

基于多层高克重四轴向碳纤维拉挤复合材料性能的研究

曹亚周¹, 葛继文¹, 陈旭¹, 崔健¹, 田爱琴¹, 郝向远², 常素兵²

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

²中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

收稿日期: 2022年6月24日; 录用日期: 2022年8月19日; 发布日期: 2022年8月26日

摘要

本文以多层高克重四轴向碳纤维布为增强材料, 改性环氧树脂(陶氏)为基体树脂, 采用拉挤成型技术制备了较长(10米)异型碳纤维复合材料; 对异型件不同部位厚度碳纤维复合材料力学性能进行了检测, 对不同部位厚度型材的力学性能的变化进行了分析; 研究了树脂粘度对拉挤工艺的影响, 确认了环境温度为33℃时, 拉挤异型碳纤维结构件树脂的最佳粘度: 560 mPa·s; 并通过超声相控阵研究了10米结构件内部缺陷, 研究表明, 10米结构件内部缺陷满足复合材料GJB2895中3.7条内部质量的A级使用要求。

关键词

多层高克重四轴向碳纤维布, 环氧树脂, 碳纤维复合材料, 无损检测, 力学性能

Study on Properties of Multilayer High-Gram Four-Axial Carbon Fiber Pultrusion Composites

Yazhou Cao¹, Jiwen Ge¹, Xu Chen¹, Jian Cui¹, Aiqin Tian¹, Xiangyuan Hao², Subing Chang²

¹CRRC Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao Shandong

²No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Taiyuan Shanxi

Received: Jun. 24th, 2022; accepted: Aug. 19th, 2022; published: Aug. 26th, 2022

Abstract

Long (10 m) shaped carbon fiber composites were prepared by pultrusion with multi-layer high

文章引用: 曹亚周, 葛继文, 陈旭, 崔健, 田爱琴, 郝向远, 常素兵. 基于多层高克重四轴向碳纤维拉挤复合材料性能的研究[J]. 材料科学, 2022, 12(8): 821-828. DOI: 10.12677/ms.2022.128091

gram weight four axial carbon fiber cloth as reinforcement and modified epoxy resin (Dow) as matrix resin. The mechanical properties of carbon fiber composites with different thicknesses at different parts of profiled parts were tested, and the changes of mechanical properties of profiled parts with different thicknesses were analyzed; The effect of resin viscosity on the pultrusion process was studied. It was confirmed that the optimum viscosity of pultruded carbon fiber structural parts was 560 MPa·s when the ambient temperature was 33°C; The internal defects of 10m structural parts are studied by ultrasonic phased array. The results show that the internal defects of 10 m structural parts meet the Class A requirements of 3.7 internal quality in composite material GJB 2895.

Keywords

Multilayer High-Gram Four-Axis Carbon Fiber Cloth, Epoxy Resin, Carbon Fiber Composite, Nondestructive Testing, Mechanical Properties

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着轨道交通高速列车的不断提速，高速列车的服役环境日趋复杂多变，传统金属材料制造的列车结构在针对振动、冲击、抗噪和抗疲劳等性能上已明显力不从心，诸如高原、沙漠、高温、高寒等环境，铝合金材料容易氧化，外表面处理困难，并且存在焊接要求高、疲劳强度低等一系列问题；不锈钢材料易存在局部屈曲以及焊接变形等问题；碳钢材料存在易腐蚀、不利于轻量化以及焊接变形大等问题，可见对于新材料在高速列车上的开发与应用已经成为一个亟待解决的问题[1] [2]。复合材料是由两种或多种不同性质或不同形态的原材料，通过复合工艺组合而成的一种材料，它既保持了原组分材料的特点，又具备了质量轻、力学性能好、耐环境性能优的特点。目前高速列车对复合材料的应用主要体现在箱体的内饰装备，并且主要以热压罐、模压、真空导入为主，拉挤成型长度较长的受力复合材料结构件也有报道，主要以碳纤维纱为主[3] [4] [5]；对长度较长拉挤成型的多层高克重四轴向碳纤维异型结构件鲜见报道，本文以多层高克重碳纤维布为增强材料，改性环氧树脂为基体树脂，在不同环境温度下，采用拉挤成型技术制备了可满足应用于高速列车较长复合材料承载件，并对碳纤维异型复合材料结构件进行了内部质量以及力学性能测试。

