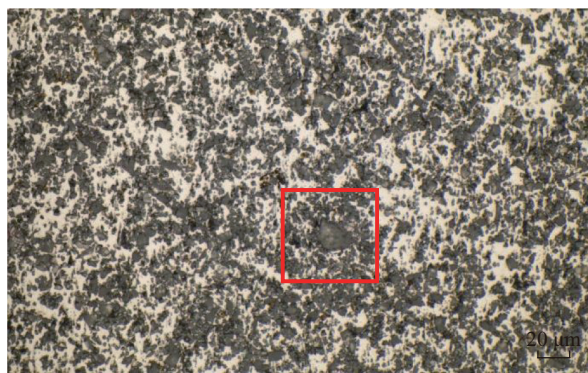


图7 No.3试块超声检测标记区域的金相图
Fig.7 Metallographic images of the ultrasonic testing marking area of specimen No.3

3.2 时间窗长度影响

根据式(1),时间窗长度是决定背散射强度成像纵向分辨率的关键参数。时间窗长度的选择应依据超声波形有效持续时间确定,而该持续时间受探头频率特性及系统增益设置的共同影响。因此,在前述试验中,基于A扫描数据中一次底面回波的实测持续时间,将时间窗长

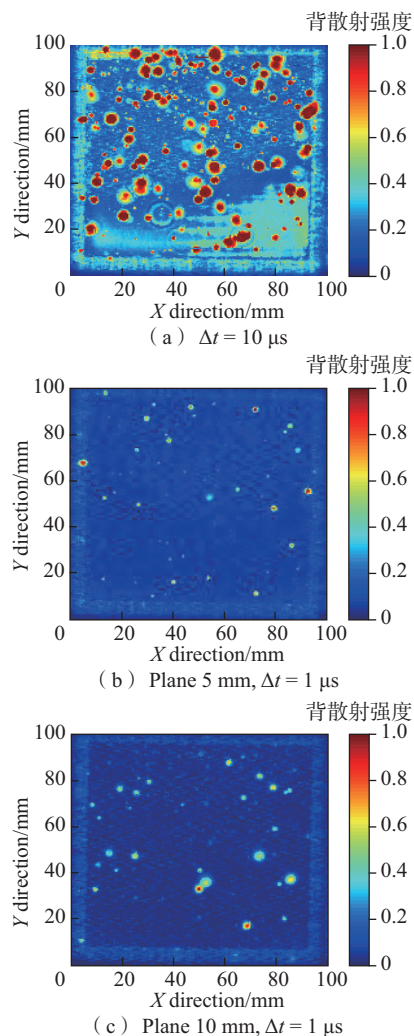


图8 聚焦深度为10 mm时No.3试块背散射强度成像结果
Fig.8 Backscattering intensity imaging results of specimen No.3 with a focal depth of 10 mm

度严格设定为 $1 \mu s$ 。为了研究时间窗长度偏差对成像结果的影响,试验将时间窗长度增加至 $1.5 \mu s$ 进行对比分析,聚焦深度为5 mm,成像结果如图9所示。定量统计表明,在该时间窗设置下,5 mm和10 mm深度平面的变异系数分别为22.33%和45.62%。与 $1 \mu s$ 时间窗的计算结果(表1)相比,最大偏差高达17.61%,结果出现显著偏离。造成这一现象的主要原因在于:当时间窗长度增大时,其对应的材料深度范围随之增加,导致时间窗覆盖了目标平面以外的区域。这使得不同深度的颗粒团聚回波信号在同一积分窗口内发生混叠与累积,从而扭曲了特定切片层的真实背散射强度分布。因此,为了实现准确的层析成像,必须严格依据回波信号的实际持续时间来确定时间窗长度,以避免相邻深度信息的相互干扰。

3.3 方法对比

超声声速和衰减法是评估金属基复合材料中增强

颗粒分布的常用方法^[12-13]。其中,声速通过测量超声波在试块中传播的时延计算得出,表示为

$$c_L = \frac{2H}{\tau} \quad (4)$$

式中, c_L 为纵波速度; H 为试块厚度; τ 为一次表面回波和一次底波之间的时间差。纵波衰减系数 α_L 则由相邻回波信号的幅值比计算得到,即

$$\alpha_L = \frac{1}{2H} \ln \left(\left| \frac{V_1}{V_2} \right| \right) \quad (5)$$

式中, V_1 为一次表面回波幅值; V_2 为一次底波幅值。声速和衰减测量试验探头与背散射试验一致,扫描步距0.5 mm、增益7 dB、电压900 V。图10和图11分别展示

