

FRP/形状记忆合金复合材料力学性能和可回复性能试验研究

惠迎新 薛彦杰 王文伟 谈笑

Experimental study on mechanical properties and recoverability of FRP/shape memory alloy composites

HUI Yingxin, XUE Yanjie, WANG Wenwei, TAN Xiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221206.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Ti-Ni基记忆合金复合材料的研究进展

Progress of Ti-Ni based shape memory alloy composites

复合材料学报. 2021, 38(7): 2070–2077 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210312.007>

基于分数阶黏弹性模型的木塑复合材料蠕变/回复性能分析

Creep/recovery behavior analysis of wood-plastic composites based on fractional order viscoelastic model

复合材料学报. 2020, 37(8): 2055–2064 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191230.002>

形状记忆合金在复合材料损伤监测中的应用

Application of shape memory alloy in damage monitoring of composite materials

复合材料学报. 2021, 38(4): 1177–1191 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201111.001>

碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的形状记忆效应

Shape memory effect of carbon fibers reinforced PEEK composite

复合材料学报. 2021, 38(9): 2839–2847 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201229.001>

碳纤维增强形状记忆聚合物复合材料的热-力学行为建模与影响因素碳纤维增强形状记忆聚合物复合材料的热-力学行为建模与影响因素

Modeling and influence factors of the thermo-mechanical behaviors of the carbon fiber reinforced shape memory polymer composites

复合材料学报. 2019, 36(6): 1438–1446 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180906.003>

发泡CaCO₃/杜仲胶形状记忆复合材料的制备与表征

Preparation and characterization of foamed CaCO₃/eucommia ulmoides gum shape memory composites

复合材料学报. 2018, 35(8): 1994–2001 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171128.005>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

FRP/形状记忆合金复合材料力学性能和可回复性能试验研究



分享本文

惠迎新¹, 薛彦杰², 王文炜^{*2}, 谈笑³

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 东南大学 交通学院桥梁工程系, 南京 211189;

3. 史蒂文斯理工学院, 霍博肯 07030)

摘要: 利用形状记忆合金 (SMA) 的回复效应将预应力引入到纤维增强复合材料 (FRP) 中是一种新理念。本文将 FRP 与 SMA 复合, 形成一种新的复合材料用于结构加固修复中, 开展了 FRP/SMA 复合材料的力学性能和受限回复性能试验。在力学性能试验中, 将 SMA 丝的数量和直径作为试验变量, 分析它们对 FRP/SMA 复合材料拉伸性能的影响; 在受限回复试验中, 将 SMA 丝直径和预应变水平作为试验变量, 分析其对 SMA 丝及 FRP/SMA 复合材料可回复性能的影响。在试验研究的基础上, 给出了第一类 FRP/SMA 复合材料的材料强度、极限应变和弹性模量的预测模型和 FRP/SMA 复合材料回复应力-温度模型。试验结果表明, 在一定掺量内, 提高掺入 SMA 丝的数量能够提高复合材料的最大断裂应变和抗拉强度, 掺入的丝数量越多, 断后残余强度越大。SMA 丝的直径显著影响复合材料试件的拉伸弹性模量。在受限回复性能试验中, FRP/SMA 复合材料的回复应力在相变区间内随温度的升高呈明显的上升趋势, 复合材料的最大回复应力将会随预应变水平的提高而增大。提出的基于 Brinson 模型的修正模型, 预测值与试验值吻合较好, 可以有效地预测 SMA 丝和 FRP/SMA 复合材料的回复应力与温度的关系。

关键词: 纤维增强复合材料; 形状记忆合金; 复合材料; 形状记忆效应; 受限回复性能

中图分类号: U441+3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2023)09-5302-13

Experimental study on mechanical properties and recoverability of FRP/shape memory alloy composites

HUI Yingxin¹, XUE Yanjie², WANG Wenwei^{*2}, TAN Xiao³

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Department of Bridge

Engineering, School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China;

3. Stevens Institute of Technology, Hoboken 07030, America)

Abstract: Using the recovery effect of shape memory alloy (SMA) to introduce prestress into fiber reinforced polymer (FRP) is a new idea. In this paper, FRP and SMA are compounded to form a new composite material for structural strengthening and repair. The mechanical properties and limited recovery properties of FRP/SMA composites are tested. In the mechanical property test, the number and diameter of SMA wires are taken as test variables, and their effects on the tensile properties of FRP/SMA composites are analyzed. In the limited recovery test, the SMA wire diameter and pre-strain level were taken as test variables to analyze their effects on the recoverable properties of SMA wire and FRP/SMA composites. On the basis of experimental research, the regression equations of recovery stress temperature of SMA wire and FRP/SMA composites are given. The test results show that increasing the number of SMA wires can improve the maximum fracture strain and tensile strength of the composite. The more wires are added, the greater the residual strength after fracture. The diameter of SMA wire significantly affects the tensile

收稿日期: 2022-09-19; 修回日期: 2022-11-11; 录用日期: 2022-11-21; 网络首发时间: 2022-12-08 10:27:14

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221206.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (52268077; 51878156); 宁夏回族自治区重点研发计划 (2020 BFG02005)

National Natural Science Foundation of China (52268077; 51878156); Key R&D Program of Ningxia Hui Autonomous Region (2020 BFG02005)

通信作者: 王文炜, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新材料在桥梁结构中的应用 E-mail: wangwenwei@seu.edu.cn

引用格式: 惠迎新, 薛彦杰, 王文炜, 等. FRP/形状记忆合金复合材料力学性能和可回复性能试验研究 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(9): 5302-5314.

HUI Yingxin, XUE Yanjie, WANG Wenwei, et al. Experimental study on mechanical properties and recoverability of FRP/shape memory alloy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(9): 5302-5314(in Chinese).

elastic modulus of composite specimens. In the limited recovery performance test, the recovery stress of FRP/SMA composites shows an obvious upward trend with the increase of temperature in the phase transition range, and the maximum recovery stress of composites will increase with the increase of pre-strain level. The modified model based on Brinson's model is proposed, and the predicted values are in good agreement with the experimental values, which can effectively predict the relationship between the recovery stress and temperature of SMA wire and FRP/SMA composites.

Keywords: fiber reinforced polymer; shape memory alloy; composite material; shape memory effect; recovery behavior

纤维复合材料 (Fiber reinforced polymer, FRP) 由于其具有优良的材料性能, 目前在土木工程结构的修复与加固中得到较广泛的应用^[1-3]。为了充分发挥 FRP 材料的轻质高强特性, 一个有效的方法是将预应力引入到 FRP 片材中。然而, 传统的机械式预应力施加方法存在施工复杂、施工空间狭小、预应力损失较大等缺点, 限制了预应力 FRP 片材的推广与应用^[4-7]。因此, 急需研究新的方法对 FRP 片材引入预应力。

目前, 一种性能优异的材料-形状记忆合金 (Shape memory alloy, SMA) 正在进入土木工程领域^[8-13], SMA 具有两种典型的特性: 超弹性性能和形状记忆效应^[14-18]。Zafar 等^[18]将超弹性的 SMA 丝与玻璃纤维复合材料 (Glass fiber reinforced polymer, GFRP) 纤维及高伸长率树脂相结合, 研究复合棒材的基本力学性能和滞回性能。Zheng 等^[19-20]、El-Tahan 等^[21]将 SMA 丝作为加固材料, FRP 作为锚固片材, 对钢板进行疲劳加固。通过 FRP 将 SMA 粘贴在钢板表面, 并利用 SMA 丝的回弹性能将预应力引入钢板, 以减小钢板的应力幅。此外, 超弹性 SMA 丝特殊的电阻特性被用来制作 FRP/SMA 组合中的应变传感元件, 以监测结构健康状况^[22]。

结合 SMA 和 FRP 两种材料的优异性能, 本文提出了一种新的 FRP/SMA 复合材料主动增强技术^[23-25]。该项加固技术所应用的加固层是由 SMA 丝和 FRP 片材两种材料组成: SMA 丝作为预应力引入介质嵌入到 FRP 片材内部, 利用 SMA 的回复性能在 FRP 片材中引入预应力。该项技术克服了机械张拉过程中 FRP 片材不易夹持, 预应力不易

施加等问题^[25-27]。

为验证该项技术的可行性, 本文开展了 SMA 丝与碳纤维复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 片材形成的复合材料的力学性能和可回复性能试验研究。

