

超低温对钢纤维增强橡胶混凝土抗弯性能的影响

苏宁玥 郭帅成 朱德举

Effect of ultra-low temperature on flexural properties of steel fiber reinforced rubber concrete

SU Ningyue, GUO Shuaicheng, ZHU Deju

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240627.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超低温作用对超高韧性水泥基复合材料抗弯性能的影响

Effect of ultra-low temperature on flexural behavior of ultra-high toughness cementitious composites

复合材料学报. 2022, 39(6): 2844–2854 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210823.001>

超低温和氯盐作用对超高韧性水泥基复合材料碳化性能的影响

Effect of ultra-low temperature and chloride on carbonation performance of ultra-high toughness cement-based composite

复合材料学报. 2023, 40(6): 3486–3498 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220907.004>

PVA-钢纤维对高强再生骨料混凝土梁抗弯性能的影响

Effect of PVA-steel fiber on the flexural performance of high-strength recycled aggregate concrete beams

复合材料学报. 2022, 39(11): 5499–5511 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211110.003>

超低温对超高韧性水泥基复合材料抗压韧性影响试验

Experimental study on the influence of ultra-low temperature on compressive toughness of ultra high toughness cementitious composites

复合材料学报. 2021, 38(12): 4325–4336 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210223.002>

混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料抗弯冲击性能

Flexural impact behavior of hybrid fiber-reinforced strain hardening cementitious composites

复合材料学报. 2022, 39(11): 5086–5097 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220623.005>

超高性能纤维增强混凝土单轴本构关系和钢纤维增强作用对其影响

Uniaxial constitutive relation of ultra-high performance fiber reinforced concrete and the effect of steel fiber reinforcement on it

复合材料学报. 2024, 41(2): 911–924 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230613.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

超低温对钢纤维增强橡胶混凝土抗弯性能的影响



分享本文

苏宁玥, 郭帅成, 朱德举*

(湖南大学 土木工程学院, 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 采用钢纤维和再生橡胶颗粒制备混凝土可以实现固废资源化利用并保证其良好的力学性能。本文针对超低温 (低至 -196°C) 极端工况下钢纤维增强橡胶混凝土 (SFRR) 抗弯性能演变开展研究, 设计了 7 组不同配比的钢纤维增强橡胶混凝土梁式试件, 经过低温深冷处理后进行四点弯曲试验, 分析了超低温作用对钢纤维橡胶混凝土弯曲性能的影响, 结果表明: 常温下随着钢纤维和橡胶体积掺量的增加, SFRR 抗弯强度均会明显提升。随着温度的降低, 钢纤维增强橡胶混凝土的弯拉强度有明显提升, 当温度降低至 -196°C 时, 其抗弯强度最大可提升 151.6%; 同时 SFRR 在超低温环境下韧性会随着温度的降低而下降。研究成果为钢纤维橡胶混凝土的性能优化设计和在超低温工程中的应用提供支持。

关键词: 超低温; 钢纤维; 橡胶混凝土; 抗弯性能; 韧性

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)04-2010-13

Effect of ultra-low temperature on flexural properties of steel fiber reinforced rubber concrete

SU Ningyue, GUO Shuaicheng, ZHU Deju*

(Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The use of steel fibers and recycled rubber aggregate to prepare concrete can achieve the utilization of solid waste resources and ensure its good mechanical properties. In this paper, the flexural performance evolution of steel fiber reinforced rubber concrete (SFRR) under the extreme conditions of ultra-low temperature (up to -196°C) was investigated, and seven groups of beam specimens with different ratios of steel fiber reinforced rubber concrete were designed to carry out four-point bending tests after low-temperature deep-cooling treatment to analyze the effect of ultra-low temperature on the flexural properties of SFRR. It is demonstrated that with the increase of steel fiber and rubber volume admixture, the flexural strength of SFRR is significantly increased at room temperature. As the temperature decreases, the bending and tensile strength of SFRR is significantly improved, and when the temperature decreases to -196°C , its bending strength can be improved by 151.6%. Meanwhile the SFRR toughness decreases in the ultra-low temperature environments. The research results provide support for the optimal design of SFRR and its application in ultra-low temperature engineering.

收稿日期: 2024-04-28; 修回日期: 2024-06-02; 录用日期: 2024-06-16; 网络首发时间: 2024-06-29 11:31:45

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240627.001>

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604400); 国家自然科学基金 (52208246; U22A20122); 湖南省自然科学基金 (2023JJ40142); 长沙市自然科学基金 (kq2202160); 中央高校基本科研业务费 (531118010493); 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设省级专项项目 (2023sfq50)) National Key R&D Program Projects of China (2023YFB2604400); National Natural Science Foundation of China (52208246; U22A20122); Natural Science Foundation of Hunan Province (2023JJ40142); Natural Science Foundation of Changsha (kq2202160); Fundamental Research Funds for the Central Universities (531118010493); Provincial Special Project for the Construction of National Sustainable Development Agenda Innovation Demonstration Zone in Chenzhou City (2023sfq50)

通信作者: 朱德举, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为生物材料多尺度力学行为及仿生、高性能纤维/织物增强水泥基和树脂基复合材料、防弹高性能纤维布的力学特性和有限元分析、冲击和高应变率试验技术 E-mail: dzhu@hnu.edu.cn

引用格式: 苏宁玥, 郭帅成, 朱德举. 超低温对钢纤维增强橡胶混凝土抗弯性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 2010-2022.

SU Ningyue, GUO Shuaicheng, ZHU Deju. Effect of ultra-low temperature on flexural properties of steel fiber reinforced rubber concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(4): 2010-2022(in Chinese).

Keywords: ultra-low temperature; steel fiber; rubber concrete; bending performance; toughness

随着工业化进程的加速推进，汽车工业得到了快速的发展，但同时造成了严峻的环境问题和能源浪费问题。目前我国已成为最大的废弃橡胶产生国，而目前废弃橡胶的主要来源于废弃轮胎、废旧胶带、胶管、垫板以及密封件等^[1]。相关统计数据结果表明：我国每年消耗橡胶近 200 万吨，但其回收利用率却不足 30%。传统的处理方式，如集中焚烧、随意堆放或弃于垃圾填埋场，不仅未能实现资源的有效再利用，反而给环境带来了严重的污染^[2]。面对这一严峻问题，废旧橡胶的综合处理和循环再利用已成为国内外学者关注的焦点。将废弃橡胶加工成颗粒状，并按一定的比例与水泥基材料相结合，研发出新型橡胶混凝土材料，不仅能够对水泥基材料进行改性，提升混凝土的工作性能，同时解决了废弃橡胶的回收再利用问题^[3]。相关研究表明，将橡胶掺入混凝土材料能够显著增强其韧性、抗冲击性能、抗渗性及抗冻性^[4-7]。为改善普通混凝土材料拉压比低、韧性差、易开裂以及开裂后裂缝宽度难以控制等缺点，国内外学者在混凝土中掺入钢纤维，研究结果表明，纤维的掺入能够显著提高材料的强度和韧性，其优异的性能使得纤维混凝土在工程中得到广泛的应用。朱江等^[8-9]通过对不同掺量的钢纤维橡胶高强混凝土进行力学性能试验，结果表明：随着钢纤维体积掺量的增大，钢纤维增强橡胶混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度均有一定程度的提升，钢纤维和橡胶的掺入有效地提升了材料的强度和韧性，高丹盈等^[10]研究了纤维类型和掺量对于混凝土剪切性能的影响，结果表明纤维的掺入可以有效改善混凝土的抗剪强度和变形性能。梁兴文等^[11]的研究结果表明超高性能混凝土抗弯力学性能主要受长纤维的影响，短纤维对其影响较小，并给出了长、短纤维的最优混合掺量。

随着石油、煤炭等能源的枯竭以及可持续战略的加速推进，增加了社会对于清洁能源的迫切需求，如中国与俄罗斯合作开发的极地 LNG-2 天然气项目、大型 LNG (Liquefied natural gas, LNG) 储罐和可燃冰等低温工程。温度低于-50℃ 的环境通常被称为超低温环境，液化天然气的储存环境往往低于-163℃，因此天然气行业的快速发展促进了混凝土结构在极端低温环境下的研究，混

