第 54 卷第 1 期
2026 年 1 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 54，No. 1
January，2026

http://jccsoc.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20250466

真空暴露对聚合物—纤维改性混凝土力学性能的影响

龙朝飞[1]，龙广成[1]，胡正勇[2]，唐 卓[1]，张玉庭[1]，封 杰[1]，杜航宇[1]，彭 磊[1]，蒋 定[1]

(1. 中南大学土木工程学院，长沙 410075；2. 中铁六局集团丰桥桥梁有限公司，北京 100070)

摘 要：针对超高速磁悬浮管道等真空工程中服役混凝土脆性增大问题，本工作提出聚合物与非金属纤维协同改性策略。通过可再分散乳胶粉(RDP)、丁苯乳胶改性乳化沥青(MEA)与超高分子量聚乙烯纤维(PEF)、碳纤维(CF)的复合掺加，并结合颗粒紧密堆积模型设计制备了一类高密实、高韧性混凝土。利用声发射技术与 Kneedle 拐点识别算法，系统揭示了常压暴露(AE)及真空暴露(VE)对改性混凝土力学损伤行为的影响机制。结果表明：AE 和 VE 均提升了混凝土的抗压强度(最高 30.9%)，但 VE 对抗弯强度不利(降幅达 22.8%)；对照组混凝土在 VE 下的压缩韧性和弯曲韧性显著降低，而通过聚合物和纤维改性可以有效避免此问题。扫描电子显微镜观察发现，真空可强化聚合物的成膜效应，有效桥接水化产物并与纤维形成高韧性的三维网络结构，从而抑制微裂纹扩展；其中 RDP 与 PEF 的组合可发挥最优协同增韧效果，使试件峰后韧性得以较好保持。声发射特征参数分析结果表明，VE 使损伤预警时间提前，并加剧了纤维–基体界面的黏结滑移，进而产生更多的剪切裂纹信号。CF 在拔出过程中易发生脆断，而 PEF 可以通过滑移变形耗散能量，与聚合物协同抑制多尺度裂纹扩展，适用于在真空环境下服役。

关键词：混凝土；真空暴露；聚合物；纤维；声发射
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)01–0243–15
网络出版时间：2025–12–18

近年来，真空工程因其在超高速交通、航天科技和前沿物理实验等领域的革命性应用而备受关注。例如，超高速低真空磁悬浮交通系统结合低真空和磁悬浮技术，使列车的运行速率突破到 1000 km/h 以上，成为下一代轨道交通的核心方向[1]。随着人类对深空的持续探索以及太空移民计划的确立，月球及火星基地的建设成为当前重要且充满挑战性的任务[2]。然而，无论是超高速低真空管道还是太空基地的建设都对材料性能提出了严苛要求。混凝土作为全球应用最广的建筑材料，因其可塑性高、成本低廉、力学性能可设计性强以及低磁阻特性，在真空工程中展现出独特的潜力[2–4]。尽管如此，混凝土在真空环境下的服役稳定性仍受到严峻挑战。

目前已有研究证实，真空环境会加速混凝土中水分散失[5–6]，抑制水化、诱导微结构劣化[7–8]，加剧脆性破坏及干缩行为[9–10]，降低抗渗性[11–12]，从而威胁结构的长期耐久性。因此，提升混凝土材料在真空环境下的服役稳定性尤为关键。基于上述问题，由真空导致水分迁移散失引发的水化停滞和干缩是造成混凝土性能退化的主要原因。因此，有必要对混凝土进行足够时间的预养护，以及采取外部涂层防护和使用保水减缩材料等策略。程冠之等[1]使用了一种氟碳涂层，有效抑制了混凝土内部水分向真空环境中散失，降低了硬化浆体的孔隙率。陈月等[13]研究发现，使用粉煤灰和减缩剂对降低水泥砂浆在真空环境下的干缩变形起到有利作用，掺加硅灰和高吸水树脂则产生了负面影响。Long 等[12]探讨了砂率和骨胶比对真空环境下混凝土强度及抗渗性的影响，为优化设计稳定的骨架体系提供了有益见解。

纤维作为一种常用的增韧手段，常被添加到水泥基材料中解决其韧性低、易开裂等问题[14–15]。钢纤维是目前最常用的纤维，但是不得不考虑其强磁性引发的涡流效应[16]，这限制了它在超高速低真空

收稿日期：2025–06–16。　修订日期：2025–07–18。
基金项目：非金属材料创新中心创新基金(24TDA-1)。
第一作者：龙朝飞(1997—)，男，博士研究生。
通信作者：龙广成(1973—)，男，博士，教授。

Received date: 2025–06–16.　**Revised date:** 2025–07–18.
First author: LONG Zhaofei (1997–), male, Doctoral candidate.
E-mail: lzf2033195@163.com
Correspondent author: LONG Guangcheng (1973–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: longguangcheng@csu.edu.cn

磁悬浮交通系统中的应用。超高分子量聚乙烯纤维和碳纤维作为有机纤维和无机纤维的代表，兼具高强、耐蚀和轻质的优势[17]，可以作为替代钢纤维的有益选项，然而其在真空环境下的有效性尚未得到验证，有必要进行深入探究。可再分散乳胶粉和乳化沥青等聚合物作为另一种增韧手段亦被证明可以通过成膜方式提高混凝土的韧性和耐久性，并具有低碳优势[18–20]。此外，研究还发现，聚合物可以与纤维协同桥接纳米和微米级的微裂纹，并提高纤维与界面过渡区(ITZ)的结合性能[21]。因此，联合使用聚合物和非金属纤维是一种提高混凝土在真空工程中应用具有前景的方式，但是相应的作用机理有待进一步完善。

综上，本工作通过单轴压缩和四点弯曲试验探究了聚合物—纤维改性混凝土在常压和真空暴露环境下的力学性能。此外，由于低真空导致的材料损伤很难探明，直接通过力学性能测试得到的结果很难深入反映真空对混凝土材料造成的影响。声发射技术作为一种先进的探伤手段，可以探测材料在外力或内力作用下的损伤[22]。以往研究表明，混凝土材料的损伤模式和损伤程度可以通过声发射信号强度、*b* 值分析、RA-AF 图像进行分析[23–25]。因此，本工作使用声发射技术监测了混凝土在不同荷载作用下的损伤行为，以深入了解真空环境以及增韧组分对混凝土力学损伤特性的影响。

1 实验

1.1 原材料

出于紧密堆积和梯级水化效应考虑，选用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥(OPC)、粉煤灰(FA)、矿渣(GGBS)和硅灰(SF)作为胶凝材料，其氧化物组成见表 1。细骨料为水洗河砂(Sand)，细度模数为 2.57，含泥量(质量分数)<2%，表观密度为 2660 kg/m^3；粗骨料为 5~20 mm 的反击破石灰石碎石(Gravel)，针片状含量(质量分数)<5%，含泥量<0.5%，表观密度为 2680 kg/m^3。聚合物分别采用了可再分散乳胶粉(RDP)和丁苯乳胶(SBR)改性乳化沥青(MEA)，其中 RDP 由醋酸乙烯—乙烯共聚乳液烘干后制成，挥发率<2%；MEA 为阳离子型，固含量为 60%，使用了 4% (质量分数)的 SBR 改善 MEA 的延展性和韧性[26]，使用前将两者用快速搅拌器混合均匀。纤维分别采用超高分子量聚乙烯纤维(PEF)和碳纤维(CF)，2 种纤维的物理力学性能指标如表 2 所示。减水剂采用商用聚羧酸系减水剂(SP)，减水率>25%。

表 1 胶凝材料的氧化物组成

Table 1 Oxide composition of cementitious materials *w*/%

Type	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O
OPC	24.05	55.45	5.50	3.63	3.44	1.36	0.17	1.06
FA	31.66	4.92	20.35	3.60	2.56	0.91	0.26	1.10
GGBS	29.78	37.18	14.29	0.40	2.61	6.16	0.59	0.36
SF	96.39	1.40	0.54	0.11	0.12	0.39	0.14	0.54

w is mass fraction.

表 2 PEF 和 CF 的物理力学性能指标

Table 2 Physical and mechanical properties of PEF and CF

Type	Density/(g·cm^{-3})	Length/mm	Diameter/μm	Elastic modulus/GPa	Tensile strength/MPa	Breaking elongation/%
PEF	0.97	24	25	122	3100	3.5
CF	1.75	24	7	228	3500	1.5

1.2 配合比设计方法

为了制备高密实、高稳定性的混凝土用于真空服役，利用 Modified Andreasen and Andersen (MAA)颗粒堆积模型对胶凝体系进行了设计，以实现最佳的粒径分布和最小的孔隙率[24]。具体的设计方法如式(1)所示：

$$P(D)=\left(\frac{D^q-D_{\min}^q}{D_{\max}^q-D_{\min}^q}\right)\times 100\% \quad (1)$$

式中：$P(D)$为颗粒尺寸为 D 时的通过百分率，%；D 为各级颗粒粒径，mm；$D_{\min}$为颗粒的最小粒径，mm；$D_{\max}$为颗粒的最大粒径，mm；q 为分布模量，通常在 0.20~0.25，根据先前的研究经验[24, 27–28]，q 设置为 0.23 可靠性较高。

通过最小二乘法可以调整不同颗粒之间的混合比例，利用残差平方和(RSS)和拟合优度(R^2)来评价实际累积堆积曲线与理论目标堆积曲线的贴合度。图 1 绘制了胶凝材料的目标堆积曲线和实际堆积曲线。不难发现，经过优化后的实际堆积曲线与目标堆积曲线基本吻合，R^2 大于 0.95，RSS 也在一个较低的水平，相较之前研究达到了预期[24,28]。

