УДК622.235

В.Н.АНИСИМОВ
Московский государственный горный университет, Россия

ДЕСТРУКЦИЯ КВАРЦСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД ПРИ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И УПРУГИХ ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Приведены результаты исследования механизма деструкции кварцсодержащих пород (железистых кварцитов) в сильных высокоградиентных импульсных магнитных полях. Рассмотрена модель и механизм перемещения зерен магнетита в немагнитной кварцевой матрице под действием упругого импульсного воздействия и одновременного сильного импульсного магнитного поля с последующим процессом деструкции и деспергации, сопровождающегося развитием микротрещин по границам зерен минералов. Приведены результаты экспериментальных исследований деструкции.

Results of research of the mechanism destruczie quartz containing breeds in strong high gradient pulse magnetic fields are resulted. The model and the mechanism of moving of grains magnetite in not magnetic quartz matrix under action of elastic pulse influence and a simultaneous strong pulse magnetic field with the subsequent process destruczie and dispergazie, accompanying with development of microcracks on borders of grains of minerals is considered. Results of experimental researches destruczie are resulted.

Известно, что в объеме материала, подвергнутом процессу перемагничивания, при определенных условиях могут возникать магнитоэлектрические (пьезомагнитострикционные), термомагнитоупругие и другие эффекты вследствие изменения магнитного состояния внутренней магнитной энергии с выделением тепла и преобразованием в механические напряжения по границам разнородных минералов.

Если твердый материал представлен, например, железистыми кварцитами, сущность ослабления межзерновых связей в них при воздействии динамических волновых воздействий можно представить следующим образом.

На ферромагнитную частицу, помещенную в импульсное электромагнитное поле высокой интенсивности, действуют силы, обусловленные с одной стороны величиной индукции B, и с другой – неоднородностью поля, определяемые, главным образом, градиентом напряженности магнитного поля. Основные силы, действующие на частицу, следующие: магнитная сила, обусловленная притяжением частицы магнитным полем; сила, вызванная магнитострикцией ферромагнетика; пондеромоторная сила, обусловленная взаимодействием токов, образующихся в слоях ферромагнитных частиц, и др.

При напряженности поля порядка 107 А/м, градиенте напряженности 108 А/м, например, длительности импульса 10^{-2}-10^{-8} с напряжения, возникающие вследствие магнитострикции магнетита, достигают 4 МПа. Напряжения, возникающие за счет пондеромоторной силы, достигают 50 МПа.

Известно, что прочность на разрыв железистых кварцитов составляет 18 МПа. Железистые кварциты при воздействии только импульсного электромагнитного поля не испытывают достаточных растягивающих напряжений σE для образования сети микротрещин по границам зерен. Как показали исследования, это происходит при совместном воздействии σE при импульсных электромагнитных волнах и при создании растягивающих напряжений σy, возни-