凝土材料在超低温环境下的应用也愈加广泛^[12]。Xue 等^[13]研究指出添加橡胶使混凝土试件在低温(-30℃)下的延性显著提高。Yu 等^[14]对-20℃ 下橡胶混凝土的静态力学性能和抗冲击性能的研究结果表明：-20℃ 下的橡胶混凝土比普通混凝土有着更好的韧性抗冲击性能。在 Bu 等^[15]的研究中发现橡胶的加入可以提高混凝土的耐水性和抗渗性，并且具有更高的保温性能。同时，钢纤维能够改善橡胶混凝土的抗拉、抗弯、抗冲击及抗疲劳性能。因此钢纤维橡胶混凝土在极地低温工程中具有独特的应用优势。但目前研究成果主要集中于常温和低温环境下的钢纤维增强橡胶混凝土的性能研究，而对于超低温极端环境下的性能研究却少有文献报道。Dahmani 等^[16]对超低温作用下混凝土的性能开展了相关研究，发现混凝土低温作用下的性能主要是由其孔隙率决定，由于低温作用材料孔隙中形成了冰，混凝土的强度随着温度的降低而逐渐增加，但混凝土返回室温后其性能却明显变差，研究人员发现超高性能混凝土(UHPC)在超低温环境下的强度较常温状态下有显著的提升^[17-19]。Xie 等^[20]研究表明，当温度降低至-120℃ 时混凝土的抗压强度达到最大值，当温度继续下降后，混凝土材料的抗压强度增长速度逐渐缓慢。

鉴于目前对于超低温环境下的钢纤维橡胶混凝土 (Steel fiber reinforced rubber concrete, SFRRC) 的性能研究较少，本文在国内外现有研究成果的基础上，通过四点弯曲性能试验研究超低温作用后钢纤维体积掺量和橡胶掺量对 SFRRC 弯曲性能的影响，为极端环境下 SFRRC 材料的性能优化设计和推广应用提供数据支撑和理论参考。

1 实验材料及方法

试验采用 P-O 42.5 普通硅酸盐水泥、武汉电厂 I 级粉煤灰、精细河砂、橡胶颗粒和镀铜微丝钢纤维，镀铜微丝钢纤维性能指标见表 1，橡胶颗粒性能指标见表 2。试验配合比见表 3。试件编号中 NC 表示为普通混凝土；20%RC 表示橡胶颗粒体积掺量为 20vol% 的橡胶混凝土；0.5%SF-20%RC 表示掺入体积分数为 0.5vol% 钢纤维和 20vol% 橡胶颗粒的 SFRRC，以此类推。

将胶凝材料、河砂以及橡胶颗粒置于搅拌机中干拌，使其充分混合后，加入水和高效减水剂，

表 1 镀铜微丝钢纤维 (SF) 性能指标

Table 1 Performance index of copper plated microfilament steel fiber (SF)

Type	Density/(g·cm ⁻³)	Diameter/mm	Length/mm	Elastic modulus/GPa	Tensile strength/MPa
Copper-plated micro steel fiber	7.8	0.25	13	200	≥2 850

表 2 橡胶颗粒性能指标

Table 2 Performance index of rubber particles

Type	Mesh	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Bulk density/(kg·m ⁻³)	Average particle size/μm
Rubber particles	80	1 180	299	175

表 3 钢纤维橡胶混凝土 (RC) 配合比及试件分组

Table 3 Mix proportion of steel fiber rubber concrete (RC) and the grouping of test pieces

Specimen	Volume fraction of steel fiber/vol%	Volume fraction of rubber particle/vol%	Steel fiber/(kg·m ⁻³)	Rubber particle/(kg·m ⁻³)	Fly ash/(kg·m ⁻³)	Cement/(kg·m ⁻³)	Sand/(kg·m ⁻³)	Water/(kg·m ⁻³)
NC	0	0	0	0				
20%RC	0	20	0	0.24				
0.5%SF-20%RC	0.5	20	0.16	0.24				
1%SF-10%RC	1.0	10	0.31	0.12	533.33	120	133.3	248
1%SF-20%RC	1.0	20	0.31	0.24				
1%SF-30%RC	1.0	30	0.31	0.36				
1.5%SF-20%RC	1.5	20	0.47	0.24				

Note: NC—Normal concrete.

为防止纤维成团，待拌合物呈现团状状态后均匀投入钢纤维，搅拌后得到最终拌合物。将拌合物倒入模具中，放置常温环境下 1 d 后脱模，得到成型试件后放入标准养护室养护 28 d，取出后置于自然环境下晾干。每组试件包括 3 个尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的梁式试件，将每组试件贴上热电偶以监测试件的实时温度，放入无锡腾川仪器设备有限公司生产的 CDWX-3000 超低温深冷试验箱中，采用通入液氮的方式对试件进行降温，降温速率为 2℃/min。试验温度梯度设置为 20、0、-50、-100、-150 和 -196℃。试验观测到热电偶恒温 80 min 后示数达到基本稳定，为了保证温度控制的准确性，确保试件整体达到目标温度值，当试件达到目标温度后恒温 100 min^[21]，降温完成后将试件放入保温箱中等待进行下一步试验。降温过程如图 1 所示。本文根据《纤维混凝土试验方法标准》设计四点弯曲试验^[22]，加载试验机采用美特斯工业系统 (中国) 有限公司生产的 MTS 微机控制抗折试验机，试验机支座布置在梁试件标距的三分点处，跨中挠度采用红点激光位移计进行测量，降温设备和试验装置见图 2。

2 试验结果分析

2.1 SFRRRC 的破坏形态与荷载-挠度曲线

图 3 为 SFRRRC 试件裂缝开展与破坏照片。从图 3(a) 可以看出，经过超低温作用后，SFRRRC 试

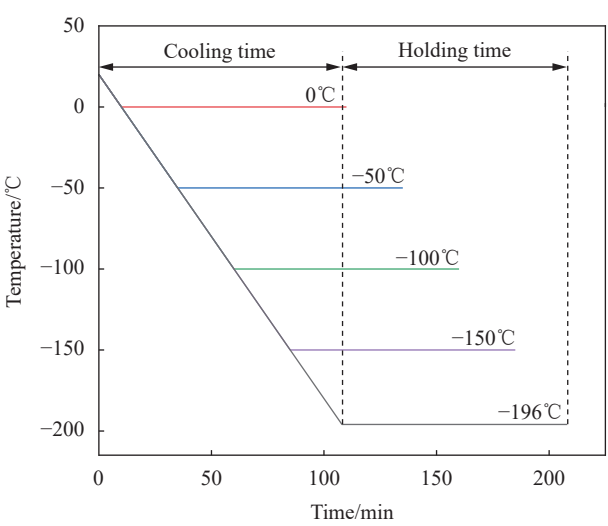


图 1 降温过程示意图

Fig. 1 Diagram of the cooling process

件表面已出现细微裂缝，且随着降温幅度的增加，细微裂缝的数量更加密集，但 SFRRRC 试件仍然具有较好的完整性，无明显外鼓以及剥落现象。超低温下 SFRRRC 试件在受弯破坏时，主要表现为主裂缝扩展，出现呈撕裂状的延性破坏断口，同时试件表面附着一层“白霜”，如图 3(b)、图 3(c) 所示。

本次试验测得各组试件在四点弯曲作用下的荷载-挠度曲线如图 4 所示。从图 4(a)、图 4(b) 可以看出，随着荷载的增加，普通混凝土和单掺橡

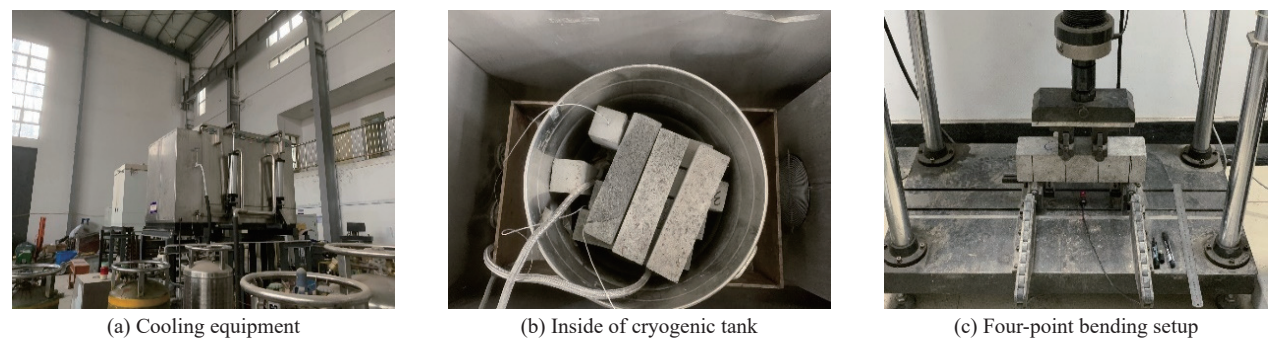


图2 低温深冷箱与试验加载装置

Fig. 2 Cryogenic tank and test loading device

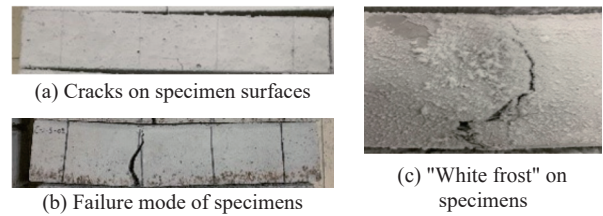


图3 钢纤维增强橡胶混凝土 (SFRRCC) 试件裂缝开展与破坏
Fig. 3 Crack development and failure of steel fiber reinforced rubber concrete (SFRRCC) specimens