1 FRP/SMA 复合材料的力学性能

FRP/SMA 复合材料主动增强技术 (图 1) 的工作原理是利用 SMA 丝的形状记忆效应将 SMA 产生的回复力引入加固区。在修复与加固工程中, 首先在端部采用 FRP 片材将 SMA 丝材锚固于梁底面, 同时, 在加固区的 FRP 片材与混凝土梁底面涂刷环氧树脂类粘结材料进行粘结, 然后通过 SMA 丝材的升温回复将预应力引入加固区中的 FRP 片材中, 在环氧树脂固化过程中, FRP 片材中的预应力传递到混凝土中, 从而改善被加固结构受力性能。

1.1 原材料

SMA 丝为西安思维金属材料有限公司生产的镍钛 (NiTi) 合金, 直径为 0.5 mm 和 1.0 mm。根据差示扫描量热法测试结果, 0.5 mm 和 1.0 mm 丝的奥氏体、马氏体相变温度如表 1 所示。可以看出, 在常温 (20℃) 的条件下, NiTi 丝处于马氏体相。

图 2 为 0.5 mm 和 1.0 mm 的 NiTi 合金丝在常温下单调拉伸的典型试验结果。在 1.0 mm/min 加载速率下, 0.5 mm 和 1.0 mm 的丝的应力-应变关系曲线表现出一致性, SMA 丝从试验加载到拉断, 整个应力-应变曲线可分为 4 个阶段: 从开始加载到 SMA 丝的应力达到相变开始应力 σ_s 之前,

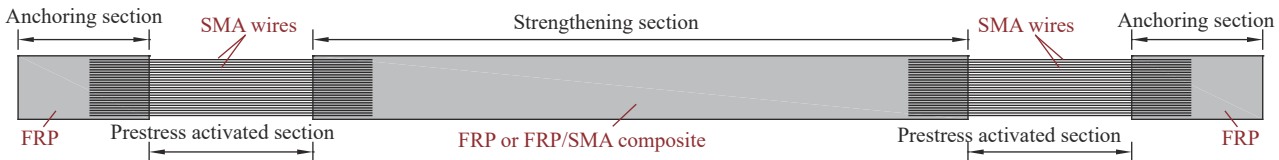


图 1 纤维增强复合材料 (FRP)/形状记忆合金 (SMA) 复合材料预应力增强系统

Fig. 1 Fiber reinforced polymer (FRP)/shape memory alloy (SMA) composite prestressed strengthening system

表 1 材料的物理力学性能
Table 1 Physical and mechanical properties of materials

Material	Diameter φ /mm	Austenite transition temperature/ $^{\circ}\text{C}$		Martensite transition temperature/ $^{\circ}\text{C}$		Phase transition stress/MPa	Strength/ MPa	Elastic modulus/ GPa	Elongation/ %
		Start A_s	Finish A_f	Start M_s	Finish M_f				
SMA wire	0.5	106.12	121.40	55.34	27.34	122	982	12.2	78.0
	1.0	79.13	105.46	59.00	35.81	117	906	10.4	75.0
CFRP		—	—	—	—	—	3 000	247.7	1.2
Epoxy resin		—	—	—	—	—	35	2.2	1.6

Notes: CFRP—Carbon fiber reinforced plastic; A_f —Austenite finish temperature; A_s —Austenite start temperature; M_s —Martensite start temperature; M_f —Martensite finish temperature.

SMA 处于弹性阶段。随着拉伸荷载的增加，SMA 丝应力超过相变开始应力 σ_s 时，触发 SMA 丝发生相变，此时 SMA 丝的应力基本不增长而应变持续增加，所对应的相变阶段的应变从 1.5% 开始一直持续到 7% 左右。当 SMA 丝的拉伸应力超过相变结束应力 σ_f 时，应力-应变曲线表现为明显的上升趋势。而后试件截面发生局部颈缩，变形持

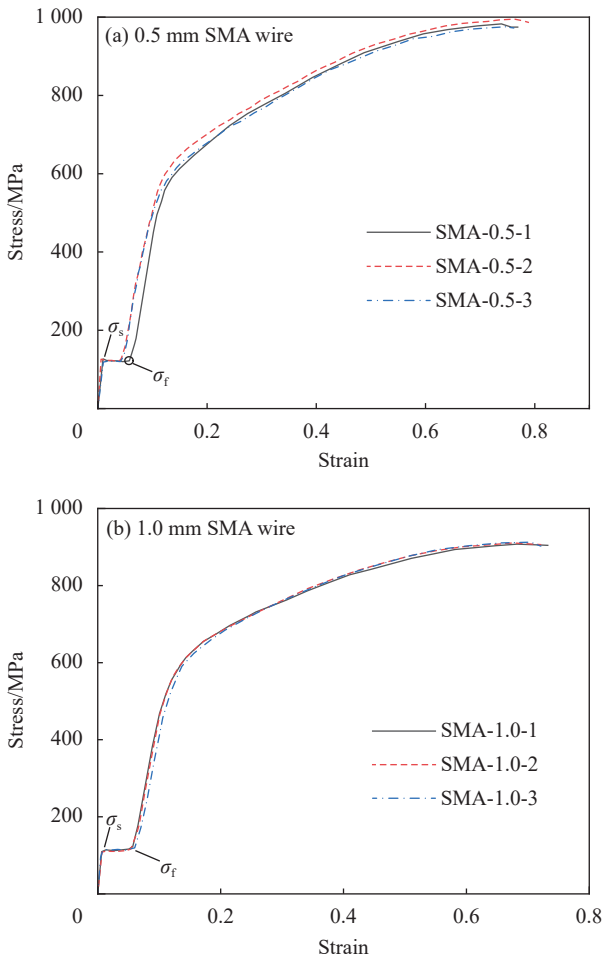
续增加，超过了极限抗拉强度后，应力随之下降直至断裂。

FRP 材料为卡本复合材料(天津)有限公司所生产的 CFS-I-300 高强 I 型 CFRP 单向布，根据《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》^[28]，试件的设计尺寸为 250 mm×25 mm×0.167 mm，标距为 150 mm。环氧树脂为配套的 CFSR-A/B 型碳纤维浸渍胶，拉伸测试标准依据 GB/T 2567—2008^[29]，标距为 50 mm 的棒骨试件拉。在 2.0 mm/min 的加载速率下，CFRP 片材试件表现为脆性断裂破坏，拉伸强度为 3 000.0 MPa，最大拉伸应变量为 1.2%，弹性模量为 247.7 GPa。环氧树脂胶抗拉强度为 35.0 MPa，最大拉伸应变约为 1.6%，弹性模量为 2.2 GPa。表 1 给出了所有材料的物理力学性能指标。

1.2 试件设计

FRP/SMA 复合材料由一层 CFRP 片材垫层、一层 SMA 丝中间夹层及一层 CFRP 片材覆盖层组成。它们之间使用环氧树脂相互牢固粘结。本文设计了两种 FRP/SMA 复合材料试件：第一种类型(I 类)的复合材料试件是由 CFRP 片材与 SMA 丝在全长度范围内进行复合，用于测试复合材料的力学性能；第二种类型(II 类)的复合材料试件是将 FRP 片材与 SMA 丝进行部分复合并留出一段非复合区—激活段，用于对 SMA 丝通电升温，测试复合材料的回复性能，如图 3 所示。

I 类复合材料试件设计了 SMA 丝的根数和 SMA 直径两个试验变量，共 4 组试件；II 类复合材料试件的试验变量为 SMA 丝的初始拉应变，共 3 组试件，如表 2 所示。表中符号“FRP/SMA-I、FRP/SMA-II”表示两类试件；“0.5、1.0”表示 SMA 丝的直径分别为 0.5 mm 和 1.0 mm；“5、10 和 15”分别表示 SMA 丝的根数；“4%、6% 和 8%”分别为 SMA 丝的初始拉应变。



σ_s —Phase transition initiation stress; σ_f —End-phase change stress
图 2 SMA 丝单调拉伸应力-应变关系曲线
Fig. 2 Stress-strain relationship of SMA wires in monotonic tension

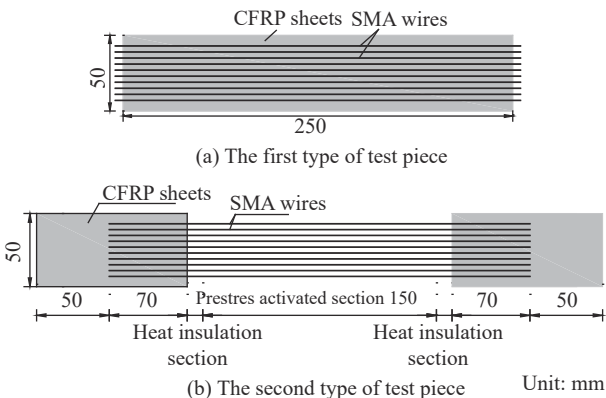


图3 两类FRP/SMA复合材料试件

Fig. 3 Two types of FRP/SMA composite specimens

1.3 试验装置

试验加载装置为电液伺服万能试验机，力传感器量程为300 kN。荷载值通过采集软件自动记

录，之后换算成试件的应力值。应变通过TST3827E动静态信号测试分析系统采集。环境温度为20℃，试验过程采用等位移速率控制，设定为2.0 mm/min，拉伸试件直至破坏。

