

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО РАСТВОРА, АРМИРОВАННОГО БАЗАЛЬТОВЫМ ВОЛОКНОМ, ОСНОВАННОЕ НА ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2020 г. Ван Ян^{1,*}, Ян Чао¹, Ван На¹, Чжан Тин Тин¹, Яо Фэй¹

¹Колледж гражданского и транспортного машиностроения, Университет Хохай, Нанкин, 210024, Китай
*E-mail: drwanghhu@126.com

Поступила в редакцию 15.12.2018; после доработки 01.06.2019

Принята к публикации 03.06.2019

Для исследования влияния базальтового волокна на процесс и механизм разрушения материалов на основе цемента при осевом сжатии были измерены сигналы акустической эмиссии (АЭ), связанные с цементным раствором, армированным базальтовым волокном (ЦРАБВ) с пятью значениями объемного содержания волокна (0 ~ 2,0 %) при осевом сжатии. Статистический анализ вейвлет-коэффициентов энергетического спектра и вейвлет-коэффициентов разложения проводился после шумоподавления до порогового значения и оценки шума исходных сигналов с помощью дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) на основе алгоритма Малла. Результаты показывают, что прочность на осевое сжатие и показатели акустической эмиссии уменьшаются с увеличением содержания волокна. В процессе разрушения ЦРАБВ при осевом сжатии основная полоса частот энергии концентрируется на полосах са7 (седьмой уровень разложения, 0 ~ 19,5 кГц), cd5 (пятый уровень разложения, 78 ~ 156 кГц) и cd4 (четвертый уровень разложения, 156 ~ 312,5 кГц), соответствующих вейвлет-разложению. Вейвлет-коэффициенты энергетического спектра полос са7 и cd4 показывают отчетливую периодичность, которую можно использовать для определения степени разрушения, в то время как внезапный рост по энергиям полосы cd6 может служить в качестве признака, предшествующего окончательному разрушению образца. Изменение вейвлет-коэффициента энергетического спектра полос са7 и cd4 можно использовать для оценки устойчивости базальтового волокна к трещинам. Соответственно значения вейвлет-коэффициентов разложения (в том числе и максимальные) могут быть использованы для определения степени разрушения. Статистический анализ вейвлет-коэффициентов энергетического спектра и вейвлет-коэффициентов разложения дает новаторскую идею для оценки внутреннего разрушения материалов на основе цемента.

Ключевые слова: цементный раствор, армированный базальтовым волокном, акустическая эмиссия, вейвлет-коэффициент энергетического спектра, вейвлет-коэффициент разложения, шумоподавление до порогового значения.

DOI: 10.31857/S013030822004003X

1. ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе цемента имеют недостатки, такие как низкая прочность на разрыв и плохая трещиностойкость [1]. Использование армирующего волокна для уменьшения вероятности образования трещин, повышения прочности и ударной вязкости является эффективным способом улучшения свойств материала [2—4], а базальтовое волокно является одним из новых высококачественных армирующих материалов [5]. Механические свойства бетона, армированного базальтовым волокном (БАБВ), зависят от длины, диаметра и содержания базальтового волокна [6]. Базальтовое волокно имело малое влияние на прочность при сжатии БАБВ [7, 8], но оно могло поглощать больше энергии (при окончательном разрушении материала), таким образом значительно улучшая ударную вязкость БАБВ [9, 10]. Ряд ученых высказались об эволюции и распространении трещин в материалах на основе цемента, армированного базальтовым волокном. Метод АЭ, как новый метод неразрушающего контроля [11], был применен для отслеживания эволюции разрушения армированных базальтовым волокном материалов [12]. На основе изучения характеристик АЭ материалов на основе цемента, армированных базальтовым волокном, во время испытаний на ударную вязкость при изгибе было обнаружено, что базальтовое волокно играет роль в подавлении или сдерживании образования и распространения трещин до первоначального растрескивания бетона [13, 14]. Нашей исследовательской группой была определена стадия разрушения раствора при осевом растяжении после анализа быстрым фурье-преобразованием спектра сигналов разрушения армированного полипропиленовым волокном цементного раствора при различных скоростях деформации с помощью полноволнового метода АЭ. Исходя из этого, механизмы разрушения армированного полипропиленовым волокном цементного раствора при осевом растяжении были предварительно проанализированы с использованием параметров энергетического спектра вейвлета полос cd7 и cd8 [15, 16]. Сигналы АЭ, связанные с развитием разрушений гетерогенных материалов, таких как материалы на основе цемента, являются неста-

ционными сигналами [17], а частотно-временные характеристики тесно связаны с внутренним разрушением материалов на основе цемента. Поэтому вейвлет-преобразование [18] подходит для анализа нестационарных сигналов АЭ [19—21].

На основе оценки шума и порогового шумоподавления исходного сигнала АЭ от ЦРАБВ с помощью дискретного вейвлет-преобразования был рассчитан вейвлет-коэффициент энергетического спектра в полосах $cd1 \sim cd7$ каждого сигнала на разных стадиях нагружения с помощью усовершенствованного метода статистического анализа. Изменение распределения частот и энергии во время нагрузки было проанализировано, чтобы найти основную энергетическую полосу частот и точно разграничить стадию разрушения, таким образом раскрывая механизмы разрушения ЦРАБВ и выдвигая разумную основу предвестника полного разрушения. После расчета максимального вейвлет-коэффициента разложения и ряда вейвлет-коэффициентов разложения каждой формы волны была проанализирована закономерность этих двух параметров на разных стадиях разрушения, что дает основу для определения степени разрушения ЦРАБВ.