胶颗粒试验组在弯曲过程中迅速出现明显裂缝，表现出“一裂就断”的脆性特性；而掺入钢纤维的试验组在整个受弯破坏过程中表现出良好的韧性，破坏形态较为完整。掺入纤维后，SFRRCC试件开裂前，此时荷载较小，荷载挠度曲线呈线性上升阶段；随着荷载增大，试件底部开始出现细微裂缝，低温作用后的部分试件荷载-挠度曲线出现陡降趋势，此时试件处于弹塑性阶段。继续增加荷载，裂缝将沿一条主裂缝继续扩展，在裂缝扩展的尖端位置出现明显的应力集中现象，截面上的应力发生重分布，钢纤维通过桥联作用将应力传递给基体，显著起到了增韧和阻裂的效果。当荷载达到峰值荷载的90%以上时，裂缝宽度逐渐增加，试件挠度迅速增大，并伴随着钢纤维的拔断和拔出，最终导致试件破坏。

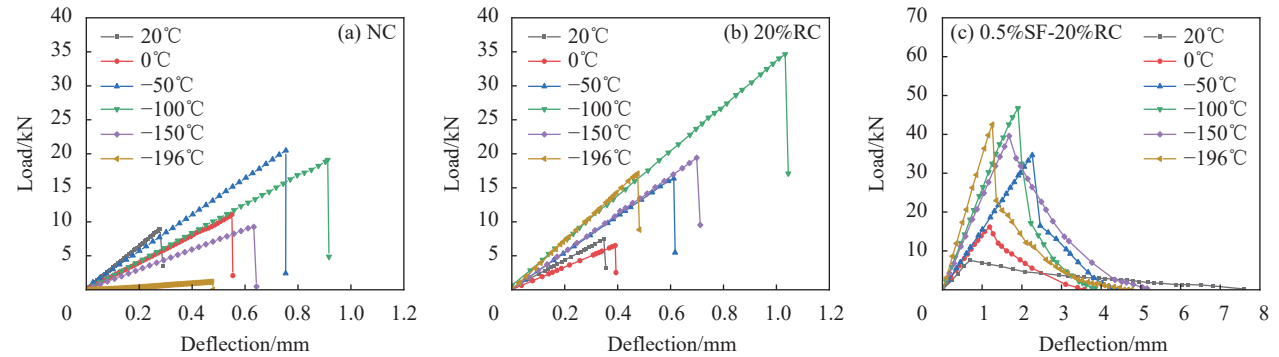
2.2 试验结果分析

为评价超低温作用后SFRRCC的抗弯性能，本文从强度和韧性两个方面对其进行分析，表4给出了各试验组在不同温度下的弯拉强度。

3 影响因素分析

3.1 超低温作用对SFRRCC强度的影响

各试验组初裂荷载、峰值荷载与温度关系如图5所示。未掺入钢纤维的试验组(NC、20%RC)在加载过程中表现出明显的脆性，试件开裂后迅速丧失承载力，因此NC和20%RC的峰值强度记为其初裂强度。试验结果表明，各试验组的初裂荷载和峰值荷载均表现出同一趋势，在降温初期，普通混凝土和SFRRCC从常温状态降低至0℃时，弯拉强度略有下降，部分试件略有波动；继续降低温度至-50℃时，各试验组的弯拉强度均有明显的增大，当温度降低至-100℃时，弯拉强度达到最大，相对于常温状态下，峰值荷载最大可提升约514%；进一步降低温度，弯拉强度略有下降，当温度继续降低至-196℃时，峰值荷载提升幅度略有降低，最大为460%，抗弯强度最大可提升151.6%。混凝土强度随着温度变化可分为3个阶段：损伤阶段、快速增长阶段和平稳波动阶段，相应的温度区间分别为：-20~20℃、-100~-20℃



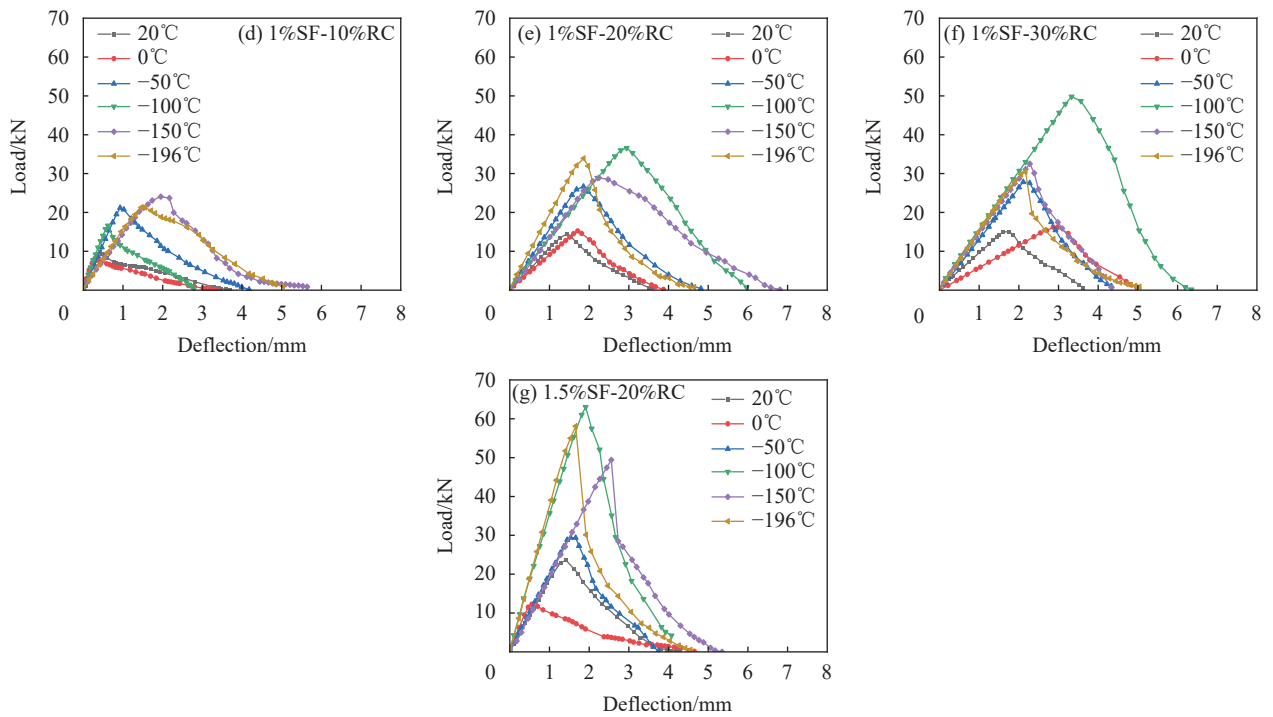


图 4 SFRRRC 试验组荷载-挠度曲线
Fig. 4 Load-deflection curves of SFRRRC test group

表 4 SFRRRC 平均弯拉强度试验值 (MPa)
Table 4 Average flexural strength test value of SFRRRC specimens (MPa)

Specimen	20℃	0℃	-50℃	-100℃	-150℃	-196℃
NC	2.70	3.31	6.14	5.73	2.77	0.35
20%RC	2.24	1.95	4.91	10.39	5.82	5.13
0.5%SF-20%RC	2.28	4.84	10.39	14.02	11.87	12.76
1%SF-10%RC	2.96	2.46	6.35	4.98	7.22	6.38
1%SF-20%RC	4.36	4.57	8.00	10.98	8.67	10.18
1%SF-30%RC	4.51	4.87	8.35	14.95	9.76	9.13
1.5%SF-20%RC	7.06	3.68	8.81	18.91	14.82	17.43

和-196~-100℃^[23]。
Rostásy 等^[24] 根据不同大小的孔隙溶液的冰点和混凝土的热膨胀系数的变化，总结了-170~20℃ 温度范围内混凝土的热应变行为：(1) 0~20℃ 时，孔隙溶液未冻结，材料变形主要由热胀冷缩引起；(2) -20~0℃ 时，大孔隙溶液开始冻结，冰体积膨胀挤压溶液至小孔，引起损伤和裂缝；(3) -60~-20℃ 时，大孔隙被冰填充，中等孔隙溶液冻结，吸附水层使更多溶液进入中等孔，导致微裂缝；(4) -90~-60℃ 时，中等孔中的冰体停止生长，胶凝孔中的孔隙溶液开始结冰；(5) -170~-90℃ 时，部分溶液迁移到胶凝孔隙中，大量的孔隙被冰填充。
超低温环境对 SFRRRC 内部作用机制如图 6 所示。在降温初期，由于大孔隙中的水结冰膨胀产