2. 试验部分

2.1. 主要原材料

多层高克重四轴向碳纤维布(1000 g/m²、800 g/m²、600 g/m²、400 g/m²)，12k、T300，常州普泰玻纤制品有限公司；改性环氧树脂(陶氏)，陶氏材料科技有限公司；AB 混合内脱模剂。

本文使用多层高克重四轴向碳纤维布与碳纤维纱具体碳纤维原材料如表 1 所示。

2.2. 试验仪器设备及测试标准

本文使用的试验设备如表 2 所示。

Table 1. Information sheet of carbon fiber raw materials**表 1.** 碳纤维原材料信息表

名称	规格/型号
碳纤维布	四轴向, T300, 1000 g/m ²
碳纤维布	四轴向, T300, 1600 g/m ²
碳纤维布	四轴向, T300, 600 g/m ²
碳纤维布	单向, T300, 400 g/m ²
碳纤维纱	TC-35R-50K

Table 2. Test equipment**表 2.** 试验设备

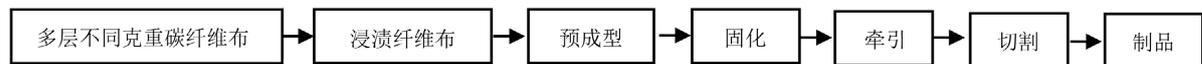
名称	生产厂家	规格/型号	数量
数字粘度计	德卡精密量仪有限公司	NDJ-5S	1 台
拉挤设备	广东仁达智能装备有限公司	50t 卧式自动拉挤机	1 台
无损检测设备	中科创新	HSPA30	1 套
拉挤工装	自制	/	1 套

2.3. 自制内脱模剂

内脱模剂是影响拉挤产品的关键因素, 由于本文拉挤的结构件比较复杂, 所以为了拉挤出该产品, 本文根据拉挤结构件自制了内脱模剂首先根据成型结构件称取一定量的自制脱模剂(A), 按照比例称取自制脱模剂(B), 在 25℃ 环境下混合搅拌数分钟直至搅拌均匀为 AB 内混合脱模剂。

2.4. 异型碳纤维拉挤复合材料制备

将多层高克重碳纤维织物按铺层设计顺序依次穿过预成型系统和模具, R 角处填充碳纤维纱; 设置加热系统参数, 三个温度区温度分别为 130℃、150℃、170℃; 待三个区温度达到设置温度后将配制好的树脂胶液倒入胶槽, 调整碳纤维织物位置, 使各层织物保持对齐; 启动牵引设备, 拉挤 1 车速率为 100 mm/min; 拉挤 2 车速率为 95 mm/min; 牵引力为 5 t~6.5 t, 拉挤异型碳纤维复合材料流程图如图 1 所示。

**Figure 1.** Flow chart of pultruded profiled carbon fiber composites**图 1.** 拉挤异型碳纤维复合材料流程图

铺层要求如表 3 所示。

Table 3. Table of paving requirements**表 3.** 铺层要求表

区间	角度	规格/型号
一区铺层	0°/90° + 45°/-45°	T300, 600 g/m ²
	0°/90° + 45°/-45°	T300, 1000 g/m ²
	0°/90° + 45°/-45°	T300, 1600 g/m ²

Continued

	0°/90° + 45°/-45°	T300, 600 g/m ²
二区铺层	0°/90° + 45°/-45°	T300, 800 g/m ²
	0°/90° + 45°/-45°	T300, 1000 g/m ²
	0°/90° + 45°/-45°	T300, 1600 g/m ²
	0°	T300, 400 g/m ²
三区铺层	0°/90° + 45°/-45°	T300, 1600 g/m ²
	0°/90° + 45°/-45°	T300, 1600 g/m ²
四区铺层	0°/90° + 45°/-45°	T300, 1600 g/m ²
	0°/90° + 45°/-45°	T300, 1600 g/m ²
	0°/90° + 45°/-45°	T300, 1600 g/m ²
	0°/90° + 45°/-45°	T300, 1600 g/m ²