1.4 试验结果与分析

1.4.1 破坏形态

图4为I类FRP/SMA复合材料试件的典型破坏形态，主要有两种：CFRP片材纵向劈裂破坏，如图4(a)所示；CFRP片材中部爆裂破坏，如图4(b)所示。CFRP片材纵向劈裂破坏是随着荷载的增加，试件的拉伸段出现一条贯通的主裂缝，使试件沿着拉伸方向产生过大的剪切力而造成的，破坏形式更类似于CFRP片材的拉伸破坏模式。CFRP片材中部爆裂破坏是随着试验载荷的增加，试件中部CFRP片材中的纤维丝相继达到拉伸强度，断裂并伴随着剧烈的爆裂声的破坏模式。

表2 两种类型的FRP/SMA复合材料试件

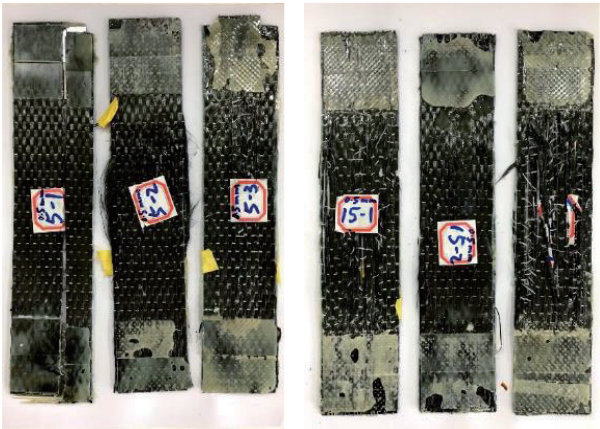
Table 2 Two types of FRP/SMA composite specimens

Specimen type	Specimen	Number of SMA wires	Diameter of SMA/mm	Prestrain/%	Length of composite section/mm
FRP/SMA-I	FRP/SMA-I-0.5-5-4%	5	0.5	4	250
	FRP/SMA-I-0.5-10-4%	10	0.5	4	250
	FRP/SMA-I-0.5-15-4%	15	0.5	4	250
	FRP/SMA-I-1-10-4%	10	1.0	4	250
FRP/SMA-II	FRP/SMA-II-1.0-10-4%	10	1.0	4	2×70
	FRP/SMA-II-1.0-10-6%	10	1.0	6	2×70
	FRP/SMA-II-1.0-10-8%	10	1.0	8	2×70

1.4.2 应力-应变关系曲线

图5给出了I类FRP/SMA复合材料试件单调拉伸直至破坏的应力-应变曲线。可知，所有试件的应力-应变关系曲线在破坏前近似为一条直线。断裂之后，试件仍然有一定的残余强度，主要来自于未断裂的CFRP纤维和SMA丝的贡献。还可以看出，对于发生纵向劈裂破坏的试件，随着SMA丝用量和直径的增加，FRP/SMA复合材料的极限抗拉强度有所降低，而断裂应变基本不变。如极限抗拉强度由FRP/SMA-I-0.5-5试件组的2 544.0 MPa(平均值)降低到FRP/SMA-I-1-10试件组的2 031.0 MPa(平均值)，对应的最大断裂应变为1.3%~1.4%。值得注意的是，对于发生中部爆裂破坏的试件，其极限抗拉强度的平均值接近CFRP片材的抗拉强度，说明这种破坏模式下，SMA丝对复合材料抗拉强度的贡献非常有限，CFRP起到主要作用。表3给出了I类FRP/SMA复合材料试件的试验结果。

根据试验结果，FRP/SMA复合材料在破坏之前的应力-应变关系可以视为线性关系，即应力等于应变与弹性模量的乘积；破坏之后，认为CFRP



(a) Longitudinal splitting failure of CFRP sheets (b) Middle burst failure of CFRP sheets

图4 FRP/SMA复合材料的破坏形态

Fig. 4 Failure modes of FRP/SMA composites

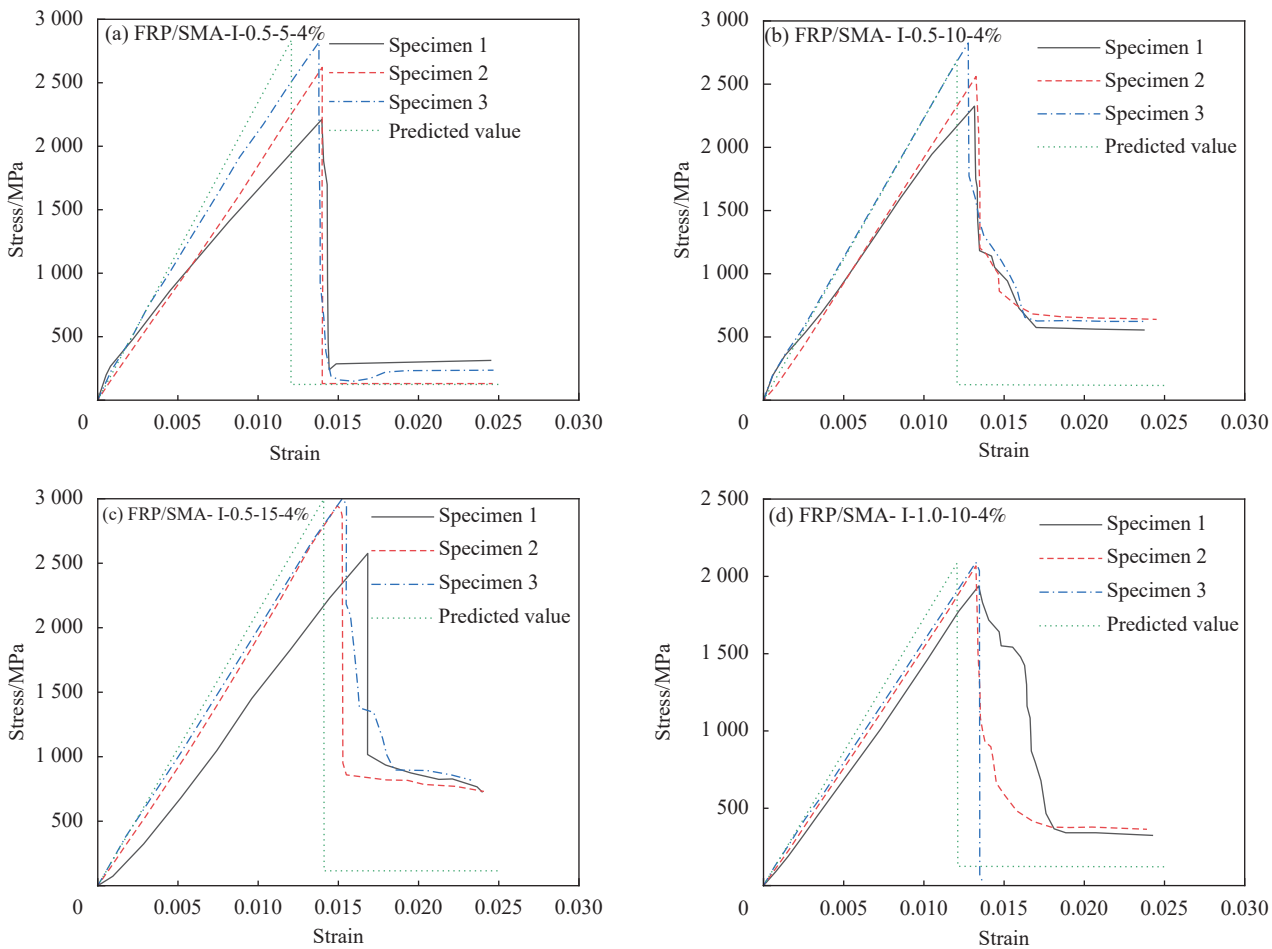


图5 FRP/SMA 复合材料试件的应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of FRP/SMA composite specimen

片材不参与工作，只有 SMA 丝提供强度，且复合材料破坏时的应变均处于 SMA 丝相变阶段，因此复合材料的应力取 SMA 丝的相变应力 σ_s ，可以给出 FRP/SMA 复合材料的应力-应变曲线为

$$\sigma_{fs} = \begin{cases} E_{fs}\varepsilon_{fs} & 0 \leq \varepsilon_{fs} \leq \varepsilon_{fs,u} \\ \sigma_s & \varepsilon_{fs} > \varepsilon_{fs,u} \end{cases} \quad (1)$$

