

铸造奥氏体不锈钢中铁素体与奥氏体位向关系及其对声衰减的影响

罗忠兵 董慧君 马志远 邹龙江 朱效磊 林莉

Orientation relationship between ferrite and austenite and its influence on ultrasonic attenuation in cast austenitic stainless steel

Luo Zhong-Bing Dong Hui-Jun Ma Zhi-Yuan Zou Long-Jiang Zhu Xiao-Lei Lin Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 238102 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181251

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181251>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

热-电应力下 Cu/Ni/SnAg_{1.8}/Cu 倒装铜柱凸点界面行为及失效机理

Interfacial reaction and failure mechanism of Cu/Ni/SnAg_{1.8}/Cu flip chip Cu pillar bump under thermoelectric stresses

物理学报.2018, 67(2): 028101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171950>

合金元素对钢中 NbC 异质形核影响的第一性原理研究

First-principles calculation of influence of alloying elements on NbC heterogeneous nucleation in steel

物理学报.2017, 66(16): 168101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.168101>

落管中 Ni-Fe-Ti 合金的快速凝固机理及其磁学性能

Rapid solidification mechanism and magnetic properties of Ni-Fe-Ti alloy prepared in drop tube

物理学报.2017, 66(13): 138101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.138101>

稀土元素在 α -Fe 和 Fe₃C 中分配行为的第一性原理研究

First-principles investigation on partitioning behavior of rare earth elements between α -Fe and Fe₃C

物理学报.2016, 65(24): 248101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.248101>

三元 (Co_{0.5}Cu_{0.5})_{100-x}Sn_x 合金的热物理性质与液固相变机理

Thermophysical properties and liquid-solid transition mechanisms of ternary (Co_{0.5}Cu_{0.5})_{100-x}Sn_x alloys

物理学报.2016, 65(22): 228101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.228101>

铸造奥氏体不锈钢中铁素体与奥氏体位向关系及其对声衰减的影响*

罗忠兵 董慧君 马志远 邹龙江 朱效磊 林莉†

(大连理工大学无损检测研究所, 大连 116085)

(2018年6月28日收到; 2018年9月18日收到修改稿)

研究了铸造奥氏体不锈钢中铁素体与奥氏体位向关系及其对超声散射衰减的影响. 利用电子背散射衍射技术表征了两相的晶体取向及其位向关系, 基于真实的铁素体形貌建立了二维声传播各向异性模型并利用时域有限差分法进行了计算, 分析了不同位向关系、铁素体形貌特征对声衰减系数的影响规律并进行了实验验证. 结果表明: 铸造奥氏体不锈钢奥氏体晶粒中散布着形状复杂的铁素体, 典型铁素体形貌为条状和岛状; 铁素体与奥氏体的位向关系以 Kurdjumov-Sachs 关系为主, 少量满足 Nishiyama-Wassermann 关系. 对声传播过程进行计算, 发现两相位向关系和铁素体形貌协同作用影响超声波传播, 在较高检测频率 (15 MHz) 下对散射衰减的影响不能忽略. 结合“原位”实验对奥氏体 (101) 柱状晶粒的声衰减影响因素进行了定量分析, 发现对于单一铸造奥氏体晶粒, 晶粒内部取向不均匀性、奥氏体-铁素体位向关系以及奥氏体晶粒内铁素体形态都是超声散射衰减的主要原因.

关键词: 铸造奥氏体不锈钢, 超声, 铁素体, 声衰减

PACS: 81.05.Bx, 43.20.+g, 62.65.+k

DOI: 10.7498/aps.67.20181251

1 引言

铸造奥氏体不锈钢 (cast austenitic stainless steel, CASS) 广泛用于石油化工、核电等领域关键构件. 以 Z3CN20-09M 钢为例, 主要用于压水堆核电站一回路主管道, 具有奥氏体、铁素体两相组织, RCC-M 规定铁素体体积分数为 12%—20%, 并有助于提高抗热裂纹、抗腐蚀和焊接性能, 综合力学性能优异 [1-4]. 由于构件多长期服役于高温、高压等恶劣环境, 易发生力学损伤. 铸造过程中产生的微小缺陷也可作为裂纹源, 促进裂纹的形核和扩展. 因此, 铸造奥氏体不锈钢中微小缺陷和损伤的有效检测对保障关键构件的安全运行十分重要.

基于超声方法的材料微观组织、结构、性能评价已经被大量研究报道 [5-7]. 由于铸造奥氏体不锈钢构件尺寸较大 (核电主管道壁厚 66—110 mm)、

铸造冷速较低、奥氏体晶粒粗大、弹性各向异性明显, 给基于声学方法的微小缺陷和损伤检测带来了困难. 美国西北太平洋国家实验室的研究结果表明 [8]: 为降低弹性各向异性奥氏体导致的结构噪声, 提高检测信噪比, 超声检测频率一般为 0.5—2.0 MHz, 此时铁素体尺寸与超声波长相比较小, 声散射效应通常被忽略, 只需考虑奥氏体晶粒. 类似处理在 Sakamoto 等 [9] 和 Chen 等 [10,11] 的研究工作中也得到体现. 然而, 对于表面或亚表面亚毫米甚至更小的缺陷和损伤, 必须提高超声检测频率, 一般均在 10 MHz 以上 [12], 个别研究竟高达 100 MHz [13]. 按 10 MHz 计算, 对应超声波长约 0.6 mm, 与铁素体晶粒尺寸同一量级. 此时, 铁素体如何影响超声波传播行为和检测评价结果是很多研究面临的棘手问题, 目前尚无定论 [14,15]. Inoue 和 Koseki [16] 研究表明, 离心铸造非平衡凝固

* 国家自然科学基金 (批准号: 51775087, 51405061) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: linli@dlut.edu.cn

过程中, 晶体生长行为受到影响, 铁素体晶粒形貌及其与奥氏体两相界面都具有一定特殊性, 从而影响材料变形过程中微观损伤发展规律, 也会影响异质界面声阻抗和超声波的传播行为^[9]. 因此, 研究 CASS 中铁素体与奥氏体的位向关系, 厘清声衰减的影响因素及规律对于提高微小缺陷和损伤评价质量非常关键.