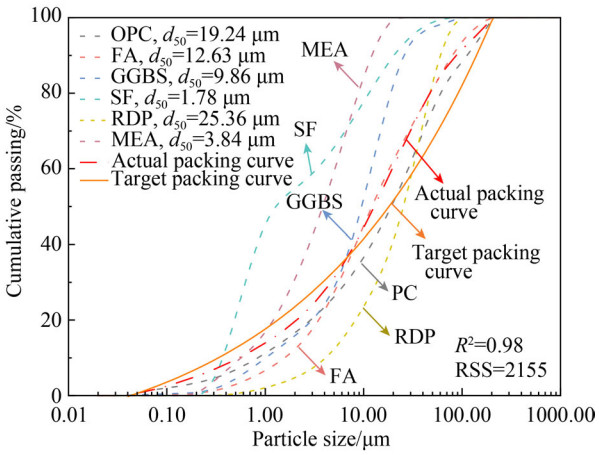


图 1　胶凝材料的粒径分布

Fig. 1　Particle size distribution of cementitious materials

根据上述颗粒堆积模型的优化结果，可以得到胶凝材料具体的组成参数，如表 3 所示。考虑到 RDP 和 MEA 会抑制水化，从而对混凝土强度产生负面影响[29–30]，两者使用量不宜过大，设置为胶凝材料质量分数的 3.5%。纤维的体积分数为 0.8%，对照组和改性组分别加入 0.8%和 1.2% (质量分数)胶凝材料的 SP，使新拌浆体坍落度控制在 70 mm 以上，满足塑性混凝土的工作性的要求。实际低真空管道工程应用混凝土的强度等级为 C60[31]，依据 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》计算得到的水胶比为 0.30。为了保证足够的气密性和安全系数，选择 0.25 作为混凝土的水胶比。为了保证各组混凝土水胶比一致，MEA+PEF 组中用水量减去了 MEA 中 40% (质量分数)的水分。基于之前研究[12]，配合比的砂率设置为 40%，以获得最佳的力学性能和抗渗性。

1.3　试件制备流程

混凝土的制备在双轴卧式混凝土搅拌机中进行，首先加入粗细集料和胶凝材料干混 1 min，然后加入水和减水剂搅拌 1 min，最后加入 RDP、MEA 和纤维继续搅拌 2~3 min 得到新拌浆料。将浆料倒入 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体和 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体模具中并振捣均匀，用于混凝土的力学性能测试。浇筑后的试件在室温养护 1 d 后脱模，然后放入标准养护室[(20±2) ℃，相对湿度>95%]中养护至 28 d。养护 28 d 是为了使混凝土充分水化，提高其抵抗真空环境的能力[4, 8]。

表 3　混凝土的配合比

Table 3　Mix proportion of concrete

Type	ρ/(kg·m^{-3})												Slump/mm
	OPC	FA	GGBS	SF	Sand	Gravel	RDP	MEA	PEF	CF	Water	SP	
R0	351	54	81	54	700	1050					135.00	4.32	100
RDP+PEF	351	54	81	54	700	1050	18.90		7.76		135.00	6.48	80
MEA+PEF	351	54	81	54	700	1050		18.90	7.76		127.44	6.48	85
RDP+CF	351	54	81	54	700	1050	18.90			14.00	135.00	6.48	95

1.4　试验方法

将养护好的混凝土试件取出，其中一部分试件标记为 SC，按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行单轴压缩试验和四点弯曲试验，将其余试件分别进行 56 d 的常压暴露(AE)和真空暴露(VE)，待暴露结束后同样进行上述力学性能测试。单轴压缩试验采用英国 Instron 1346 型电液伺服压力机，加载速率为 0.36 mm/min，用引伸计记录试件的轴向位移，用于绘制立方体试件的压缩应力–应变曲线；四点弯曲试验采用英国 Instron 1342 型电液伺服压力机，加载速率为 0.09 mm/min，同样用引伸计记录试件的跨中位移，用于绘制棱柱体试件的弯曲荷载–位移曲线。AE 在温度(20±2) ℃、相对湿度 55%~65%的常压室中进行；VE 采用自制的真空箱进行模拟，真空压力约 100 Pa，相对湿度 <10%，温度与 AE 环境基本一致。收集断裂面的试样并进行喷金处理，采用日本电子 JSM-IT500 型扫描电子显微镜(SEM)观察样品的微观形貌。力学性能测试期间采用美国声学物理公司的六通道 PCI-2 型声发射监测系统同步进行声发射测试。利用凡士林作为耦合剂将 Mini 300 型声发射探头固定在试件表面，收集试件在断裂过程中产生的声发射信号。探头端部连接一个前置放大器，信号增益为 40 dB，振幅阈值为 45 dB，以避免外界环境干扰。系统以 1 MHz 的速率持续采集数据并通过电脑显示屏实时显示。结合上升角(RA)和平均频率(AF)可以判别结构破坏的主要类型，两者的计算方法如式(2)和式(3)所示[24]：

$$RA=\frac{RT}{A} \tag{2}$$

$$AF=\frac{RC}{D} \tag{3}$$

式中：RT 为上升时间；A 为振幅；RC 为振铃计数；D 为持续时间。

在拉伸破坏模式下，弹性能释放迅速，*RT* 和 *D* 短，*A* 大，导致 *RA*<*AF*；在剪切破坏模式下则相反，能量主要通过裂缝的摩擦滑移产生，使得 *RT* 和 *D* 延长，导致 *RA*>*AF*，可以用 *RA*–*AF* 图像的对角线大致区分生成裂缝的类型。然而，试件的 *RA*–*AF* 分布因材料和工程环境的不同存在差异，用统一的方法进行分类容易造成误差[32]。Kneedle 法是一种基于拐点检测的简单方法，能够有效地识别分类的阈值或拐点，不依赖模型假设，计算简便快捷[33]，其计算原理如下。

对于数据集 $D_n=\{x_1, x_2, x_3 \ldots x_n\}$，可以认为每个数据点都对应一个函数值 $f(x_i)$，那么连续函数 $f(x)$ 的曲率计算方法如下。

$$K(x)=\frac{f''(x)}{[1+f'(x)^2]^{1.5}} \tag{4}$$

式中：$f'(x)$ 为 $f(x)$的一阶导数；$f''(x)$ 为 $f(x)$的二阶导数。

曲率下降函数 $\Delta(x)$ 的计算方法如式(5)所示：

$$\Delta(x)=K_{\max}(x)-K(x) \tag{5}$$

式中：$K_{\max}(x)$ 为最大曲率函数。

可以通过计算曲率下降函数来监测拐点。识别到的拐点即可当作分界线斜率 *k*，裂纹占比将基本不受 *k* 值增大的影响，可以最大限度规避分界线选取导致的分类误差。

2 结果与讨论

2.1 抗压性能

图 2 统计了各组试件在干燥处理前后的立方体抗压强度测试结果。由图 2 可以看到，标养后试件的抗压强度均在 70 MPa 以上，达到了预期的设计强度。试件在 AE 和 VE 下的抗压强度均获得不同程度的增长，其中 PEF 增强混凝土在 VE 下的抗压强度提升更为显著，而对照组和 CF 增强混凝土在 VE 下的抗压强度低于 AE 条件。

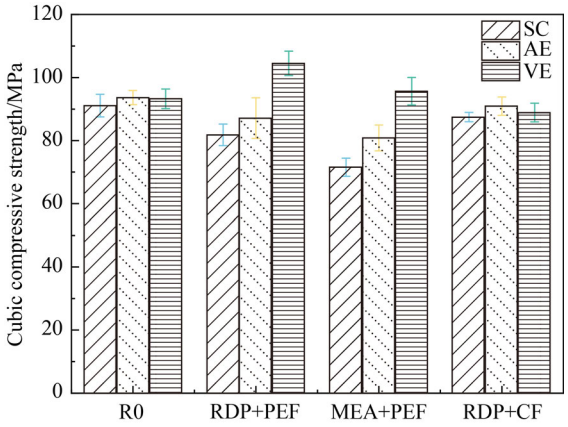


图 2 试件的立方体抗压强度

Fig. 2 Cubic compressive strength of specimens

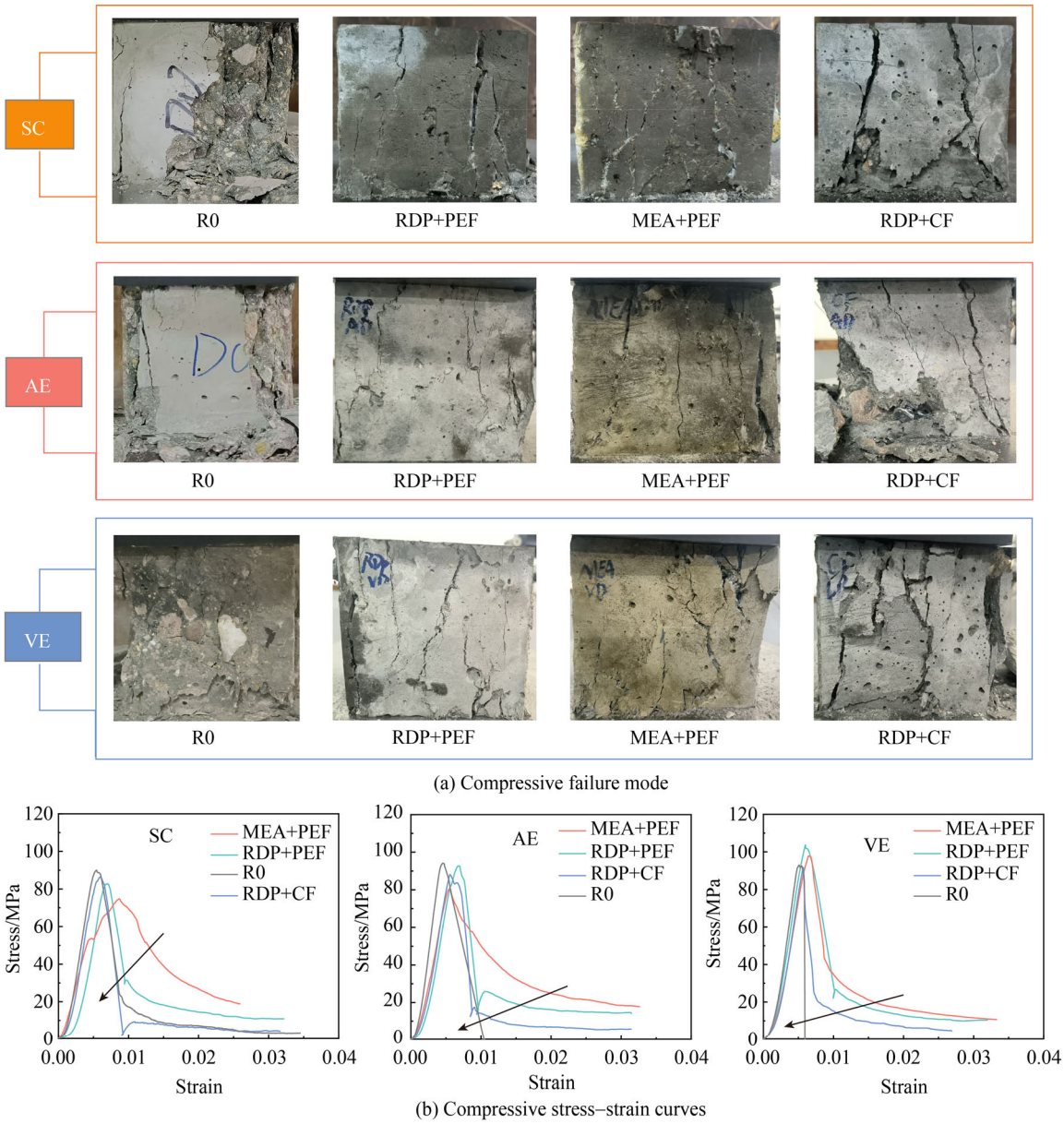
图 3 为各组试件在不同环境下的抗压损伤形貌及典型的应力–应变曲线。不难发现，PEF 增强混凝土在各种环境条件下呈延性破坏，而对照组及 CF 增强混凝土为脆性破坏，伴随剪切带外侧浆体和骨料的剥落以及巨大的爆炸声。对照组混凝土中由于缺乏韧性组分，脆性破坏行为最为显著。对比不同暴露环境下试样的破坏形貌可以发现，VE 下试件的脆性破坏行为更加显著，剪切带也更加复杂，这可能是由真空引起的微观缺陷导致的。

