

ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Визначені основні фактори формування зон та інтервалів метастабільності в мінералах та гірських породах

FACTORS OF FORMING OF AREAS OF METASTABLES IN MINING ROCKS

Certain basic factors of forming of areas and intervals of metastables in minerals and mining rocks

Проблема изменения структуры вещества при энергетических воздействиях давно привлекает внимание исследователей. В целом ее можно условно разделить на два основных направления: исследования пластических и хрупких деформаций в искусственных материалах (металлах, сплавах) и изучение подобных деформаций в природных средах (минералах, породах). Для природных сред изменение структуры вещества под действием различных энергетических воздействий исследовано в меньшей степени, в силу трудности отбора проб из керна глубоких скважин или из забоев глубоких горных выработок.

Формы реализации дислокационной теории и образование на этой основе разного рода трещиноватости (от микро- до мегатрещин), носит не только фундаментальный характер, но и имеет большое прикладное значение. Коллекторские свойства пород, газодинамические и динамические явления в породах при отработке полезных ископаемых, изменение горно-геологических условий на глубоких горизонтах горных предприятий – вот неполный перечень направлений реализации результатов изучения изменений структуры вещества, что придает актуальность, научную и прикладную значимость этой проблеме.

Цель работы заключается в кратком определении основных физико-механических и горно-геологических факторов, влияющих на структурные преобразования минералов и пород.

Научно-прикладная задача, рассмотренная в статье, направлена на выделение структурно нарушенных зон или стратиграфических интервалов и последующая прогнозная оценка динамических, газодинамических, коллекторских и других критериев, определяющих геологические свойства исследуемых пород и минералов.

В последнее время, благодаря привлечению к решению этого комплекса задач предложенной в 1934 году дислокационной теории [1-2], исследователи перешли на новый качественный уровень изучения преобразования вещества. Возникающая при приложении внешнего напряжения или импульса энергии и перемещающаяся в объеме вещества дислокация, явилась тем недостающим звеном, которое соединяет причину и следствие: изменение условий состояния вещества влечет за собой изменение структуры, а следовательно, и свойств этого вещества.

Д.П. Григорьев [3], применительно к горным породам, сделал следующий вывод, что перекристаллизация наступает лишь при определенной, критической температуре, характерной для каждого минерала, которая в свою очередь, зависит от температуры и степени пластической деформации. Увеличение степени пластической деформации, по данным указанного автора, снижает критическую температуру, при которой начинается перекристаллизация. Все логично - плавление, это процесс перехода вещества из структурного состояния в бесструктурное при тепловом воздействии и любое нарушение структуры, каким является и пластическая деформация, способствует ускорению этого перехода.

Исходя из этого, данный процесс можно представить в следующем схематическом виде. Если выразить всю энергию, затраченную на рассматриваемый качественный переход в процентах и условно представить ее как сто процентов, то любое воздействие на эту породу: сжатие или растяжение, воздействие ультразвуком или другим энергетическим полем, является частью этих ста процентов. Условно мы можем, к примеру, разрушить кусок породы, затратив 10 % энергии, потом расплавить ее, используя остальные 90 %.

Авторы [4], исследуя механизм деформационного упрочнения, показали возможность целенаправленного изменения механических свойств монокристаллов MgO, в сторону увеличения пластичности, путем создания исходных дислокационных структур, обеспечивающих гомогенное развитие пластической деформации без деформационного упрочнения при низких температурах. Ими были найдены оптимальные условия предварительной обработки для проявления эффекта пластификации, а также обнаружен новый тип дефектов - полосы переориентации и изучены некоторые особенности их развития.

Приведенные факты свидетельствуют о том, что температурное воздействие (как повышение, так и понижение ее) является одним из основных критериев изменения структуры и свойств вещества.

Вторым важным фактором является давление. Исследования изменения свойств горных пород, минералов, металлов, проводили многие отечественные и зарубежные ученые. Так Н.Н. Павлова и др. [5] исследовали осадочные породы до и после деформации при температуре 1000С, причем условия деформации были адекватны глубине 8 км. Электронно-микроскопическое исследование пород показало, что отмеченный в опыте рост пустотности на 3,4 % связан с обособлением зерен кварца трещинами, ориентированными в направлении действия деформирующего усилия.