异型结构制品如图 2 所示。

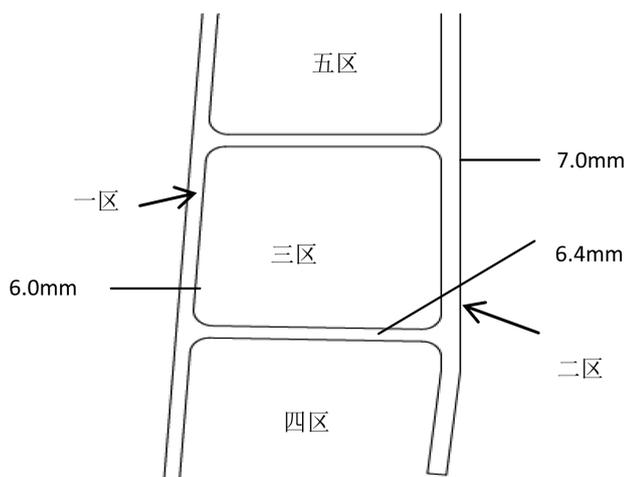


Figure 2. Product drawing of special structure
图 2. 异型结构制品图

2.5. 性能测试

2.5.1. 力学性能测试

采用美国 Instron 公司的 Instron 4465 型电子万能试验机对拉挤异型结构样品[6] (对拉挤样品不同尺寸部位裁剪成测试样品)的开孔拉伸性能(ASTM D5766-2011 聚合物基复合材料层压板开孔拉伸强度标准条件)、冲击后压缩强度(ASTM D136/D7136M-20 纤维增强聚合物基体复合材料抗落锤冲击损伤的标准测试方法)、层间剪切强度(ASTM D2344:2016 聚合物基复合材料及其层压板短梁强度标准试验方法), 每类测试平行测试 5 个样品, 取其平均值作为力学性能数据; 测试环境温度为(22 ± 2)°C。

2.5.2. 无损检测方法

采用武汉中科创新 HSPA30 对 10 米型材进行无损检测, 开机, 设置参数, 探头设计: 2L32-0.6*10-A30, 增益值: 18 dB, 厚度根据制品不同部位进行设置, 厚度设置分别为: 6 mm, 7 mm, 然后在被检测物表

面喷洒耦合剂(水), 进行 10 米上边梁制品无损检测[7]。

3. 结果与讨论

3.1. 多腔型材不同尺寸部位力学性能分析

如图 1 制品厚度不同部位力学性能如表 4 所示。

Table 4. Mechanical properties of different parts of the product at different thickness

表 4. 制品不同部位厚度力学性能

厚度(mm)	开孔拉伸强度($\mu\epsilon$)	开孔压缩强度($\mu\epsilon$)	冲击后压缩强度($\mu\epsilon$)	层间剪切强度(MPa)
6.0 mm	13803	7846	6197	62
6.4 mm	15154	7861	/	54
7.0 mm	15556	6863	5948	51

其中厚度 6.4 mm 冲击后压缩强度最大尺寸为 31.8 mm, 无法从制品中裁剪尺寸为 150 mm*100 mm 的测试样件, 因此未对厚度为 6.4 mm 冲击后压缩强度进行测试, 从表 4 可以看出制品拉伸强度随着厚度的增加而增加, 开孔压缩强度厚度为 6.4 mm 最大, 冲击后压缩强度随着厚度的增大在降低, 层间强度随着厚度的增大而减小。综合分析, 开孔拉伸强度随着厚度增大而增大, 是由于厚度增加, 碳纤维增加, 从而开孔拉伸强度增加; 7.0 mm 开孔压缩强度小于 6.4 mm、6.0 mm 开孔压缩强度, 这是由于 7.0 mm 厚度为型腔部位, 碳纤维布包裹型腔, 出现纤维布重叠, 导致树脂用量减少, 纤维用量增大, 树脂对纤维布的粘接降低, 所以 7.0 mm 的开孔压缩强度下降; 冲击后压缩强度降低; 随着厚度的增加层间剪切强度下降, 这是由于: 制品的结构较复杂, 6.0 mm 铺层在成型过程中, 纤维布过渡比较平顺, 纤维布进模具时纤维布无起皱现象, 所以树脂能很好粘接纤维布; 6.4 mm 铺层成型过程中, 纤维布进模具弧度较小, 纤维布容易重叠或起皱, 导致局部树脂用量降低, 因此层间强度下降, 7.0 mm 腔口纤维布容易重叠、起皱, 树脂用量下降较大, 层间强度下降程度增大。