本文以 Z3CN20-09M 铸造奥氏体不锈钢为对象, 基于铁素体与奥氏体之间的位向关系分析, 借助声学仿真与“原位”实验设计, 通过模型材料分析了声衰减系数的影响因素及其规律, 为阐明 CASS 声学响应机制和发展定量评价方法提供支撑.

2 实验

Z3CN20-09M 铸造奥氏体不锈钢试样取自压水堆核电站一回路主管道余料, 主要成分为(质量分数, %): Fe 68.142, C 0.027, S 0.014, Si 1.27, Mn 1.13, P 0.023, Cr 20.09, Ni 8.92, Mo 0.21, Cu 0.094, Co 0.044, N 0.032, B 0.004. 如图 1(a) 所示, 从内径 800 mm、壁厚 80 mm 的管道上切取

80 mm 厚的试块, 垂直于管道轴向方向对试样打磨抛光, 分别用高氯酸或草酸溶液对试样进行腐蚀, 获取样品沿壁厚方向上的宏观组织, 并利用 Leica MEF-3 型光学显微镜和 Olympus OLS-4000 型激光共聚焦显微镜进行观察. 确定管道柱状晶和等轴晶位置后, 垂直于柱状晶生长方向制备板状试样, 厚度约 1 mm. 借助 Buller Vibrome-2 型自动振动抛光仪制备试样, 用于电子背散射衍射 (electron back-scatter diffraction, EBSD) 分析奥氏体、铁素体取向及其位向关系. 所用仪器为 Zeiss Supra 55 型场发射扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 和 Oxford EBSD 分析仪. 考虑测试精度和效率的平衡, 利用 EBSD 获得等轴晶和柱状晶表面分布时步长选用 10 μm , 在进行两相位向关系分析时, 铁素体不可忽略, 步长选用 1 μm .

利用三轴水浸超声 C 扫描系统和超声脉冲回波法垂直于试样表面采集 A 扫描信号, 步进采样间隔 0.1 mm, 重复定位精度 $\leq \pm 0.02$ mm. 所用探头为 Olympus 水浸聚焦探头, 入射频率为 15 MHz. 根据一次底面回波与二次底面回波时间差值及幅值计算相应纵波声速和声衰减系数.

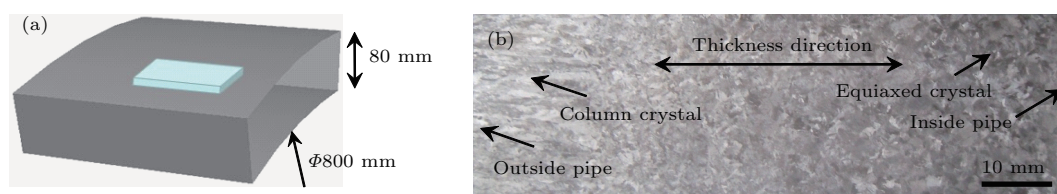


图 1 Z3CN20-09M 钢试样及其组织 (a) 取样示意图 (单位: mm); (b) 宏观组织
Fig. 1. Specimen and macrostructure of Z3CN20-09M: (a) Schematic sampling (unit: mm); (b) macrostructure.

3 结果与讨论

3.1 CASS 的组织结构

CASS 宏观组织如图 1(b) 所示. 奥氏体晶粒粗大且不均匀, 管道外壁为柱状晶, 长度可达十几毫米, 其余部分为等轴晶, 沿壁厚方向晶粒大小并不均匀, 直径在 1—5 mm, 以内壁晶粒最为粗大. 利用 EBSD 分析试样表面法向的晶体取向, 分别获得等轴晶和柱状晶晶粒取向分布图, 如图 2 所示. 可以看出, 等轴晶区的奥氏体晶体取向呈随机分布, 晶粒大小并不均匀, 形状多不规则, 长条状和等轴状均有发现; 柱状晶区奥氏体晶粒却有明显不同, 具有明显的方向性, 即择优取向, 以 $\langle 101 \rangle$ 方

向为主, 个别位置也有少量近 $\langle 001 \rangle$ 方向晶粒. 从两者取向分布图也可以看出, 较大晶粒取向分布图内部颜色并不均匀, 存在多个取向微区, 说明凝固过程中晶体生长受到了较大影响. 已有研究表明: CASS 粗晶结构弹性各向异性显著, 材料的声学特性与传播方向即奥氏体的晶体取向关系密切^[9,17,18].

为方便后续的声学建模和实验验证, 选取图 2(b) 中同为 $\langle 101 \rangle$ 取向的柱状奥氏体晶粒, 利用激光共聚焦显微镜得到两种典型的铁素体晶粒形貌, 如图 3 所示, 两者分别呈长条状 (图 3(a)) 和岛状 (图 3(b)). 对其形貌特征进行定量统计, 前者铁素体晶粒平均长度为 (189 ± 108) μm , 后者仅为 (57 ± 49) μm , 差异显著. 铁素体总含量约为 15%,

这样的微观组织保证了铸造奥氏体不锈钢的综合力学性能,也有助于提高耐晶间腐蚀能力^[19,20].进一步借助EBSD进行微区分析,发现两处铁素体晶体取向一致,为 $\langle 106 \rangle$,即除铁素体形貌不同外,两

典型位置的奥氏体、铁素体晶体取向均相同,且这两处奥氏体与铁素体之间满足Kurdjumov-Sachs (K-S) 关系,这就为后续的实验测试提供了理想的模型材料.