2. ПРОЦЕДУРА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Подготовка образцов

Для сравнительных испытаний были разработаны образцы ЦРАБВ с пятью объемными содержаниями волокна, которые составляли 0, 0,5, 1, 1,5 и 2,0 %, а каждая группа содержала 5 образцов. Образцы, использованные в этой статье, приобретены из одной партии, и эксперимент должен был завершиться за короткое время, чтобы уменьшить ошибки, вызванные такими факторами, как возраст материала и образца.

Для приготовления образца для испытаний выбраны Портланд-цемент типа P.O.42.5 и чистый мелкий песок с модулем крупности 2,1 от компании Xiao Ye Tian из Нанкина. Средой для смеси была выбрана обычная вода с $pH = 7$. Образец в виде куба получали заливкой в форму в соответствии с соотношением смеси «цемент : песок : вода» = 1 : 2 : 0,5, размер образца составлял $100 \times 100 \times 100$ мм. Прочность на растяжение испытанного базальтового волокна составляла 1200 ~ 2200 МПа, длина — 18 мм, модуль упругости — 70 ГПа, а относительное удлинение при разрыве — 2,4 %.

2.2. Нагружающее устройство и система сбора данных АЭ

Нагружающей системой в эксперименте была управляемая электрогидравлическая для испытаний под давлением машина YAW4306 от компьютерной компании «Shanghai xinsansi», а новейшую систему PCI-2™, разработанную компанией PAC в США, использовали в качестве

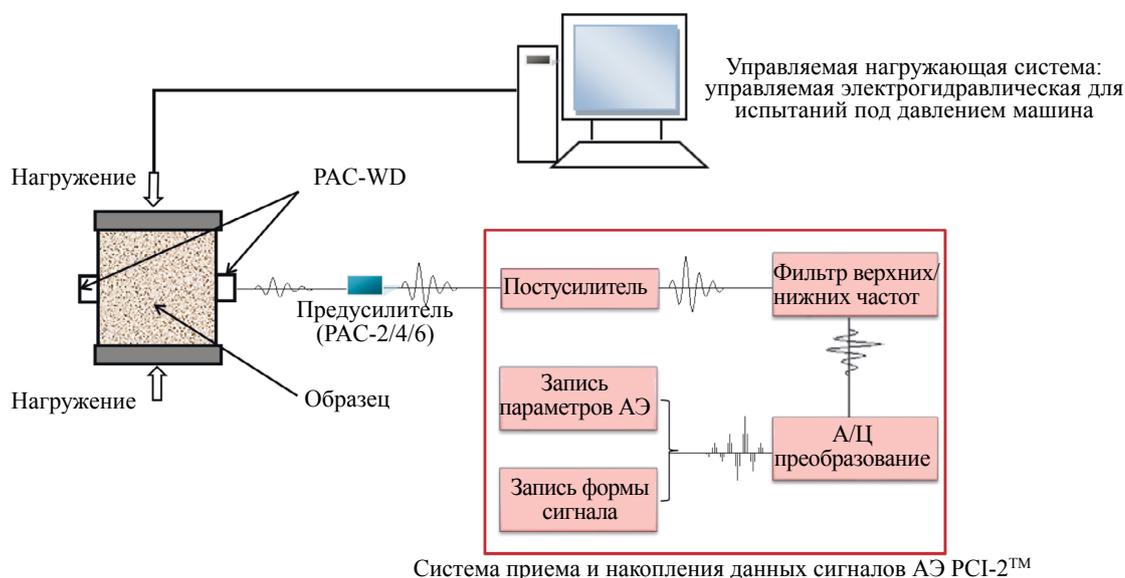


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

устройства получения сигнала АЭ. Эксперимент представлял собой статическое нагружение с регуляцией воздействия в соответствии со стандартом для метода испытаний основных свойств цементного раствора JGJ/T70-2009, скорость нагружения при этом испытании составляла 0,3 МПа/с. Время первичного получения сигнала АЭ соответствует времени начальной нагрузки механической системы. Когда нагрузка достигает пикового значения, электрогидравлический сервотестер давления автоматически прекращает нагрузку. Принципиальная схема всей экспериментальной установки и базовый принцип технологии измерения АЭ показаны на рис. 1.

Сигналы АЭ измеряли с помощью двух широкополосных датчиков АЭ (РАС-WD), которые имеют относительно плоскую амплитудно-частотную характеристику в диапазоне 100 ~ 1000 кГц, пиковая чувствительность датчика АЭ составляла 55 В/(м/с), внешние габариты были 18×20 мм, а предусилитель (модель: РАС-2/4/6) имел полосу пропускания 10 кГц ~ 2,0 МГц. В сочетании с характеристиками системы АЭ РСІ-2™ усиление сигналов составляло 40 дБ, а пороговый уровень был установлен на уровне 35 дБ, что могло эффективно устранить влияние шума. Частота дискретизации АЭ составляла 5 МГц, полоса пропускания фильтра — 1 кГц ~ 3 МГц, количество дискретных сигналов было 15360, а длительность сигнала составляла 3072 мкс.

3. ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ

3.1. Вейвлет-разложение и алгоритм восстановления, основанный на теории Малла

Согласно теории вейвлет-анализа Малла, сигнал раскладывается на составляющие разных частотных диапазонов на основе крупномасштабного анализа [19]. Дискретная последовательность представляет собой приблизительный сигнал на уровне 0, а уровень разложения равен J . $D_j f(n)$ — сигнал восстановления высокочастотной составляющей вейвлет-разложения с J -слоями, $A_j f(n)$ является сигналом восстановления низкочастотной компоненты, поэтому сигнал может быть описан как

$$f(n) = A_j f(n) + \sum_{j=1}^J D_j f(n). \quad (1)$$

Частота дискретизации в эксперименте записывается как $f_s = 5\,000$ кГц, сигнал разлагается на полосы частот $J + 1$ по шкале J , формула расчета для каждого диапазона частот выглядит следующим образом:

$$\left[0, \frac{f_s}{2^{j+1}} \right], \left[\frac{f_s}{2^{j+1}}, \frac{f_s}{2^j} \right], \quad (j = 1, 2, \dots, J). \quad (2)$$

В соответствии с правилами и опытом выбора базиса вейвлетов и расчет шкалы разложения в нашей предыдущей работе [22] было обнаружено, что выбор ортогонального базиса вейвлетов Coif5 и разложение формы волны АЭ по шкале 7 часто дают лучшие результаты. Высокочастотная составляющая записывается как «cd», а низкочастотная составляющая записывается как «са». В табл. 1 перечислены частотные диапазоны на каждом уровне разложения. Информация о расположении сигналов АЭ низкой частоты отражается компонентом более высокого уровня разложения, в то время как информация о расположении сигналов АЭ высокой частоты отражается компонентами более низкого уровня разложения.

Таблица 1

Частотный диапазон для каждого уровня

Уровни разложения	Частотный диапазон, кГц	Уровни разложения	Частотный диапазон, кГц
cd1	1250 ~ 2500	cd5	78 ~ 156
cd2	625 ~ 1250	cd6	39 ~ 78
cd3	312,5 ~ 625	cd7	19,5 ~ 39
cd4	156 ~ 312,5	ca7	0 ~ 19,5

Чтобы дополнительно выделить параметры энергетического спектра вейвлета сигналов АЭ и устранить помехи, вейвлет-коэффициенты энергетического спектра каждого уровня были

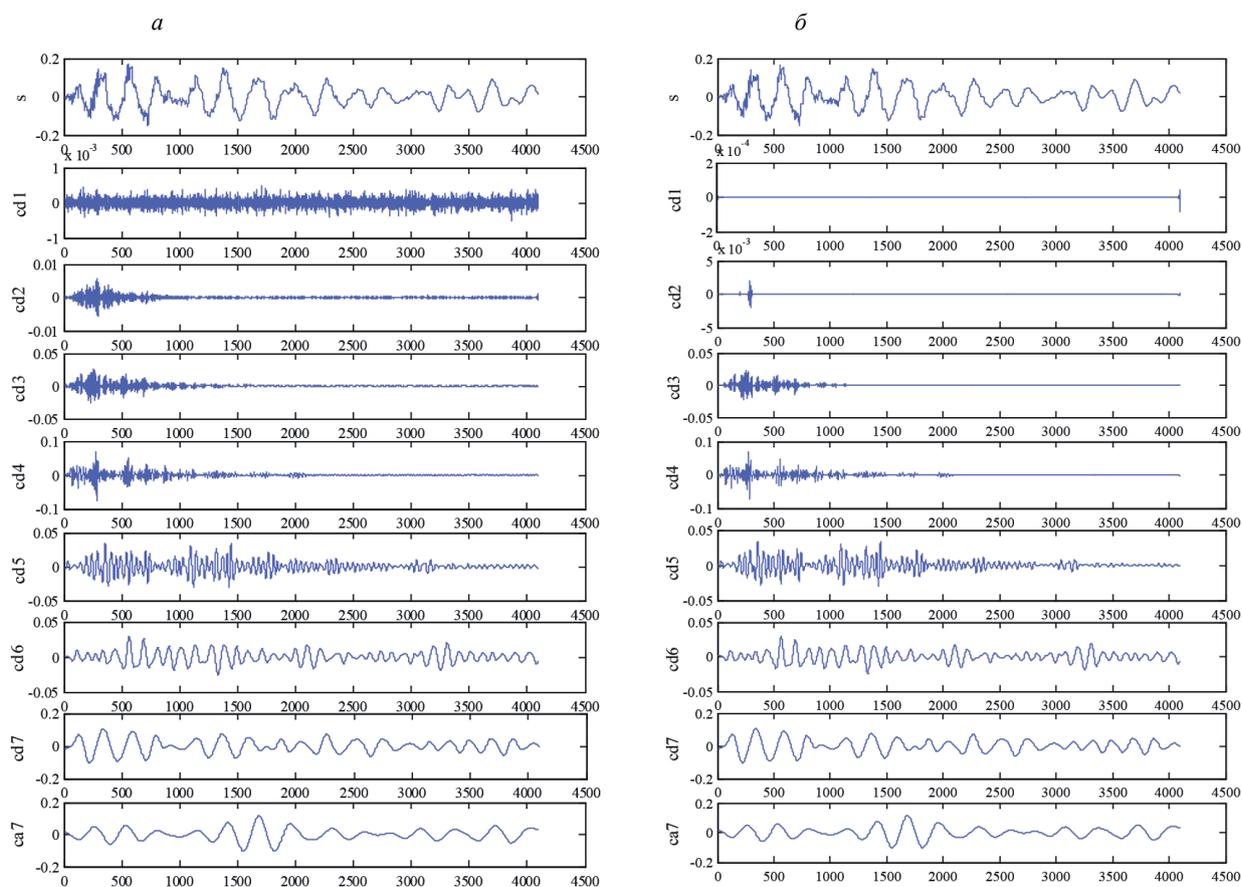


Рис. 2. Сигналы АЭ в каждом слое разложения: исходный сигнал (а); сигнал после шумоподавления (б).