Авторы [6], исследуя остаточные деформации в гранитах, в лабораторных условиях, отмечают остаточные деформации в шлифах при нагрузках в 25-30 % от максимальных. При дифференциальных нагрузках порядка 50 % от максимальных, возрастает число хрупких деформаций, двойникование, группировка сколовых нарушений в зоне, наклоненной под углом 30-350 к направлению осевой нагрузки. При дифференциальных напряжениях выше 75 % от максимальных начинается процесс усиленного роста и слияния трещин в плоскостях наибольших сдвиговых напряжений. Это регистрируется лавинным нарастанием сейсмических импульсов, что отражает увеличение хрупких разрушений.

Исследователи отмечают два механизма, приводящие к разрушению породы - пластическое течение и хрупкое растрескивание, идущие одновременно.

В работе [7] отмечено образование пластических деформаций типа полосок Бема в гранитах при всестороннем сжатии в лабораторных условиях. Образованные в результате нагрузок в 30 % от максимальных микротрещины имели извилистый и ступенчатый характер, что указывает на проявление как пластической, так и хрупкой деформации в исследуемом образце. Ступенчатый характер берегов микротрещин, полученный экспериментально в гранитах, интересный и важный результат. Подобные факты при изучении структуры вообще и микроструктуры в частности, очень редко описаны в литературе.

В.И. Зайцев [1], анализируя результаты гидростатического сжатия кристаллов, подтвердил вывод И.А. Одингга (1948 г.) о том, что, начиная с некоторой плотности дефектов, дислокации все больше мешают движению друг друга, формируя малоподвижные образования, что приводит к упрочнению. По мнению В.И. Зайцева плотность дислокаций 10^{12} см⁻² - 10^{13} см⁻² является оптимальной для образования и раскрытия трещин в кристаллах. По этой причине дальнейшее насыщение кристаллов дислокациями бесперспективно.

Данный вывод хорошо согласуется с эмпирическими данными по выбросоопасности горных пород. Так, вышеприведенные результаты указывают на волновую природу структурных преобразований в результате увеличения напряженного состояния вещества. Рост дислокаций сначала способствует возникновению пластических микродеформаций, затем образованию микротрещин (хрупкая деформация), затем, с определенной величины напряжений, препятствует их образованию, упрочняя породу.

С выбросами пород происходит аналогичная картина. Они начинают проявляться с определенной глубины, когда структура вещества достаточным образом подготовлена к этому, а напряженное состояние имеет необходимый потенциал для реализации процесса деформирования. Отпалка пород при проходке горных выработок в таких условиях инициирует возникновение выброса. Дальнейшее увеличение напряженного состояния горных пород ведет к изменению структуры вещества, в нашем случае песчаника, в сторону упрочнения. Количество выбросов пород уменьшается и постепенно указанное явление на рубеже среднего и позднего катагенеза исчезает. Таким образом, явление выбросоопасности должно иметь степенную зависимость от напряженного состояния пород и от подготовленности структуры вещества к реализации рассматриваемого явления. Степень подготовленности структуры вещества, по мнению автора статьи аналогична степени катагенеза пород.

Приведенные факты свидетельствуют о том, что давление, как и температура, является причиной структурных преобразований. Катагенетические преобразования горных пород формируют некоторый неустойчивый интервал, в котором, при благоприятных условиях, могут происходить газодинамические явления. Зная выделенные параметры: напряженное состояние пород и степень катагенетического преобразования, можно прогнозировать газодинамические явления, а в перспективе управлять данным процессом.

Последующий анализ позволил установить, что не только температура и давление ответственны за состояние среды. В.В. Благовещенский [8], показал особенности размножения дислокаций и образование полос скольжения в кристаллах под действием ультразвука.

Н.М. Кобелев и др. [9], решали обратную задачу, исследовали влияние дислокаций на дисперсию скорости ультразвуковых волн в кристаллах и пришли к выводу о том, что затухание ультразвуковых волн в кристаллах меди и некоторых других, связано с микронеоднородностями среды и, в первую очередь, с дислокациями. Кристаллы подвергались сжатию до образования системы полос скольжения с характерным расстоянием между полосами порядка 300-600 микрон. Выполненные на ряде образцов измерения полей внутренних напряжений поляризационно-оптическим методом показали, что характерный период изменения полей напряжений, примерно соответствует расстоянию между полосами, а их амплитуда - напряжению деформации кристалла.

