Лекция 11

Электрические свойства горных пород

Механизмы поляризации горных пород.

Относительная диэлектрическая проницаемость. Влияние состава и строения.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

В любой горной породе имеются свободные (электроны) и **связанные** (например, ионы) заряды.

При наложении на породу электрического поля в ней происходит **смещение** внутренних связанных зарядов. В результате на ее поверхности появляются неуравновешенные заряды. Это явление носит название **электрической поляризации** (рис. 7.1).

Вектор поляризации P.--**суммарный электрический момент** единицы объема породы. В зависимости от механизма поляризации и типа частиц, участвующих в ней, выделяют **четыре основные** ее вида: электронную, ионную, дипольную и миграционную.

Электронная поляризация $P_{эл}$ возникает в атомах в результате смещения электронных орбит относительно положительно заряженных ядер. Так как с увеличением напряженности поля смещение электронных орбит увеличивается, величина $P_{эл}$ прямо пропорционально напряженности электрического поля $E_э$ (упругая поляризация):

$$P_{эл} = \alpha_э E_э n \qquad (11.1)$$

где $\alpha_э$ -поляризуемость атома (коэффициент, характеризующий способность электронного облака данного атома деформироваться под воздействием внешнего электрического поля), Ф * м^2 ; n--число поляризующихся в единице объема атомов, 1/м^3.

Электронная поляризация присуща всем атомам и молекулам и является наиболее быстрым видом поляризации (возникает за 10^{-15} с).

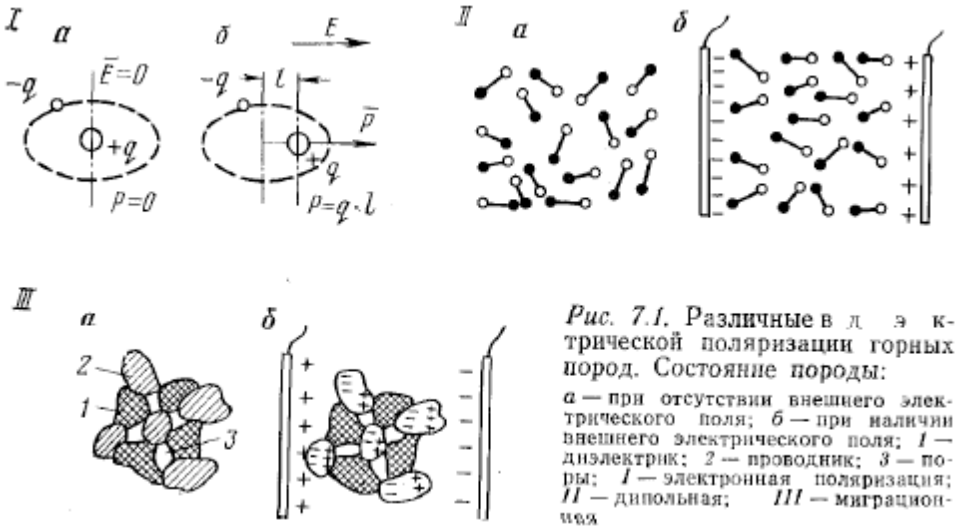

Рис. 7.1. Различные в л э к-трической поляризации горных пород. Состояние породы:

а — при отсутствии внешнего электрического поля; *б* — при наличии внешнего электрического поля; *1* — диэлектрик; *2* — проводник; *3* — поры; *I* — электронная поляризация; *II* — дипольная; *III* — миграционная

Ионная (атомная) поляризация $P_и$ образуется за счет смещения в электрическом поле ионов или частей кристаллических решеток с ковалентной связью. При этом под воздействием электрического поля положительные и отрицательные ионы сдвигаются.

Величина ионной поляризации также прямо пропорциональна $E_э$ внешнего поля:

$P_и = \alpha_и E_э n,$ (

где $\alpha_и$ --поляризуемость иона.

Время установления ионной поляризации несколько меньше, чем электронной; оно составляет 10^{-14}--10^{-12} с.

Дипольная поляризация $P_д$ наблюдается при наличии в породах ионов с полярными связями. В этом случае каждая молекула уже имеет некоторый дипольный момент при отсутствии внешнего электрического поля. Тем не менее в объеме породы, состоящем из таких молекул, из-за их хаотического расположения суммарный дипольный момент при отсутствии внешнего поля равен нулю. При его наличии диполи будут ориентироваться согласно внешнему полю, т. е. возникает электрическая поляризация объема породы. Дипольная поляризация завершается в течение 10^{-10}-- 10^{-7} с.

Миграционная (объемная) Рм поляризация возникает в многофазной породе, состоящей из частиц, обладающих различными электрическими свойствами, а также при наличии пор, заполненных электролитом.

При внесении породы в электрическое поле свободные электроны и ионы, содержащиеся в проводящих и полупроводящих включениях, начинают перемещаться в пределах каждого включения.