生的拉应力以及橡胶颗粒收缩导致孔壁损伤和基体细微裂缝扩展，造成混凝土内出现一定的损伤，但由于钢纤维的桥联作用，一定程度上缓解了材料内部的微裂缝出现。进一步降低环境温度，存在于 SFRRRC 中较小孔隙中的孔隙水随温度降低开始逐渐结冰，这在一定程度上增大了 SFRRRC 的有效受力面积，0℃ 后弯拉强度开始由降转为升。这是由于经超低温作用后，试件孔隙中的水过渡成冰的状态，填补了试件中的细微孔隙以及缺陷，使得试件内部更加密实，其强度随着温度的降低明显提升。随着温度的进一步降低，一方面更小孔隙中的孔隙水也开始冻结，另一方面由于冰体、骨料与基体间的弹性模量差异，其收缩程度不同，随着温度的降低，冰体、骨料产生收缩，导致其传递应力作用减弱，这两个因素相互耦合影响，

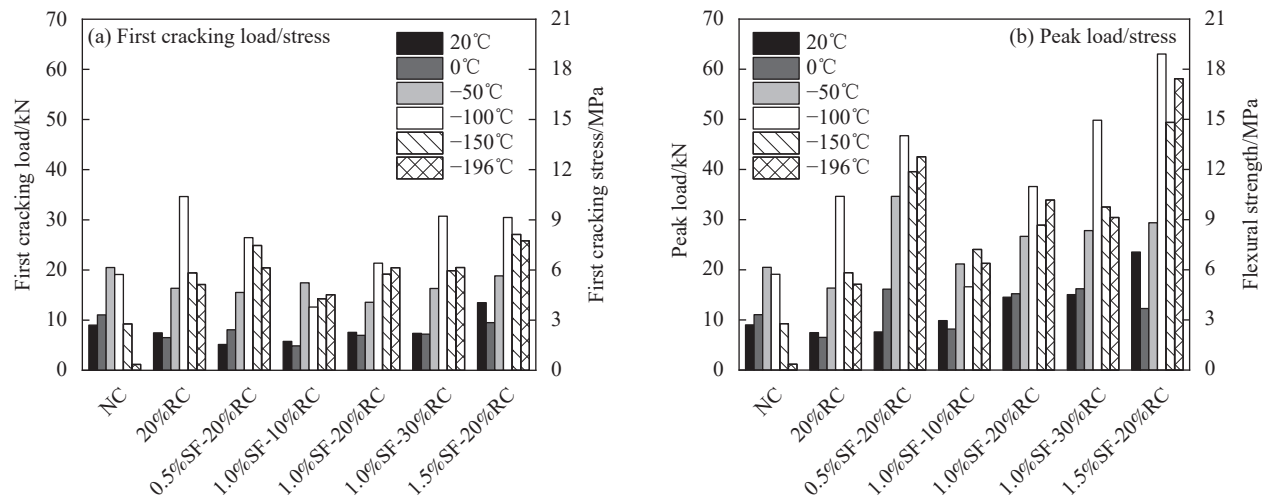


图 5 不同温度下 SFRRc 的强度

Fig. 5 Strength of SFRRc under different temperatures

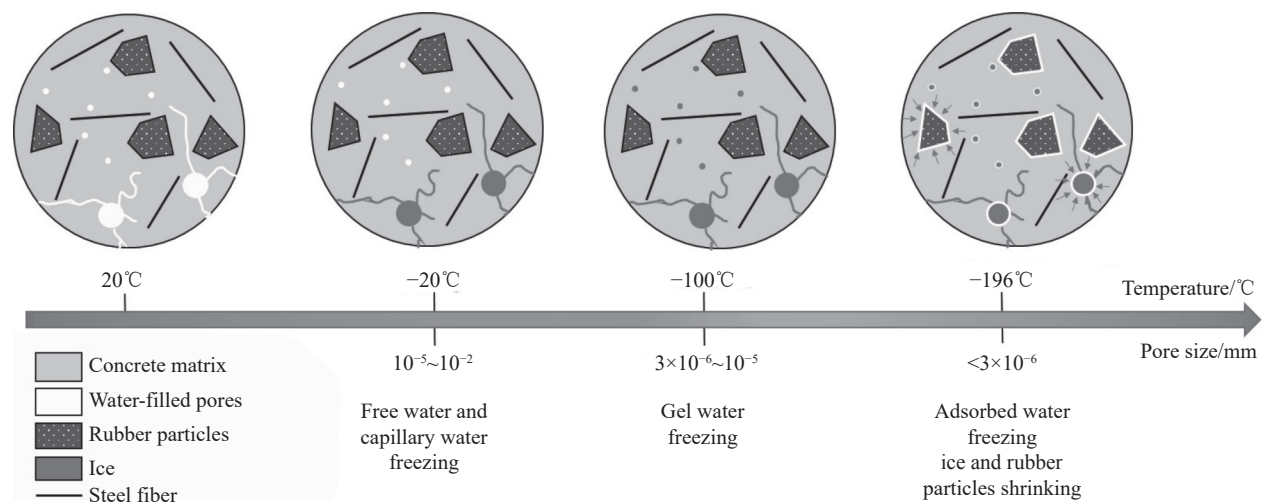


图 6 超低温环境对 SFRRc 作用机制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the mechanism of ultra-low temperature effects on SFRRc

导致-100℃后继续降低温度使得 SFRRc 的强度有所降低^[25-26]。

图 7(a) 为钢纤维体积掺量 1.0vol% 时不同橡胶掺量的初裂荷载和峰值荷载，图 7(b) 为橡胶颗粒掺量 20vol% 时不同体积掺量钢纤维的初裂荷载和峰值荷载。可以看出，钢纤维体积掺量不变时，橡胶的掺入对材料强度有一定的提升，当橡胶掺量从 10vol% 增大至 30vol%，其峰值荷载增大 27%，弯曲强度增大 52%。当橡胶掺量达到 30vol% 时，其峰值荷载达到最大。但橡胶掺量的增加对 SFRRc 材料初裂强度未见明显提升。同时随着橡胶掺量的增大，在-196~-100℃ 区间范围内强度下降趋势更为显著，这是由于橡胶的热膨胀系数较大，在低温作用下其收缩更为显著，与

基体间产生了更为显著的不均匀热变形，导致弯拉强度显著降低。而钢纤维的掺入明显提升了材料抗弯强度，当掺量从 0.5vol% 增加至 1.5vol%，其初裂荷载提升并不明显，而峰值荷载提升了约 209%，弯曲强度增大 215%。且随着温度的降低，其提升幅度更加明显，这归因于孔隙水结冰对钢纤维与基体界面过渡区的改善作用和钢纤维的桥接作用的增强^[27]。

3.2 超低温作用对 SFRRc 变形能力的影响

各试验组初裂荷载、峰值荷载对应的挠度如图 8 所示。初裂变形主要与材料弹性模量大小相关，而峰值变形主要包括初始阶段弹性变形和塑性变形两个部分构成^[10]，在经历超低温作用后，一方面 SFRRc 的弹性模量发生了较大变化，导致

