Записки Ленинградского горного института им. Г.В.Плеханова
Т. 123. Л., 1990

УДК 550.837:622

О.В.СЕРГЕЕВ, Е.А.МАРКИНА, И.А.ЛИВШИЦ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Как показывает мировой опыт изучения влияния давления на физические свойства горных пород и использования физических методов для исследования геомеханических процессов, сопровождающих подземную отработку месторождений полезных ископаемых, электропроводность – одно из самых чувствительных к механическому состоянию свойств горной породы. В условиях, когда плотность и пористость породы меняются на 5–10 %, электропроводность меняется на 35–70 % от первоначального значения. Однако, для эффективного использования электрометрического метода для изучения геомеханических процессов в массиве необходимо иметь четкие представления о физической природе изменения электропроводности горных пород в процессе их деформирования.

Горная порода, в общем случае, представляет собой трехфазную систему: твердая фаза – минеральный скелет и цемент; жидкая – минерализованная влага и газообразная – газ, заполняющий поровое пространство породы. Все ее физические свойства, в частности электрические, определяются свойствами каждой фазы и характером взаимодействия фаз. Благодаря такой сложной связи электрические свойства горных пород меняются в широком диапазоне.

В формировании электрических свойств большинства горных пород осадочного комплекса (за исключением углей высоких марок) ведущая роль принадлежит жидкой фазе, которая в естественном залегании представлена минерализованными грунтовыми водами, полностью или частично заполняющими поровое пространство горной породы. Электрические свойства жидкой фазы определяются степенью минерализации раствора и характером взаимодействия с твердой фазой. На контакте фаз возникает двойной электрический слой, механизм образования которого связан с процессами диффузии и адсорбции на контакте и ориентацией полярных молекул у поверхности твердой фазы.

Жидкость в поле действия двойного электрического слоя значительно отличается по физическим и электрическим свойствам от свободной. При росте влагонасыщения от нуля до полного насыщения меняется характер распределения влаги в поровом пространстве. Сначала на неоднородной поверхности зерен породообразующих минералов гидратируются активные центры, затем образуется мономолекулярный слой, на стыках зерен происходит капиллярная конденсация, приводящая к образованию скоплений влаги (манжет), манжеты сли-

ваются, поры заполняются водой. Таким образом, по мере увлажнения происходит переход от мономолекулярной пленки связной воды со свойствами, сильно отличающимися от свойств свободной воды, к появлению свободной воды со свойствами, определяемыми степенью минерализации раствора. Чем шире поры в породе, тем больший процент влаги находится в свободном состоянии. В мелкопористых породах влага вплоть до полного насыщения может оставаться в виде тонкой пленки и ведущая роль в формировании электропроводности породы будет принадлежать поверхностным эффектам и электрическим свойствам двойного электрического слоя. Присутствие в любой породе мелкодисперсных, активно адсорбирующих влагу частиц (глина) существенно влияет на ее электрические свойства [2]. По мере увлажнения породы происходит изменение ее электропроводности. Максимально возможное количество влаги в породе определяется объемом порового пространства. При этом электропроводность породы с непроводящим скелетом при прочих равных условиях достигает максимальных значений.

Как показывает структурный и гранулометрический анализ образцов однотипных горных пород с разных глубин [3], в том числе до нескольких тысяч метров, изменение структуры породы (например, песчаника) происходит в основном за счет переориентации зерен породообразующих минералов под действием веса вышележащих пород и их цементации за счет привнесенного цемента, либо за счет химических процессов растворения и осаждения минералов в условиях длительного воздействия значительных и неравномерно распределенных нагрузок. Разрушение зерен прочных породообразующих минералов начинается тогда, когда давление в местах контакта превосходит предел прочности зерен на сжатие. Можно предположить, что в условиях высоких давлений и скоростей их приложения при подземной разработке пластовых месторождений, изменение объема и структуры порового пространства и механического состояния находящегося в нем цемента в горной породе происходит только за счет механического воздействия неравномерных, сравнительно небольших (до $3\gamma H$) удельных нагрузок. При этом происходит перераспределение поровой влаги, меняются заполнение объема порового пространства и соотношение между количеством свободной и связной влаги, так как при трещинообразовании на любом уровне происходит увеличение внутренней поверхности порового пространства и часть свободной жидкости может перейти в связную. При нарушении гидравлического равновесия между исследуемым объемом и окружающим массивом возможны приток либо отток жидкости. Изменение состояния и количества поровой влаги в исследуемом объеме приводит к изменению его электропроводности.