式中： σ_{fs} 为 FRP/SMA 复合材料的应力； ε_{fs} 为 FRP/SMA 复合材料的应变； $\varepsilon_{fs,u}$ 为 FRP/SMA 复合材料的极限拉应变； E_{fs} 为 FRP/SMA 复合材料的弹性模量； σ_s 为 SMA 丝的相变开始应力。

FRP/SMA 复合材料的弹性模量可以按照下式计算：

$$E_{fs} = \frac{E_f A_{fs} + E_s A_{ss}}{A_{fs} + A_{ss}} \quad (2)$$

式中： E_f 、 E_s 分别是 CFRP 片材的弹性模量和 SMA 丝的弹性模量； A_{fs} 、 A_{ss} 分别是 CFRP 片材的截面面积和 SMA 丝的截面面积。

FRP/SMA 复合材料的极限拉应变可以按照下

式计算：

$$\varepsilon_{fs,u} = \begin{cases} \varepsilon_f & \text{纵向劈裂} \\ \frac{f_{fs,u}}{E_{fs}} & \text{爆裂破坏} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{fs,u} = \begin{cases} \frac{f_{fu} A_{fs} + \sigma_s A_{ss}}{A_{fs} + A_{ss}} & \text{纵向劈裂} \\ f_{fu} & \text{爆裂破坏} \end{cases} \quad (4)$$

式中： f_{fu} 、 σ_s 分别是 CFRP 片材的极限抗拉强度和 SMA 丝的相变开始应力； $f_{fs,u}$ 为 FRP/SMA 复合材料的极限抗拉强度。

表 3 给出了试验结果与计算结果的比较。可以看出，抗拉强度、弹性模量及断裂应变的试验值与计算值比值的平均值分别为 0.95、0.85 和 1.13，变异系数分别为 0.08、0.09 和 0.04，计算值与试验值吻合较好。然而，弹性模量的计算值略高于试验值，断裂应变的计算值略低于试验值，其原因是每组试验中均有单个试件的抗拉强度相对较低，而断裂应变相差不大，从而造成该试件

表 3 FRP/SMA 复合材料试验与分析结果

Table 3 Test and analysis results of FRP/SMA composites

Specimen	No.	Strength/MPa			Elastic modulus/GPa			Fracture strain/%			Failure mode
		Test value	Calculated value	Test value/calculated value	Test value	Calculated value	Test value/calculated value	Test value	Calculated value	Test value/calculated value	
FRP/SMA-I-0.5-5-4%	1	2 206		0.78	158.7		0.68	1.39		1.16	Longitudinal splitting
	2	2 617	2 840	0.92	186.9	234.7	0.80	1.40	1.2	1.17	
	3	2 809		0.98	205.0		0.87	1.37		1.14	
FRP/SMA-I-0.5-10-4%	1	2 326		0.86	169.7		0.76	1.32		1.10	Longitudinal splitting
	2	2 566	2 697	0.95	192.9	222.9	0.87	1.33	1.2	1.11	
	3	2 828		1.05	212.6		0.95	1.28		1.07	
FRP/SMA-I-0.5-15-4%	1	2 602		0.87	154.9		0.73	1.68		1.19	Burst failure
	2	2 992	3 000	1.04	188.4	212.4	0.89	1.65	1.41	1.17	
	3	2 999		1.00	196.0		0.92	1.65		1.17	
FRP/SMA-I-1.0-10-4%	1	1968		0.95	145.8		0.85	1.35		1.13	Longitudinal splitting
	2	2 085	2 078	1.00	156.8	171.8	0.91	1.33	1.2	1.11	
	3	2039		0.98	156.8		0.91	1.30		1.08	
Average value				0.95			0.85			1.13	
Standard deviation				0.08			0.08			0.04	
Coefficient of variation				0.08			0.09			0.04	

的弹性模量也相对较低，影响了平均值和变异系数。

2 FRP/SMA 复合材料的可回复性能

为了清楚地了解 FRP/SMA 复合材料的回复性能，本文进行了 SMA 丝及 FRP/SMA 复合材料的受限回复试验，采用通电升温的方式获得回复应力。

2.1 SMA 丝的回复性能

2.1.1 试件设计

在 SMA 丝回复性能试验中，设计了 7 组试件，每组试件包含 2 个试样，SMA 丝试件两夹头之间距离 200 mm(图 6)。试验变量为 SMA 丝的直径和初始拉应变水平，直径为 0.5 mm 和 1.0 mm，初始拉应变设计为 4%、6%、8% 和 10%，如表 4 所示。

预先对 SMA 丝施加初始预拉伸应变，将 SMA 丝的夹持端用砂纸打磨后用绝缘胶布包裹后放置在电子万能材料试验机的夹具中。电源为直流高压稳压直流电源，采用电流控制并达到设计温度。在升温过程中，采用温度传感器实时监测温度的变化情况。试验中记录 SMA 丝的回复应力随温度变化的曲线，确定目标电流下 SMA 丝所能达到的最高应力水平 (σ_{\max}) 及该应力水平所对应的温度 (T_o)，试验加载装置如图 6 所示。

2.1.2 试验结果与分析

0.5 mm 直径的 SMA 丝在不同初始拉应变水平下的受限回复应力与温度的关系曲线如图 7 所示。可以看出，随着温度的升高，SMA 丝发生奥氏体相变，产生了很大的回复应力，并且其回复应力

随温度的升高而迅速增加。当温度大于奥氏体相变结束温度 A_f 后，回复应力值的增加趋于平缓，此时应力的下降是由温度热膨胀引起的。表 4 统计了所有试件的最大回复应力。可以看出，当 0.5 mm 的 SMA 丝的预应变水平分别为 4%、6%、8% 和 10% 时，最大回复应力分别为 202 MPa、273 MPa、288 MPa 和 295 MPa，即随着预拉伸应

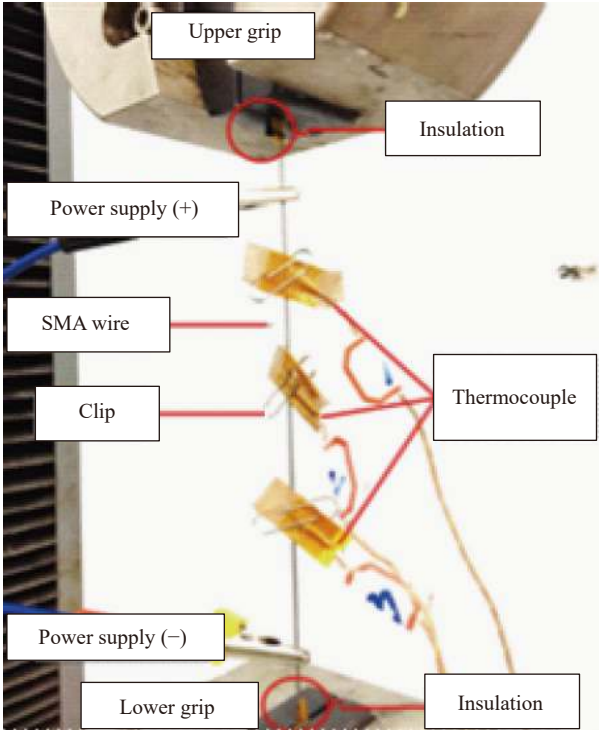


图 6 SMA 回复试验装置

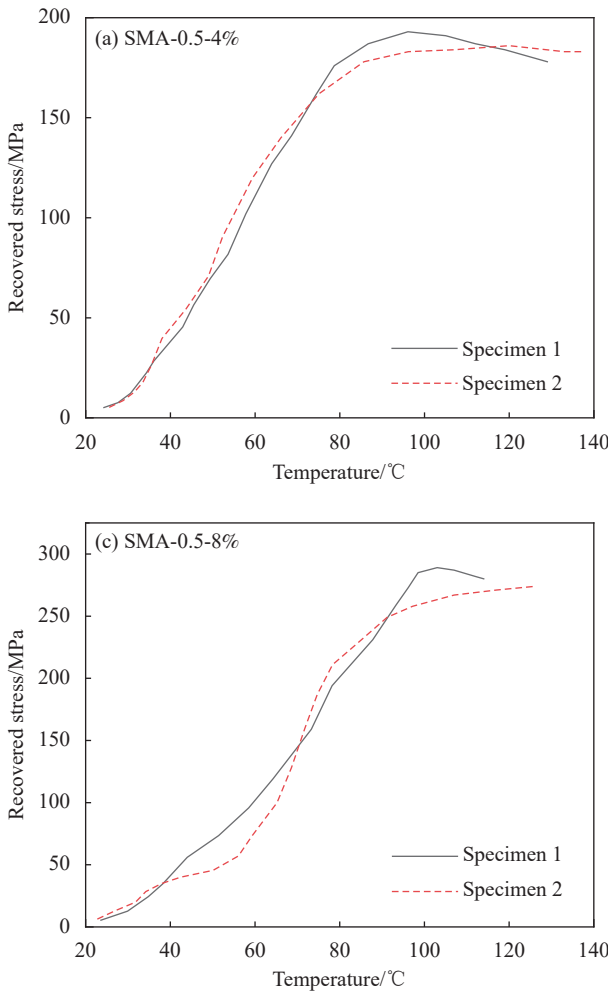
Fig. 6 SMA recovery test device

表 4 SMA 回复性能试验试件设计与试验结果
Table 4 Design and test results of SMA recovery test specimen