Данный вывод интересен еще и тем, что подобные системы полос скольжения были получены нами в кварце, стеклах, янтаре и других веществах вначале под электронным микроскопом, а позже в образцах горных пород при помощи оптического микроскопа [10-11]. Расстояния между полосами варьируют, в зависимости от увеличения. Исследования при помощи электронного микроскопа позволили установить средние расстояния между полосами скольжения от 7 до 15 микрон, с максимумом в районе 8 - 10 микрон, не зависимо от того, какое по своим свойствам вещество было исследовано. Примечательно то, что минимальные размеры квазикристаллических частиц, установленных на сколах разных веществ, составляли 1 - 3 микрона. Полосы скольжения с такими расстояниями не установлены. Причины этого могут быть различны. Возможно, необходимо было изменить рабочее увеличение - не 2000X, а большее. Возможно, применявшийся метод изготовления двухступенчатых углеродных реплик не позволяет достичь желаемого результата и его необходимо совершенствовать, либо менять метод исследования. В любом случае, факт формирования частиц указанных размеров установлен. Поскольку образование таких частиц может быть следствием только пластической деформации, не может быть сомнений по поводу существования плоскостей деформаций данного размера.

Исследованные автором статьи плоскости скольжения при помощи оптического микроскопа позволили установить, что они представлены двумя системами: основной - более четкой и ярко выраженной, и подчиненной. Средние размеры между плоскостями скольжения основной системы изменяются в пределах 60 - 100 мк, с максимумом в районе 80 мк. Подчиненная система характеризуется средними расстояниями между плоскостями скольжения в пределах 30 - 50 мк, с максимумом в районе 40 мк. Приведенные расстояния получены эмпирическим путем в природно деформированных веществах. Полученные в [9] размеры путем приложенных напряжений к кристаллам меди могут быть уже следующим уровнем структурирования вещества.

Приведенные выше расстояния были получены при изучении углеводородных песчаников Донбасса и названы трансляционными полосами скольжения

[10]. Важным является то, что полученные нами полосы являлись следствием структурных преобразований пород и минералов в природных условиях и по форме они аналогичны описанным выше, полученным искусственным путем.

М.И. Клиндер и др. [12] показали, что в стеклообразном SiO_2 и в кристаллическом SiO_2 , под действием электронов подпороговой для упругих смещений энергии, возникают, проявляющиеся в изменении объема кристалла, короткоживущие дефекты. В заключение статьи авторы указывают на большое количество фактического материала последних лет о других радиационных эффектах в твердых телах, сопровождающих процессы дефектообразования.

Н.Г. Хатиашвили и М.Е. Перельман [13], исследуя ионный кристалл диэлектрика и некоторые горные породы (граниты, базальты, габбро) установили, что колебания заряженных дислокаций должны приводить к генерации электромагнитных излучений. По их мнению, должен существовать и обратный эффект: в переменном электромагнитном поле заряженные дислокации, приходя в колебание, будут излучать акустические колебания на частоте электромагнитного поля. В отличие от пьезоэлектрического, этот эффект, считают авторы, должен зависеть от предыстории образца (от плотности дислокаций, количества точек их закрепления, температуры и внешнего давления).

Таким образом, можно однозначно утверждать, что любое энергетическое воздействие на вещество, в соответствующих объемах, может привести к изменению структуры и свойств данного вещества. Кроме того, для наиболее эффективного воздействия на свойства вещества, существует оптимальная для структуры данного вещества плотность дислокаций [1]. Это означает то, что зная нижнюю и верхнюю границы этой плотности, мы можем наиболее эффективно прогнозировать газодинамические явления, свойства данных пород или, в перспективе, управлять этими свойствами.

В этой связи следует отметить слабую изученность дефектообразования на микроуровне в осадочных породах по сравнению с другими деформациями. При этом, такие динамические явления как выбросы угля, породы и газа, стрельяние, заколообразование, горные удары на глубоких горизонтах шахт и рудников становятся рядовыми явлениями, отражают напряженное состояние породного массива и являются следствием относительной неустойчивости структурных параметров горных пород.