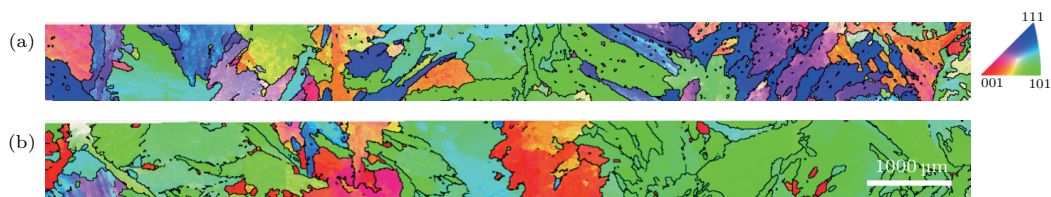


图2 Z3CN20-09M钢晶体取向分布图 (a) 等轴晶区; (b) 柱状晶区

Fig. 2. Crystal orientation profile of Z3CN20-09: (a) Equiaxed crystal; (b) columnar crystal.

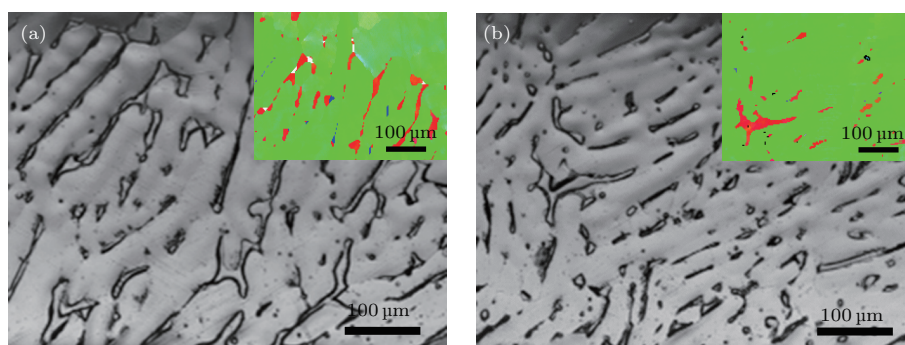


图3 铁素体晶粒典型形貌和晶粒取向 (a) 位置1, 条状为主; (b) 位置2, 岛状为主

Fig. 3. Typical morphology and crystal orientation of ferrite grains: (a) Position 1, mainly bar; (b) position 2, mainly island.

3.2 铁素体与奥氏体位向关系

两相的位向关系决定了两相的适配程度,直接影响界面声阻抗等关键声学参量,从而影响超声波的传播行为.基于EBSD极图方法进行取向关系鉴定时,不需要知道两相信息,仅需确定不同米勒指数上的极图分布,可以在较大范围内分析相间晶体学特征^[21].这里对CASS等轴晶和柱状晶区奥氏体和铁素体两相取向关系进行了分析,典型情况如图4和图5所示.

以等轴晶为例加以说明.根据图4(a)等轴晶表面法向取向分布图,进一步分析获取奥氏体相 $\{111\}$ 面的极图与铁素体相 $\{110\}$ 面的极图,两者叠加后如图4(b)所示,红色圆圈所示位置代表奥氏体和铁素体相的极射投影完全重合,即奥氏体 $\{111\}$ 面与铁素体 $\{100\}$ 面平行($\{111\}_\gamma // \{110\}_\alpha$),表明奥氏体与铁素体的取向关系为K-S关系或者Nishiyama-Wassermann (N-W)关系.同样获取奥氏体相 $\langle 110 \rangle$ 方向、 $\langle 112 \rangle$ 方向和铁素体相 $\langle 111 \rangle$ 方向的极图,发现奥氏体 $\langle 110 \rangle$ 方向和铁素体 $\langle 111 \rangle$

方向重合(如图4(c)),满足平行关系,但奥氏体 $\langle 112 \rangle$ 方向和铁素体 $\langle 111 \rangle$ 方向极图中没有重叠位置,即 $\{111\}_\gamma // \{110\}_\alpha$, $\langle 110 \rangle_\gamma // \langle 111 \rangle_\alpha$,因此满足K-S关系.这与多数研究得到的结论相同^[22-24].同时,研究中也发现一些例外,如图5(a)中奥氏体等轴晶中分布有条状铁素体, $\{111\}_\gamma // \{110\}_\alpha$ (图5(b)),但 $\langle 110 \rangle_\gamma$ 方向和 $\langle 111 \rangle_\alpha$ 方向并不重合,而是 $\langle 112 \rangle_\gamma // \langle 110 \rangle_\alpha$ (图5(c)),因此满足N-W关系.多处分析结果均证实: CASS中无论等轴晶还是柱状晶,两相均以K-S关系为主,少量满足N-W关系.

晶粒学中有四种典型的取向关系,分别为Brain关系, K-S关系, N-W关系和Greninger-Troiano关系^[25].从铁碳二元相图可以看出, CASS平衡凝固过程中, δ -铁素体首先在液相中形成,随着温度的降低,奥氏体晶粒在铁素体中经包晶反应形成^[24]. Brooks和Thompson^[26]认为,由于铸造凝固过程中冷却速率较高,导致高温 δ -铁素体来不及转化为奥氏体相,以多种形态保留到铸坯中,而

转化后的奥氏体则在母相铁素体特定晶面上形成, 在切变过程中两相满足K-S关系. 同时由于离心铸造等原因, 晶体生长受到影响, 少量满足N-W关系^[21]. 然而, 个别研究也报道了一些不同结果. Inoue和Koseki^[16]采用无填充金属的焊缝研究了

奥氏体不锈钢中初生铁素体和奥氏体的凝固过程行为, 发现奥氏体在具有胞状形貌初生铁素体的枝晶间形成, 两者独立生长, 没有任何晶体学关系限制. 总之, 上述的晶体学分析为建立更为准确的声学仿真模型提供了保证.