Таким образом, процессы упругого и неупругого деформирования горной породы приводят к изменению объема и качества порового пространства и перераспределению в нем влаги, что сопровождается характерным изменением электропроводности породы. При этом влажность породы является своеобразным чувствительным „индикатором давления" в электрометрическом методе исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород, что в сочетании с современной измерительной техникой позволяет достичь

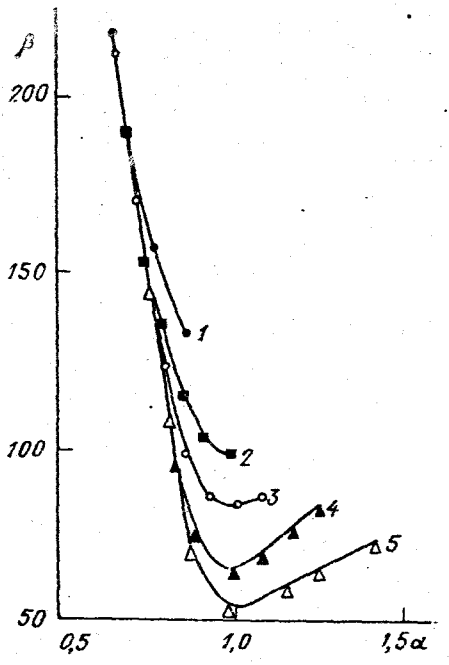


Рис.1. Изменение относительного удельного электрического сопротивления образца ($\rho_{об}$ / $\rho_{в\text{-}ра}$) от перераспределения влаги в образце ($\alpha=1+(V_в-V_п)/V_п$) при его деформировании под давлением; первоначальная пористость $K_п$ = 0,5; первоначальная влажность $K_в$: 1 - 0,54; 2 - 0,62; 3 - 0,70; 4 - 0,75; 5 - 0,87

высокой чувствительности метода исследования. Электрометрический метод обладает большой глубинностью, позволяет измерять электропроводность массива на большом удалении от стенки выработки без нарушения сплошности массива. Сочетание высокой чувствительности с большой глубинностью обеспечивает перспективность применения электрометрии для контроля механического состояния горных пород в глубине массива при подземной отработке пластовых месторождений.

Проверка предположений о механизме формирования изменений электропроводности влажной горной породы с непроводящим скелетом[x] на искусственных образцах показала их правдоподобие.

На рис.I показано изменение удельного электрического сопротивления образцов с различной исходной влажностью по мере осевого нагружения образца, находящегося в специальной матрице, где предусмотрена возможность оттока избытка жидкости. Из рис.I видно, что до момента полного насыщения по мере нагружения образца его электропроводность растет (сопротивление падает), а затем, после наступления момента насыщения, излишки раствора вытекают из образца и электропроводность падает (сопротивление растет). Эти результаты хорошо согласуются с результатами наблюдений на образцах реальных горных пород с непроводящим скелетом: сопротивление полностью водонасыщенных пород с ростом давления растет, не полностью водонасыщенных – падает. Трещинообразование приводит к резкому увеличению объема порового пространства и изменению его структуры, что в условиях полного влагонасыщения сопровождается резким уменьшением электросопротивления, а в условиях не полного насыщения влагой – увеличением сопротивления.