Specimen	Length of SMA/mm	Diameter of SMA/mm	Prestrain/%	Average value of maximum recovery stress/MPa
SMA-0.5-4%	200	0.5	4	202
SMA-0.5-6%	200	0.5	6	273
SMA-0.5-8%	200	0.5	8	288
SMA-0.5-10%	200	0.5	10	295
SMA-1.0-4%	200	1.0	4	267
SMA-1.0-6%	200	1.0	6	312
SMA-1.0-8%	200	1.0	8	391

变水平的增大，最大回复应力也均随之增加。

1.0 mm 直径的 SMA 丝不同预应变水平下的受限回复应力与温度的关系曲线如图 8 所示。与 0.5 mm 直径的 SMA 丝所表现出来的性质类似，最大回复应力随预拉伸应变水平的增加而增加。



但是相比于相同预拉伸应变水平下 0.5 mm 直径 SMA 丝，1.0 mm 直径的 SMA 丝的回复应力有明显的提升，如表 4 所示。可以看出，当 1.0 mm 的 SMA 丝的预应变水平分别为 4%、6%、8% 时，最大回复应力分别为 267 MPa、312 MPa 和 391 MPa。

2.2 基于 Brinson 模型的受限回复分析

2.2.1 理论推导

Brinson 模型^[30-32]将马氏体分为温度诱发的马氏体和应力诱发的马氏体两部分，相对应的两部分的马氏体体积分数分别用 ξ_T 和 ξ_S 表示。受限回复过程中，SMA 的马氏体相变开始和结束温度及马氏体逆相变的开始和结束温度都将因应力水平不同而有所改变。考虑应力因素后的马氏体相变开始和结束温度及马氏体逆相变开始和结束温度分别设为 M_s^m 、 M_f^m 、 A_s^m 、 A_f^m 。

Brinson^[31]根据 SMA 在相变过程中自由能达到最小值的原理建立了 SMA 的本构关系模型，

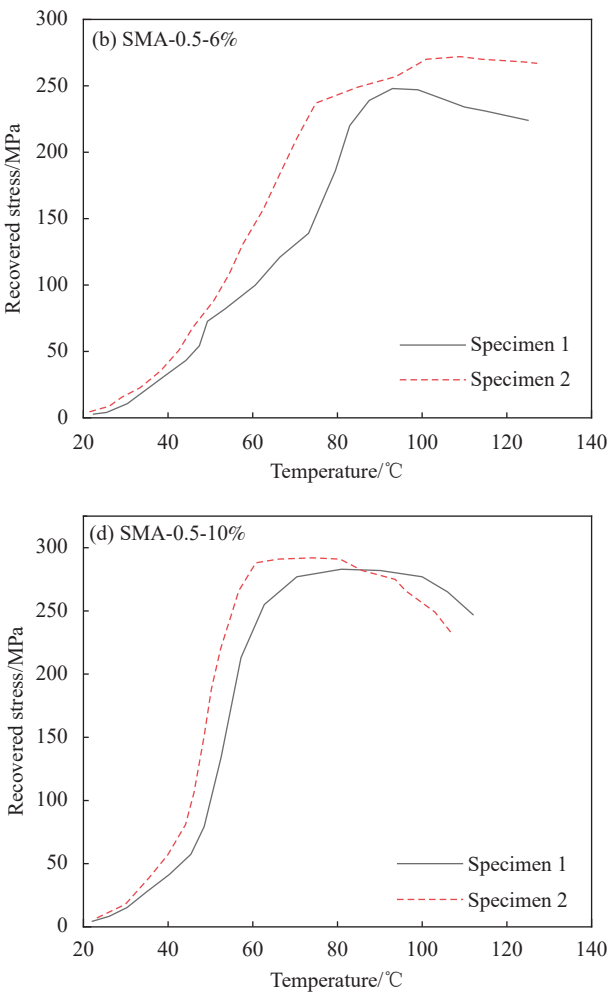


图 7 0.5 mm SMA 丝不同预应变水平情况下回复应力随温度的变化曲线

Fig. 7 Recovery stress curves of 0.5 mm SMA wire with different pre-strain levels as a function of temperature

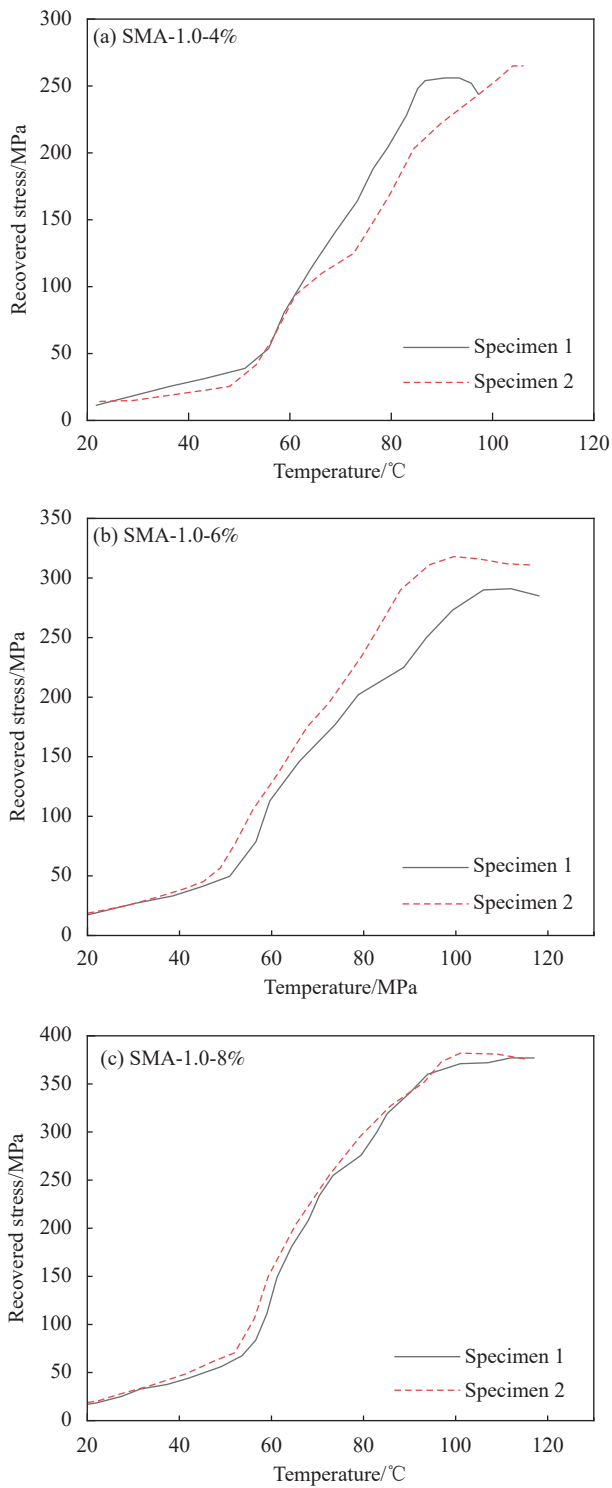


图 8 1.0 mm SMA 丝不同预应变水平情况下回复应力随温度的变化曲线
Fig. 8 Recovery stress and temperature curves of 1.0 mm SMA wire with different pre-strain levels

并考虑了应力诱导马氏体含量对本构关系的影响。根据 Brinson 模型可知, SMA 的本构关系可表达为

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi) \varepsilon - E(\xi_0) \varepsilon_0 + \Omega(\xi) \xi_S - \Omega(\xi_0) \xi_{S0} + \Theta(T - T_0) \quad (5)$$