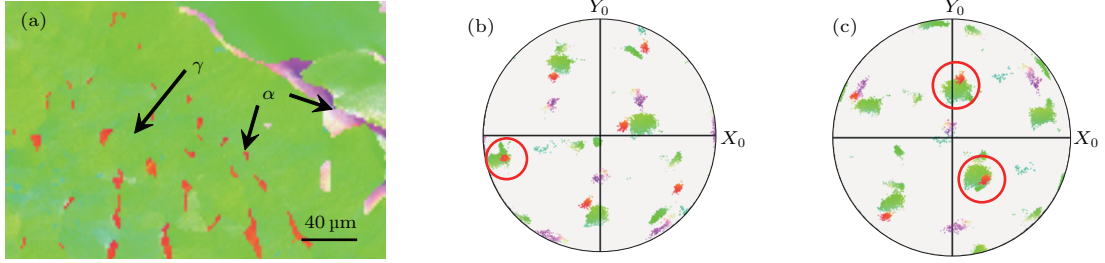


图4 等轴晶中两相K-S关系 (a) 表面取向分布图; (b) $\{111\}_\gamma // \{110\}_\alpha$; (c) $\langle 110 \rangle_\gamma // \langle 111 \rangle_\alpha$

Fig. 4. K-S orientation relationship in equiaxial crystal: (a) Surface inverse orientation figure; (b) $\{111\}_\gamma // \{110\}_\alpha$; (c) $\langle 110 \rangle_\gamma // \langle 111 \rangle_\alpha$.

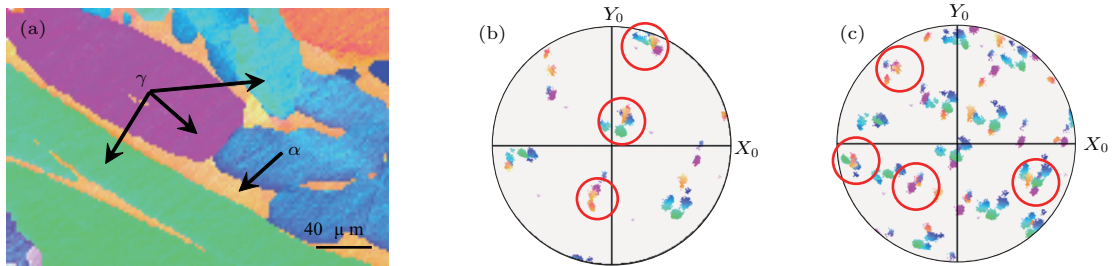


图5 等轴晶中两相N-W关系 (a) 表面取向分布图; (b) $\{111\}_\gamma // \{110\}_\alpha$; (c) $\langle 112 \rangle_\gamma // \langle 110 \rangle_\alpha$

Fig. 5. N-W orientation relationship in equiaxial crystal: (a) Surface inverse orientation figure; (b) $\{111\}_\gamma // \{110\}_\alpha$; (c) $\langle 112 \rangle_\gamma // \langle 110 \rangle_\alpha$.

3.3 考虑两相位向关系的声学建模计算

为了分析铁素体与奥氏体之间位向关系和铁素体形态对CASS声学性能的影响, 必须建立对应的声学仿真模型. 前期基于EBSD的时域有限差分建模思路已经被证实切实可行, 与实验结果符合较好^[10,11]. 这里以图3中两种典型铁素体形貌为基础, 分别引入K-S和N-W关系, 建立二维各向异性时域有限差分模型, 研究相同奥氏体取向条件下不同铁素体形态分布和取向关系对声传播的影响. 模

型左右边界设为固定边界, 以确保在计算范围内不会发生波型转变和超声波扩散, 上下端设为吸收边界, 防止产生额外的反射波而影响计算结果.

材料弹性特性的定量描述是获得可靠计算结果的关键. 对于弹性各向异性介质, 常用欧拉角 $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$ 表示晶体取向与空间坐标轴的旋转关系, 根据Bunge定义^[27], 三个欧拉角构成的方向余弦矩阵分量如(1)式所示, 进而由 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 \times \mathbf{R}_2 \times \mathbf{R}_3$ 得到如(2)式所示的方向余弦矩阵.

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 & 0 \\ -\sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & \sin \Phi \\ 0 & -\sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 \\ -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \Phi & \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \Phi & \sin \varphi_2 \sin \Phi \\ -\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \Phi & -\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \Phi & \cos \varphi_2 \sin \Phi \\ \sin \varphi_1 \cos \Phi & -\cos \varphi_1 \sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix}. \quad (2)$$

为获得晶体坐标系下的刚度矩阵, 利用 Bond 变换计算每个奥氏体、铁素体晶粒对应晶体取向下的弹性常数^[28]:

$$C' = R_D C R_D^{-1}, \quad (3)$$

$$R_D = \begin{pmatrix} R_{11}^2 & R_{12}^2 & R_{13}^2 & 2R_{11}R_{12} & 2R_{11}R_{13} & 2R_{12}R_{13} \\ R_{21}^2 & R_{22}^2 & R_{23}^2 & 2R_{21}R_{22} & 2R_{21}R_{23} & 2R_{22}R_{23} \\ R_{31}^2 & R_{32}^2 & R_{33}^2 & 2R_{31}R_{32} & 2R_{31}R_{33} & 2R_{32}R_{33} \\ R_{11}R_{21} & R_{12}R_{22} & R_{13}R_{23} & R_{11}R_{22} + R_{12}R_{21} & R_{11}R_{23} + R_{13}R_{21} & R_{12}R_{23} + R_{13}R_{21} \\ R_{11}R_{31} & R_{12}R_{32} & R_{13}R_{33} & R_{11}R_{32} + R_{11}R_{31} & R_{11}R_{33} + R_{13}R_{31} & R_{11}R_{33} + R_{13}R_{31} \\ R_{21}R_{31} & R_{22}R_{32} & R_{23}R_{33} & R_{21}R_{32} + R_{22}R_{31} & R_{21}R_{33} + R_{23}R_{31} & R_{22}R_{33} + R_{23}R_{31} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