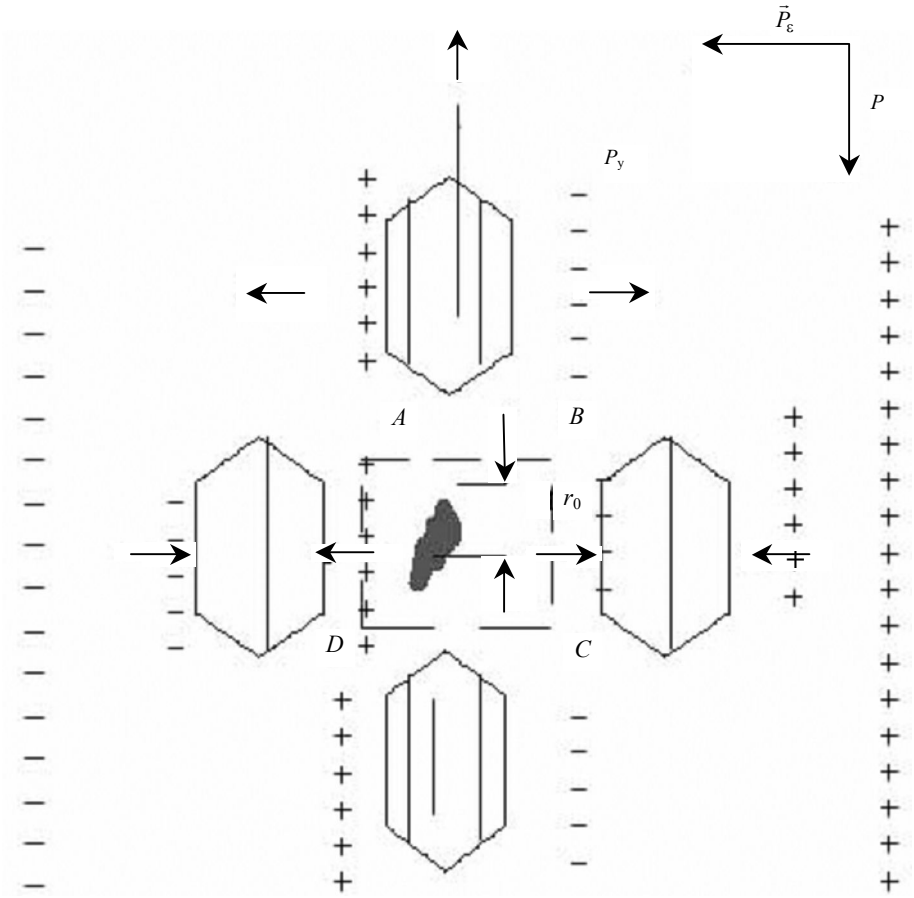


Рис.1. Схема взаимодействия электромагнитных сил в пьезоэлектрической текстуированной среде

кающих при прохождении упругих волн напряжения (ударных механических нагрузок, в том числе и от взрыва различных зарядов ВВ).

Рассмотрим в качестве примера массив железистых кварцитов.

Механизм формирования железистых кварцитов в условиях динамометаморфизма, т.е. под действием ориентированных давлений и температур, сопряжен с образованием пространственно ориентированных текстур. Высокий пьезоэлектрический, магнитострикционный, магнитоэлектрический и другие эффекты, реализующиеся в кварцитах, обусловлены их генезисом и закономерной ориентацией и чередованием упругоанизотропных зерен кварца и зерен магнетита в пространстве [1-4].

Рассмотрим механизм деформирования и разрушения кварцитов. Кварциты обладают пьезоэлектрической текстурой самого низшего ранга, т.е. имеют ось симметрии бесконечного порядка и перпендикулярную к ней плоскость симметрии с зеркально отраженной пространственной ориентацией зерен кварца.

Фрагмент такой структуры представлен на рис.1. Рассмотрим межкристаллическую условно изотропно-упругую среду, содержащую зерна магнетита. Модель предполагает наличие в ней микротрещин как зародышей микротрещиноватости, способствующей «раскрытию» зерен магнетита, так как под воздействием упругих и электромагнитных волн возникает микротрещиноватость в среде, где ориентированные зерна кварца обладают соответствующими пьезоэлектрическими свойствами.

Условие взаимодействия импульса электромагнитного поля $\vec{P}$ с упругим импульсом (в том числе с импульсом взрывной ударной волны) представим в виде

$$\Delta t_P \to \vec{P}\Delta t_{\text{у}}.$$

Эффект воздействия электромагнитного импульса происходит в течение отрезка времени $\Delta t_{\text{у}}$ упругого механического воздействия на среду (технологически предполагается некоторая временная задержка Δt_P генерации импульса электромагнитного поля).

С помощью этого условия возможно предположить суммарный эффект воздействия упругого и электромагнитных полей на процесс деструкции межкристаллической среды (межкварцевого заполнителя).

Допустим, что вектор распространения продольной волны нормален к $\vec{P}_{\text{у}}$ вектору импульса электрического поля $\vec{P}_{\varepsilon}$ (рис.1). Рассмотрим элемент объема межкристаллического заполнителя с сечением *ABCD* и внутренним дефектом в виде зародышевой микротрещины.