其中: $E(\xi)$ 为 SMA 丝的弹性模量; $\Omega(\xi)$ 为 SMA 的相变张量; 下标 0 表示 SMA 材料的初始状态。

将 SMA 的回复应力用 σ^r 表示, 则 SMA 初始状态为 $\sigma_0^r = 0$, $\varepsilon_0 = \varepsilon_m$, $\xi_0 = 1$, $\xi_{S0} = \varepsilon_m / \varepsilon_L$, $T_0 = T_m < M_f$ 。其中, ε_m 为 SMA 拉伸后的残余应变, ε_L 为最大可回复应变。由于 SMA 初始的应力诱发马氏体分数 ξ_{S0} 不大于 1, 故当 ε_m 略大于 ε_L 时, 取 ε_m 等于 ε_L , 即此时有 $\xi_{S0} = 1$ 。

为便于计算加热受限回复过程中的回复应力, 基于 Brinson 模型对其进行分段推导:

① 当 $T \leq A_s^m$ 时, 没有发生马氏体逆相变, 此时受限回复应力与温度之间的关系为

$$\sigma^r - \sigma_0^r = \Theta(T - T_m) \quad (6)$$

② 当 $T = A_s^m$ 时, SMA 即将发生马氏体逆相变, 应力达到临界点, 由式 (5) 可得:

$$\sigma_{A_s^m}^r = \Theta(A_s^m - T_m) \quad (7)$$

③ 当 $A_s^m < T \leq A_f^m$ 时, SMA 发生马氏体逆相变, 此时 SMA 初始状态为 $\sigma_0^r = \sigma_{A_s^m}^r$, $\varepsilon_0 = \varepsilon_m$, $\xi_0 = 1$, $\xi_{S0} = \varepsilon_m / \varepsilon_L$, $T_0 = A_s^m$ 。马氏体含量和应力诱发马氏体含量可分别表示为

$$\xi = \frac{1}{2} \cos[a_A(T - A_s) - \sigma^r / C_A] + \frac{1}{2} \quad (8)$$

$$\xi_S = \frac{\xi_{S0}}{2} \cos[a_A(T - A_s) - \sigma^r / C_A] + \frac{\xi_{S0}}{2} \quad (9)$$

SMA 刚开始发生马氏体逆相变时, 温度为 A_s^m , 此时应力诱发马氏体含量仍为 ξ_{S0} , a_A 和 C_A 为 SMA 丝的材料常数, 根据式 (8) 和式 (9) 可得:

$$A_s^m = \frac{C_A A_s - \Theta T_m}{C_A - \Theta} \quad (10)$$

当 SMA 发生马氏体逆相变时, 根据式 (5) 受限回复应力与温度的关系可表示为

$$\sigma^r - \sigma_{A_s^m}^r = \Theta(T - A_s^m) + E(\xi) \frac{\varepsilon_0}{2} \{1 - \cos[a_A(T - A_s) - \sigma^r / C_A]\} \quad (11)$$

当 $T = A_f^m$ 时, 马氏体逆相变结束, 受限回复应力达到临界点, 可表示为

$$\sigma_{A_f^m}^r = \Theta(A_f^m - A_s^m) + (E_A - E_M) \varepsilon_0 + \varepsilon_L E_M \xi_{S0} + \sigma_{A_s^m}^r \quad (12)$$

由式 (9) 和式 (12) 可得:

$$A_f^m = \frac{E_A \varepsilon_0 + C_A A_f - \Theta A_s^m}{C_A - \Theta} \quad (13)$$

当 $T \geq A_f^m$ 时, 马氏体逆相变完成。此时 SMA 初始状态为: $\sigma_0^r = \sigma_{A_f^m}^r$, $\varepsilon_0 = \varepsilon_m$, $\xi_0 = 0$, $T_0 = A_s^f$ 。根据式 (5), 受限回复应力与温度的关系可表示为

$$\sigma^r - \sigma_{A_f^m}^r = \Theta(T - A_f^m) \tag{14}$$

当温度达到 A_f^m 时，此时 SMA 丝内部相变已

经完成，因此将此时产生的受限回复应力定义为最大受限回复应力。

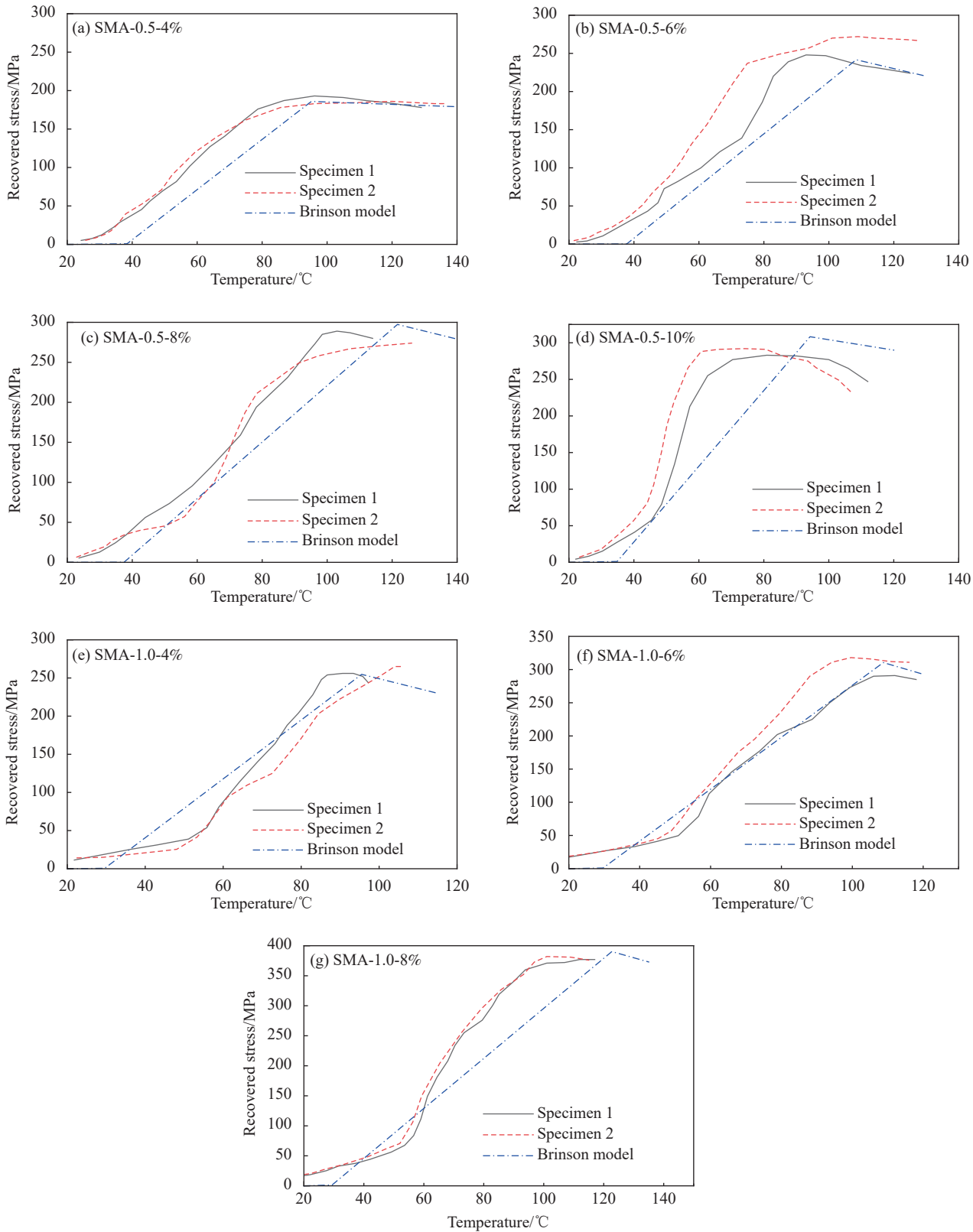


图9 SMA 丝回复应力-温度模拟曲线

Fig. 9 Stress-temperature simulation curves of SMA wire recovery

2.2.2 数值模拟

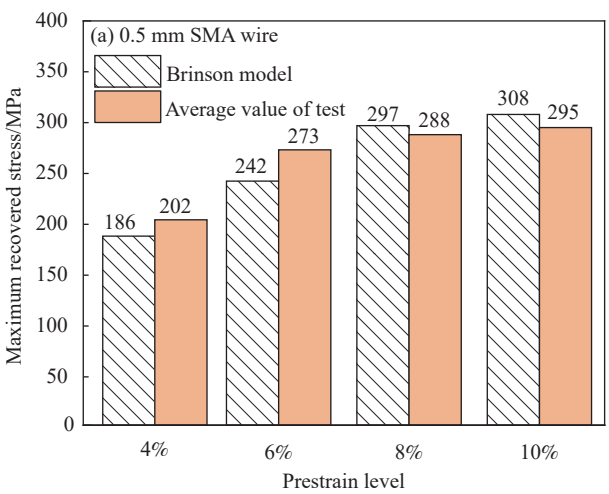
根据上述分析,对 SMA 丝受限回复过程性能进行计算,并与试验结果进行了对比,如图 9 所示。根据试验数据和表 1 所列的试验参数,可得计算过程中所需的 SMA 材料参数取值。