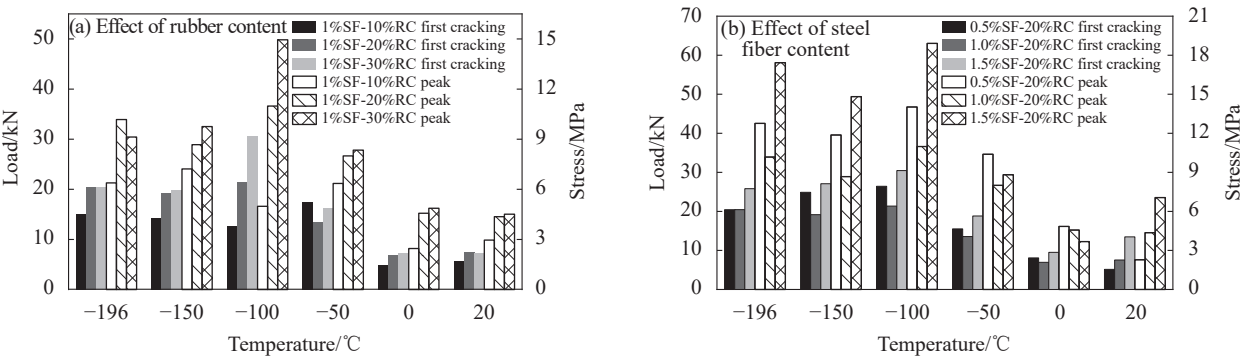


图7 橡胶和钢纤维掺量对 SFRRc 强度影响

Fig. 7 Effects of rubber and steel fiber contents on the strength of SFRRc

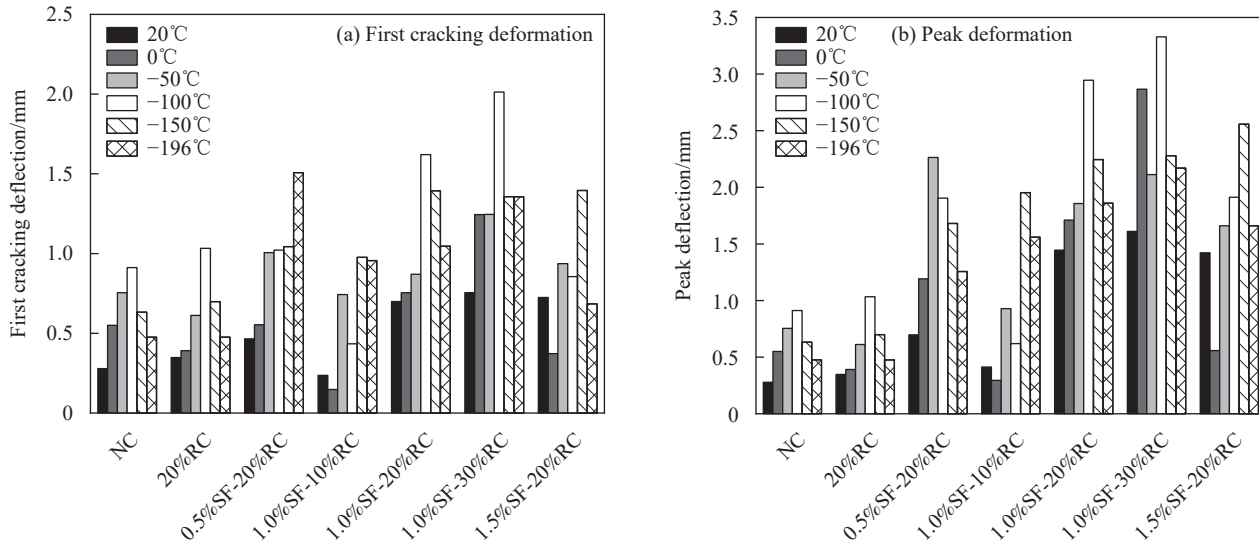


图8 不同温度下 SFRRc 的变形

Fig. 8 Deformations of SFRRc under different temperatures

其弹性变形随之发生变化，其变形记为 ε_1 ；另一方面，超低温作用下材料内部细观结构受损、微裂缝也不断扩展，导致其塑性变形也有相应变化，记为 ε_2 ，两种因素均对材料变形能力造成影响，应综合考虑分析两方面因素的影响。

试验结果表明，各试验组的初裂挠度、峰值挠度变形趋势均表现出先增大后降低的规律。在降温初期，由于冰体膨胀产生的挤压作用导致材料内部出现损伤，试件弹性模量降低，变形能力略有提升，但进一步降低温度后，由于冰体的填充效应，增加了材料的密实度，部分裂缝和孔洞被冰体填充，材料的弹性模量会有所增大^[28]，变形能力有一定的降低。

初裂变形主要与材料的弹性模量有关，其中 1%SF-20%RC 试验组的初裂变形明显大于其他试验组，但继续增加掺量发现材料的变形能力略微下降。这主要是由于橡胶作为一种超弹性不可压

缩材料，弹性模量要远小于其他类型的矿物材料，因此混凝土中的橡胶颗粒起到了弹性孔的作用，改善了材料内部的物理结构。现有的研究成果也表明混凝土梁的抗弯刚度和开裂荷载会随着混凝土中的橡胶含量的增加而降低，但其变形能力会体现相反的趋势^[5]，其主要原因是由于随着橡胶掺量的增加，过多的橡胶颗粒与基体间缺少“强”化学键因素，降低了颗粒-基体界面效应，颗粒间浆体包裹层均匀程度降低，在颗粒-基体界面引入大量微观缺陷，降低了 SFRRc 的初始弹性模量^[29]。

图 9(a) 为 1.0vol% 钢纤维掺量下不同橡胶掺量的初裂变形和峰值变形，图 9(b) 为 20vol% 橡胶掺量下不同体积掺量钢纤维的初裂变形和峰值变形。结果表明在钢纤维掺量不变时，随着橡胶颗粒掺量的增加，材料的变形能力明显提升，当达到 30vol% 掺量时，变形能力达到最大，但当温度降

低至-196℃ 时, 其变形能力要略低于 20vol% 橡胶掺量试验组; 而橡胶颗粒掺量不变时, 随着钢纤维的掺入, 材料的变形能力略有提升, 但超过

1.0vol% 体积掺量后, 材料的变形能力急剧下降, 当达到 1.5vol% 体积掺量时, 变形能力已低于 0.5vol% 掺量。

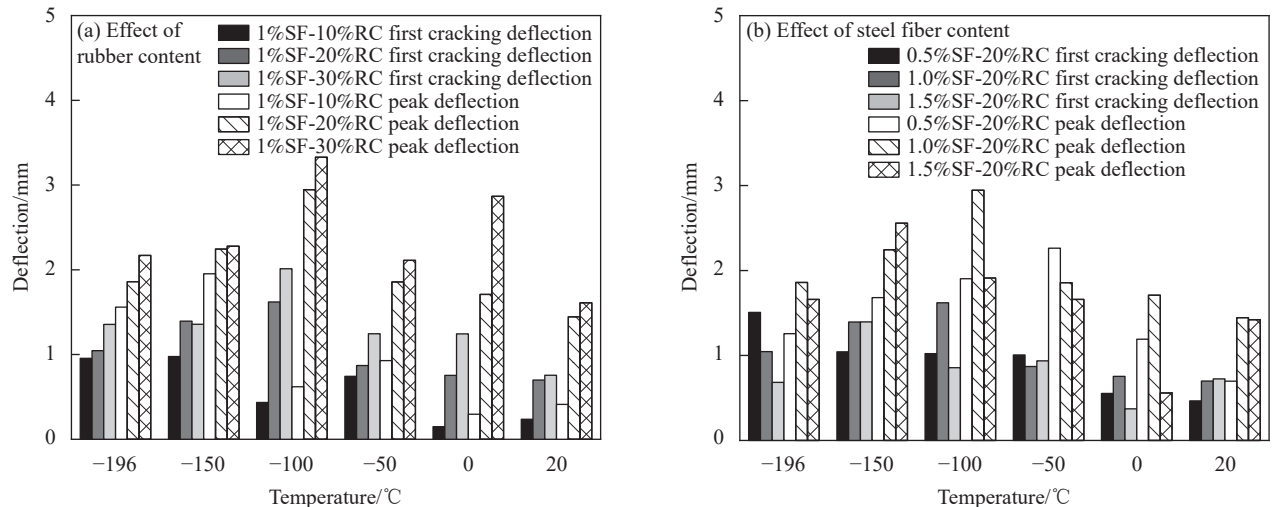


图9 橡胶和钢纤维掺量对 SFRRc 变形影响

Fig. 9 Effects of rubber and steel fiber contents on the deformation of SFRRc

这是由于橡胶的存在增加了材料的能量吸收能力, 当裂缝开始出现并扩展时, 橡胶颗粒能够有效地分散应力, 降低裂缝尖端的应力集中, 延缓裂纹发展。同时, 掺入的钢纤维通过桥接作用分担了部分荷载并且对裂缝的快速扩展起到了抑制作用^[30]。但过量的钢纤维降低了纤维在浆体中的比表面积, 造成了纤维结团现象, 降低材料的性能。

3.3 超低温作用后 SFRRc 的韧性评价

3.3.1 等效弯曲强度和弯曲韧性比

参考《纤维混凝土试验方法标准》^[22], 计算了不同温度作用后 SFRRc 的等效弯曲强度, 其计算表达式为

f_e = \frac{\Omega_k L}{bh^2 \delta} \tag{1}

式中: f_e 为等效弯曲强度 (MPa); \Omega_k 为跨中挠度为 L/150 的荷载-挠度曲线下的面积 (N·mm); L 为试验梁支座间的跨距 (mm); b 为试件截面宽度 (mm); h 为试件截面高度 (mm); \delta 为跨中挠度为 L/150 时的挠度值 (mm)。