Как известно, размер трещины с радиусом r_0 определяется закаченной в выделенный элемент объема энергии

$$P = \gamma\pi r_0^2,$$

где γ – удельная энергия образования единицы свободной поверхности, В·А/м^2. В феноменологическом приближении задача сводится к расчету энергии, закачиваемой в элемент объема непосредственно упругой и электромагнитной волнами в P_{Σ}. В свою очередь, электромагнитная волна трансформируется в упругую за счет механоэлектрических, магнитоэлектрических, пондеромоторных, магнитострикционных сил. Тогда

$$P_{\Sigma} \approx \Sigma(P_y + P_{\varepsilon}).$$

В первом приближении без учета влияния температуры (в данном случае рассматриваются достаточно малые промежутки времени) возможный размер микротрещины

$$r_0 = \left[\frac{(\vec{P}_y + \vec{P}_{\varepsilon})}{\gamma\pi}\right]^{1/2},$$

где $\vec{P}_y$ – энергия электромагнитного поля, трансформируемая в упругую энергию в элементе объема, или

$$\vec{P} = \vec{H}\cdot\vec{E};\ \ \vec{\text{H}} = \frac{\vec{\text{B}}}{\mu};\ \ \vec{P} = \frac{\vec{B}}{\mu}\vec{E},$$

где $\vec{B}$, $\vec{H}$, μ – соответственно индукция, напряженность магнитного поля, магнитная проницаемость среды. Для изотропной однородной среды (кварца):

$$\text{grad}\,\vec{P} = \frac{dP}{dr} = 2\gamma\pi r_0.$$

Согласно 1-му уравнению Максвелла

$$\text{rot}\,\vec{H} = \vec{\delta} + \varepsilon_a\frac{d\vec{E}_{\Sigma}}{dt},$$

где δ – плотность тока проводимости; $\varepsilon_a\frac{d\vec{E}_{\Sigma}}{dt}$ – плотность тока электрического смещения (в кварцевой матрице при изменении напряженности электрического поля).

Согласно 2-му уравнению Максвелла

$$\text{rot}\,\vec{E}_{\Sigma} = -\frac{d\vec{B}}{dt},$$

где $\frac{d\vec{B}}{dt}$ – изменение магнитного поля во времени, вызывающего вихревое электрическое поле

$$\text{rot}\,\vec{H} = \delta + \frac{d\vec{D}}{dt},$$

$\vec{D}$ – индукция электрического поля.

Для анизотропной среды:

$$\mu = \begin{vmatrix} \mu_{a11} & \mu_{a12} & \mu_{a1n} \\ \mu_{a21} & \mu_{a22} & \mu_{a2n} \\ \mu_{an1} & \mu_{an2} & \mu_{an} \end{vmatrix}.$$

Тогда энергия в объеме dV

$$\left(\frac{\varepsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2}\right)dV.$$