разделены с помощью подавления шума. Влияние ряда эффективных методов шумоподавления [23], которые были применены к сигналам разрушения ЦРАБВ вследствие осевого сжатия, показаны на рис. 2. Основной характеристикой шума АЭ во временной области является случайное распределение во всем диапазоне времени выборки, и помехи обычно имеют высокую частоту. Хорошо видны сигналы в высокочастотных диапазонах $cd1$ и $cd2$, которые сильно отличаются от исходного сигнала, демонстрируют характерные особенности шума, и могут быть идентифицированы как шум. Кроме того, пороговое значение вейвлет-шумоподавления в основном ограничивает компоненты двух полос частот, что указывает на эффективность метода шумоподавления.

3.2. Статистический анализ вейвлет-коэффициента энергетического спектра и вейвлет-коэффициента разложения

Информация о распределении сигнала по разным уровням разложения может отражаться энергетическими характеристиками разных уровней разложения. Поэтому в этом разделе энергия каждого компонента вейвлет-разложения определяется в соответствии с формулой (3) [16], а $E_J^A f(n)$ и $E_J^D f(n)$ соотносятся с энергиями низкочастотного и высокочастотного сигналов шкалы разложения соответственно. $E f(n)$ представляет общую энергию сигнала, формула расчета которой показана в (4). Отношение энергии каждой составляющей разложения к общей энергии используется для описания распределения энергии сигнала в различных частотных диапазонах, соответствующих уровням разложения, и называются как вейвлет-коэффициенты энергетического спектра преобразования, которые записываются как rE_J^A и rE_J^D соответственно, которые рассчитываются по формуле (5). Физический смысл вейвлет-коэффициента энергетического спектра — это распределение энергии сигнала в каждой полосе частот вейвлет-преобразования:

$$\begin{cases} E_j^A f(n) = \sum_{n=1}^N (A_j f(n))^2 \\ E_j^D f(n) = \sum_{n=1}^N (D_j f(n))^2, \quad j = 1, 2, \dots, J \end{cases}; \quad (3)$$

$$Ef(n) = E_j^A f(n) + \sum_{j=1}^J E_j^D f(n); \quad (4)$$

$$rE_j^A = \frac{E_j^A f(n)}{Ef(n)}, \quad rE_j^D = \frac{E_j^D f(n)}{Ef(n)}, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (5)$$

Поскольку количество сигналов АЭ, генерируемых в течение всего процесса трещинообразования цементного раствора, огромно, этот процесс разделяется на 20 сегментов. MATLAB использовался для расчета среднего значения вейвлет-коэффициента спектра энергии для всех вейвлетов в каждом временном интервале.

Вейвлет-коэффициент разложения [24] можно понимать как корреляцию между базисной функцией вейвлета в разных уровнях и сигналом. Его величина представляет собой аппроксимацию базиса вейвлета к сигналу. Чем больше вейвлет-коэффициент разложения, тем более полная характеристика сигнала, которая, в основном, определяется по этим большим вейвлет-коэффициентам разложения. Произведение максимального вейвлет-коэффициента разложения и взвешенного коэффициента меньше 1 устанавливается в качестве порога для вейвлет-коэффициента разложения. Число вейвлет-коэффициентов разложения, превышающих этот порог, равно N , а максимальный вейвлет-коэффициент разложения записывается как C_{\max} . Аналитическая связь между ними показана в формуле (6). N — больше, что указывает на то, что характеристики сигнала в основном определяются большим вейвлет-коэффициентом разложения, а энергия более распродоточена:

$$C_{\max} \rightarrow N. \quad (6)$$

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Прочность на осевое сжатие и показатели АЭ

Три небольших образца были выбраны из каждой группы, на рис. 3 показано среднее значение прочности на осевое сжатие и совокупных сигнал АЭ каждой группы. Как можно видеть, при увеличении содержания волокна прочность на осевое сжатие ЦРАБВ уменьшается, а показатель снижения величины данного параметра увеличивается с 14 до 26 %. С одной стороны, как тип

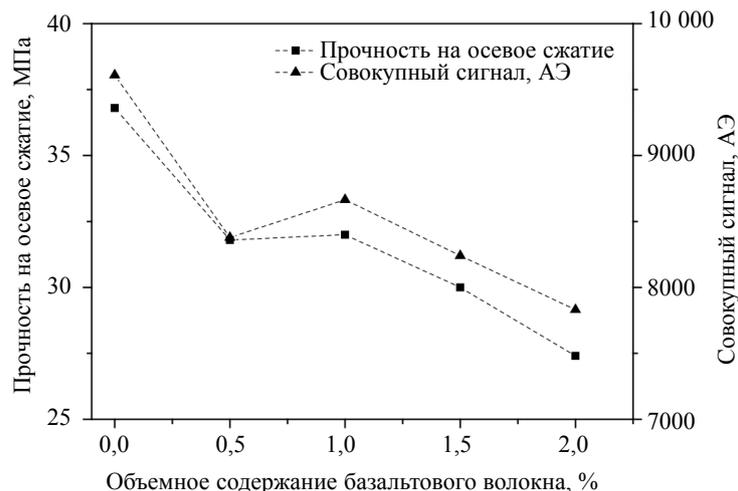


Рис. 3. Прочность на осевое сжатие и совокупный сигнал АЭ образцов ЦРАБВ с различным содержанием.