通过对应力–应变曲线进行分析可以得出，相较 SC，AE 分别使 R0、RDP+PEF、MEA+PEF 和 RDP+CF 的峰值应力增大 4.7%、11.9%、8.0%和 2.0%，VE 下的增长率则变为 3.3%、25.1%、30.9%和 6.1%。除了对照组，其余试件在 VE 下的抗压强度相较 AE 进一步提升。混凝土抗压强度的提高一方面源于真空加速了孔隙水蒸发，降低了其向裂缝尖端移动产生的孔隙水压力[34]；另一方面是由于真空导致 C-S-H 结构中层间水的去除和凝胶孔的重构会促进高密度 C-S-H 凝胶的生成，从而使固相强度提高[35]。尽管 VE 对试件抗压强度有所促进，但同样导致了其变形能力的降低，上述 4 组混凝土的峰值应变分别降低了 6.4%、13.3%、24.0%和 4.2%，对照组混凝土抵抗变形能力更差，因而抗压强度相较 AE 也出现了衰减。RDP+PEF 和 MEA+PEF 在 VE 下的峰值应力和峰值应变相较 R0 分别提高了 11.5%、5.1%和 17.8%、29.1%，其中 RDP 侧重承载能力的提升，而 MEA 侧重变形能力的提升。CF 增强混凝土在不同环境条件的峰值应变要小于 PEF 增强混凝土，在不同干燥环境下的应力水平也更低，表明 CF 抵抗干燥环境的能力弱于 PEF。

2.2 抗弯性能

图 4 呈现了混凝土在不同环境下的抗弯损伤形貌及相应的荷载–位移曲线。由图 4a 可见，普通混凝土和 CF 增强混凝土同样呈脆性断裂，PEF 增强混凝土表现出了较好的弯曲韧性，裂缝开口处有大量乱向分布的 PEF，纤维被部分或完全拔出。进一步对比荷载–位移曲线可以得出，聚合物和纤维的引入使混凝土的峰值位移增大，在干燥环境下还会同步提升混凝土的抗弯承载能力。其中 RDP+CF 的提升效果最显著，使 VE 下的抗弯强度和峰值位移分别比对照组高出 30.5%和 18.2%。PEF 则赋予了混凝土卓越的应变硬化行为，RDP 与 PEF 对弯曲承载

能力和韧性的贡献要优于 MEA。AE 使 R0、RDP+PEF、MEA+PEF 和 RDP+CF 的抗弯承载能力分别提高了–4.4%、11.0%、7.1%和 9.8%；VE 则导致四者的抗弯强度分别下降 22.8%、11.2%、16.0%和 9.4%，峰值位移分别下降 17.9%、3.3%、8.0%和 0.6%，这与 Lin 等[4]和 Shangguan 等[6]的研究结论是一致的。不难发现，VE 显著降低了普通混凝土的抗弯性能，但是经过聚合物和 PEF 改性后的混凝土抗弯性能保持良好，特别是弯曲韧性，这相较之前的研究也有明显改善[12](仅通过 PEF 增韧)。以上结论表明，聚合物和 PEF 可以协同提高混凝土在真空环境下的断裂韧性。



(a) Compressive failure mode

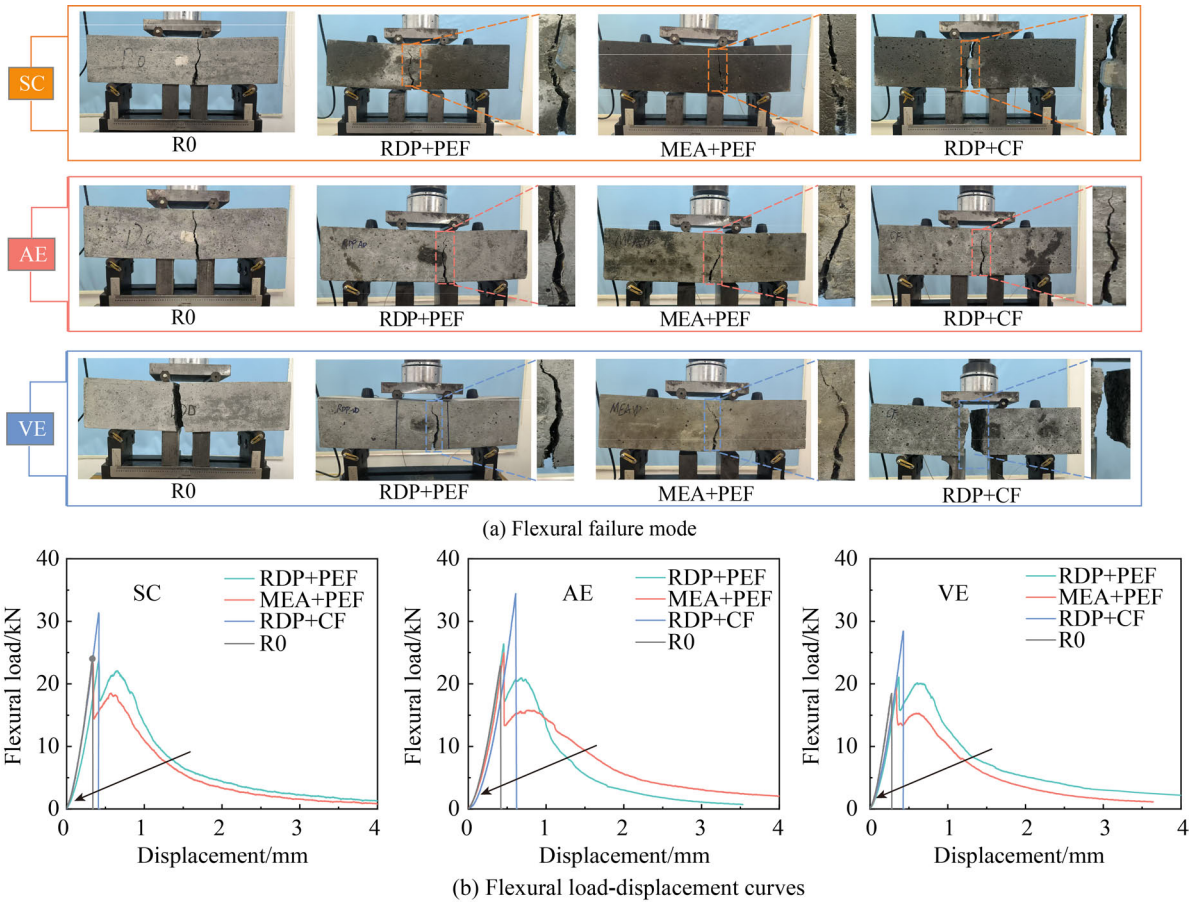
(b) Compressive stress–strain curves

图 3　试件的抗压损伤形貌及应力–应变曲线

Fig. 3　Compressive damage morphology and stress–strain curves of specimens

2.3　基于声发射的损伤演化分析

2.3.1　振铃计数　　振铃计数可以反映声发射的活跃程度，用于判断混凝土内部损伤发展的激烈程度及实时变化[36]。图 5 为试件在压缩荷载下的振铃计数演化规律，以进一步探明聚合物–纤维改性混凝土在不同环境下的力学损伤特性。由图 5 可见，振铃计数的发展可以分为早期缓慢增加(Ⅰ)、中期迅速增加(Ⅱ)和后期稳定增加(Ⅲ)3 个阶段，最活跃的事件在峰值应力附近出现。阶段Ⅰ的振铃计数大部分小于 100，源于试件内部原始缺陷在低应力水平下发生闭合以及微裂纹的萌生与生长[37]；阶段Ⅱ微裂纹逐渐扩展成宏观裂纹，纤维发挥桥接作用；阶段Ⅲ宏观裂纹贯通，纤维从基体中拔出。