根据已有文献报道的铁素体和奥氏体弹性常数^[9,11,29], 选取成分、组织与本研究相近的情况并取平均值, 列于表 1, 铁素体弹性常数取 $C_{11} = 230.3$ GPa, $C_{12} = 135.1$ GPa, $C_{44} = 116.6$ GPa, 奥氏体取 $C_{11} = 265.8$ GPa, $C_{12} = 114.0$ GPa, $C_{44} = 117.1$ GPa^[9]. 由上述 EBSD 结果获取的欧拉角数据, 利用上述理论计算得到对应晶粒取向下的弹性常数, 结果如表 2 所列. 铁素体密度为 7897 kg/m^3 , 奥氏体密度为 8150 kg/m^3 ^[30].

利用有限差分方法计算得到时域 A 扫描波形后, 声衰减系数 β 可通过下式计算:

$$\beta = \frac{20}{2d} \lg \frac{A_1}{A_2}, \quad (5)$$

式中, C 为样品坐标系下的刚度矩阵, C' 为晶体坐标系下的刚度矩阵, R_D 为与 (2) 式方向余弦矩阵 R 有关的 6×6 矩阵. R_D 和 R 之间的对应关系如 (4) 式所示, R_D^{-1} 为 R_D 的逆矩阵.

式中 d 为试样厚度, A_1 和 A_2 分别为一次底面回波和二次底面回波的幅度, 结果如表 3 所列. 在柱状晶中, 条状铁素体形貌对应的 K-S 关系和 N-W 关系造成的声衰减系数差为 0.51 dB/mm , 岛状铁素体对应的声衰减系数差仅为 0.1 dB/mm , 几乎相同; 根据声衰减系数差与相同铁素体形貌下最大声衰减系数值, 得到由位向关系差异导致的相对偏差分别为 26% 和 7% . 对于铁素体形貌的影响, 柱状晶中满足 K-S 关系时, 条状铁素体和岛状铁素体对应的声衰减系数差为 0.08 dB/mm , N-W 关系对应差值为 0.49 dB/mm , 同理得到相对偏差分别为 6% 和 25% . 等轴晶中也存在相似的大小关系, 在此不

表 1 铁素体弹性常数 (单位: GPa)^[11,29]
Table 1. Elastic constants of ferrite (unit: GPa).

C_{ij}	a	b	c	d	e	f	g	h	Avg.
C_{11}	232.2	231.4	226	230.0	228	233.1	230.4	231	230.3
C_{12}	135.6	134.7	140	134.6	132	135.5	134.1	134	135.1
C_{44}	117.0	116.4	116	116.6	117	117.8	115.9	116	116.6

表 2 两种位向关系中奥氏体和铁素体对应的欧拉角和弹性常数
Table 2. Euler angles and elastic constants of austenite and ferrite with two orientation relationships.

Grain shape	Orientation relationship	Phase	Euler angle/(°)			Elastic constant/GPa		
			φ_1	Φ	φ_2	C_{11}	C_{12}	C_{44}
Columnar crystal	K-S	γ -[116]	296.6	13.0	44.9	285.0	99.7	101.7
		α -[146]	74.4	34.2	17.1	237.8	133.4	101.3
	N-W	γ -[126]	290.6	22.1	32.4	308.5	80.7	84.5
		α -[106]	287.3	8.1	75.9	236.2	134.3	113.5
Equiaxed crystal	K-S	γ -[215]	270.2	22.4	61.1	306.7	89.0	87.3
		α -[135]	270.9	30.8	16.4	252.7	117.4	91.9
	N-W	γ -[223]	338.7	45.0	43.5	299.9	94.9	75.9
		α -[236]	257.3	36.7	36.0	277.7	104.4	79.8

表3 不同铁素体形貌下两种位向关系对应声衰减系数

Table 3. Attenuation coefficient corresponding to two orientation relationships of different ferrite morphologies.

Grain shape	Orientation relationship	Ferrite morphology	Attenuation coefficient /dB·mm ⁻¹
Columnar crystal	K-S	mainly bar	1.46
		mainly island	1.38
	N-W	mainly bar	1.97
		mainly island	1.48
Equiaxed crystal	K-S	mainly bar	1.35
		mainly island	1.19
	N-W	mainly bar	1.08
		mainly island	1.04

再赘述. 需要注意的是, 上述位向关系和铁素体形貌在柱状晶和等轴晶中均有发现, 未见与奥氏体晶粒形态、取向有明显对应关系, 因此必须考虑两者对 CASS 超声衰减的影响, 后者更为显著.

4 声衰减实验测试与讨论

利用水浸超声脉冲回波技术“原位”获得图3柱状晶两区域对应的A扫描信号, 如图6(a)所示, 并计算声衰减系数如图6(b)所示. 其中条状铁素体形貌对应声衰减系数为(3.44 ± 0.04) dB/mm, 岛状铁素体形貌对应值为(3.70 ± 0.05) dB/mm. 与上述柱状晶中K-S关系对应模拟结果相比, 这里不仅声衰减系数要高出1—2倍, 两种铁素体形貌对应大小关系也是相反的, 说明实验中同时存在其他因素的共同作用.