волокна с низким модулем упругости, базальтовое волокно может иметь ограничение, говоря о напряжениях в матрице, с другой стороны, внедрение избыточного количества волокна приводит к его агломерации, в результате разрушаются сами волокна. Следовательно, в исходном состоянии у строительного раствора увеличивается содержание пор, плотность раствора уменьшается, что приводит к уменьшению прочности на осевое сжатие.

Из рис. 3 также видно, что среднее значение совокупного сигнала АЭ в ЦРАБВ уменьшается на 10—19 % при увеличении содержания волокна. Совокупный сигнал АЭ является показателем АЭ. Следовательно, включение волокон снижает показатели АЭ раствора. Одна из причин разрушения заключается в том, что обычный раствор является более хрупким, чем ЦРАБВ [25], а другая — структура, образованная базальтовым волокном внутри раствора, имеет более однородное трехмерное разупорядоченное распределение [13], перекрывающее действие на трещины на поверхности раствора. Увеличение содержания волокна в единице объема приводит к большему поглощению кинетической энергии раствором, что снижает показатели АЭ.

4.2. Принцип изменения коэффициента спектра энергии вейвлет-преобразования АЭ в процессе трещинообразования ЦРАБВ

Как показано на рис. 4, распределение вейвлет-коэффициента спектра энергии образцов ЦРАБВ с различным объемным содержанием в основном одинаково в каждой полосе частот. Соответствующие полосы вейвлет-коэффициента спектра энергии от большого к малому: са7 (0 ~ 19,5 кГц), cd5 (78 ~ 156 кГц) и cd4 (156 ~ 312,5 кГц). Сумма вейвлет-коэффициента спектра энергии этих трех полос составляет около 76 ~ 80 %, то есть процент от полной энергии в этих трех полосах составляет около 76 ~ 80 %. Три полосы частот могут быть использованы в качестве основных полос частот энергии процесса трещинообразования, это означает, что большая часть информации о сигналах АЭ, генерируемых при разрушении раствора, передается полосами cd7, cd5 и cd4.



Рис. 4. Статистическая гистограмма вейвлет-коэффициента спектра энергии образцов ЦРАБВ с различным содержанием.

Была построена зависимость вейвлет-коэффициента энергетического спектра каждой полосы частот от степени нагружения. Установлено, что вейвлет-коэффициент энергетического спектра полос ca7 и cd4 демонстрирует некоторую периодичность. В этой статье процесс разрушения образцов BFRM при осевом сжатии разделен на четыре стадии А~D, как показано на рис. 5а, б.

Видно, что вейвлет-коэффициент энергетического спектра полосы ca7 уменьшается с увеличением степени нагружения на стадии А зажатия микротрещин, тогда как на полосе cd4 увеличивается с увеличением степени нагружения. На стадии В устойчивого развития разрушений корреляция изменения вейвлет-коэффициента энергетического спектра полос ca7 и cd4 со степенью нагружения заметно отличается от предыдущей стадии. Значения вейвлет-коэффициента энергетического спектра этих трех параметров в основном стабильны, так как полоса ca7 увеличивается с увеличением содержания волокна, а полоса cd4 уменьшается с увеличением содержания волокна. На стадии С ускоренного развития повреждений вейвлет-