В условиях естественного залегания влажность и объем порового пространства могут быть однозначно определены на образцах, взятых с месторождения, и на основании этих данных может быть спрогнозирован характер

---

[x] Изменения электропроводности пород с хорошо проводящим скелетом обусловлены, в основном, изменением электрического контакта между хорошо проводящими зернами: уплотнение приводит к увеличению электропроводности, трещинообразование – к ее уменьшению [1]. В реальных горных породах оба механизма имеют место и, в зависимости от соотношения электропроводностей скелета и минерализованных грунтовых вод, один из них может преобладать.

изменения электропроводности горных пород в массиве в процессе его деформирования.

Наблюдение за изменением удельного электрического сопротивления пород в шахтных условиях позволит проследить за процессом деформирования массива, начиная с области упругих деформаций и кончая областью интенсивного трещинообразования, и прогнозировать начало интенсивного разрушения.

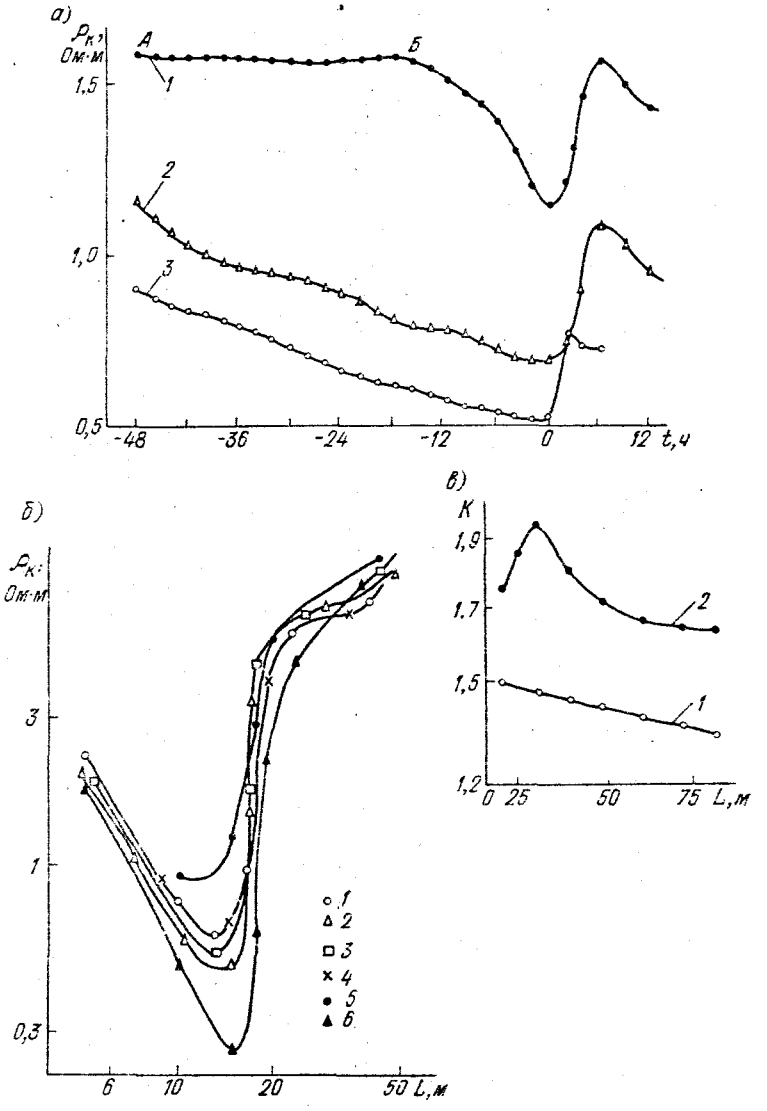


Рис.2. Применение электрометрии для изучения изменения механического состояния массива в процессе отработки пласта полезного ископаемого: а – результаты наблюдения за изменением состояния пород кровли до и после обрушения основной кровли при различных расстояниях до забоя: 1 – 56; 2 – 48; 3 – 40 м; б – результаты зондирования выемочного столба впереди лавы на расстояниях от забоя: 1– 32; 2 – 39; 3 – 20; 4 – 15; 5 – 12; 6 – 8 м; в – результаты электрометрического наблюдения за целиками на месторождении горючих сланцев