已有研究表明: 奥氏体单晶声衰减行为呈各向异性[31,32], 体现为吸收衰减, 与介质的黏滞特性、热传导特性以及介质微观过程引起的弛豫效应等密切相关[33]. 为简化影响因素, 这里仅基于上述结果对<101>柱状晶中声衰减系数加以讨论. Merkulov[34]提出超声波的散射衰减依赖于超声波长λ与散射体尺寸D, 即根据kD值(k为波数, k = 2π/λ), 可将散射机理分为三类: 瑞利散射、随机散射和漫散射. Smith[35]给出了超声散射衰减系数β_S与频率f、散射体尺寸D之间的关系:

$$\text{瑞利散射 } \beta_S = C_1 D^3 f^4 \quad (kD < 1), \quad (6)$$

$$\text{随机散射 } \beta_S = C_2 D f^2 \quad (kD \approx 1), \quad (7)$$

$$\text{漫散射 } \beta_S = C_3 D^{-1} \quad (kD > 1), \quad (8)$$

其中C₁, C₂, C₃是与材料弹性参数、密度和超声波波速有关的常数. 超声入射频率为15 MHz时对应纵波波长约为0.4 mm, 因此铁素体晶粒对应的kD在0.13—4.7之间, 声波散射主要为瑞利散射和随机散射[36]. 当kD值较小时(如kD = 0.13), 单个铁素体晶粒的散射能力较弱, 可以近似为远场低频

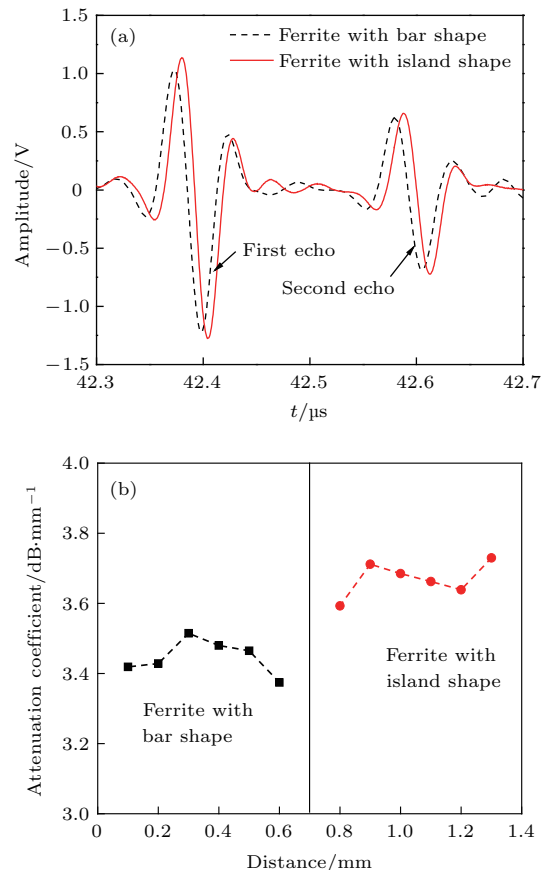


图6 柱状晶的声学测试 (a) 实际测量超声A扫描波形; (b) 声衰减系数测试结果

Fig. 6. Ultrasonic testing of columnar crystals: (a) Time domain waveform; (b) attenuation coefficient.

的球散射, 对应的散射声强可以表示为

$$I_S(r, \theta) = \frac{|p_S(r, \theta)|^2}{2\rho c} = \frac{k^4 r_0^6 I_p}{9 r^2} \left(1 - \frac{3}{2} \cos \theta\right)^2, \quad (9)$$

其中 p_S 为散射声压; p_p 为入射波声压; ρ 为散射体密度; c 为散射体中超声波传播速度; $I_p = |p_p(r, \theta)|^2 / (2\rho c)$ 为入射波声强, 可由瑞利散射公式计算; θ 为铁素体与声波入射方向之间的夹角. 此时, 多个铁素体晶粒形成散射颗粒群, 多重散射总功率可近似认为是所有晶粒散射功率之和. 对于 kD 值较大的情况 (如 $kD = 4.7$), 散射波更加集中在散射体面向入射波的方向, 铁素体晶粒之间的耦合作用更为明显, 必须考虑对总散射功率的叠加效应.

下面对几种影响因素加以讨论. 首先, 奥氏体与铁素体位向关系的影响. 对应条状和岛状两种铁素体形貌, 当位向关系分别为 K-S 和 N-W 时, CASS 声衰减系数差分别为 0.51 dB/mm 和 0.1 dB/mm, 说明奥氏体与铁素体的位向关系带来的声衰减系数最大偏差约为 0.5 dB/mm. 其次, 铁素体形貌的影响. 对图 3 分析发现: 条状铁素体晶粒平均长径比为 9.3 ± 6.4 , 与声波入射方向平均夹角为 $31^\circ \pm 13^\circ$, 而岛状铁素体晶粒平均长径比为 4.7 ± 3.9 , 仅相当于条状铁素体的 1/2, 与声波入射方向平均夹角为 $68^\circ \pm 14^\circ$ (偏差均为标准差). 根据 (9) 式, 同等条件下前者对声传播的阻碍作用更强, 这一点在 N-W 位向关系中也得到印证, 如表 3 所列, 两种形貌对应的声衰减系数偏差为 0.49 dB/mm. 对应这里的 K-S 关系, 两种铁素体形貌带来的差异很小, 体现为 (9) 式中 ρc 影响较弱; 当铁素体形貌为岛状时, 奥氏体与铁素体之间位向关系差异带来的影响也可以忽略, 铁素体晶粒多重散射效应并不明显. 两种情况充分说明两相位向关系与铁素体形貌协同作用影响超声波传播, 两个因素的任何一方弱化, 都会降低另一因素变化所产生的影响. 然而, 这与两因素同时作用又有本质不同: 即使在岛状铁素体、K-S 关系情况下, 最小的声衰减系数也在 1.2 dB/mm, 说明铁素体对声衰减的影响不能忽略, 约占实测总衰减系数的 30%—60%, 而铁素体形貌和两相位向关系的变化所带来的影响约占 10%—15%.