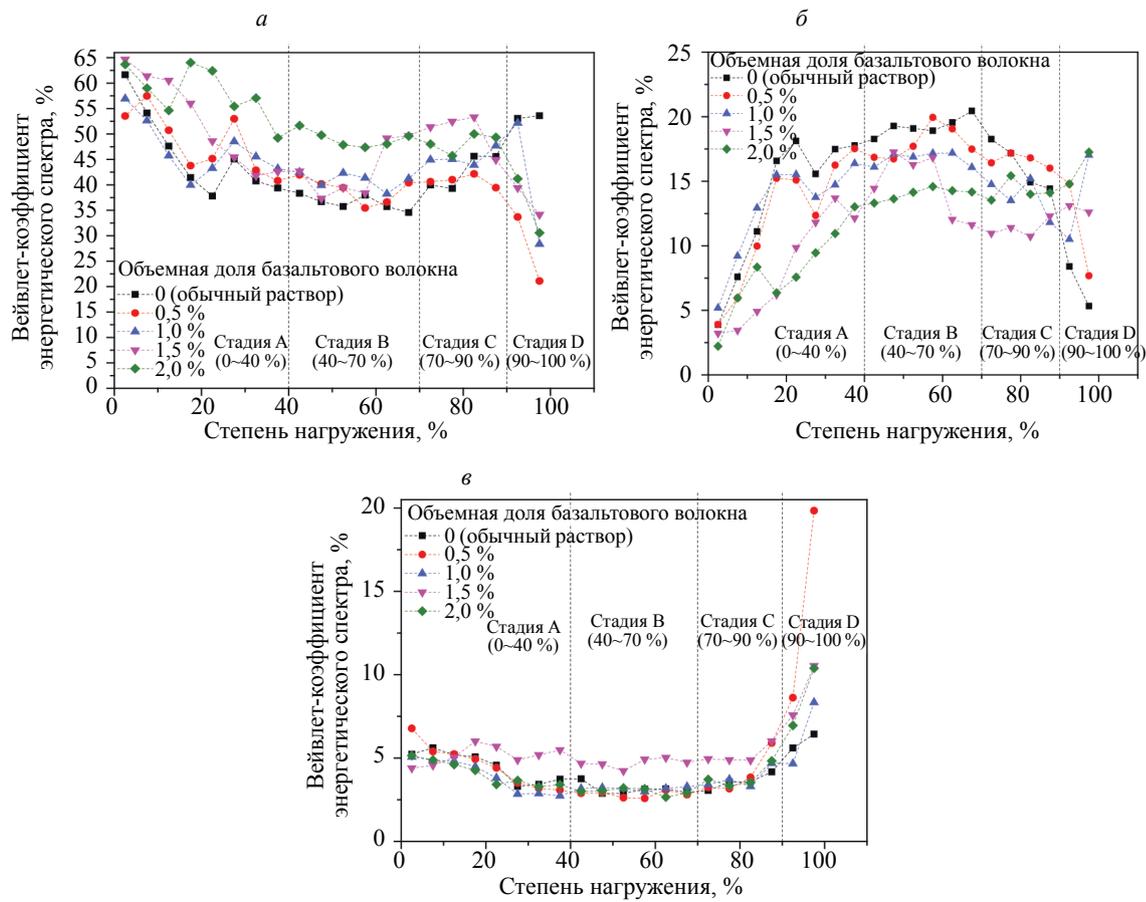


Рис. 5. Вейвлет-коэффициент спектра энергии ЦРАБВ с различным содержанием: полоса частот са7 (а); полоса частот cd4 (б); полоса частот cd6 (в).

коэффициент энергетического спектра полосы са7 увеличивается с увеличением степени нагружения, а полоса частот cd4 медленно уменьшается. Коэффициент вейвлет-энергетического спектра обычного раствора в полосе са7 выше, чем у армированного волокном раствора, а у полосы cd4 — наоборот. На стадии D растягивания и обрыва волокон вейвлет-коэффициент энергетического спектра обычного раствора увеличивается с увеличением степени нагружения в полосе са7, в то время как у ЦРАБВ имеется внезапное падение. Вейвлет-коэффициент энергетического спектра полосы cd4 обычно увеличивается с увеличением степени нагружения.

На рис. 5в показана диаграмма изменения вейвлет-коэффициента энергетического спектра полосы cd6 ЦРАБВ с различным содержанием по отношению к степени нагружения; можно отметить, что вейвлет-коэффициент энергетического спектра для каждого содержания волокна в полосе cd6 (39 ~ 78 кГц) на трех стадиях нагрузки А, В и С колеблется на уровне около 5 %, но его значение увеличивается до максимума на стадии D, что означает, что полоса cd6 демонстрирует большое преимущество при определении предвестников окончательного разрушения раствора, поэтому эта полоса может использоваться в качестве предвестника окончательного разрушения образца.

4.3. Статистический анализ вейвлет-коэффициента разложения

В соответствии с теорией вейвлет-коэффициентов разложения были рассчитаны C_{\max} и N для каждого сигнала в образцах обычного цементного раствора. Исходя из этого, на рис. 6 показан диапазон распределения C_{\max} и N всех сигналов на четырех стадиях от А до D. C_{\max} и N уменьшаются с ухудшением внутреннего состояния, что, в основном, проявляется в сокращении диапазона изменения для C_{\max} и N . Эта закономерность также встречается в ЦРАБВ с различными содержаниями, поэтому ее можно использовать для оценки степени разрушения раствора.

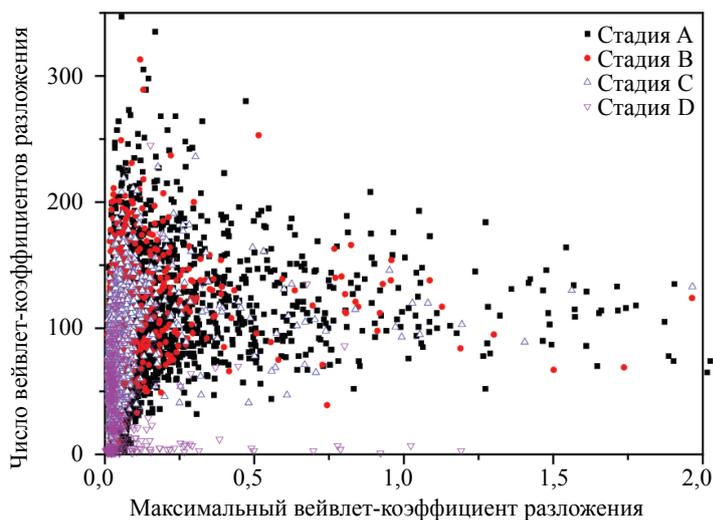


Рис. 6. Вейвлет-коэффициенты разложения АЭ раствора при различных стадиях нагружения.

На стадии D проявляется механизм вытягивания и разрушения волокна. Поэтому вейвлет-коэффициент разложения на стадии D выбирается в качестве статистического показателя для количественного анализа влияния волокна на степень разрушения раствора. На рис. 7 представлены результаты определения среднего значения C_{\max} и N для ЦРАБВ с различными объемными содержаниями на стадии D, что указывает на то, что среднее значение C_{\max} и N обычного раствора, очевидно, ниже, чем у армированного волокнами раствора.