3.2. 树脂粘度对拉挤工艺的影响

本文制品所用的纤维为四轴向纤维布, 布与布网格编织紧密, 所以制品对树脂粘度要求较高, 树脂粘度对拉挤工艺的影响如表 5 所示。

Table 5. Effect of resin viscosity on pultrusion process

表 5. 树脂粘度对拉挤工艺的影响

树脂粘度(mPa·s)	树脂温度($^{\circ}\text{C}$)	牵引力(t)	夹持力(MPa)	外观质量
560	33	3.2	4.4	表面平整、光亮
650	30	4.8	5	表面平整
800	23	9.2	11	表面有凹坑
1253	19	15	20	纤维布间断性未浸透
1923	19	22	打滑	堵模

从表 5 可以看出, 随着粘度的增加, 拉挤的牵引吨数增大, 夹持力增大, 甚至出现打滑, 外观质量越来越差。综合分析树脂粘度越大, 树脂越难渗透(浸渍)多层致密的四轴向纤维布, 浸渍于多层纤维布表面开始固化, 导致未浸透的纤维布之间摩擦力增大, 纤维布出现起皱或者折叠, 从而牵引力的吨位增加,

加持力增大, 严重时出现打滑, 外观质量越来越差, 导致堵模; 树脂粘度小于 560 mPa·s, 在模具出口有溢胶, 导致制品不能完全固化。综合分析树脂粘度为 560 mPa·s 拉挤工艺参数稳定, 制品质量最佳。

3.3. 上边梁(10 米)无损检测分析

多层高克重四轴向碳纤维布拉挤复合材料制品采用超声相控阵检测确认内部质量缺陷, 复合材料内部缺陷主要有脱胶、分层、气泡、夹杂、孔隙、纤维断裂。

3.3.1. 超声相控阵检测复合材料机理

根据声波传播理论, 当介质发生突变或者出现不连续时, 声波传播规律就会发生改变。这种改变与传播介质及突变的前后介质的特性, 比如声速、密度、声波的幅度、相位、传播时间和衰减特性等密切相关。采用超声检测技术可对复合材料结构中的分层、孔洞、脱粘、裂纹、冲击损伤等缺陷进行检测, 对缺陷能够进行准确的定量评价。超声检测方法根据发射和接收方式分为反射法和穿透法; 按耦合方式又可分为接触法、液浸法和喷水法[8]。

喷水穿透法是利用超声换能器向被检构件发射超声波, 在构件异侧用接受探头接受声波, 辅以扫查装置, 耦合剂多采用水, 声波传播路径依靠喷水装置形成的水流传导。喷水扫查设备由喷头、探头支架、夹具、扫查控制机构组成。声波发射信号进入被检工件内部, 其中一部分返回到发射探头中, 若没有遇到异常的反射面区域时, 声波会穿透被检构件, 被接收探头接收。如构件无缺陷时, 接受探头接受声波较多, 接收信号较大, 当缺陷较小时, 部分声能被反射, 有较弱的信号被检测到; 缺陷很大时, 声能被全部反射, 接收探头无法接收到检测信号, 从而根据接收信号幅值变化识别材料的缺陷[9], 如图 3 所示。