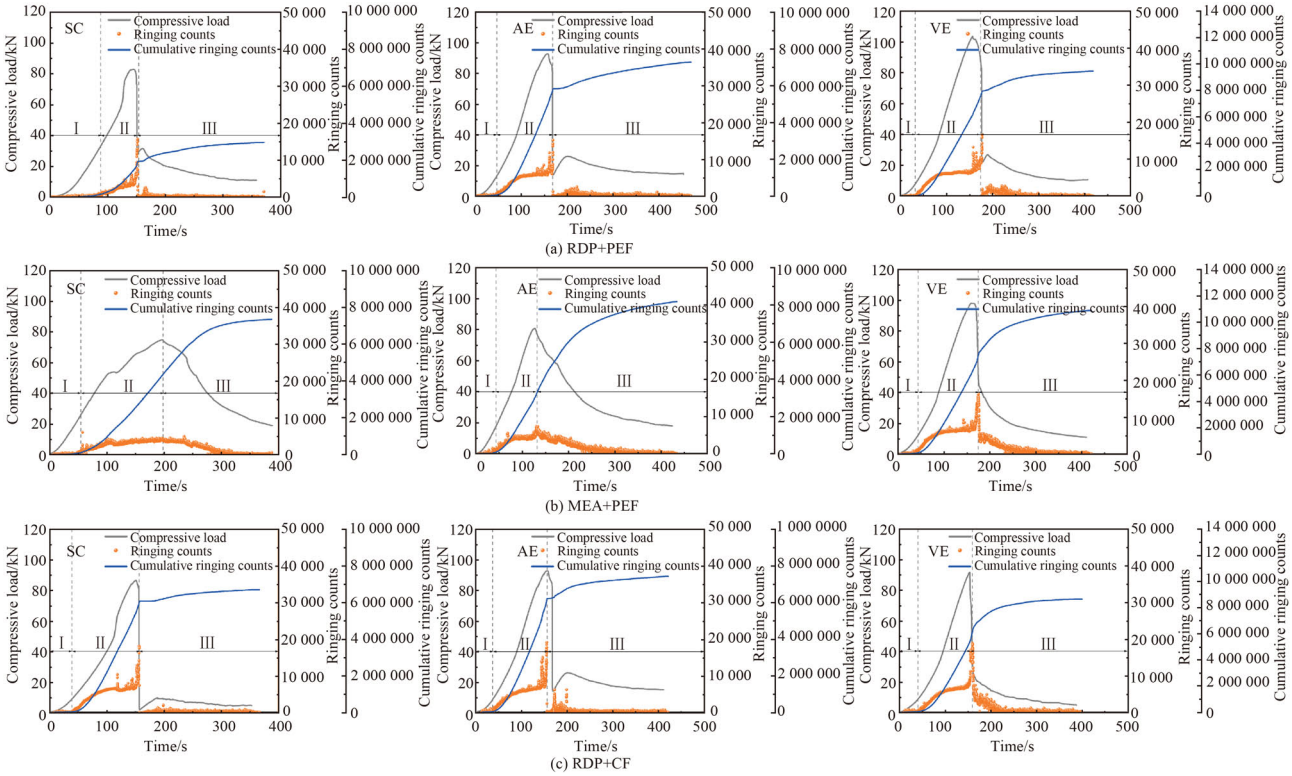


(a) Flexural failure mode

(b) Flexural load-displacement curves

图 4 试件的抗弯损伤形貌及荷载-位移曲线

Fig. 4 Flexural damage morphology and load-displacement curves of specimens



(a) RDP+PEF

(b) MEA+PEF

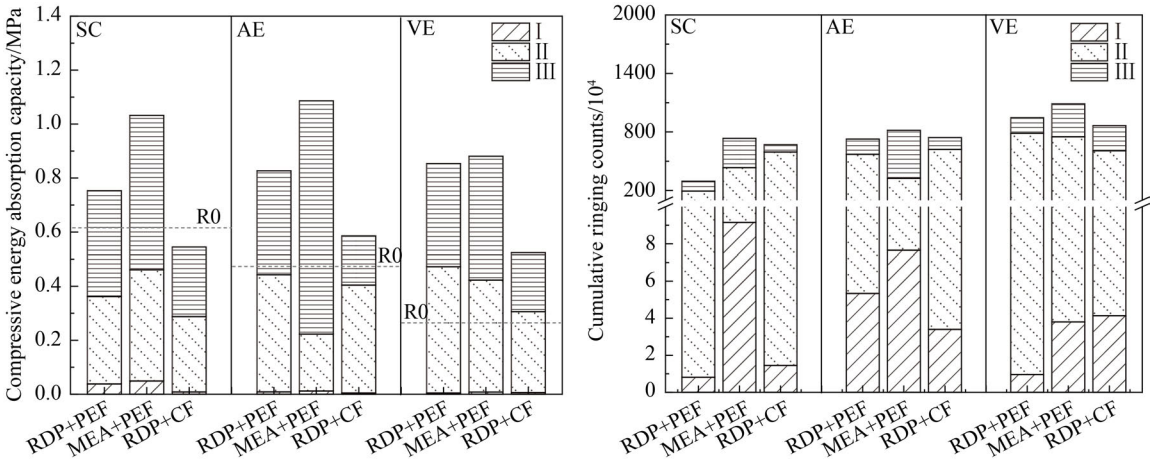
(c) RDP+CF

图 5 试件在压缩荷载下的振铃计数

Fig. 5 Ringing counts of specimens under compressive load

为了准确揭示组成和环境对各阶段损伤演化的影响，统计了试件在各阶段的能量吸收值以及累积振铃计数，如图 6 所示。由图 6a 可见，对照组混凝土经历干燥暴露后的抗压能量吸收能力降低，而聚合物–纤维改性混凝土则相反。还注意到 VE 的提升效果不如 AE，这与强干燥导致的混凝土脆性增大有关，但 PEF 协同聚合物仍使混凝土的抗压能量吸收能力提高 2 倍以上。通过图 6b 可以看到，混凝土经历干燥暴露后的累积声发射事件增多，特别是在 VE 条件下，这表明混凝土内部的纤维桥接作用增强，这可能与基体收缩产生了更大的内应力有关。通过图 6a 和图 6b 还可以得出，RDP+PEF 在 VE 下阶段 II 的能量吸收能力和振铃计数都是最大的，而 RDP+CF 最小。结合强度数据表明，RDP 和 PEF 结合对 VE 下抗压性能的改善要优于 MEA，而 PEF 与聚合物的协同效果优于 CF，抗弯试验的统计结果进一步证明了这一点。

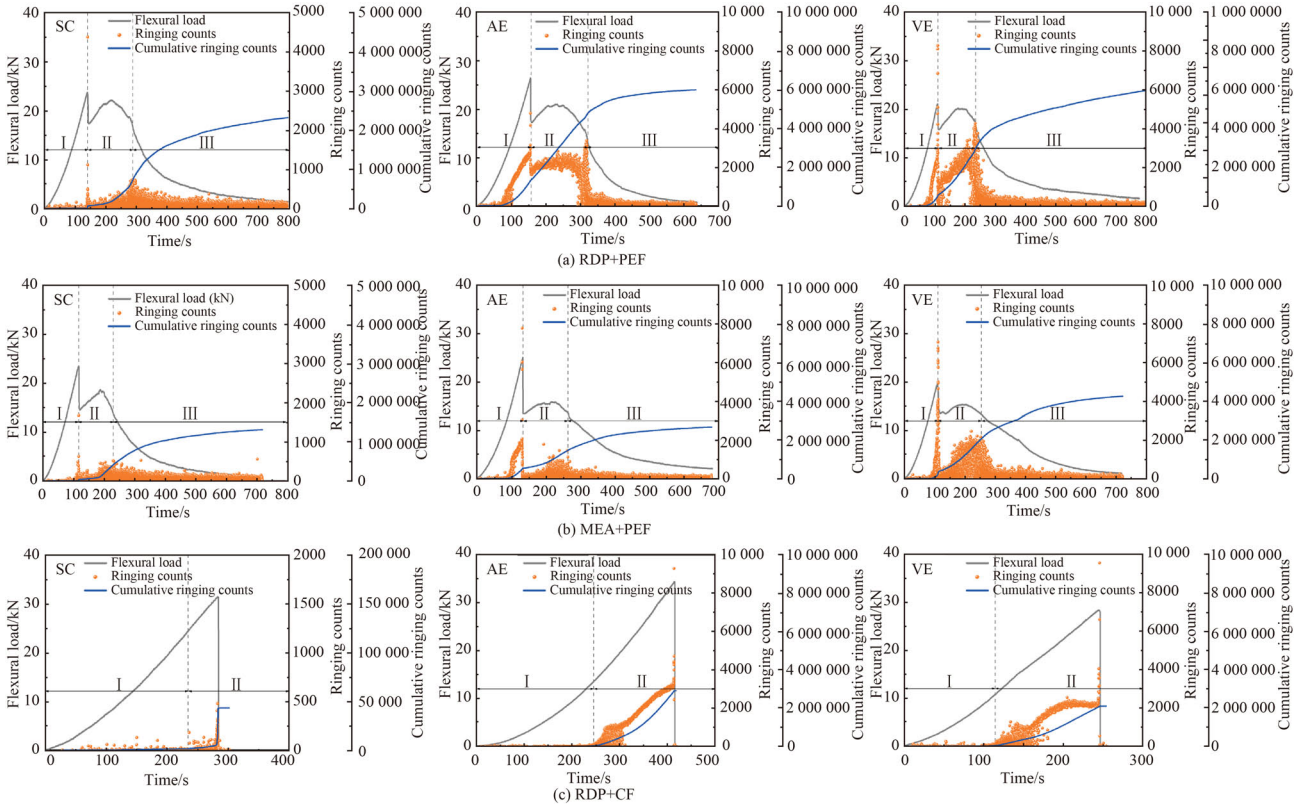
试件在弯曲荷载下的振铃计数发展情况如图 7 所示。通过观察发现，振铃计数激增时刻与荷载发展曲线的关键阶段相对应。对于 PEF 增强混凝土，第 1 次激增时刻出现在荷载–挠度曲线的初裂点；之



(a) Compressive energy absorption capacity　　(b) Cumulative ringing counts

图 6　试件在不同压缩阶段的能量吸收能力和累积振铃计数

Fig. 6　Compressive energy absorption capacity and cumulative ringing counts of specimens at different compression stages



(a) RDP+PEF

(b) MEA+PEF

(c) RDP+CF

图 7　试件在弯曲荷载下的振铃计数

Fig. 7　Ringing counts of specimens under flexural load

后进入阶段Ⅱ(应变硬化)，振铃计数波动愈发活跃，累积振铃计数迅速积累，这与 PEF 的拔出行为紧密相关[38]；阶段Ⅲ试件开始软化，声发射事件的活跃度逐渐下降，振铃计数的增长速率也随之减小。CF 增强混凝土由于发生脆断，只存在初始缺陷闭合和裂纹扩展破坏 2 个阶段。可以注意到，经历干燥环境暴露后，试件在阶段Ⅱ的声发射活跃度明显增强，特别是在 VE 后。在这个阶段会发生大量的纤维拔出和断裂行为，VE 导致的基体收缩会加强纤维与基体间的物理黏结作用，从而使纤维拔出消耗更多的能量，进而产生大量声信号。另一方面，干燥促进了聚合物在纤维表面成膜，从而提高了纤维–基体界面的结合强度[21]。

图 8 为混凝土在不同弯曲阶段的能量吸收能力以及累积振铃计数。与抗压结果类似，混凝土经历 AE 后抗弯能量吸收能力提高，VE 相较 AE 削弱了混凝土的能量吸收能力，但 RDP 和 PEF 协同仍使其能量吸收能力提高 10 倍以上。还可以注意到经历干燥暴露后，混凝土在弯曲荷载下声发射事件活跃度的激增现象显著高于压缩荷载。这是由于纤维主要在弯曲荷载模式下承担桥接作用，对压缩荷载的贡献较弱，因而干燥收缩对纤维-基体界面的增强机制在弯曲荷载作用下更显著。通过进一步对比可以得出，RDP 对抗弯性能的贡献优于 MEA，PEF 相较 CF 也与聚合物之间协同效果更佳。