В результате каждое включение приобретает дипольный момент и ведет себя подобно большому диполю.

Время завершения миграционной поляризации составляет 10^{-6} - 10^{-3} с.

Время установления дипольной и миграционной поляризации пород сравнимо с частотой применяемых на практике электромагнитных полей, поэтому указанные виды поляризации называются **релаксационными или медленными** в отличие от "мгновенного" смещения электронов и ионов.

Суммарная поляризация породы, представляющая собой средний дипольный момент единицы ее объема, равна сумме всех видов поляризации:

$$P_э = \alpha_o E_{эо} n \qquad (11.3)$$

где α_o -- условная средняя поляризуемость.

Поляризации пород сопутствует явление, называемое **электрострикцией.** Оно заключается в деформировании (подобно всестороннему сжатию) диэлектриков под действием электрического поля и присуще всем породам. Причинами электрострикции являются, одной стороны, давление на породу заряженных частиц, создающих электрическое поле и притягивающихся друг к другу, с другой -- смещение ионов и электронов в породе, вызываемое внешним полем.

ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ПОЛЯРИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВ И ПОРОД

Как известно, существуют 32 кристаллографических класса минералов. Из них 11 классов имеют центр симметрии. Эти минералы не обладают никакими особыми электрическими свойствами и подчиняются рассмотренным закономерностям поляризации под воздействием электрического поля. Им, как и всем твердым телам, присуща электрострикция.

Минералы остальных кристаллографических классов ассимметричны (ацентричны), и для них характерна поляризация приложением механических нагрузок (**пъезоэлектрический эффект**).

Так, нагрузив монокристалл кварца, получают разноименные заряды на его противоположных гранях. Этот эффект обратим: приложение к кварцу электрического

поля вызывает деформацию кристалла, которая значительно больше, чем электрострикция.

Пьезоэффект в отличие от электрострикции зависит от направления поля. Поэтому, приложив к граням кристалла переменные электрические поля, можно вызвать вибрацию кристалла.

Пьезоэффект изучен более чем в 400 минералах, в том числе в кварце, турмалине, цинковой обманке, бораците, сфалерите и нефелине. М. П. Воларовнч и Э. И. Пархоменко (ИФЗ АН СССР) в 1954 г. открыли явление пьезоэффекта также в горных породах, содержащих минералы - пьезоэлектрики,---в гранитах, гнейсах, кварцитах, жильном кварце, нефелиновых породах и т. д.

Величина поляризации $P_п$ пьезоэлектрика прямо пропорциональна механическим напряжениям σ:

$$P_п = \zeta\sigma, \qquad (11.4)$$

где ζ--коэффициент, характеризующий пьезоэлектрический эффект породы (пьезоэлектрический модуль).

Десять кристаллографических классов из числа пъезоэлектриков имеют особенные оси, в положительном и отрицательном направлениях которых свойства кристаллов различны. Эти кристаллы спонтанно (самопроизвольно) поляризованы. Величина их поляризации зависит от температуры. Они называются **параэлектриками**. При нагреве кристалла пироэлектрика один его конец заряжается положительно, другой -- отрицательно. Охлаждение кристалла ведет к нзменению знака заряда. Появление зарядов на поверхности пироэлектрика связано с дополнительным смещением диполей вдоль электрической оси под воздействием температуры.

Пироэффект обратим: в электрических полях, направленных по электрической оси кристалла, происходит его нагрев, в противоположных полях - охлаждение. К пироэлектрикам относятся турмалин, вермикулит, нефелин, канкринит, пирротин и др.

У некоторых пироэлектриков направление самопроизвольной поляризации можно изменить, воздействуя на них внешним электрическим полем. Эта группа минералов носит название **сегнетоэлектриков**. Сегнетоэлектрические свойства могут проявлять минералы кубической, тетрагональной, ромбической и моноклинной сингоний, например, пирохлор, колеманит, борацит, пиролюзит и др.

Так как сегнетоэлектрики спонтанно поляризованы, даже при ничтожно малой напряженности поля поляризация их значительна.

Существует температура (точка Кюри), выше которой сегнетоэлектрики теряют свою поляризацию - деполяризуются. Каждый минерал имеет свою точку Кюри (в пределах 10-840К).

Практически все минералы - диэлектрики и слабые полупроводники способны поляризоваться при трении. Возникающие при этом заряды называются **трибоэлектричеством**.

Существует общая закономерность, согласно которой при трении двух диэлектриков друг о друга положительно заряженным становится диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

В результате электрической поляризации пород возникает внутреннее электрическое поле, направленное противоположно внешнему. Поэтому в любом веществе суммарная напряженность электрического поля $E_э$, оказывается меньше, чем в вакууме $E_{эо}$.

Отношение $E_{эо} / E_о$, показывающее, во сколько раз напряженность поля в веществе меньше по сравнению с вакуумом, называется **относительной диэлектрической проницаемостью** $\varepsilon_г$, являющейся мерой поляризации вещества.