最后, 粗晶奥氏体晶粒内取向不均匀性的影

响. 针对柱状晶的模拟和实验中, 实验所得声衰减系数要高出约 2.0—2.3 dB/mm, 占总衰减系数的 55%—70%, 且两种铁素体形貌对应声衰减系数大小关系相反, 原因主要在于粗晶奥氏体内部并不均匀, 如图 2 所示的 EBSD 测试结果, 即使同一奥氏体晶粒, 也存在晶体取向微区的差别. 这些微区间造成一定的 ρc 差, 阻碍超声波传播. 因此, 上述 EBSD 模型除选取相同取向奥氏体晶粒进行比较外, 也对奥氏体微区做了均匀化处理, 排除奥氏体晶粒内部不均匀性的影响, 证实铁素体对超声波衰减的影响必须加以考虑. 上述三个因素共同作用, 影响 $\langle 101 \rangle$ 柱状奥氏体晶粒的声衰减, 对于其他取向晶粒以及不同检测频率下声衰减行为, 有待于进一步深入研究.

5 结 论

1) CASS 中奥氏体晶粒粗大且不均匀, 既有等轴晶又有柱状晶, 且每个奥氏体晶粒中散布着形状复杂的铁素体, 典型铁素体形貌为条状和岛状, 差异明显.

2) 利用极图研究了柱状晶、等轴晶的奥氏体-铁素体位向关系, 发现 CASS 中奥氏体-铁素体位向关系既有满足 K-S 关系 ($\{111\}_\gamma // \{110\}_\alpha$, $\langle 110 \rangle_\gamma // \langle 111 \rangle_\alpha$) 又有满足 N-W 关系 ($\{111\}_\gamma // \{110\}_\alpha$, $\langle 112 \rangle_\gamma // \langle 110 \rangle_\alpha$) 的情况, 其中以 K-S 关系为主, 少量满足 N-W 关系.

3) 基于 EBSD 图谱建立了考虑铁素体形貌和奥氏体-铁素体位向关系的二维声传播各向异性模型, 发现铁素体形貌和奥氏体-铁素体位向关系协同作用影响超声波传播.

4) “原位”超声实验结果表明: 较高检测频率 (15 MHz) 下, 对于单一 CASS 晶粒, 奥氏体内部取向不均匀性、奥氏体-铁素体位向关系以及奥氏体晶粒内铁素体形貌都会影响超声散射衰减, 其中前者约占总衰减系数的 50% 以上, 其余部分主要为后两者的协同贡献.

参考文献

- [1] Li S L, Wang Y L, Wang H, Xin C S, Wang X T 2016 *J. Nucl. Mater.* **469** 262
- [2] Lach T G, Byun T S, Leonard K J 2017 *J. Nucl. Mater.* **497** 139

- [3] Wang Z X, Xue F, Jiang J W, Ti W X, Yu W W 2011 *Eng. Fail. Anal.* **18** 403
- [4] Chen W Y, Li M M, Kirk M A, Baldo P M, Lian T G 2016 *J. Nucl. Mater.* **471** 184
- [5] Song Y F, Li X B, Shi Y W, Ni P J 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 214301 (in Chinese) [宋永锋, 李雄兵, 史亦韦, 倪培君 2016 物理学报 **65** 214301]
- [6] Lan B, Lowe M J S, Dunne F P E 2015 *J. Mech. Phys. Solids* **83** 221
- [7] Zhang Z G, Ta D A 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134304 (in Chinese) [张正罡, 他得安 2012 物理学报 **61** 134304]
- [8] Ramuhalli P, Good M S, Diaz A A, Anderson M T, Watson B E, Peters T J, Dixit M, Bond L J 2009 *Ultrasonic Characterization of Cast Austenitic Stainless Steel Microstructure: Discrimination between Equiaxed-and Columnar-grain Material-an Interim Study* (Washington: Pacific Northwest National Laboratory) p5
- [9] Sakamoto K, Furukawa T, Komura I, Kamiyama Y, Mihara T 2012 *E-J. Adv. Maint.* **4** 5
- [10] Chen Y, Luo Z B, Zhou Q, Zou L J, Lin L 2015 *Ultrasonics* **59** 31
- [11] Chen Y, Luo Z B, Zhang D H, Zhou Q, Liu L L, Yang H M, Lin L 2016 *Chin. J. Mech. Eng.* **52** 24 (in Chinese) [陈尧, 罗忠兵, 张东辉, 周全, 刘丽丽, 杨会敏, 林莉 2016 机械工程学报 **52** 24]
- [12] Tabatabaeipour M, Hettler J, Delrue S, van Den Abeele K 2016 *NDT&E Int.* **80** 23
- [13] Islam M D, Arai Y, Araki W 2015 *Ultrasonics* **56** 354
- [14] Toozandehjani M, Matori K A, Ostovan F, Mustapha F, Zahari N I, Oskoueian A 2015 *J. Mater. Sci.* **50** 2643
- [15] El Rayes M M, El-Danaf E A, Almajid A A 2015 *J. Mater. Process. Tech.* **216** 188
- [16] Inoue H, Koseki T 2017 *Acta Mater.* **124** 430
- [17] Smith R J, Li W Q, Coulson J, Clark M, Somekh M G, Sharples S D 2014 *Meas. Sci. Technol.* **25** 055902
- [18] Chassignole B, Guerjouma R E, Ploix M A, Fouquet T 2010 *NDT & E Int.* **43** 273
- [19] Wang Y Q, Li N, Yang B 2015 *Corros. Eng. Sci. Tech.* **50** 330
- [20] Li S L, Wan Y L, Li S X, Wang X T 2010 *Acta Metall. Sin.* **46** 1186 (in Chinese) [李时磊, 王艳丽, 李树肖, 王西涛 2010 金属学报 **46** 1186]
- [21] Fu J W, Sun J J, Cen X, Zhang X M, Li F, Wu Y C 2018 *Mater. Charact.* **139** 241
- [22] Miyamoto G, Karube Y, Furuhashi T 2016 *Acta Metall.* **103** 370
- [23] Marinelli M C, Bartali A E, Signorelli J W, Evrard P, Aubin V, Alvarez-Armas I, Degallaix-Moreuil S 2009 *Mater. Sci. Eng. A* **509** 81
- [24] Besson J, Devillers-Guerville L, Pineau A 2000 *Eng. Fract. Mech.* **67** 169
- [25] Cheng J Y, Zhao A M, Chen Y L, Dong R, Huang Y 2013 *Acta Metall. Sin.* **49** 137 (in Chinese) [程俊业, 赵爱民, 陈银莉, 董瑞, 黄耀 2013 金属学报 **49** 137]
- [26] Brooks J A, Thompson A W 1991 *Int. Mater. Rev.* **36** 16
- [27] Huang Y 1991 *A User-material Subroutine Incorporating Single Crystal Plasticity in the ABAQUS Finite Element Program* (Cambridge: Harvard University) p2
- [28] Auld B A 1973 *Acoustic Fields and Waves in Solids* (Melbourne: Krieger) pp73-74
- [29] Kim S A, Johnson W L 2007 *Mater. Sci. Eng. A* **452-453** 633
- [30] Li H P, Zhao G Q, He L F 2008 *Mater. Sci. Eng. A* **478** 276
- [31] Xia Y B 1995 *Prog. Nat. Sci.* **5** 546
- [32] Xia Y B, Zhang T Y, Fei G T, Zhou X 1992 *Acta Metall. Sin.* **28** A269 (in Chinese) [夏月波, 张天宜, 费广涛, 周星 1992 金属学报 **28** A269]
- [33] Ying C F 1990 *Ultrasound* (Beijing: Science Press) pp74-83 (in Chinese) [应崇福 1990 超声学 (北京: 科学出版社) 第74-83页]
- [34] Merkulov L G 1956 *Sov. Phys. Tech. Phys.* **1** 59
- [35] Smith R L 1982 *Ultrasonics* **20** 211
- [36] Papadakis E P 1963 *J. Appl. Phys.* **34** 265