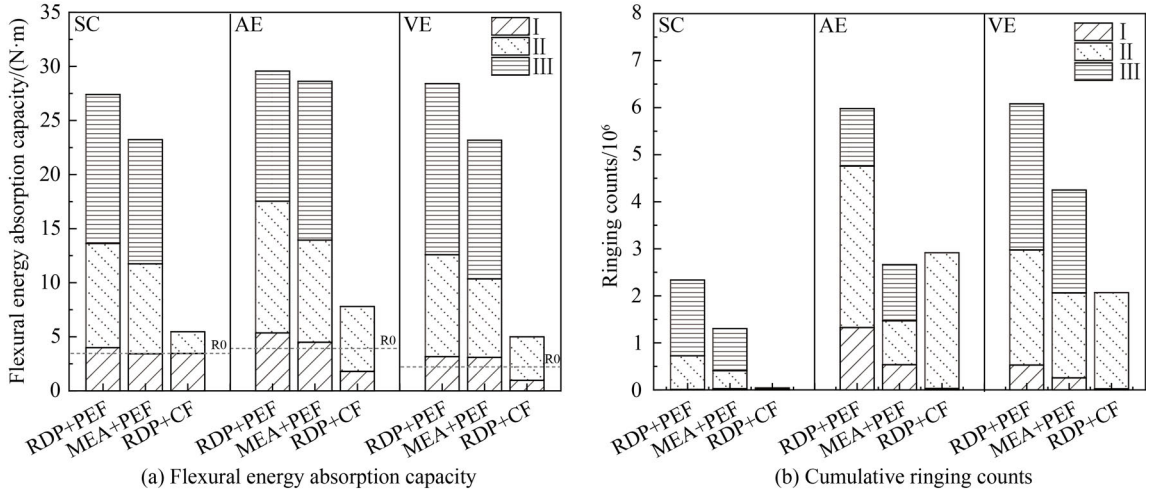


图 8 试件在不同弯曲阶段的能量吸收能力和累积振铃计数

Fig. 8 Flexural energy capacity and cumulative ringing counts of specimens at different flexural stages

2.3.2 *b* 值分析 混凝土内部微裂纹的形成和增长会以弹性波的形式释放出许多不同振幅的声发射事件。由于与地震波的性质类似，因此可以通过 *b* 值分析法检测混凝土在弯曲荷载作用下的内部开裂情况[23]。具体来说，根据 Gutenberg–Richter 方程，*b* 值的定义如下。

$$\lg N = a - b\left(\frac{A_{\mathrm{dB}}}{20}\right) \tag{6}$$

式中：A_{dB} 为声发射事件的峰值振幅；N 为振幅超过 A_{dB} 的声发射事件；a 为经验常数；b 为拟合曲线的斜率，即 *b* 值。

图 9 和图 10 分别绘制了各试件在压缩载荷和弯曲荷载下的 *b* 值变化规律。由图 9 可见，试件在抗压破坏前经历 *b* 值的迅速下降，随后伴随纤维的不断拔出而出现上下波动，图 10 可以观测到同样的现象。*b* 值的快速下降通常意味着微裂纹向宏观裂纹的转变，即试件趋于破坏[25]。通过图 10 还可以发现一个有趣现象，对于干燥暴露前的样品，其弯曲 *b* 值在峰值荷载附近开始下降，而对于干燥暴露后的样品，*b* 值下降时间会提前到峰值荷载之前，表明材料的损伤积累过程加快。

根据以往研究[25]，*b* 值开始下降的时间可以定义为材料失效的警告时间，警告时间越长代表材料的安全性越高；最小 *b* 值则可以体现材料抵抗破坏的能力，*b* 值越小代表材料受到的损伤越大。图 11 统计了各试件在不同环境条件和荷载作用下的警告时间及最小 *b* 值的变化情况。由图 11 可见，无论是何种加载模式，VE 后试件的警告时间最短，相较 SC 和 AE 降幅分别达 20%~60%以及 2%~47%。进一步对比最小 *b* 值的变化发现，AE 使材料的抗压损伤减小，但导致抗弯损伤增大；VE 则同时导致材料的抗压损伤和抗弯损伤增大。这表明真空环境会降低材料的安全性。

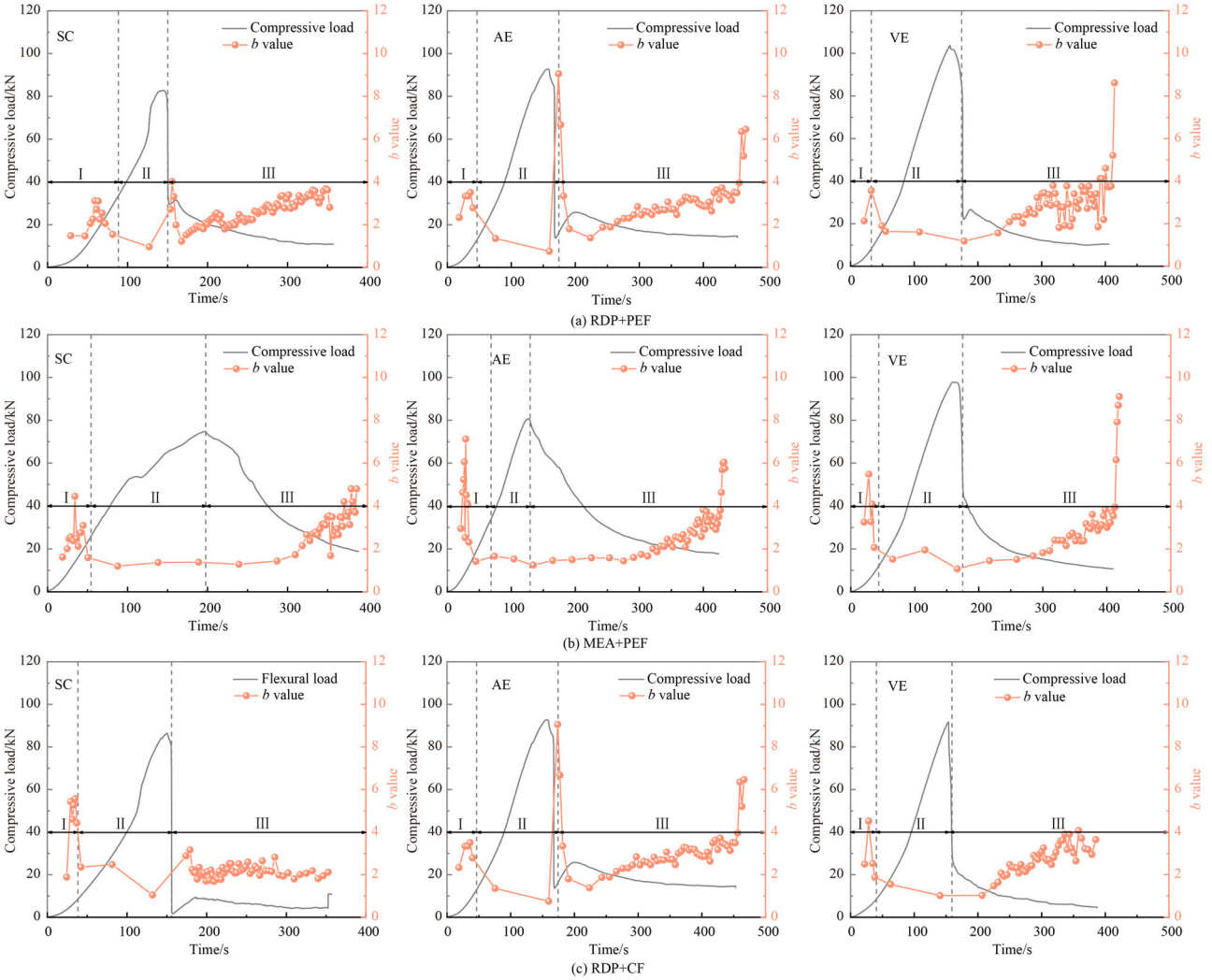


图 9　*b* 值在压缩荷载下的变化规律

Fig. 9　Change law of *b* value under compression load

2.3.3　RA-AF 关联分析　　基于 Kneedle 法，计算了试件在不同荷载作用及环境条件下剪切裂纹的发展情况，如图 12 所示。由图 12a 可见，试件在压缩荷载下阶段 I 剪切裂纹比例较低，在阶段 II 和III占据了主导。这是合理的，随着荷载逐渐增大，应力集中现象更加明显，容易产生剪切裂纹；试件达到峰值应力后纤维的拉拔滑移将产生更多的剪切信号[38]。对比不同环境条件下的裂纹比例发现，经历干燥暴露后 PEF 增强混凝土在阶段 I 的剪切裂纹比例下降，而 CF 增强混凝土的剪切裂纹比例升高，并且 VE 相较 AE 更加显著。阶段 I 主要进行初始缺陷的压密过程，这会产生更多的剪切裂纹[37]。因此，干燥处理可使 PEF 增强混凝土中的初始缺陷降低，但使 CF 增强混凝土中初始缺陷增多，并且这种现象与干燥程度呈正相关。这表明聚合物与 PEF 结合可以有效减少真空导致的缺陷。还可以发现干燥处理使阶段III的剪切裂纹比例升高，这进一步证实了真空使纤维与基体界面的黏结作用增强，使纤维拉拔产生了更多的剪切信号，这种效应在抗弯试验中更加显著。

由图 12b 可见，随着干燥程度的加剧，试件在抗弯过程中剪切裂纹的占比也更多，尤其对于阶段 II。在阶段 II 主要发生纤维的脱粘滑移行为，真空加剧了这一行为，使剪切裂纹信号显著增加。无论是在抗压还是抗弯损伤中 CF 增强混凝土都产生了较少的剪切裂纹，这表明 CF 与基体的黏结滑移行为不显著，这与其较差的变形能力有关。还可以发现，在 VE 下 RDP+PEF 的剪切裂纹比例比 MEA+PEF 高，这表明 RDP 协同 PEF 与基体的黏结作用比 MEA 更强。