了3组试块的声速和衰减系数分布。结果表明,3组试块声速均值存在差异,具体为:No.2 (5542 m/s) > No.1 (5515 m/s) > No.3 (5420 m/s)。该差异与SiC颗粒的分布状态有关,即No.1和No.2试块中SiC颗粒分布较为均匀,而No.3试块中SiC颗粒分布分散性较大,导致其平均声速最低。从声速图像的整体分布来看,3组试块均显示出较高的均匀性,这一结果与实际金相及CT检测所观察到的颗粒聚集现象并不一致,说明仅依靠声速的整体分布难以有效识别SiC颗粒的局部不均匀性。此外,值得注意的是,No.1试块中 $X \in (25, 80)$ mm, $Y \in (0, 30)$ mm区域内出现声速异常升高的现象,该结果与超声背散射成像所揭示的颗粒富集区相吻合。然而,

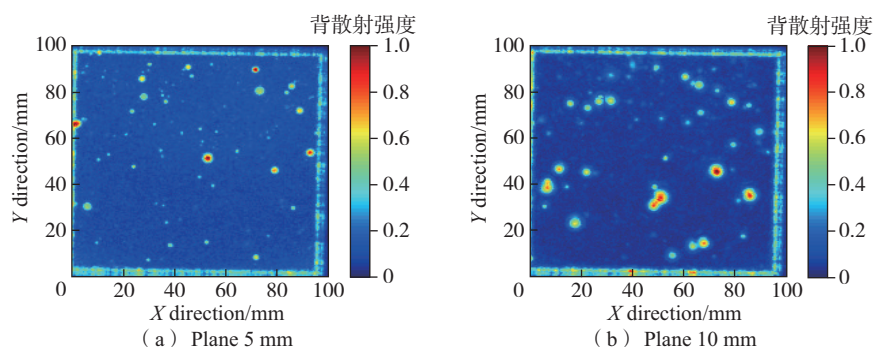


图9 时间窗长度为1.5 μ s时No.3试块的背散射强度成像结果

Fig.9 Backscattering intensity imaging results of specimen No.3 with a time window length of 1.5 μ s