На рис.2 представлены некоторые результаты применения электрометрии для изучения изменения механического состояния массива в процессе отработки пласта полезного ископаемого. На рис.2,а показаны результаты наблюдения за состоянием пород кровли (непосредственная кровля – 1–3 м – глинистый сланец, основная – 30–32 м – песчаник) впереди лавы при отработке угольного пласта мощностью 1,47 м длинными столбами с управлением кровлей полным обрушением. Наблюдения проводились в течение двух недель и охватили период, включающий три момента обрушения основной кровли. Измерялось удельное электрическое сопротивление на глубине примерно 25 м от стенки выработки. Отсчет времени ведется от момента обрушения в ту и другую сторону. Первое обрушение произошло, когда расстояние от измерительной станции было примерно 56 м. Видно, что перед первым обрушением, когда расстояние до лавы еще достаточно велико, электропроводность пород в глубине массива практически не меняется (участок A-B на кривой 1), но за 15 ч до обрушения начинается резкое уменьшение ρ_K, что свидетельствует об активизации процесса деформирования и перераспределения нагрузок перед обрушением. После обрушения величина ρ_K восстанавливается до первоначальных значений. Можно предположить, что на таких расстояниях от забоя лавы пригрузки перед обрушением вызывают упругие деформации, которые снимаются после обрушения. По мере приближения лавы кривая изменения ρ_K приобретает наклон (кривые 2 и 3), что свидетельствует о деформациях в глубине массива под влиянием опорного давления впереди лавы. Процесс разгрузки после обрушения не приводит к восстановлению первоначального значения ρ_K, что свидетельствует о наличии остаточных деформаций.

На рис.2,б представлены результаты зондирования пласта антрацита впереди забоя лавы на разных расстояниях от забоя. Расстояние менялось от 32 до 6 м. При сохранении общего вида кривой зондирования (минимум ρ_K в зоне максимума опорного давления от выработки, в которой расположен профиль наблюдения) по мере приближения лавы происходит углубление минимума ρ_K, что связано с наложением влияния пригрузок от опорного давления впереди лавы.

На рис.2,в представлены результаты электрометрического наблюдения за целиками на месторождении горючих сланцев при разных системах отработки: 1 – изменение электрометрического коэффициента концентрации $K = \rho_K^{max} / \rho_K^{нат}$ по мере сокращения размеров целика от 50 до 7 м при камерной системе отработки; 2 – изменение K по мере увеличения площади обнажения в выработанном пространстве при отработке пласта длинными столбами с полным обрушением. Видно, что при отработке пласта камер-лавами сокращение размеров целика приводит к незначительным изменениям K и между исследуемыми величинами наблюдается линейная связь. В случае же отработки длинными столбами по мере увеличения пролета выработанного пространства в целике происходят интенсивные изменения механического состояния пород, что приводит к увеличению скорости изменения электропроводности пород. При пролете около 20 м градиент кривой изменения K меняет знак,

что можно объяснить развитием процесса интенсивного трещинообразования в условиях полного влагонасыщения и связать с потерей несущей способности целика, так как дальнейшая отработка столба оказалась невозможной.

Таким образом, результаты лабораторных и шахтных исследований, проведенных в различных условиях, не противоречат рабочей гипотезе о механизме формирования связи электропроводности горных пород с ее механическим состоянием, что позволяет перейти от качественной оценки деформационного состояния контролируемой области массива по электрометрическим наблюдениям к дифференцированной оценке различных этапов деформирования с фиксированием переходов от одного этапа к другому.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лившиц И.А. Исследование взаимосвязи электрических и деформационных свойств горных пород // Физические процессы горного производства: Межвуз. сб. Вып. 10 / Ленинградский горный ин-т. Л., 1982.

2. Элланский М.М. Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики. М.: Наука, 1978.

3. Энгельгардт В. Поровое пространство осадочных пород. М.: Наука, 1964.