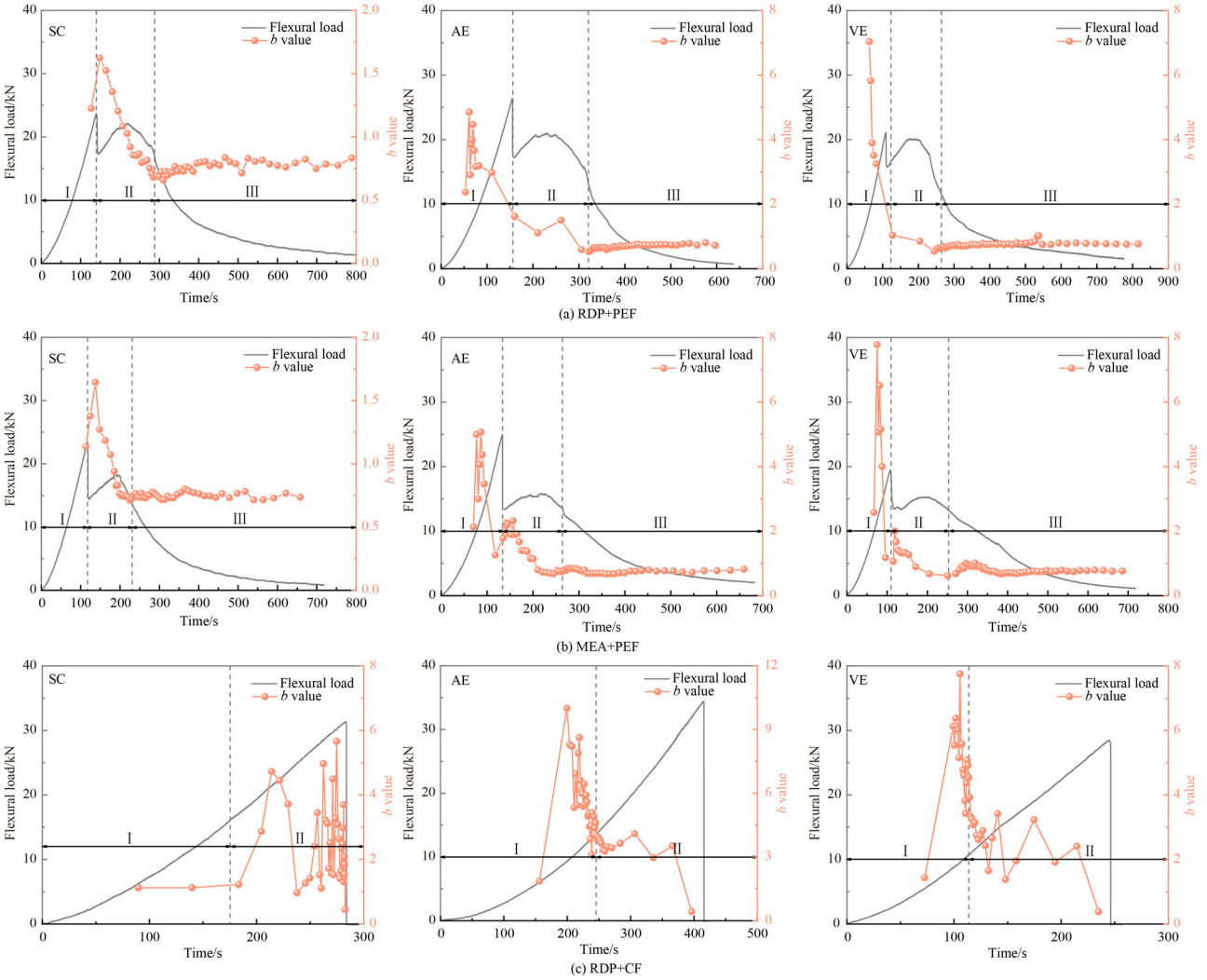


图 10 b 值在弯曲荷载下的变化规律

Fig. 10 Change law of b value under flexural load

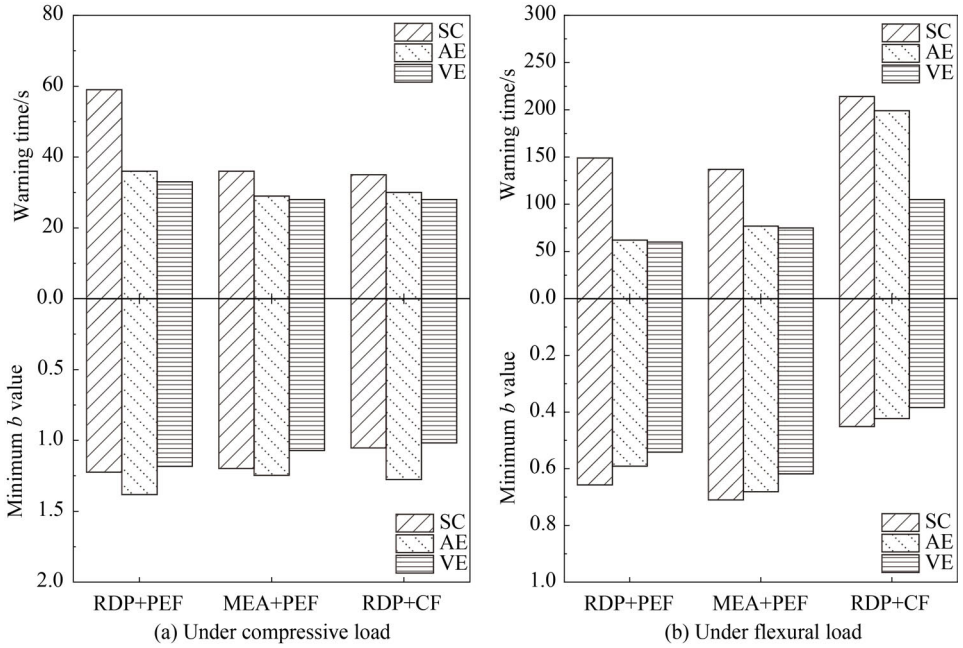


图 11 最小 b 值与预警时间的统计结果

Fig. 11 Statistical results of minimum b value and warning time

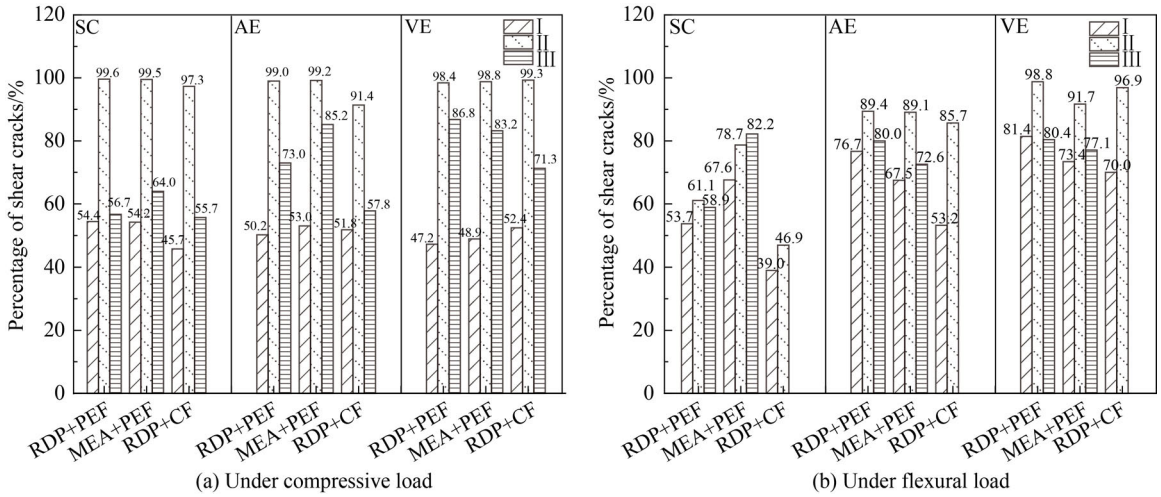


图 12　试件的剪切裂纹比例统计结果

Fig. 12　Statistical results of the shear crack percentage of specimens

2.4　微结构演化及改性机理

图 13 为混凝土经历不同环境暴露后的微观形貌。由图 13a 和图 13b 可见，经历 AE 后试件 ITZ 保持完好，但是在 VE 后会出现部分微裂纹，应该是收缩应力导致的[9]。这种 ITZ 的缺陷会在应力作用下发生错动和扩展，导致剪切裂纹比例的增加[33]。由图 13c 和图 13d 可见，相较 AE，VE 下基体微观结构存在许多小尺寸的 C-S-H 凝胶团簇，这可能与低密度 C-S-H 凝胶的收缩压实有关[39]。这一方面有助于提高固相强度，但同时也会导致基体脆性增大以及孔隙结构的粗化。

聚合物和纤维的加入有助于缓解真空导致的混凝土脆化问题，图 14 详细阐述了两者的作用机理。由图 14a 可见，RDP 在长期真空暴露后可以形成完整的柔性膜，并且可以与水化产物紧密地结合交联、抑制微裂纹的扩展、填充孔隙以及桥接微观结构。之前研究指出，为了形成具有足够强度的聚合物膜，需要一段干燥固化时间[40]。低真空加快了聚合物的干燥速率，使聚合物颗粒相互聚集，促进了薄膜的形成。由图 14b 可见，沥青微粒破乳后可以在水化产物间隙形成柔性膜，共同构筑成柔性骨架，缓解内应力及微裂纹的产生。真空造成的水分蒸发同样有助于沥青成膜，形成连续的柔性结构。总体而言，真空的加速聚合物成膜机制可以将脆性水泥基体转化为“刚性–柔性互穿网络结构”，实现韧性的显著提升。

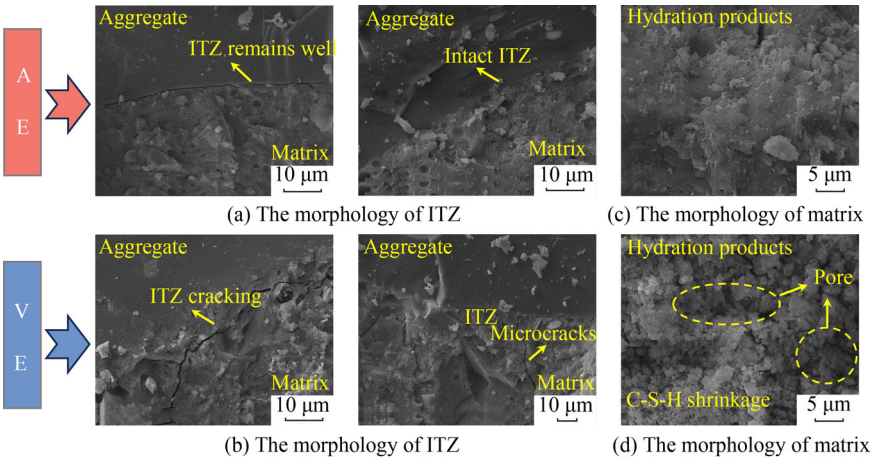


图 13　经历不同环境暴露后试件的微观形貌

Fig. 13　Microscopic morphology of specimens after exposure to different environments