Таким образом, с увеличением палеоглубины на горную породу увеличивается влияние температуры и давления (основные слагаемые энергетических воздействий на породу). Это влечет за собой появление сначала пластических, а затем хрупких деформаций. В дальнейшем указанные деформации проявляются одновременно, дополняя друг друга и постепенно изменяя структуру вещества, аналогично полученным экспериментально данным [6, 10, 13].

В результате указанных воздействий нарушается устойчивость структурных параметров породы. С этого момента в горном массиве могут происходить различные газодинамические явления, подобные горным лавинам при метастабильном состоянии снежного покрова, когда крика или просто громкого разговора достаточно для того, чтобы обрушилась лавина.

С дальнейшим увеличением палеоглубины, а соответственно и термобарических воздействий, накопленная энергия реализуется в изменении структуры (своеобразный фазовый переход для породы, аналогичный переходу α в β кварц). Порода, в целом, становится прочнее, монолитнее, изменяются ее физико-механические свойства, исчезают такие явления как выбросоопасность, шелушение, заколообразование. Параллельно появляется все больше участков с кварцитовидной структурой, особенно в зонах с небольшим количеством цемента (менее 5 %), происходит выравнивание структурных параметров, за счет разрушения наиболее крупных зерен и уменьшения, в результате этого, потенциальной энергии.

Указанное разрушение, согласно полученным эмпирическим данным, происходит не одномоментно, а в результате нескольких переходных этапов. Вначале, в обломочных зернах, накапливается значительное количество упругой энергии, реализующейся при прогрессирующем процессе в пластическую деформацию. В зернах начинают возникать, накапливаться и трансформироваться пластические микродеформации: полосы Бема, пластины и пояса деформации, иррациональный и смятый кварц. В дальнейшем, при усилении внешних воздействий, за счет геостатических, тектонических и температурных воздействий (в основном), по наиболее энергетически нестабильным пластическим деформациям происходит разрыв сплошности, иными словами - хрупкая деформация, выражающаяся в дроблении зерен на блоки, грануляции и возникновении энергетически более устойчивой к внешним воздействиям структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев В.И. Физика пластичности гидростатически сжатых кристаллов – К.: Наук. думка, 1983. – 188 с.
2. Коттрел А. Теория дислокаций. – М.: Мир, 1969. – 96 с.
3. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. – Львов: ЛГУ, 1961. – 284 с.
4. Бережкова Г.В., Перстнев П.П. Влияние предварительной деформации при высокой температуре на пластические свойства кристаллов окиси магния // ДАН СССР, 1979. Вып.248, №5. – С.1105-1108.
5. Микроструктурные и микротектурные изменения в осадочных породах, деформированных при различных объемно-напряженных состояниях и температурах // Физические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах / Н.Н. Павлова, Г.Н. Юрель, Р.А. Камышева и др. – Тбилиси, ТГУ, 1974. – С.268-270.
6. Звягинцев Л.И., Томашевская И.С. Остаточные деформации в гранитах при дифференцированных напряжениях // Физические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах – М.: Наука, 1978. – С.80-85.
7. Волярович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. Механика горных пород при высоких давлениях – М.: Наука, 1979. – 152 с.
8. Благовещенский В.В. особенности размножения дислокаций и образования полос скольжения под действием ультразвука: Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. Наук: 01.04.14 / МГУ.- М., 1982. – 16 с.
9. Кобелев Н.П., Конохов В.А., Мальшаков А.Н. Влияние дислокаций на дисперсию скорости ультразвуковых волн в кристаллах // Физика твердого тела. – 1984. – Т.26, №1. – С.259-261.
10. Баранов В.А. Причины и условия образования сутурных и стилолитовых контактов в минералах и горных породах // Придніпровський науковий вісник, 1998. - №118 (185). – С.102-116.
11. Баранов В.А. Квазикристаллы в кварце песчаников Донбасса // Геотехническая механика, 1998. - №10.- С.35-40.
12. Клиндер М.И., Лушик Ч.Б, Машовец Т.В. и др. Создание дефектов в твердых телах при распаде электронных возбуждений // Успехи физических наук. – 1985. – Т.147, №3. – С.523-550.
13. Хатиашвили Н.Г., Перельман М.Е. Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы // ДАН СССР. – 1982. – Т.263, №4. – С.839-842.