为进一步评价极端温度作用后的 SFRRc 的韧性性能, 规范中进一步提出了弯曲韧性比 R_e, 其计算表达式为

R_e = \frac{f_e}{f_{cr}} \tag{2}

式中, f_{cr} 为 SFRRc 的四点弯曲初裂强度 (MPa)。

图 10 为不同影响因素下的等效弯曲强度和弯 韧比, 由于 NC 和 20%RC 组在试验过程中表现出 显著的脆性, 其韧性性能较差, 因此在本节中未 对此两组试件进行参数分析, 计算结果表明: 等 效弯曲强度和弯韧比的趋势表现出与弯拉强度相 同的规律, 随着温度的降低, 等效弯曲强度有所 降低, 但继续降低温度, 等效弯曲强度明显提升, 温度在 -100℃ 时, 各试验组的等效弯曲强度达到 峰值, 随着温度的进一步降低, 等效弯曲强度进 入波动阶段, 但总体呈现出下降趋势。但弯韧比 表现出不同的变化趋势, 在 20~-100℃ 温度区 间范围内为试件损伤阶段, SFRRc 的弯韧比表现 出降低的趋势, 但进一步降低温度后, SFRRc 弯 韧比有一定程度的提升, 其主要原因是由于更小 孔隙中的孔隙水结冰, 填充了 SFRRc 中的孔隙和 裂缝, 提升了材料的密实度。

3.3.2 弯曲韧性系数计算

韧性指标体现了材料在吸收能量和发生大变 形后残余强度的能力^[31]。《纤维混凝土试验方法 标准》(CECS 13—2009)^[22] 中提出通过计算初裂 挠度 \delta 的 3.0、5.5 和 10.5 倍挠度点与荷载-挠度 曲线围成的面积来确定弯曲韧性, 但由于极端温 度作用, 规范建议的弯曲韧性计算方法难以计算 超低温作用后的 SFRRc 的韧性, 因此本文采用文献

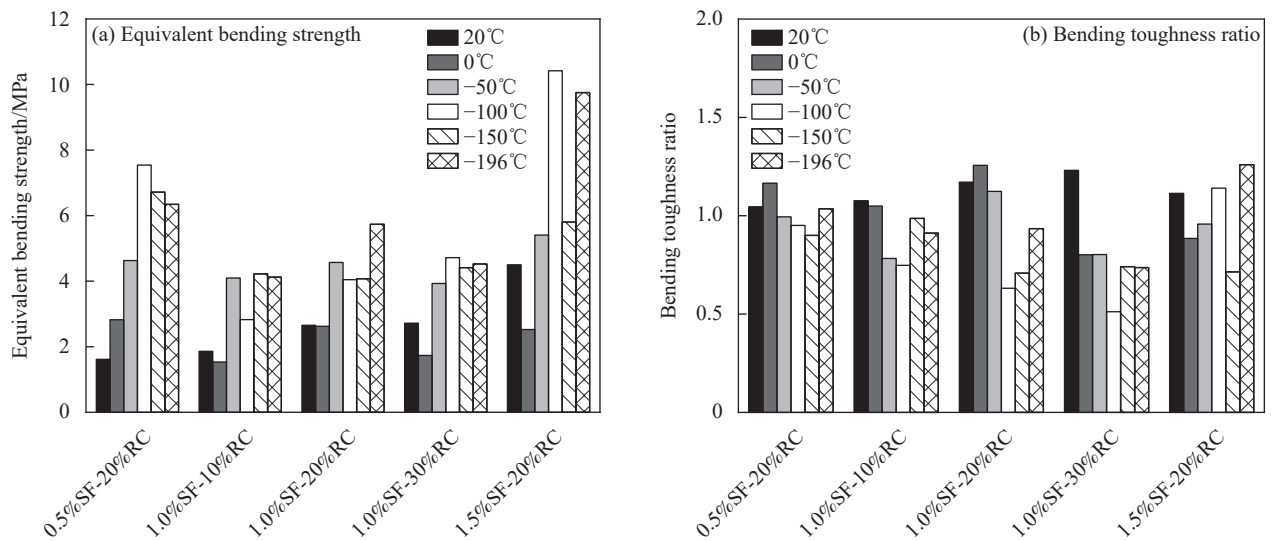


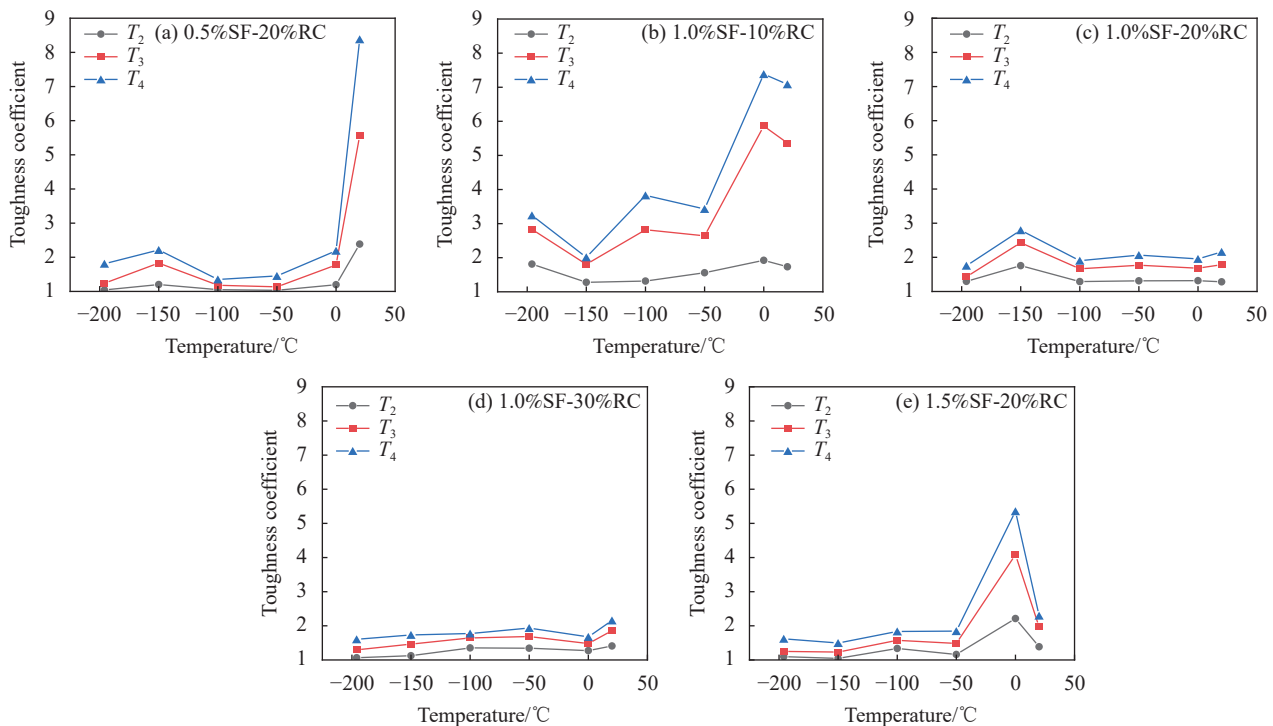
图 10 不同影响因素下 SFRRc 的等效弯曲强度和弯切比

Fig. 10 Equivalent bending strength and bending toughness ratio of SFRRc under different influencing factors

[21] 所采用的韧性评估方法来计算超低温作用后 SFRRc 的韧性系数。

图 11 为不同影响因素下的 SFRRc 的韧性系数，计算结果表明：除 1%SF-10%RC 和 1.5%SF-20%RC 试验组试验结果出现波动，SFRRc 韧性主要在降温初期下降，主要原因是材料内部毛细孔隙中的水冰点受孔隙大小和孔隙中盐溶液浓度的共同影

响。Skapski 等^[32]提出的孔隙水冰点方程认为当温度降低至-2℃时，直径为 50 nm 的毛细管孔隙中的水会结冰，而当温度降至-7℃时，直径为 10 nm 的毛细孔隙水才会冻结。较大孔隙中的水结冰引起的膨胀效应更加显著，对 SFRRc 的力学性能影响较大。随着温度的进一步降低，较小孔隙中的孔隙水逐渐冻结，但对 SFRRc 力学性能造



T_2 —Toughness coefficient at 0.85×(peak load); T_3 —Toughness coefficient at 0.5×(peak load); T_4 —Toughness coefficient at 0.2×(peak load)

图 11 SFRRc 韧性系数

Fig. 11 SFRRc toughness coefficient

成的影响较小，SFRRRC 的韧性系数进入波动阶段，总体趋势趋于平缓。而随着钢纤维和橡胶颗粒的掺入，材料韧性出现明显改善，常温状态下材料韧性系数最高提升 138.81%，但当纤维掺量达到 1.5vol% 时，材料的韧性系数较小，约 2.5 左右。这是由于纤维的掺入对材料性能具有正负效应，一方面，纤维的加入能够有效提升基体性能，起到增韧和阻裂的效果；另一方面，纤维的加入也会在纤维-基体界面产生一定的缺陷。随着纤维掺量的增加，纤维在浆体中的比表面积将显著降低，从而减弱纤维-基体界面的效应。