0.5 mm 和 1.0 mm 的 SMA 丝在不同预应变水平情况下的最大回复应力的试验平均值和 Brinson 模型的模拟值进行了比较,如图 10 所示。可以看出,针对不同预应变水平情况下,升温阶段计算曲线均与试验曲线吻合较好,特别是计算所得最大受限回复应力与试验实测值较接近,表明基于 Brinson 模型提出的修正模型可较好地描述 SMA 的升温阶段受限回复性能。

2.3 FRP/SMA 复合材料的受限回复性能

2.3.1 试验方案

由前述试验结果可知,直径为 1.0 mm 的



SMA 丝的回复应力-温度曲线与预应变水平相关性较好。在制备复合材料试件时,1.0 mm 丝有一定的刚度,在操作上更有可行性。因此,在 FRP/SMA 复合材料回复性能试验中使用的是直径为 1.0 mm 的 SMA 丝。试验设计了 3 组试件,每组试件包含 2 个试样,试件激活段长度为 150 mm,丝直径为 1.0 mm,试验变量为初始拉伸应变水平,分别设置了 4%、6% 和 8%。

试验装置及试件细部分别如图 11(a) 和图 11(b) 所示。值得注意的是,由于涉及到试件内多根 SMA 丝同时进行通电加热,使用与丝间距相配套的螺母连接相互临近的丝,这样可将丝串联形成串联电路,如图 11(c) 和图 11(d) 所示。加热激活区 SMA 丝与复合段之间预留绝热段,加热激活段端部与复合段端部的距离为 $L=10\text{ mm}$,这可保证复合段不受 SMA 丝加热的影响。

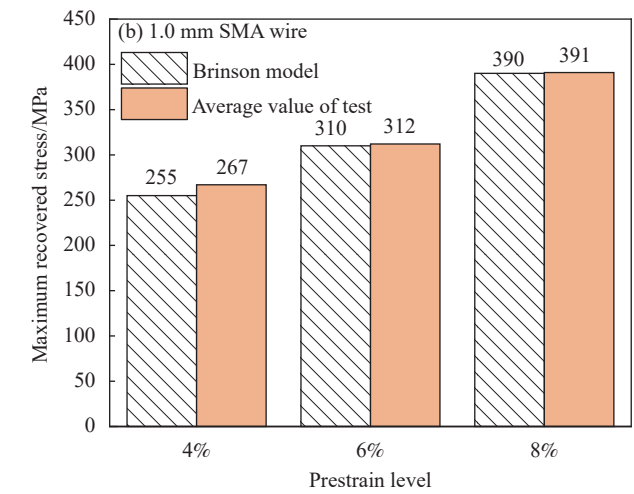


图 10 SMA 丝最大回复应力试验值和模拟值比较

Fig. 10 Comparison of the test value and simulation value of maximum recovery stress of SMA wire

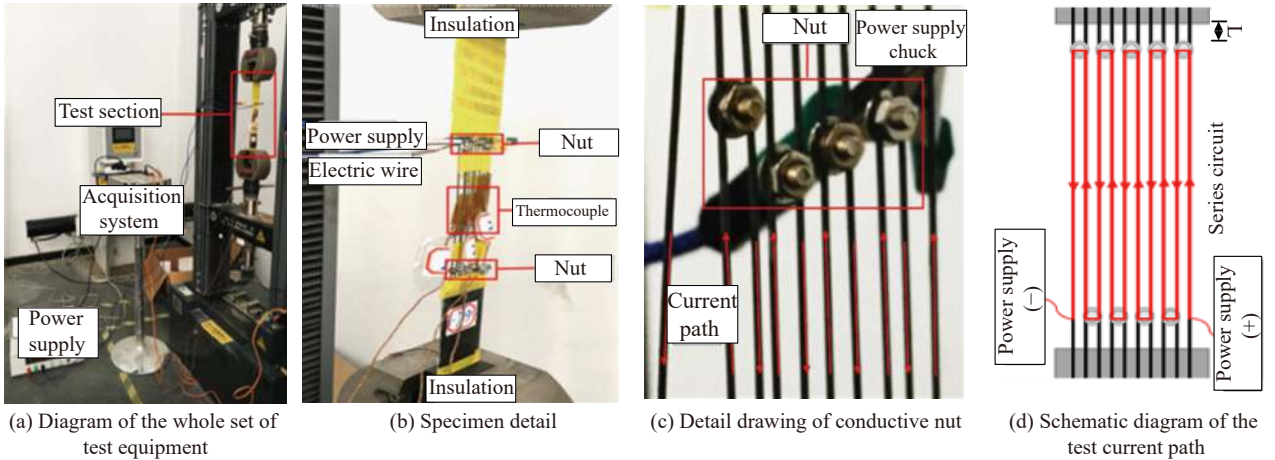


图 11 FRP/SMA 复合材料试件受限回复试验

Fig. 11 Restricted recovery test of FRP/SMA composite specimen

2.3.2 试验结果与分析

FRP/SMA 复合材料试件受限回复应力与温度的关系曲线如图 12 所示。可知，与 SMA 丝受限

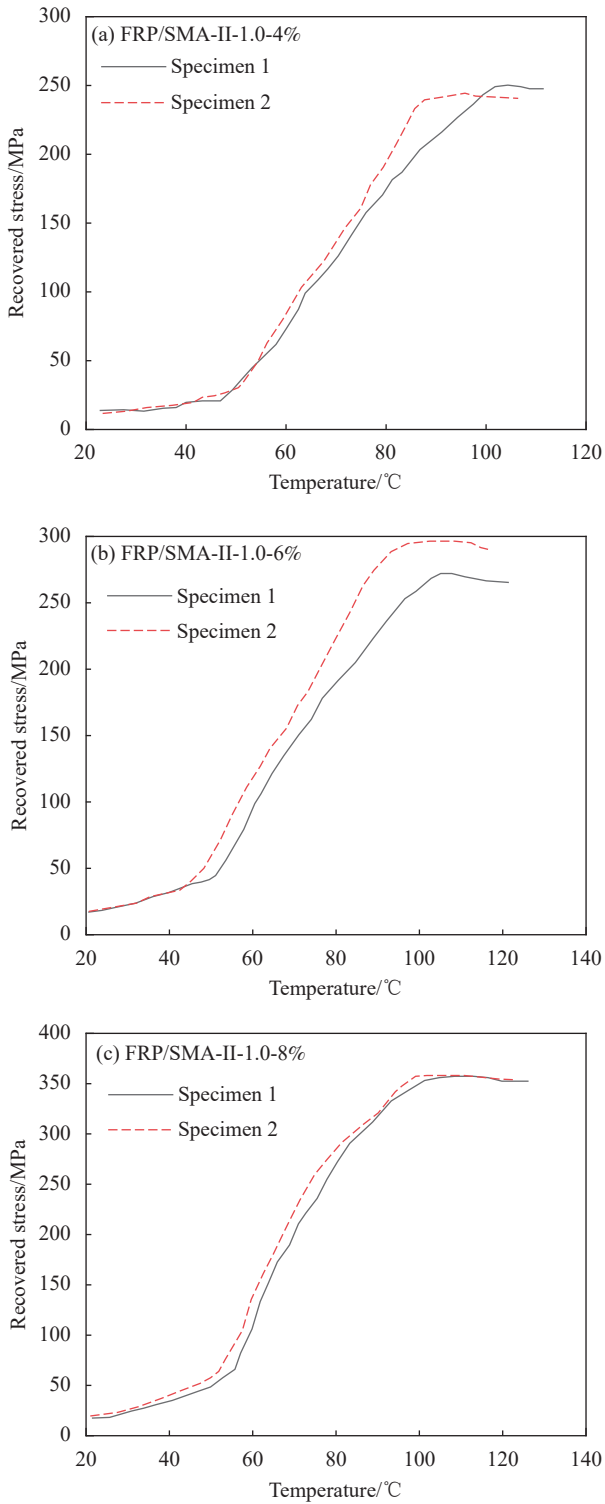


图 12 FRP/SMA 复合材料试件不同预应变水平情况下回复应力随温度的变化曲线

Fig. 12 Recovery stress curve of FRP/SMA composite specimens with different pre-strain levels as a function of temperature