图 14c~图 14e 呈现了 PEF 和 CF 在混凝土中的分布情况、拔出及断裂形式。由图 14c 可见，PEF 呈柔韧弯曲状，贯穿多块水泥石，形成三维网状结构，而 CF 呈刚性笔直簇状排列。不同的排列方式使 PEF 在控制裂缝扩展方面性能更佳，CF 则更有利于提升基体的刚度。由图 14d 和图 14e 可见，PEF

与基体界面相对光滑，断裂面变形大，可随基体变形拉伸，持续提供桥接力；CF 与基体表面相对粗糙，纤维拔出阻力大，倾向于脆性断裂而非滑移，因而在提高强度方面性能优异，但是在提高延性方面作用不大，特别是考虑真空干燥的影响。需要指出的是，纤维不仅可以传递应力，还可以与有机柔性薄膜结合共同提高与基体之间的粘弹性，桥接微纳尺度的裂缝，从而更好地抵抗干燥收缩开裂的危害。具体而言，RDP 水解和 MEA 破乳后可以与水化产物发生物理交联及化学锚固，其中非极性官能团可以通过范德华力与纤维进行结合共同提升混凝土的韧性[21]，但这需要进一步的试验及模拟验证。

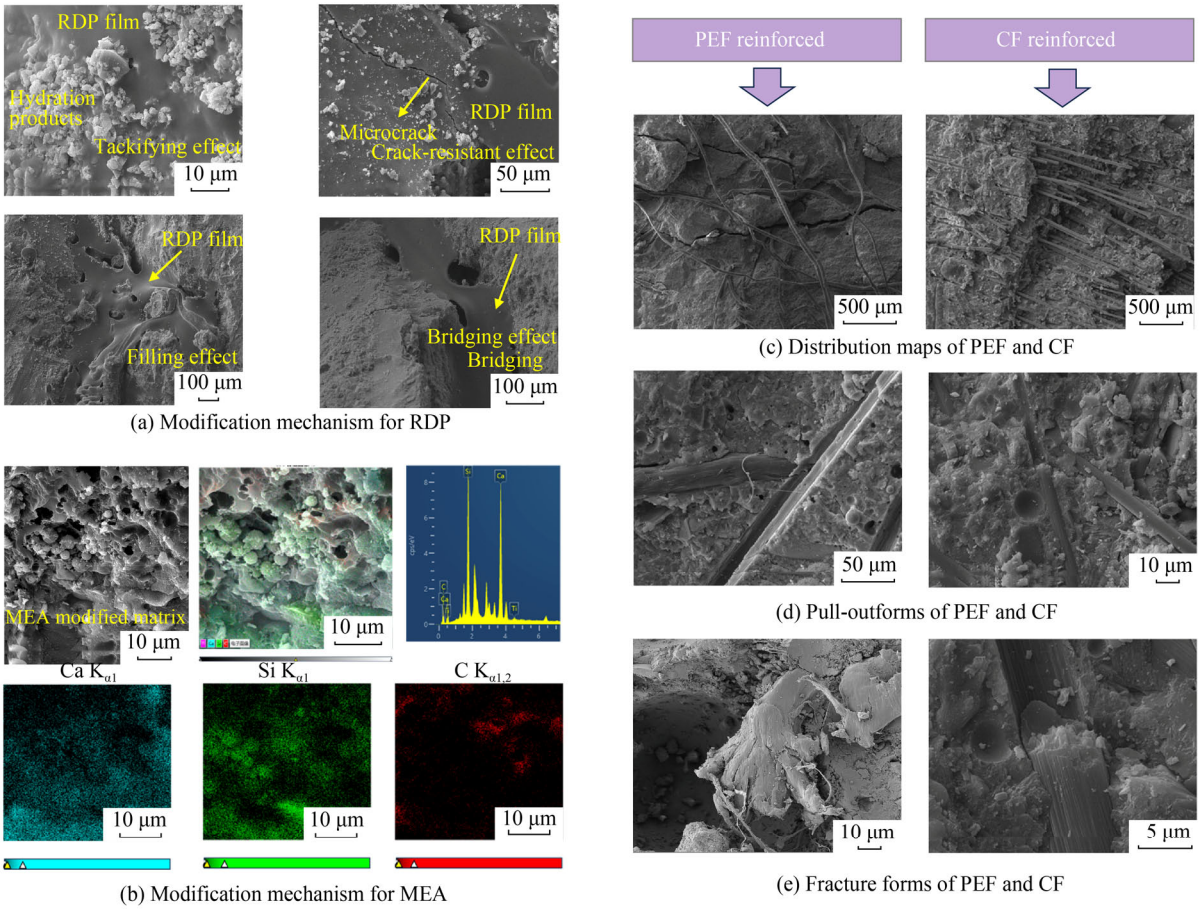


图 14 聚合物和非金属纤维对混凝土在真空暴露下的改性增强机理

Fig. 14 Modification and enhancement mechanism of polymers and non-metallic fibers on concrete under vacuum exposure

3 结论

1) VE 对混凝土的抗压强度有利，但对抗弯强度不利。相较 SC，对照组混凝土在 VE 下的抗压强度和抗弯强度分别增长 3.3%和下降 22.8%；聚合物–纤维改性混凝土的抗压强度增幅可达 6%~31%，而抗弯强度降幅为 9%~16%；改性混凝土在 VE 下的压缩韧性与弯曲韧性也明显提高，其中 RDP 与 PEF 的组合对力学性能的改善效果最佳，相较对照组的抗压能量吸收能力和抗弯能量吸收能力分别提高了 2 倍和 10 倍以上。

2) 声发射 *b* 值分析证实 VE 可使损伤预警时间缩短 20%~60%，RA-AF 关联特征显示剪切裂纹比例也会在破坏阶段显著增加，归因于纤维–基体界面粘结滑移行为加剧与 ITZ 微裂纹的扩展。

3) SEM 测试结果表明，VE 有助于 RDP/MEA 成膜，形成“刚性水泥石–柔性膜”互穿网络结构。柔性膜可以与水化产物紧密结合共同缓解内应力并抑制微裂纹扩展，PEF 则通过三维网状分布及滑移耗能机制显著提升混凝土的峰后韧性。CF 因其自身较低的断裂伸长率和较强的基体粘结作用易在拔出过程中脆断，使混凝土的韧性降低。

4) 聚合物与 PEF 联用可以兼顾混凝土的强度与韧性，两者“薄膜增韧–滑移耗能”的协同作用可以有效降低混凝土的脆性，提高其在真空环境下的服役性能。研究成果可为真空服役混凝土的设计及应用提供科学依据。

参考文献:

[1] 程冠之, 林红威, 李咏昊, 等. 涂层防护对低真空暴露混凝土性能的影响规律[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(5): 1133–1143.
CHENG Guanzhi, LIN Hongwei, LI Yonghao, et al. J Chin Ceram Soc, 2025, 53(5): 1133–1143.

[2] HU Z J, SHI T, CEN M Q, et al. Research progress on lunar and Martian concrete[J]. Constr Build Mater, 2022, 343: 128117.

[3] 常洪雷, 王晓龙, 郭政坤, 等. 低真空环境对硬化水泥浆体力学性能的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(4): 113–118.
CHANG Honglei, WANG Xiaolong, GUO Zhengkun, et al. Mater Rep, 2024, 38(4): 113–118.

[4] LIN H W, HAN S, HAN B, et al. Development of mechanical properties of concrete in vacuum tunnel of vacuum-based maglev train[J]. Constr Build Mater, 2024, 445: 137928.

[5] WANG X L, CHANG H L, LI S W, et al. Influence of low vacuum and high temperature condition on moisture transport and dry shrinkage of mature concrete[J]. J Build Eng, 2024, 95: 110262.

[6] SHANGGUAN M H, XIE Y J, XU S Q, et al. Mechanical properties characteristics of high strength concrete exposed to low vacuum environment[J]. J Build Eng, 2023, 63: 105438.

[7] CHANG H L, WANG X L, WANG Y F, et al. Influence of low vacuum condition on mechanical performance and microstructure of hardened cement paste at early age[J]. Constr Build Mater, 2022, 346: 128358.

[8] SHANGGUAN M H, XIE Y J, LONG G C, et al. Hydration and microstructure evolution of cement paste in low vacuum environments[J]. Constr Build Mater, 2024, 438: 137233.

[9] LONG G C, CHEN Y, TANG Z, et al. Drying shrinkage behavior of cement mortar under low vacuum conditions[J]. Constr Build Mater, 2023, 374: 130933.

[10] LONG Z F, LONG G C, CHEN Y, et al. Regulating drying shrinkage behavior of cement-based materials in low vacuum environments and developing a predictive model[J]. J Build Eng, 2025, 99: 111639.

[11] SHANGGUAN M H, XIE Y J, WANG F, et al. Effect of low-vacuum environment on the strength and permeability of cement-based materials[J]. Constr Build Mater, 2023, 400: 132676.

[12] LONG Z F, LONG G C, TANG Z, et al. Effects of aggregates and fibers on the strength and permeability of concrete exposed to low vacuum environment[J]. J Build Eng, 2024, 97: 110902.

[13] 陈月, 上官明辉, 龙广成, 等. 低真空环境下水泥砂浆干缩性能及机理研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7): 2530–2538.
CHEN Yue, SHANGGUAN Minghui, LONG Guangcheng, et al. J Railw Sci Eng, 2023, 20(7): 2530–2538.

[14] GONG J H, MA Y W, FU J Y, et al. Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review[J]. Compos Part B Eng, 2022, 241: 109995.

[15] TRAN N P, GUNASEKARA C, LAW D W, et al. A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials[J]. J Build Eng, 2021, 38: 102210.

[16] CAI F N, ZHOU D J, WEI J J, et al. Running magnetic resistance of high-T_c superconducting maglev prototype vehicle in an evacuated tube track[J]. Mech Syst Signal Process, 2022, 169: 108635.