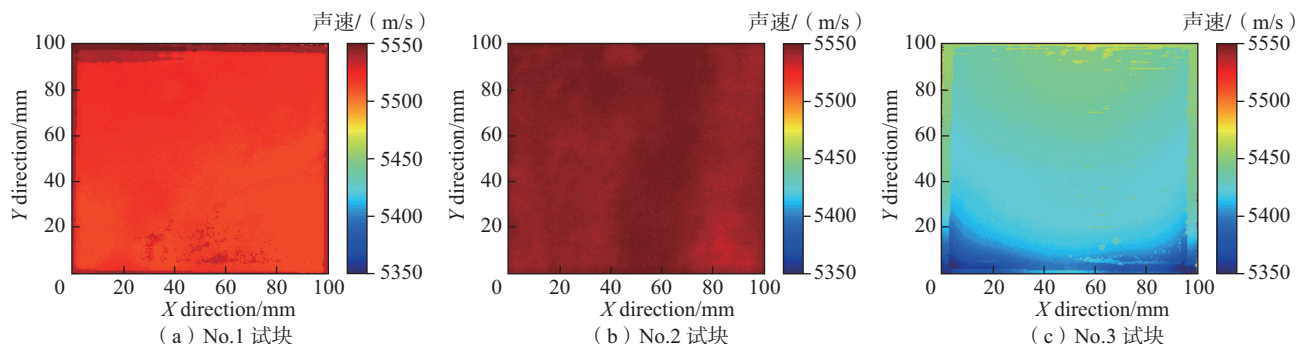


图10 声速成像结果

Fig.10 Ultrasonic velocity imaging results

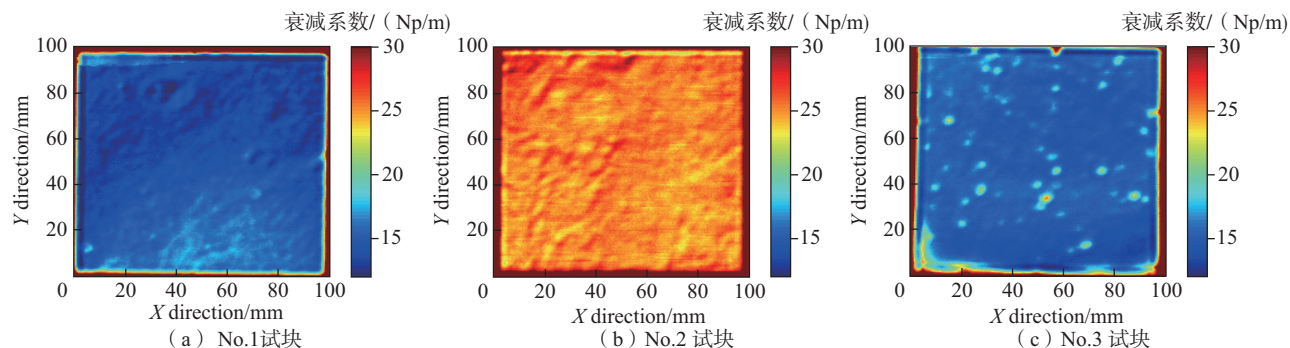


图11 衰减系数成像结果

Fig.11 Ultrasonic attenuation coefficient imaging results

声速图像未能清晰地反映出 No.3 试块内部存在的大量颗粒团聚区域,表明声速法对局部微观结构变化的灵敏度有限。

3 组试块的衰减系数均值分别为:No.2 (25 Np/m) > No.1 (15 Np/m) $\approx$ No.3 (14 Np/m)。No.2 试块的衰减测量结果与其声速特征一致,均反映出较高的整体数值。但是,衰减系数对于 No.1 与 No.3 试块中 SiC 颗粒的平均分布情况区分不敏感,未能有效区分二者差异。其次, No.2 试块中存在区域性团聚现象,而 No.3 试块内部则呈现大量点状团聚特征,这些结果与背散射成像所揭示的分布情况基本吻合,但仍存在一定程度的漏检。该漏检主要源于衰减测量在较低能量条件下进行的信号采集,导致小尺寸团聚易被忽略。声速和衰减系数本质上是超声波在材料传播路径上的积分响应结果,仅能反映 SiC 颗粒沿声束方向的平均分布情况,难以评价其在三维空间中的局部聚集状态。相比之下,背散射法不仅对 SiC 颗粒的分布具有更强的敏感性,还能实现指定深度平面的层析成像。

4 结论

本文提出了一种基于超声背散射信号的颗粒增强铝基复合材料增强相分布评价方法。研究表明,该方法能够有效实现材料内部 SiC 颗粒空间分布的无损评价。通过与金相图和工业 CT 层析结果对比,验证了该方法在识别点状团聚、局部团聚等不同类型 SiC 颗粒分布形态方面具有较高的灵敏度。与传统声速法与衰减法相比,背散射法不仅能够实现指定深度平面的层析成像,还能进一步量化材料内部的微观结构不均匀性程度。通过对 3 组不同批次制备的铝基复合材料进行试验,发现 No.3 试块内部存在显著的颗粒团聚,不均匀程度达 63.23%,且以点状团聚为主;而 No.1 和 No.2 试块中颗粒分布相对均匀,仅存在少量局部团聚区域。但需要指出的是,尽管现有方法实现了对材料不均匀性的统计量化表征,目前尚无法对团聚体的具体几何尺寸进行精确测定。