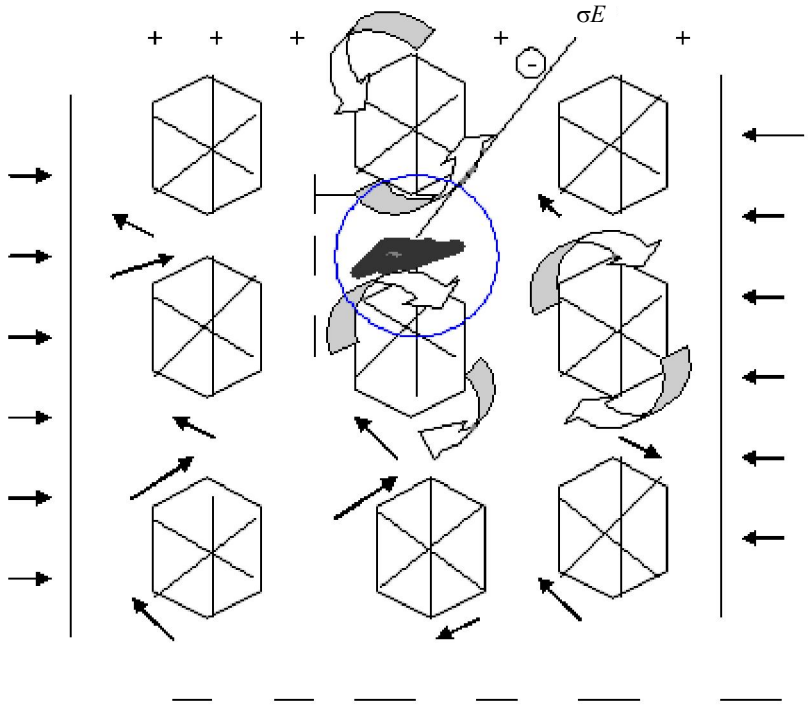


Рис.2. Диспергация в условиях негидрастатического сложнонапряженного состояния

Так, для кристалла кварца (для кристалла магнетита в кварцевой матрице производится соответствующая оценка), возбужденного внешним электромагнитным импульсом, соотношение между энергией внешнего электрического поля и энергией упругого деформирования определяется коэффициентом электромеханической связи и соответствует максимальной величине для кристалла SiO_2:

$$K_E = \frac{P_y}{P_E} = \pi\,; \quad d_{11}^2 \frac{C_{66}}{\varepsilon} \approx 0{,}02\,,$$

где d_{11}^2 – пьезоэлектрический модуль; C_{66} – упругая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость [3].

Анализ электромагнитного взаимодействия в вершине микротрещины выглядит следующим образом. Выделяют зону концентрации механических напряжений (один из вариантов концентрации напряжений в результате возникновения заряженных поверхностей субмикротрещин) (рис.2). Дипольное взаимодействие расходящихся берегов субмикротрещин с внешним электромагнитным импульсом (рис.3) может приводить к электрическому ослаблению «электростатического» взаимодействия растущих субмикротрещин:

$$K_0 = \frac{E_{\text{â}}}{E_{\varepsilon} + E_{\text{ñò}}}\,,$$

где $E_{\text{в}}$ – напряженность внешнего электромагнитного импульса; $E_{\text{ст}}$ – напряженность электростатического поля на берегах субмикротрещин.

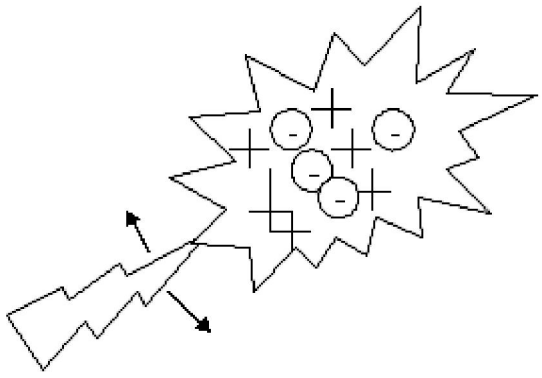


Рис.3. Дипольное взаимодействие расходящихся берегов заряженных поверхностей субмикротрещин под воздействием внешнего электромагнитного импульса и механического напряжения

Условие распространения субмикротрещин запишем в виде

$$\varepsilon E_{\text{ñò}} = \vec{D}\,.$$

Эксперименты по изучению электромагнитного поля при разрушении образцов горных пород под прессом дают значение порядка 103-4 В/см. При диэлектрической проницаемости горных пород (ε = 8-10) условие разрушения

$$E_{\text{в}} \geq 10^5 \text{ В/см}.$$

Условие справедливо также и при корректировке расчетов напряжений, возникающих при магнитоэлектрических эффектах (магнитострикционных, магнитотермоупругих и др.).

Процесс деструкции горных пород как поликристаллических систем под воздействием упругих волн (в том числе при массовых взрывах зарядов ВВ) сопровождается генерацией электромагнитных импульсов, возникающих при деструкции кристаллических решеток породообразующих минералов. При наложении внешнего электромагнитного импульса с вектором напряженности, противоположным вектору электростатического поля, внутри субмикротрещин возникает дополнительное усилие электростатического взаимодействия, которое суммируется с магнитоэлектрическим. Эти взаимодействия способствуют более интенсивному росту субмикротрещин в поликристаллической среде, что подтверждается и экспериментальными данными.