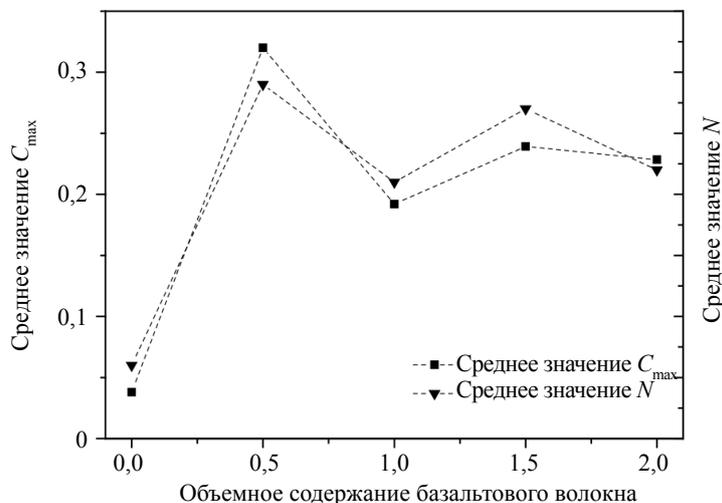


Рис. 7. Гистограмма средней величины C_{\max} и средней величины N .

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ коэффициентов энергетического спектра с вейвлет-преобразованием является отличным методом описания характеристик сигналов АЭ образцов ЦРАБВ в процессе их разрушения. Вейвлет-коэффициент энергетического спектра основных энергетических частотных полос диапазонов $sa7$ и $sd4$ демонстрирует заметную периодичность в процесса разрыва образца, что означает, что частотные характеристики сигналов АЭ тесно связаны с возникновением и развитием микротрещин. На стадии А внутренняя микроструктура изменялась из-за постепенного уплотнения первичных микропор и дефектов в образцах раствора под воздействием внешней силы, что приводило к появлению сигналов АЭ более низкой частоты полосы $sa7$ (0 ~ 19,5 кГц)

с увеличением степени разрушения. Однако возникновение и распространение микротрещин и расслоение волоконно-матричной структуры постоянно увеличивают сигналы АЭ более высокой частоты полосы cd_4 (156 ~ 312,5 кГц). Стабильное развитие нескольких вышеупомянутых типов разрушения на стадии В приводит к устойчивым колебаниям сигналов АЭ более низкой частоты (0 ~ 19,5 кГц) и более высокой частоты полосы cd_4 (156 ~ 312,5 кГц). На этой стадии базальтовое волокно начинает играть роль в подавлении возникновения и распространения микротрещин в цементном растворе. Чем выше содержание волокна, тем более очевиден эффект подавления развития трещин, который показывает, что вейвлет-коэффициент энергии спектра более высоких частотных полос уменьшается с увеличением содержания волокна. На стадии С микротрещины постепенно распространяются до краев образца в дополнение к продвижению в самой матрице, что вызывает увеличение макроскопических трещин на поверхности, в то время как распространение микротрещин постепенно ослабевает. Следовательно, низкочастотные (0~19,5кГц) сигналы АЭ показывают тенденцию к увеличению, в то время как более высокие частоты (156 ~ 312,5 кГц) сигналы АЭ постепенно уменьшаются. Однако влияние базальтового волокна на подавление развития макротрещин на данной стадии неочевидно, и его основная роль заключается в подавлении развития именно микротрещин. На стадии D особенности разрушения при растяжении волокна в ЦРАБВ делает развитие макроскопических трещин в строительном растворе, очевидно, в некоторой степени подавленным по сравнению с таковым у обычного строительного раствора. Следовательно, низкочастотные сигналы армированного строительного раствора имеют резкую тенденцию к снижению, что указывает на то, что базальтовое волокно значительно улучшает пластичность и трещиностойкость раствора на этой стадии.

C_{max} и N уменьшаются при увеличении степени разрушения, то есть статистический анализ вейвлет-коэффициента разложения может использоваться для определения степени повреждения раствора при осевом сжатии. Это показывает, что базальтовое волокно улучшает пластичность и трещиностойкость раствора на заключительной стадии разрушения. Кроме того, содержание волокна 0,5 % значительно повышает пластичность и трещиностойкость раствора.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были измерены сигналы АЭ, связанные с образцами ЦРАБВ с пятью объемными содержаниями базальтового волокна (0 ~ 2,0 %) во время процесса разрушения при осевом сжатии. Статистический анализ распределения энергии сигнала в каждой полосе частот был основан на разложении и подавлении шума исходного сигнала с помощью вейвлет-анализа АЭ. Результаты показывают:

1. Прочность на сжатие образцов растворов уменьшается с увеличением содержания базальтового волокна, относительное уменьшение прочности составляет около 19 %. Более того, совокупный сигнал АЭ уменьшается с увеличением содержания волокон в процессе их разрыва, снижение составляет около 26 %. Это показывает, что осевая прочность на сжатие раствора не может быть значительно улучшена, когда содержание волокна изменяется от 0,5 до 2 %, и показатели АЭ также снижаются.

2. Энергия ЦРАБВ с различным объемным содержанием концентрируется в диапазонах sa_7 (0 ~ 19,5 кГц), cd_5 (78 ~ 156 кГц), cd_4 (156 ~ 312,5 кГц), соответствующих вейвлет-преобразованию в процессе их разрушения, и в процентном соотношении суммарная энергия этих трех полос частот составляет 76 ~ 80 %, что может быть использовано в качестве основных полос частот энергии процесса разрушения.

3. Вейвлет-коэффициент энергетического спектра полос sa_7 и cd_4 демонстрирует заметную периодичность в течение всего процесса разрушения при осевом сжатии ЦРАБВ, которые можно использовать в качестве характеристических параметров для определения степени повреждения, в то время как внезапное увеличение частоты полосы cd_6 может быть использован в качестве предвестника, чтобы судить об окончательном разрушении образца.