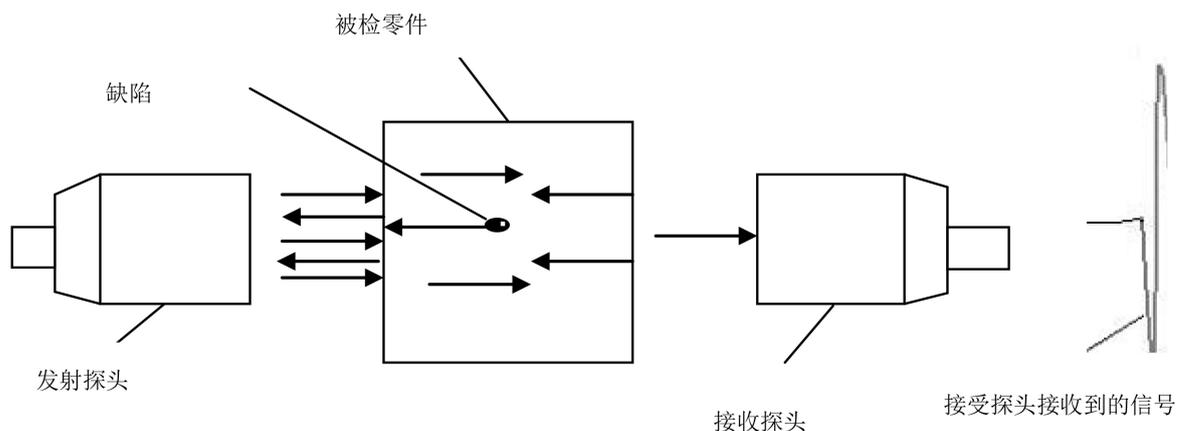


Figure 3. Ultrasonic phased array detection mechanism

图 3. 超声相控阵检测机理

3.3.2. 制品对比块超声相控阵检测

参照 GJB-1038. 1A-2004 标准中对比块的制作要求, 结合被测对象的厚度范围, 从制品中裁剪被检试件对比块, 采用超声相控阵方法检测了制品对比块, 测试结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 对比块不同深度的曲线, 该缺陷满足型材设计要求, 为此对 10 米型材进行了内部缺陷的检验。测试如图 5 所示。

从图 5 可以看出(a)内部无缺陷, (b)内部缺陷进分析为长 4.7 mm, 缺陷高 0.53 mm, 并且该处为 7 mm 厚度处, 从力学性能测试数据分析, 内部杂质可能为四轴向纤维布褶皱导致, 与力学性能层间强度下降分析一致, 但该处测试缺陷在 GJB2895 中 3.7 条内部质量的 A 级要求范围之内, 10 米型材满足应用要求。