同时钢纤维体积掺量为 1.0vol% 时 SFRRRC 表现出良好的韧性性能，其韧性并未随温度的降低而下降；橡胶的掺入表现出与掺入钢纤维类似的趋势，由于橡胶颗粒不能和周围水泥砂浆牢固结合，橡胶与基体材料之间缺乏“强”化学键的联系，随着橡胶掺量的增加，韧性性能明显下降，综合评价表明当钢纤维体积掺量为 1.0vol%，橡胶掺量为 10vol% 时，SFRRRC 材料韧性性能达到最优。

4 SFRRRC 荷载-挠度曲线本构模型

钢纤维、橡胶和超低温共同作用于 SFRRRC，使其在受弯荷载-挠度曲线的下降段表现出显著的增韧和阻裂效果。因此，本研究基于过镇海 [33] 提出的单轴压缩本构模型以及 Wu 等 [34] 提出的钢纤

维混凝土受弯本构模型，在曲线下降段引入材料特征参数 [35]，并对温度进行修正，提出了符合钢纤维橡胶混凝土弯曲荷载-挠度曲线特征的本构模型如下：

$$y = x, \quad 0 \leq x \leq 1 \tag{3}$$

$$y = \frac{x}{\alpha(x-1)^2 + x}, \quad x > 1 \tag{4}$$

$$\alpha = (0.404 f_f^{0.785} - 0.705) [2 - (T + 273.15)^{0.2211} (\lambda_f^{-0.0148} - 0.974 \lambda_r)] \tag{5}$$

其中： $y=F/F_{peak}$ ， F 为荷载， F_{peak} 为峰值荷载； $x=\delta/\delta_{peak}$ ， δ 为挠度， δ_{peak} 为峰值挠度； f_f 为 SFRRRC 抗弯强度 (MPa)； T 为温度 (°C)； $\lambda_f=V_f l_f/d_f$ ，其中 V_f 为钢纤维体积掺量 (vol%)， l_f 为钢纤维长度 (mm)， d_f 为钢纤维直径 (mm)； $\lambda_r=\rho_r d_r$ ， ρ_r 为橡胶体积掺量 (vol%)， d_r 为橡胶平均粒径 (mm)。对不同低温环境下的 SFRRRC 荷载-挠度曲线进行拟合，拟合结果如图 12 所示。

通过对比分析本构模型和实验曲线的拟合程度，发现引入钢纤维和橡胶特征参数并对温度修正后的受弯本构模型在大多数情况下与实验数据呈现出高度的相关性。除纤维掺量 1.5vol%、橡胶掺量 20vol%、温度 0°C 特定条件下下降段拟合效果较差外，其余各种温度和掺量组合下拟合曲线与数据点吻合度较好。这一结果说明，经过钢纤

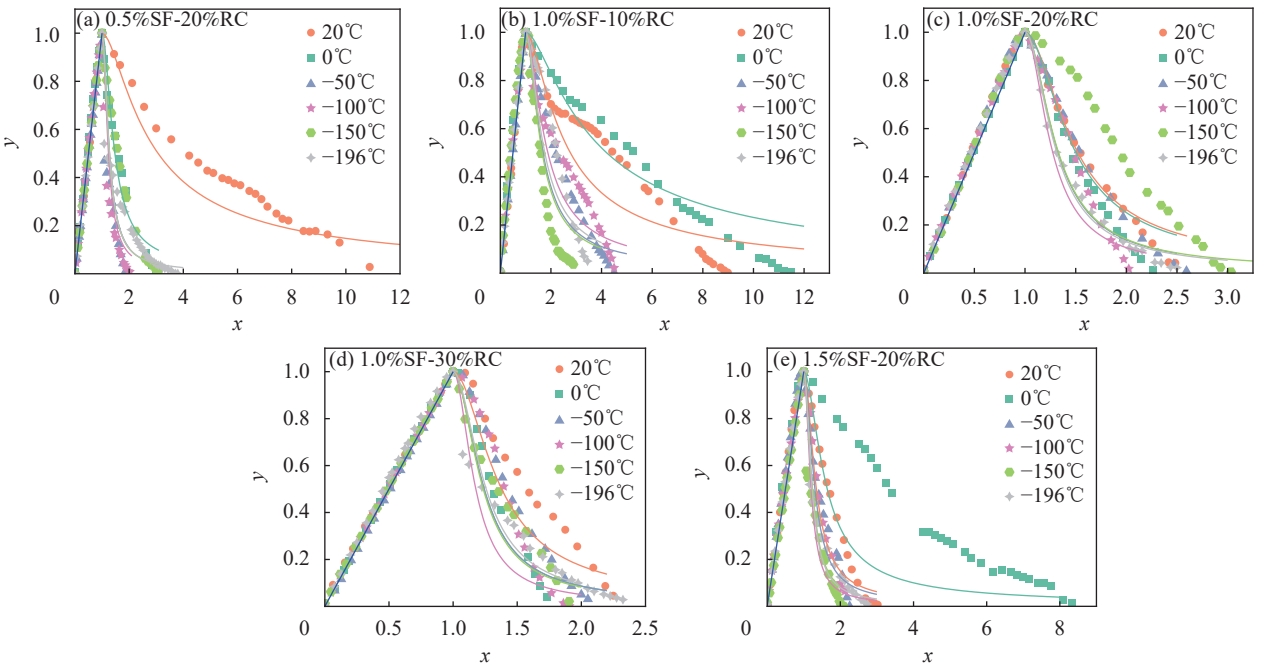


图 12 SFRRRC 荷载-挠度曲线拟合

Fig. 12 SFRRRC load-deflection curves fitting results

维和橡胶特征系数和温度的修正后的模型能够较好地反映 SFRRRC 的受弯挠度-荷载曲线,能够有效地表征不同温度下 SFRRRC 的受弯力学行为。本试验提出的本构模型适用于长径比约 52 的镀铜微丝钢纤维、纤维体积掺量不超过 1.5vol%、橡胶平均粒径为 0.175 mm、橡胶体积掺量不超过 30vol%、温度在-196~20℃ 的 SFRRRC 荷载-挠度曲线的拟合。若用于其他掺量和温度条件,需要对模型下降段进行进一步的调整和优化。

5 结论

通过对超低温作用后不同钢纤维和橡胶掺量的钢纤维增强橡胶混凝土 (SFRRRC) 试件进行四点弯曲性能试验,计算出 SFRRRC 的修正弯曲韧性系数,分析了钢纤维体积掺量和橡胶颗粒体积掺量对 SFRRRC 抗弯性能的影响,主要结论如下:

(1) 常温下随着钢纤维和橡胶体积掺量的增加, SFRRRC 抗弯强度均会明显提升。当纤维掺量从 0.5vol% 增加至 1.5vol%, 其初裂荷载提升并不明显,而峰值荷载提升了约 209%,弯曲强度增大约 215%。橡胶的掺入能够提升材料的变形能力,当掺量从 10vol% 增大至 30vol%, 其峰值荷载增大约 27%,弯曲强度增大约 52%;

(2) SFRRRC 在超低温环境下抗弯强度会进一步提升。在降温过程中, SFRRRC 从常温状态降低至 0℃ 时,弯拉强度均略有下降,随着温度进一步降低至-100℃ 时, SFRRRC 的弯拉强度达到最大值,与常温状态相比,弯拉强度最大可提升约 514%。当温度继续降低至-196℃ 时,提升幅度略有降低,最大为 460%;

(3) SFRRRC 在超低温环境下韧性会随着温度的降低而下降。同时韧性系数在降温初期的降低程度最为显著,继续降低温度,韧性系数进入平缓波动阶段,综合弯拉强度以及材料的韧性性能, 1.0vol% 钢纤维掺量和 10vol% 橡胶掺量的 SFRRRC 在常温和超低温环境下具有最优的力学性能;

(4) 基于传统本构模型提出了在不同温度下 SFRRRC 的荷载-挠度曲线本构模型,该模型能够较好地拟合 SFRRRC 荷载-挠度曲线的试验数据。

参考文献:

- [1] XU X Q, ZHANG Z G, HU Y G, et al. Bearing strength of crumb rubber concrete under partial area loading[J]. *Materials*, 2020, 13(11): 2446.
- [2] 王晓初, 江必有, 聂晓梅. 中国废旧轮胎循环利用前景与建议[J]. *橡塑技术与装备*, 2022, 48(8): 5-8.
WANG Xiaochu, JIANG Biyou, NIE Xiaomei. Prospects and suggestions for recycling of waste tires in China[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2022, 48(8): 5-8(in Chinese).
- [3] LIU F, ZHENG W H, LI L J, et al. Mechanical and fatigue performance of rubber concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 711-719.
- [4] 汪振双, 苏昊林. 冻融条件下再生橡胶混凝土损伤演变与强度相关性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(12): 4286-4291.
WANG Zhenshuang, SU Haolin. Correlation between recycled rubber concrete strength and damage evolution in freeze thaw cycles[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(12): 4286-4291(in Chinese).
- [5] SAVAS B Z, AHMAD S, FEDROFF D. Freeze-thaw durability of concrete with ground waste tire rubber[J]. *Transportation Research Record*, 1996, 1574(1): 80-88.
- [6] FEDROFF D, AHMAD S, SAVAS B Z. Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber[J]. *Transportation Research Record*, 1996, 1532(1): 66-72.
- [7] 徐金花, 冯夏庭, 陈四利. 橡胶集料对混凝土抗冻性的影响[J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2012, 33(6): 895-898.
XU Jinhua, FENG Xiating, CHEN Sili. Effects of rubber aggregate on the frost resistance of concrete[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2012, 33(6): 895-898(in Chinese).
- [8] 李旭东, 朱江, 张东升. 掺钢纤维的橡胶混凝土力学性能试验研究[C]//第十二届全国现代结构工程学术研讨会暨第二届全国索结构技术交流会论文集. 天津: 工业建筑杂志社, 2012: 962-966.
LI Xudong, ZHU Jiang, ZHANG Dongsheng. Experimental study on mechanical properties of steel fiber reinforced rubber concrete[C]//Proceedings of the 12th National Symposium on Modern Structural Engineering and the 2nd National Technical Exchange Meeting on Cable Structures. Tianjin: Industrial Building Magazine, 2012: 962-966(in Chinese).
- [9] 朱江, 张东升, 李旭东. 钢纤维改性橡胶混凝土的研究应用与展望[C]//第十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: 工业建筑杂志社, 2013: 1569-1576.
ZHU Jiang, ZHANG Dongsheng, LI Xudong. Application and prospect of steel fiber modified rubber concrete[C]//Proceedings of the 13th National Symposium on Modern Structural Engineering. Tianjin: Industrial Building Magazine, 2013: 1569-1576(in Chinese).
- [10] 高丹盈, 朱海堂, 汤寄予. 纤维高强混凝土抗剪性能的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2004(6): 88-92, 98.
GAO Danying, ZHU Haitang, TANG Jiyu. Experimental

study on behavior of fiber reinforced high-strength concrete under shear[J]. *Journal of Building Structures*, 2004(6): 88-92, 98(in Chinese).

[11] 梁兴文, 胡翔翔, 于婧, 等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(3): 722-731.
LIANG Xingwen, HU Aoxiang, YU Jing, et al. Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(3): 722-731(in Chinese).

[12] 蒋正武, 李雄英, 张楠. 超低温下高强砂浆强度发展 [J]. *硅酸盐学报*, 2011, 39(4): 703-707.
JIANG Zhengwu, LI Xiongying, ZHANG Nan. Strength development of high strength mortar at very low temperature[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 39(4): 703-707(in Chinese).

[13] XUE G, LIU J X, CAO M L. A study of the impact resistance of rubber concrete at low temperatures (-30℃)[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1: 1-14.

[14] YU Y, JIN Z, ZHU H, et al. Effect of rubber particles on impact resistance of concrete at a temperature of -20℃ [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, 21(3): 107.

[15] BU C M, ZHU D X, LIU L, et al. Research progress on rubber concrete properties: A review[J]. *Journal of Rubber Research*, 2022, 25(2): 105-125.

[16] DAHMANI L, KHENANE A, KACI S. Behavior of the reinforced concrete at cryogenic temperatures[J]. *Cryogenics*, 2007, 47(9): 517-525.

[17] KIM M J, YOO D Y, KIM S, et al. Effects of fiber geometry and cryogenic condition on mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 107: 30-40.

[18] KIM M J, YOO D Y. Analysis on enhanced pullout resistance of steel fibers in ultra-high performance concrete under cryogenic condition[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 251: 118953.

[19] 艾金华, 何倍, 张翼, 等. 超低温作用下UHPC受弯力学行为及其本构关系 [J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(1): 23-29.
AI Jinhua, HE Bei, ZHANG Yi, et al. Flexural behaviour and constitutive correlation of UHPC at cryogenic temperatures[J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(1): 23-29(in Chinese).

[20] XIE J, LI X, WU H. Experimental study on the axial-compression performance of concrete at cryogenic temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 72: 380-388.

[21] 苏骏, 钱维民. 超低温作用对超高韧性水泥基复合材料抗弯性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(6): 2844-2854.
SU Jun, QIAN Weimin. Effect of ultra-low temperature on flexural behavior of ultra-high toughness cementitious composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(6): 2844-2854(in Chinese).

[22] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
China Association for Engineering Construction Standardization. Fiber reinforced concrete test method standard: CECS 13—2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2010(in Chinese).

[23] 时旭东, 居易, 郑建华, 等. 混凝土低温受压强度试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2014, 44(5): 29-33.
SHI Xudong, JU Yi, ZHENG Jianhua, et al. Experimental study on compressive strength of concrete exposed to cryogenic temperature[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 44(5): 29-33(in Chinese).

[24] ROSTASY F S, WIEDEMANN G. Stress-strain-behaviour of concrete at extremely low temperature[J]. *Cement and Concrete Research*, 1980, 10(4): 565-572.

[25] 胡金泉, 裴万胜, 王冲, 等. 超低温混凝土力学性能与抗冻融耐久性研究进展 [J]. *冰川冻土*, 2024, 46(1): 111-125.
HU Jinquan, PEI Wansheng, WANG Chong, et al. Progress in mechanical properties and frost durability of ultra-low temperature concrete[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024, 46(1): 111-125(in Chinese).

[26] 苏骏, 黄福, 王淞波, 等. 低温作用下改性骨料-钢纤维再生混凝土弯曲性能试验 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(2): 884-897.
SU Jun, HUANG Fu, WANG Songbo, et al. Experimental study on bending properties of modified aggregate-steel fibre recycled concrete under low temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(2): 884-897(in Chinese).

[27] LIU J, CHENG L, ZHOU D. Study on the flexural performance and brittle fracture characteristics of steel fiber-reinforced concrete exposed to cryogenic temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 432: 136604.

[28] MONTEJO L A, SLOAN J E, KOWALSKY M J, et al. Cyclic response of reinforced concrete members at low temperatures[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2008, 22(3): 79-102.

[29] 李丽娟, 陈智泽, 谢伟锋, 等. 橡胶改性高强混凝土基本性能的试验研究 [J]. *混凝土*, 2007(5): 60-63.
LI Lijuan, CHEN Zhize, XIE Weifeng, et al. Experimental study of the performance of high strength concrete modified by recycled rubber powder[J]. *Concrete*, 2007(5): 60-63(in Chinese).

[30] LIU R, LI H, JIANG Q, et al. Experimental investigation on flexural properties of directional steel fiber reinforced rubberized concrete[J]. *Structures*, 2020, 27: 1660-1669.

[31] 高丹盈, 赵亮平, 冯虎, 等. 钢纤维混凝土弯曲韧性及其评价方

法 [J]. [建筑材料学报](#), 2014, 17(5): 783-789.

GAO Danying, ZHAO Liangping, FENG Hu, et al. Flexural toughness and it's evaluation method of steel fiber reinforced concrete[J]. [Journal of Building Materials](#), 2014, 17(5): 783-789(in Chinese).

[32] SKAPSKI A, BILLUPS R, ROONEY A. Capillary cone method for determination of surface tension of solids[J]. [Journal of Chemical Physics](#), 1957, 26(5): 1350-1351.

[33] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 33-39.

GUO Zhenhai. Strength and constitutive relation of concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 33-39(in Chinese).

[34] WU Z, SHI C, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete[J]. [Construction and Building Materials](#), 2016, 103: 8-14.

[35] 赵秋红, 董硕, 朱涵. 钢纤维-橡胶/混凝土单轴受压全曲线试验及本构模型 [J]. [复合材料学报](#), 2021, 38(7): 2359-2369.

ZHAO QiuHong, DONG Shuo, ZHU Han. Experiment on stress-strain behavior and constitutive model of steel fiber-rubber/concrete subjected to uniaxial compression[J]. [Acta Materiae Compositae Sinica](#), 2021, 38(7): 2359-2369(in Chinese).