回复试验类似，FRP/SMA 复合材料试件的回复表现出首先缓慢上升，当达到奥氏体相变开始温度后回复应力迅速增长，达到奥氏体相变结束温度后回复应力趋于稳定的趋势。复合试件的最大回复应力随预应变水平的增加而增加，但与 SMA 单丝试件相比，其最大回复应力略有降低。表 5 统计了所有试件的最大回复应力。可以看出，当 FRP/SMA 复合材料试件的预应变水平分别为 4%、6%、8% 时，最大回复应力的平均值分别为 247 MPa、284 MPa、358 MPa，即随着预拉伸应变水平的增大，最大回复应力也均随之增加。

表 5 FRP/SMA 回复性能试验试件设计与试验结果
Table 5 FRP/SMA recovery test specimen design and test results

Specimen	Length of activated section/mm	Diameter of SMA/mm	Prestrain/%	Average value of maximum recovery stress/MPa
FRP/SMA-II-1.0-4%	150	1.0	4	247
FRP/SMA-II-1.0-6%	150	1.0	6	284
FRP/SMA-II-1.0-8%	150	1.0	8	358

3 结论

(1) 常温下形状记忆合金丝在单调拉伸至断裂的过程中主要经历 4 个阶段，其最大应变可达 0.7 以上，极限强度 900 MPa 以上。随着应变的增加，形状记忆合金 (SMA) 丝约在应变幅值为 7% 后进入强化阶段。

(2) 纤维增强复合材料 (FRP)/SMA 复合材料试件的单轴拉伸基本力学试验研究结果表明，在一定 SMA 丝掺量范围内，提高掺入 SMA 丝的数量 (体积率) 可提高 FRP/SMA 复合材料试件的最大断裂应变和抗拉强度，且掺入的丝数量越多，断后残余强度越大。掺入丝的直径明显影响 FRP/SMA 复合材料试件的拉伸弹性模量。

(3) SMA 丝的回复应力随温度的变化呈明显的上升趋势，在一定预应变范围内，SMA 丝的最大回复应力随预应变水平的增加而增加。0.5 mm 的 SMA 丝的预应变水平为 8% 时，产生的最大回复应力为 297 MPa；1.0 mm 的 SMA 丝的预应变水平为 8% 时，产生的最大回复应力为 392 MPa。

(4) 验证了 FRP/SMA 复合材料通电回复试验的可行性，FRP/SMA 复合材料试件的回复表现出

首先缓慢上升,当达到奥氏体相变开始温度后回复应力迅速增长,达到奥氏体相变结束温度后回复应力趋于稳定的趋势。复合试件的最大回复应力与 SMA 单丝试件表现出类似的现象,但与 SMA 单丝试件相比,其最大回复应力略有降低。

参考文献:

- [1] 吴智深,汪昕,吴刚,等. FRP增强工程结构体系[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 10-18.
WU Zhishen, WANG Xin, WU Gang, et al. FRP reinforced engineering structural systems[M]. Beijing: Science Press, 2017: 10-18(in Chinese).
- [2] ZHENG Y Z, WANG W W, MOSALAM K M, et al. Experimental investigation and numerical analysis of RC beams shear strengthened with FRP/ECC composite layer[J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112436.
- [3] ZHOU Y W, GAO H, HU Z H, et al. Ductile, durable, and reliable alternative to FRP bars for reinforcing seawater sea-sand recycled concrete beams: Steel/FRP composite bars[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121264.
- [4] BASARAN B, KALKAN I. Investigation on variables affecting bond strength between FRP reinforcing bar and concrete by modified hinged beam tests[J]. *Composite Structures*, 2020, 242: 112185.
- [5] KUERES S, WILL N, HEGGER J. Shear strength of prestressed FRP reinforced concrete beams with shear reinforcement[J]. *Engineering Structures*, 2020, 206: 110088.
- [6] HUANG H, WANG W W, DAI J G, et al. Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded prestressed CFRP sheets[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(3): 04016108.
- [7] RIUS J M, CLADERA A, RIBAS C, et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams using shape memory alloys[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 200: 420-435.
- [8] ZHENG B T, EL-TAHAN M, DAWOOD M. Shape memory alloy-carbon fiber reinforced polymer system for strengthening fatigue-sensitive metallic structures[J]. *Engineering Structures*, 2018, 171: 190-201.
- [9] EL-TAHAN M, DAWOOD M. Fatigue behavior of a thermally-activated NiTiNb SMA-FRP patch[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 25(1): 015030.
- [10] CONCILIO A, ANTONUCCI V, AURICCHIO F, et al. Shape memory alloy engineering: For aerospace, structural and biomedical applications[M]. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2015: 369-403.
- [11] XUE Y J, WANG W W, TAN X, et al. Mechanical behavior and recoverable properties of CFRP shape memory alloy composite under different prestrains[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 333: 127186.
- [12] SHAHVERDI M, CZADERSKI C, MOTAVALLI M. Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112(1): 28-38.
- [13] TRAN H, BALANDRAUD X, DESTREBECQ J F. Recovery stresses in SMA wires for civil engineering applications: Experimental analysis and thermomechanical modelling[J]. *Materials Science & Engineering Technology*, 2011, 42(5): 435-443.
- [14] ISSA A, ALAM M S. Comparative seismic fragility assessment of buckling restrained and self-centering (friction spring and SMA) braced frames[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(5): 055029.
- [15] CHEN Q W, ANDRAWES B. Cyclic stress-strain behavior of concrete confined with NiTiNb-shape memory alloy spirals[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(5): 04017008.
- [16] SCHRANZ B, MICHELS J, CZADERSKI C, et al. Strengthening and prestressing of bridge decks with ribbed iron-based shape memory alloy bars[J]. *Engineering Structures*, 2021, 241: 112467.
- [17] XUE Y J, WANG W W, WU Z H, et al. Experimental study on flexural behavior of RC beams strengthened with FRP/SMA composites[J]. *Engineering Structures*, 2023, 289: 116288.
- [18] ZAFAR A, ANDRAWES B. Seismic behavior of SMA-FRP reinforced concrete frames under sequential seismic hazard[J]. *Engineering Structures*, 2015, 98: 163-173.
- [19] ZHENG B T, DAWOOD M. Fatigue crack growth analysis of steel elements reinforced with shape memory alloy (SMA)/fiber reinforced polymer (FRP) composite patches[J]. *Composite Structures*, 2017, 164: 158-169.
- [20] ZHENG B, DAWOOD M. Fatigue strengthening of metallic structures with a thermally activated shape memory alloy fiber-reinforced polymer patch[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(4): 04016113.
- [21] EL-TAHAN M, DAWOOD M, SONG G. Development of a self-stressing NiTiNb shape memory alloy (SMA)/fiber reinforced polymer (FRP) patch[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(6): 065035.
- [22] QIU Z X, YAO X T, YUAN J A, et al. Experimental research on strain monitoring in composite plates using embedded SMA wires[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(4): 1047-1053.
- [23] WANG Y Q, ZHANG T, GUO S G, et al. Improvement and

- experimental research on the recovery stress-temperature model of NiTi shape memory alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(1): 117-121.
- [24] DAWOOD M, EL-TAHAN M W, ZHENG B. Bond behavior of superelastic shape memory alloys to carbon fiber reinforced polymer composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 77: 238-247.
- [25] HOLLAWAY L C. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(12): 2419-2445.
- [26] EL-HACHA R, ALY M Y E. Anchorage system to prestress FRP laminates for flexural strengthening of steel-concrete composite girders[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 17(3): 324-335.
- [27] ŞAKAR G, TANARSLAN H M. Prestressed CFRP fabrics for flexural strengthening of concrete beams with an easy prestressing technique[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2014, 50(4): 537-542.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范: GB/T 50608—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for construction engineering application of fiber reinforced composite materials: GB/T 50608—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2010(in Chinese).
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 树脂浇铸体拉伸性能试验方法: GB/T 2567—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Test method for tensile properties of resin castings: GB/T 2567—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008(in Chinese).
- [30] PATOOR E, LAGOUDAS D C, ENTCHEV P B, et al. Shape memory alloys, Part I: General properties and modeling of single crystals[J]. *Mechanics of Materials*, 2006, 38(5-6): 391-429.
- [31] BRINSON L C. One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1993, 4(2): 229-242.
- [32] BRINSON L C, HUANG M S. Simplifications and comparisons of shape memory alloy constitutive models[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1996, 7(1): 108-114.