4. Эти два параметра C_{max} и N можно использовать для определения степени разрушения. В них заложен большой потенциал для изучения оптимального содержания волокон в армированном растворе.

Работа была поддержана Фондом фундаментальных исследований для центральных университетов (№ 2019B13114).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shen Rongxi, Cui Qi, Li Qinghai. New fiber reinforced cementitious composites / China Architecture & Building Press, 2004.

2. *Huang T., Zhang Y.X., Su C.* et al. Effect of Slip-Hardening Interface Behavior on Fiber Rupture and Crack Bridging in Fiber-Reinforced Cementitious Composites // *Journal of Engineering Mechanics*. 2015. V. 141. № 10. P. 04015035.
3. *Soulioti D., Barkoula N.M., Paipetis A.* et al. Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending // *Construction & Building Materials*. 2009. V. 23. № 12. P.3532—3536.
4. *Rudresh B.M., Kumar B.N.R., Lingesh B.V.* Fibrization Effect on the Mechanical Behavior of PA66/PTFE Blend Based Fibrous Composites // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2017. V. 70. № 10. P. 2683—2694.
5. *Zhao Y.R., Wang L., Lei Z.K.* et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of the basalt fiber reinforced concrete after the freeze-thaw based on the digital image correlation method // *Construction & Building Materials*. 2017. V. 147. P. 194—202.
6. *Dias D.P., Thaumaturgo C.* Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers // *Cement & Concrete Composites*. 2005. V. 27. № 1. P. 49—54.
7. *Dong J.Q.* Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete at Low Cycle Impact // *Applied Mechanics & Materials*. 2012. V. 174—177. P. 1524—1527.
8. *Sadrnometazi A., Tahmouresi B., Saradar A.* Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC) // *Construction & Building Materials*. 2018. V. 162. P. 321—333.
9. *Demirci M.T., Tarakçioğlu N., Avcı A.* et al. Fracture toughness (Mode I) characterization of SiO₂ nanoparticle filled basalt/epoxy filament wound composite ring with split-disk test method // *Composites Part B Engineering*. 2017. V. 119. P. 114—124.
10. *Zhang H., Wang B., Xie A.Y.* et al. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete // *Construction & Building Materials*. 2017. V. 152. P. 154—167.
11. *Yun H.D., Choi W.C., Seo S.Y.* Acoustic emission activities and damage evaluation of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets // *Ndt & E International*. 2010. V. 43. № 7. P. 615—628.
12. *Wang Y., Chen S.J., Xu Z.Z.* et al. Damage Processes of Steel Fiber Reinforced Mortar in Different Fiber Content Revealed by Acoustic Emission Behavior // *Journal of Wuhan University of Technology*. 2018. V. 54. № 1. P. 55—64.
13. *Dan L.I., Jun-Lin T., Ning W.* et al. Research on Acoustic Emission Characteristics for Basalt Fiber Reinforced Concrete During Flexural Impact Tests // *Journal of Wuhan University of Technology*. 2013. V. 35. № 4. P. 84—89.
14. *Kencanawati N.N., Shigeishi M.* Acoustic Emission Hit Generation Behavior of Basalt Fiber High Strength Mortar under Compression // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 493. P. 678—683.
15. *Yan W., Jie C.S., Lu G.* et al. Characterization of the Damage Process of Polypropylene Fiber Mortar at Medium Loading Rate by the Full Wave Acoustic Emission Technique // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. № 6. P. 430—442.
16. *Yan W., Jie C.S., Li Z., Zhi C.Y., Xiang H.H., Lu G.* Full curve damage process of polypropylene fiber reinforced mortars under dynamic tensile loading based on acoustic emission technique // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. № 7. P. 495—509.
17. *Hunzeker John T.* Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data and experimental investigations on Non-Linear Slow Dynamics of Damaged Materials // *Mechanical Systems & Signal Processing*. 2008. V. 22. № 6. P. 1441—1464.
18. *Zhao L., Kang L.* et al. Research and Application of Acoustic Emission Signal Processing Technology // *IEEE ACCESS*. 2019. № 7. P. 984—993.
19. *Liu X., Liang Z., Zhang Y.* et al. Acoustic Emission Signal Recognition of Different Rocks Using Wavelet Transform and Artificial Neural Network // *Shock and Vibration*. 2015. P. 846308 (1—14).
20. *Stepanova L.N., Petrova E.S., Chernova V.V.* Strength Tests of a CFRP Spar Using Methods of Acoustic Emission and Tensometry // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. № 4. P. 243—248.
21. *Rinkevich A.B., Perov D.V.* A Wavelet Analysis of Acoustic Fields and Signals in Ultrasonic Nondestructive Testing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2005. V. 41. № 2. P. 93—101.
22. *Wang Y., Chen S.J., Liu S.J.* et al. Best wavelet basis for wavelet transforms in acoustic emission signals of concrete damage process // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52. № 3. P. 125—133.
23. *Wang Y., Chen S.J., Ge L.* et al. The optimal wavelet threshold de-noising method for acoustic emission signals during the medium strain rate damage process of concrete // *Nondestructive Testing & Evaluation*. 2017. V. 32. № 4. P. 400—417.
24. *Baccar D., Söffker D.* Identification and classification of failure modes in laminated composites by using a multivariate statistical analysis of wavelet coefficients // *Mechanical Systems & Signal Processing*. 2017. V. 96. P. 77—87.
25. *Xie T.* et al. Acoustic Emission Characteristics of Rock Failure under Uniaxial Loading // *Advanced Materials Research*. 2012. V. 378—379. P. 43—46.