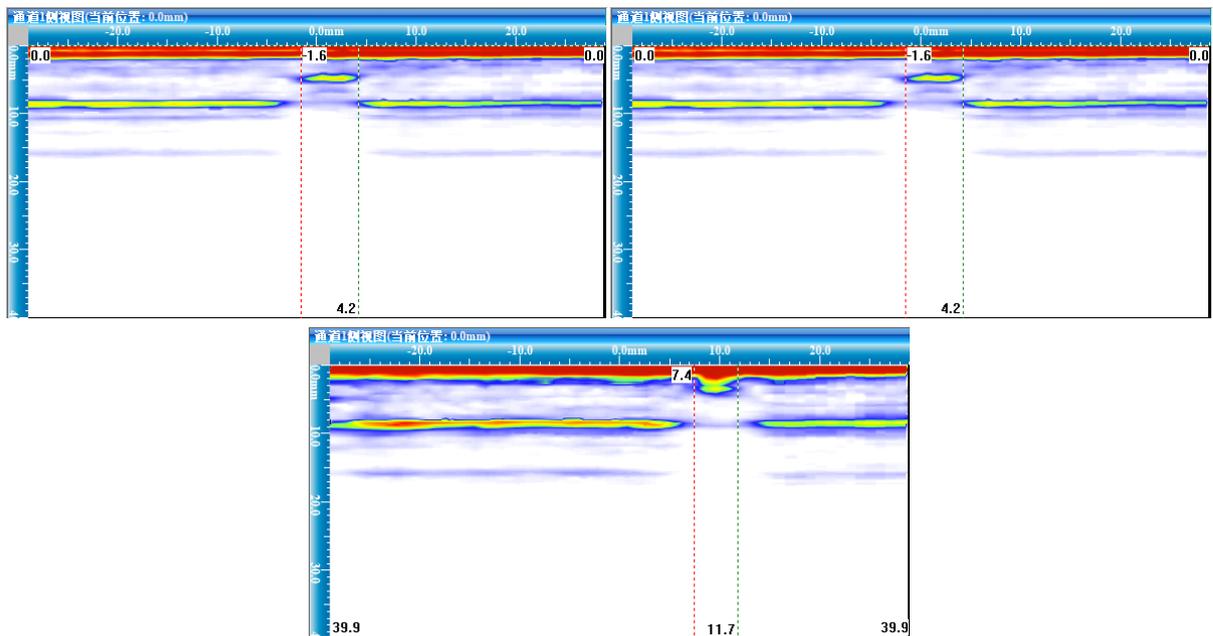


Figure 4. Comparison block defects at different depths
图 4. 不同深度对比块缺陷

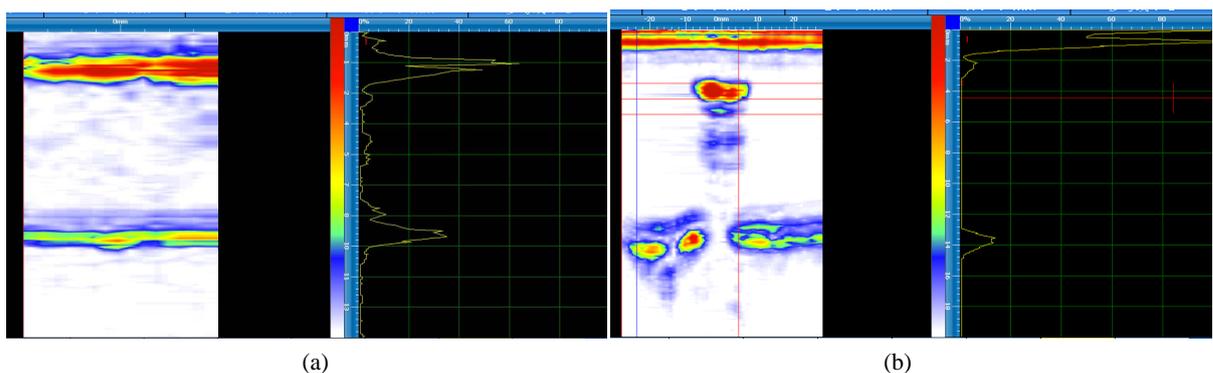


Figure 5. 10 m profile internal defects. (a) No internal defects; (b) Impurities inside
图 5. 10 米型材内部缺陷图。(a) 内部无缺陷；(b) 内部有杂质

4. 结论

本文通过对多层高克重四轴向碳纤维布的铺层设计，拉挤了长、大的碳纤维结构件，分析了不同温度环境下树脂粘度对拉挤工艺参数的影响，确定基体树脂的粘度：560 MPa·s，并对拉挤的结构件厚度为 6.0 mm、6.4 mm、7.0 mm 力学性能进行了测试，分析了 10 米型材不同部位厚度 6.0 mm、6.4 mm、7.0 mm 力学性能；结合超声相控阵检测了拉挤型材内部缺陷，测试缺陷与力学性能分析一致，结果满足复合材料 GJB2895 中 3.7 条内部质量的 A 级使用要求。

参考文献

- [1] Xu, J.Z., Qiao, M., You, B., *et al.* (2012) Simulation and Optimization of Mandrel-Heating Process for Composite Shells Using Internal Heat-Curing Method. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **31**, 133-143. <https://doi.org/10.1177/0731684411431763>
- [2] 郭战胜, 杜善义, 张博明, 等. 先进复合材料用环氧树脂的固化反应和化学流变[J]. 复合材料学报, 2004, 21(4):

146-152.

- [3] 孙曼灵. 环氧树脂应用原理与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] Costa, M.L., Botelho, E.C. and Rezende, M.C. (2006) Monitoring of Cure Kinetic Pre and Cure Cycle Modeling. *Journal of Materials Science*, **41**, 4349-4356. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-6082-1>
- [5] 徐亚栋, 钱林方, 石秀东. 复合材料身管三维瞬态热结构耦合分析[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(2): 151-154.
- [6] 郭兆璞, 陈浩然, 段滋华. 复合材料层合板粘弹性固化残余应力分析[J]. 计算结构力学及其应用, 1996, 13(4): 401-407.
- [7] 刘松平. 复合材料无损检测与缺陷评估技术[J]. 无损检测, 2008, 30(10): 673-678.
- [8] 陈尧, 罗忠兵, 金士杰, 等. 厚壁粗晶铸造奥氏体不锈钢相位相干成像模拟[J]. 无损探伤, 2016(3): 14-17.
- [9] Weston, M., Nageswaran, C., Sutcliffe, M., *et al.* (2012) Calibration of Ultrasonic Techniques Using Fullmatrix Capture Data for Industrial Inspection. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, **54**, 602-611. <https://doi.org/10.1784/insi.2012.54.11.602>