Объектом исследований являлись образцы железистых кварцитов Лебединского месторождения КМА, форма образцов – цилиндрическая, образцы выпиливались из керна, диаметр исходного керна – 42 мм, керны отобраны при разведочном бурении из массивов, не подверженных массовым взрывам, высота образцов 40 мм, фазовый состав образцов Fe_3O_4 + кварц + амфибол с незначительной разницей в соотношениях в каждой из партий образцов.

Образцы готовились для нагружения импульсным магнитным полем, которое создавалось током в магнитном контуре порядка 200 кА. При этом характерное значение индукции составляло 0,3-1 Тл.

Образцы до нагружения воздействием импульсного магнитного поля высушивались, затем производилось измерение сопротивления мегомметром Е6-16 при зондирующем напряжении 500 В. Методикой исследований предусматривалось: проведение неразрушающих методов контроля образцов, измерение удельного сопротивления образцов до и после их обработки импульсным магнитным полем, проведение неразрушающей ультразвуковой диагностики образца железистых кварцитов до и после воздействия импульсным магнитным полем.

Впервые для исследования образцов железистых кварцитов была применена лазерно-ультразвуковая иммерсионная методика с лазерным источником ультразвука, разработанная в МГГУ на кафедре акустики. Измерения были проведены в режиме проходящих волн на образцах до и после обработки импульсным магнитным полем.

В результате проведенных исследований, задачей которых являлось определение параметров динамических волновых воздействий для деструкции железистых кварцитов, еще на стадии БВР удалось установить следующее.

Образцы железистых кварцитов, обработанные высокоградиентным импульсным магнитным полем (с учетом анизотропии, структурно-текстурных особенностей), подверглись сильным изменениям. Это отразилось в уменьшении скорости звука и увеличении коэффициента затухания на всем частотном диапазоне исследований; кроме того, уровень структурного шума возрос в 2-3 раза, что явилось следствием увеличения микротрещиноватости по межзерновым границам после воздействия импульсного магнитного поля.

Впервые установлено, что удельное сопротивление образцов железистых кварцитов после воздействия на них высокоградиентного импульсного магнитного поля уменьшается в 3-4 раза по сравнению с удельным сопротивлением до воздействия импульсного поля (например, для образцов высотой и

диаметром 42 мм до воздействия удельное сопротивление составляло 540 кОм·м, после воздействия даже трех импульсов (длительность импульса магнитного поля – полусинусоида 200-250 мкс, выход на максимум 90-120 мкс) удельное сопротивление уменьшилось до 0,1 кОм·м.

Выводы

Результаты исследований позволяют отметить перспективность разработки нового направления предварительных и одновременных высокоградиентных импульсных динамических волновых воздействий на массивы и могут быть использованы: в геофизике при сейсмо- и электроразведке, при глубинном зондировании недр; в процессах рудоподготовки трудновзрываемых и труднообогатимых руд еще на стадии БВР; при разработке новых методов и технических средств, при бурении массивов; при проходке горных выработок в плотных трудновзрываемых массивах горных пород; при разработке новых высокоэффективных безопасных методов взрывания и инициирования зарядов ВВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анисимов В.Н.* Концепция малооперационной ресурсосберегающей технологии взрывной рудоподготовки железистых кварцитов с применением дополнительных импульсных волновых воздействий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 7.

2. *Анисимов В.Н.* К концепции малооперационной ресурсосберегающей технологии взрывной рудоподготовки железистых кварцитов при различных динамических волновых воздействиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 11.

3. *Ревнивцев В.И.* О радикальной организации процесса раскрытия минералов в соответствии с современными представлениями физики твердого тела // Труды «Механобра». 1975. Вып.140.

4. *Соболев Г.А.* Механоэлектрические явления в земле / Г.А.Соболев, В.М.Демин. М.: Недра, 1980.