Orientation relationship between ferrite and austenite and its influence on ultrasonic attenuation in cast austenitic stainless steel*

Luo Zhong-Bing Dong Hui-Jun Ma Zhi-Yuan Zou Long-Jiang Zhu Xiao-Lei Lin Li[†]

(*NDT & E Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China*)

(Received 28 June 2018; revised manuscript received 18 September 2018)

Abstract

Cast austenitic stainless steel (CASS) is widely used in important engineering components, which has a two-phase microstructure, i.e. austenite and ferrite. With slow cooling rate during solidification procedure, the austenite grain is coarse and the morphology of ferrite is complex. Due to the remarkable elasticity anisotropy of austenite, the resulting structural noise makes the recognition of macroscopic defects quite difficult in ultrasonic testing. To improve the signal-to-noise ratio, the ultrasonic testing frequency is generally small, about 0.5–2.0 MHz, and the ultrasonic scattering effect of ferrite is ignored. However, for submillimeter or even smaller defect and damage near the surface, the ultrasonic testing frequency should be increased to achieve a higher resolution. In these cases, how the ferrite influences the ultrasonic wave propagation behavior and the testing result is still not conclusive. Therefore, CASS Z3CN20-09M is studied as an example in this paper. Based on ultrasonic propagation modeling and “in situ” experimental design, the crystal orientation relationship between ferrite and austenite in CASS is studied and the factors influencing the ultrasonic scattering attenuation are clarified. The results would be helpful for clarifying the ultrasonic response mechanism of CASS and critical for the quantitative evaluation of small defects and early-stage damage.

The orientation relationship between ferrite and austenite and its influence on ultrasonic scattering attenuation in CASS are studied. The crystal orientations and their relationships between two phases are characterized by the EBSD technique. A two-dimension anisotropic model is built based on the morphology of ferrite, and the ultrasonic propagation is calculated by the time domain finite difference method. The influences of orientation relationship and morphology on the longitudinal wave attenuation are analyzed and verified by “in-situ” experiments. Results show that ferrite grains with bar or island shape are distributed on the austenite grains. The orientation relationship between ferrite and austenite is mainly Kurdjumov-Sachs relationship, and only a minority of ferrite and austenite satisfy the Nishiyama-Wassermann relationship. Numerical simulation of the ultrasonic propagation under a testing frequency of 15 MHz indicates that the orientation relationships between two phases and ferrite morphologies present collaborative effects on the ultrasonic scattering attenuation, which could not be ignored. The factors influencing the ultrasonic attenuation in $\langle 101 \rangle$ austenite grain are quantitatively analyzed. It is found that in single austenite grains of CASS, the inhomogeneity of crystal orientation, the orientation relationship between austenite and ferrite and the ferrite morphology play an important role in determining the total ultrasonic attenuation.

The results would provide supports for clarifying the ultrasonic response mechanism of CASS and developing the quantitative evaluation methods.

Keywords: cast austenitic stainless steel, ultrasonic, ferrite, ultrasonic attenuation

PACS: 81.05.Bx, 43.20.+g, 62.65.+k

DOI: [10.7498/aps.67.20181251](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181251)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51775087, 51405061).

† Corresponding author. E-mail: linli@dlut.edu.cn