[17] ZOLLO R F. Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development[J]. Cem Concr Compos, 1997, 19(2): 107–122.

[18] SHI X X, NING B K, LIU J P, et al. Effects of re-dispersible latex powder-basalt fibers on the properties and pore structure of lightweight foamed concrete[J]. J Build Eng, 2023, 75: 106984.

[19] LI G, ZHAO Y, PANG S S, et al. Experimental study of cement-asphalt emulsion composite[J]. Cem Concr Res, 1998, 28(5): 635–641.

[20] NIAZI Y, JALILI M. Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(3): 1338–1343.

[21] ZHANG S W, WANG R, ZHANG J L, et al. Enhancing toughness in cement-based composites: Unraveling the composite effect mechanisms of polymers and fibers through physic testing and molecular dynamics simulations[J]. Compos Part B Eng, 2024, 287: 111827.

[22] YANG K, LONG G C, TANG Z, et al. Insight into the flexural characteristics of rapid hardening ultra-high performance concrete (RH-UHPC) incorporating C-S-H seeds using acoustic emission technology[J]. Constr Build Mater, 2023, 408: 133632.

[23] XU X B, JIN Z Q, YU Y, et al. Damage source and its evolution of ultra-high performance concrete monitoring by digital image correlation and acoustic emission technologies[J]. J Build Eng, 2023, 65: 105734.

[24] YANG K, LONG G C, TANG Z, et al. Enhancing the flexural toughness of UHPC through flexible layer-modified aggregates: A novel interfacial toughening strategy[J]. Cem Concr Compos, 2024, 154: 105770.

[25] XU J, NIU X L, MA Q, et al. Mechanical properties and damage analysis of rubber cement mortar mixed with ceramic waste aggregate based on acoustic emission monitoring technology[J]. Constr Build Mater, 2021, 309: 125084.

[26] YAO X G, TAN L Z, XU T. Preparation, properties and compound modification mechanism of waterborne epoxy resin/styrene butadiene rubber latex modified emulsified asphalt[J]. Constr Build Mater, 2022, 318: 126178.

[27] 余睿, 范定强, 水中和, 等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1145–1154.
YU Rui, FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1145–1154.

[28] LI Y R, ZENG X H, SHI Y, et al. A comparative study on mechanical properties and environmental impact of UHPC with belite cement and Portland cement[J]. J Clean Prod, 2022, 380: 135003.

[29] WANG R, WANG P M. Action of redispersible vinyl acetate and versatate copolymer powder in cement mortar[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(11): 4210–4214.

[30] XIAO J J, JIANG W, YE W L, et al. Effect of cement and emulsified asphalt contents on the performance of cement-emulsified asphalt mixture[J]. Constr Build Mater, 2019, 220: 577–586.

[31] 张新艺. 超高速低真空管道磁浮系统预制板施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(24): 144–149.
ZHANG Xinyi. Constr Technol, 2024, 53(24): 144–149.

[32] BEHNIA A, CHAI H K, SHIOTANI T. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission[J]. Constr Build Mater, 2014, 65: 282–302.

[33] 王聚贤, 梁鹏, 张艳博, 等. 基于声发射RA-AF值与kneedle算法的岩石拉剪破裂分类研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增刊 1): 3267–3279.
WANG Juxian, LIANG Peng, ZHANG Yanbo, et al. Chin J Rock Mech Eng, 2024, 43(Suppl 1): 3267–3279.

[34] WEN J C, WAN Y, XU C W, et al. A review of new methods for measuring saturation of concrete and its impact on concrete properties[J]. J Build Eng, 2024, 96: 110664.

[35] ZUO S H, YUAN Q, HUANG T J, et al. Microstructural changes of

young cement paste due to moisture transfer at low air pressures[J]. Cem Concr Res, 2023, 164: 107061.
[36] GENG J S, SUN Q, ZHANG Y C, et al. Studying the dynamic damage failure of concrete based on acoustic emission[J]. Constr Build Mater, 2017, 149: 9–16.
[37] 黄虎, 刘赵涵, 邱庆明, 等. 基于声发射检测 CSG 材料损伤演变及裂纹识别[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(6): 565–572.
HUANG Hu, LIU Zhaohan, QIU Qingming, et al. J Build Mater, 2024, 27(6): 565–572.
[38] REN H L, LI T, NING J G, et al. Analysis of damage characteristics of steel fiber-reinforced concrete based on acoustic emission[J]. Eng Fail Anal, 2023, 148: 107166.
[39] ZHOU C S, ZHANG X Y, QIAO J, et al. The deformation of CSH gels and its link with dynamic length change of cement pastes upon drying and resaturation[J]. Cem Concr Res, 2025, 187: 107693.
[40] KNAPEN E, VAN G. Polymer film formation in cement mortars modified with water-soluble polymers[J]. Cem Concr Compos, 2015, 58: 23–28.

Effect of Vacuum Exposure on Mechanical Properties of Polymer-Fiber Modified Concrete

LONG Zhaofei[1], *LONG Guangcheng*[1], *HU Zhengyong*[2], *TANG Zhuo*[1], *ZHANG Yuting*[1], *FENG Jie*[1], *DU Hangyu*[1], *PENG Lei*[1], *JIANG Ding*[1]
(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Fengqiao Bridge Co., Ltd. of China Railway Sixth Group Co., Ltd., Beijing 10070, China)

Extended Abstract

Introduction Vacuum environment engineering has attracted significant attention due to its revolutionary applications in ultra-high-speed transportation, space technology, and frontier physics experiments. Concrete, as the most widely used construction material globally, remains an ideal choice for constructing ultra-high-speed vacuum pipelines and space bases. However, under harsh vacuum conditions, concrete faces severe challenges such as rapid dehydration, increased brittleness, drying shrinkage cracking, and reduced durability. To effectively enhance the vacuum service performance of concrete, this study designs a type of polymer-fiber modified concrete that leverages the film-forming toughening effects of polymers and the high strength and high elastic modulus characteristics of fibers to effectively mitigate the brittle behavior of concrete when exposed to vacuum. Utilizing acoustic emission techniques, the study examines how vacuum conditions, polymers, and fibers affect the mechanical properties of the modified concrete, further elucidating the underlying mechanisms with scanning electron microscopy (SEM) imaging.

Methods Based on the principles of dense particle packing and gradational hydration, a mix design was developed for the binder system (including cement, fly ash, slag, and silica fume). Redispersible latex powder (RDP) and styrene-butadiene latex-modified emulsified asphalt (MEA) were selected as the polymer modification materials, while ultra-high molecular weight polyethylene fibers (PEF) and carbon fibers (CF) were chosen as the fiber reinforcement materials. To balance the strength and toughness of the concrete, the polymer dosage was set at 3.5% by mass of the binder, and the fiber volume fraction at 0.8%. A polycarboxylate-based superplasticizer was used at 1.2% by mass of the binder to ensure the workability of the fresh paste. The concrete was mixed using a dual-axis horizontal mixer. Initially, the coarse and fine aggregates and binder were dry-mixed for 1 min, then water and superplasticizer were added and mixed for 1 min. Finally, the polymer and fibers were incorporated and mixed for an additional 2–3 min to produce a fresh paste. The specimens were cured under standard conditions for 28 days before being exposed to either atmospheric exposure (AE) or vacuum exposure (VE) conditions.

AE was conducted in an ambient pressure room maintained at a temperature of (20±2) ℃ and a relative humidity of 55%–65%. VE was simulated using a homemade vacuum chamber with a vacuum pressure of approximately 100 Pa, a relative humidity of <10%, and a temperature essentially identical to that of the AE environment. In accordance with GB/T 50081–2019 “Standard Test Methods for the Physical and Mechanical Properties of Concrete,” uniaxial compression tests and four-point bending tests were performed on specimens before and after exposure. Extensometers were used to record the axial and mid-span displacements of the specimens, and the corresponding stress–strain curves and load–displacement curves were plotted. During the mechanical performance tests, acoustic emission monitoring was conducted simultaneously. The mechanical damage characteristics of the concrete specimens were analyzed based on the acoustic emission signal intensity, *b*-value, and RA-AF plots. Finally, SEM was employed to observe the microstructure of the samples, revealing the degradation mechanism of concrete under vacuum exposure as well as the modification mechanism of the polymer-fiber combination.

Results and discussion VE is beneficial to the compressive strength of the concrete but detrimental to its bending strength. Compared with SC, the concrete in the control group under VE shows a 3.3% increase in compressive strength and a 22.8% decrease in flexural strength. For the polymer-fiber modified concrete, the compressive strength increased by 6%–31%, whereas the flexural strength decreased by 9%–16%. The modified concrete also exhibited significantly improved compression and flexural toughness under VE conditions. Notably, the combination of RDP and PEF yielded the greatest enhancement in mechanical properties, increasing compressive energy absorption capacity over two-fold and flexural energy absorption capacity more than ten-fold compared to the control group.

Acoustic emission test results indicate that VE can reduce the damage-warning time by approximately 40%. The RA-AF correlation features show that the proportion of shear cracks increases significantly during the failure stage, which is attributed to intensified fiber–matrix interfacial debonding and the propagation of microcracks in the interfacial transition zone (ITZ). SEM images revealed that vacuum exposure promotes RDP/MEA film formation, creating an interpenetrating network of rigid cement paste and flexible film. This film bonds strongly with hydration products, reducing internal stresses and preventing microcracks. Additionally, PEF enhances post-peak toughness through its three-dimensional network and sliding energy dissipation, while the low fracture elongation and strong matrix adhesion of CF lead to brittle pull-out, thereby reducing concrete toughness.

Conclusions The main conclusions of this paper are summarized as follows. The compressive and flexural toughness of the control group concrete under VE is significantly reduced, while modification with polymers and fibers can effectively avert this issue. Vacuum exposure enhances the film-forming effect of the polymer, effectively bridging hydration products and forming a high-toughness three-dimensional network structure together with the fibers, thereby inhibiting microcrack propagation. In particular, the combination of RDP and PEF exerts the optimal synergistic toughening effect, allowing the specimens to better retain their post-peak toughness. The synergistic mechanism of "film toughening–sliding energy dissipation" effectively reduces the brittleness of the concrete and improves its performance under vacuum conditions. These findings provide practical references for the optimized design of the new ultra-high-speed vacuum pipeline maglev transportation system as well as materials for deep space engineering.

Keywords concrete; vacuum exposure; polymer; fiber; acoustic emission