参考文献

- [1] Sarmah P, Gupta K. Recent advancements in fabrication of metal matrix composites: A systematic review[J]. *Materials*, 2024, 17 (18): 4635.
- [2] 赵栋才,白雪峰,冷金凤,等.颗粒增强铝基复合材料力学性能影响因素及其性能预测模型发展趋势[J]. *材料导报*, 2026, 40: 1-18.
- [3] Zhao Dongcai, Bai Xuefeng, Leng Jinfeng, et al. Influencing factors on the mechanical properties of particle-reinforced aluminum matrix composites and the development trends of their performance prediction models[J]. *Materials Reports*, 2026, 40: 1-18.
- [4] Lu S J, Wang X H, Teng L C, et al. Finite element analysis and experimental investigation of ultrasonic testing of internal defects in SiCp/Al composites[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(5): 5972-5982.
- [5] Hruby P, Singh S S, Williams J J, et al. Fatigue crack growth in SiC particle reinforced Al alloy matrix composites at high and low R-ratios by in situ X-ray synchrotron tomography[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 68: 136-143.
- [6] Liu Z Y, Wang Q Z, Xiao B L, et al. Clustering model on the tensile strength of PM processed SiC_p/Al composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(11): 1686-1692.
- [7] Sahin Y. Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminium alloy composites[J]. *Materials & Design*, 2003, 24 (8): 671-679.
- [8] Guo Z X, Song Y F, Li X B. Decoupling analysis of ultrasonic scattering characteristics in porous polycrystalline materials using phase field and finite element methods[J]. *Ultrasonics*, 2025, 159: 107864.
- [9] 徐振业,刘振浩,钱恒奎,等.复合材料构件超声 C 扫描图像去噪与超分辨研究[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(19): 110-117.
- [10] Xu Zhenye, Liu Zhenhao, Qian Hengkui, et al. Research on ultrasonic C-scan images denoising and super-resolution reconstruction for composite components[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2025, 68(19): 110-117.
- [11] 刘雨,田强,王新艳,等.基于单向测量超声背散射系数的晶粒尺寸评价高效方法[J]. *物理学报*, 2024, 73(7): 174-182.
- [12] Liu Yu, Tian Qiang, Wang Xinyan, et al. An efficient method for grain size evaluation based on unilaterally measured ultrasonic backscatter coefficient[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(7): 174-182.
- [13] 马志远,宋鑫民,张天旭,等.基于超声回波相位导数谱测量 CFRP 表面富树脂层厚度[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(9): 20-26.
- [14] Ma Zhiyuan, Song Xinmin, Zhang Tianxu, et al. Thickness measurement of resin-rich layer solidified on CFRP based on ultrasonic echo phase derivative spectrum[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2025, 68(9): 20-26.
- [15] Liu Y, Tian Q, Zhang S Z, et al. Combined effect of frequency, grain size, and sound path on phased array ultrasonic spectrum and attenuation[J]. *Ultrasonics*, 2025, 149: 107593.
- [16] 孙广开,周正干. SiC_p/Al 复合材料增强体分布均匀性超声成像方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(3): 417-423.
- [17] Sun Guangkai, Zhou Zhenggan. Ultrasonic imaging method for distribution uniformity of reinforcement in SiC_p/Al composites[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43 (3): 417-423.
- [18] Liu Y, Song Y F, Li X B, et al. Evaluating the reinforcement content and elastic properties of Mg-based composites using dual-mode ultrasonic velocities[J]. *Ultrasonics*, 2017, 81: 167-173.
- [19] Podymova N B, Kalashnikov I E, Bolotova L K, et al. Laser-ultrasonic nondestructive evaluation of porosity in particulate reinforced metal-matrix composites[J]. *Ultrasonics*, 2019, 99: 105959.

- [15] Du H L, Yao D. Ultrasonic measurement of microstructural anisotropy in a Ni-based superalloy fabricated by direct laser deposition[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2023, 42(3): 60.
- [16] Liu Y, Wang X Y, Oliveira J P, et al. Spatial and directional characterization of wire and arc additive manufactured aluminum alloy using phased array ultrasonic backscattering method[J]. *Ultrasonics*, 2023, 132: 107024.
- [17] Sotelo L D, Hadidi H, Pratt C S, et al. Ultrasonic mapping of hybrid additively manufactured 420 stainless steel[J]. *Ultrasonics*, 2021, 110: 106269.
- [18] 吴杰, 刘涛, 梁成渝, 等. SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料分层缺陷低频超声识别优化[J]. *复合材料学报*, 2026, 43(5): 3129–3137.
- Wu Jie, Liu Tao, Liang Chengyu, et al. Optimization of low-frequency ultrasonic detection of delamination in SiC_f/SiC ceramic matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2026, 43(5): 3129–3137.
- [19] Podymova N B, Karabutov A A. Combined effects of reinforcement fraction and porosity on ultrasonic velocity in SiC particulate aluminum alloy matrix composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 113: 138–143.
- [20] Podymova N B, Kalashnikov I E, Bolotova L K, et al. Effect of porosity on the statistical amplitude distribution of backscattered ultrasonic pulses in particulate reinforced metal-matrix composites[J]. *Ultrasonics*, 2020, 108: 106235.
- [21] 汪小凯, 蒋秋月, 关山月, 等. 基于深度学习的TC4钛合金零件微小缺陷超声相控阵检测图像降噪方法研究[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(22): 46–52.
- Wang Xiaokai, Jiang Qiuyue, Guan Shanyue, et al. Research on ultrasonic phased array images denoising method for micro defect detection of TC4 titanium alloy parts based on deep learning[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(22): 46–52.
- [22] 李雄兵, 宋永锋, 胡宏伟, 等. 基于衰减速率的晶粒尺寸超声评价方法[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(14): 1–7.
- Li Xiongbing, Song Yongfeng, Hu Hongwei, et al. Evaluation of grain size using the ultrasonic attenuation rate[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(14): 1–7.
- [23] Liu Z H, Li J L, Zheng Y, et al. Ultrasonic backscattering model of lamellar duplex phase microstructures in polycrystalline materials[J]. *Ultrasonics*, 2025, 149: 107581.

(责编 阳光)