Влияние вещества (среды) на величину электрических сил учитывается, например, в законе Кулона, согласно которому сила взаимодействия двух зарядов q_1, и q_2 на расстоянии г между ними равна

$$F = q_1 q_2 / 4\pi\varepsilon_а r^2 \qquad (11.5)$$

где $\varepsilon_а$ --некоторый коэффициент, учитывающий влияние внешней среды на силу взаимодействия и называемый абсолютной диэлектрической проницаемостью, Ф/м.

Отношение $\varepsilon_а / \varepsilon_г = \varepsilon_о$ называется электрической постоянной ($\varepsilon_о = 8{,}83\text{-}10^{-12}$ Ф/м).

Вектор полярязации P. можно представить как разность электрических индукций в веществе и, условно, в вакууме:

$$\overline{P}_э = \varepsilon_o \varepsilon_r \overline{E_{эо}} - \varepsilon_o \overline{E_{эо}} \qquad (11.6)$$

Отсюда

$$\varepsilon_r = \overline{P}_э / (\varepsilon_o \overline{E}_{эо}) + 1 \qquad (11.7)$$

Понятие диэлектрической проницаемости имеет смысл только для плохо поводящих сред. Действительно, если среда, в которой располагаются заряды, способна проводить ток (т. с. имеет много свободных зарядов), то вместо взаимодействия будет происходить перенос зарядов из точки с большим потенциалом в
точку с меньшим потенциалом до момента их выравнивания.

Поэтому в случае электростатического поля в проводниках $E_э = 0$ и, следовательно, диэлектрическая проницаемость близка к бесконечности.

Решая совместно уравнения (14.3) и (14.7), можно получить

$$\varepsilon_r = \alpha_o n / \varepsilon_o + 1 \qquad (11,8)$$

С учетом дополнительного взаимодействия частиц внутри поляризованного объема формула (14.8) приобретает следующий вид:

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{n\alpha_o}{3\varepsilon_o} \qquad (11.9)$$

где k -постоянная Больцмана; k =1,38-10^{-23} Дж/К.

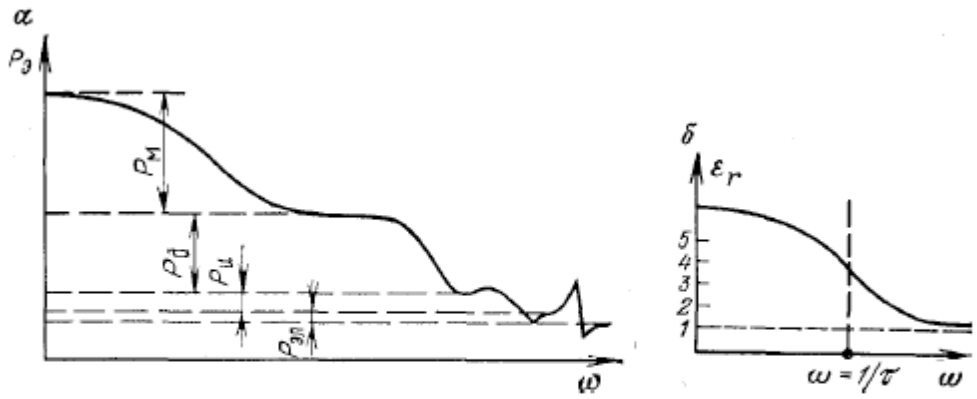

Рис. 7.2. Зависимость электрической поляризации $P_э$ (*а*) и диэлектрической проницаемости ε_r (*б*) пород от частоты ω электрического поля

В то же время число поляризующихся частиц и, следовательно, поляризация зависят от частоты f электрического поля (рис. 7.2).

В силу того, что ионная поляризация возникает лишь тогда, когда частота электрического поля снижается до 10^{12} Гц, а дипольная -- лишь при частоте поля не более 10^{7}-- 10^{10} Гц, с возрастанием круговой частоты f электрического поля от О до ∝ диэлектрическая проницаемость постепенно уменьшается (см. рис. 7.2 б) и стремится к единице:

Диэлектрическая проницаемость минералов при небольших частотах находится обычно в пределах от 3 до 25. Наименьшее значение величины в, (около 3--4) имеют минералы, обладающие в основном электронной поляризацией (например, кварц, ортоклаз, гипс, сера). Минералы, у которых к электронной добавляется еще ионная поляризация, обычно обладают большей диэлектрической проницаемостью. Так, у галита и сильвина ε_r = 4,7 - 6,4.

У минералов с дипольной поляризацией диэлектрическая проницаемость еще больше. Именно этим объясняется высокая диэлектрическая проницаемость воды (81), льда (73), рутила (130) и др. Большая диэлектрическая проницаемость характерна для рудных минералов из-за миграционной поляризации.

Диэлектрическая проницаемость пород является функцией значений ε_r минералов, слагающих породу, их концентрации и взаимного расположения.

Поэтому наибольшие значения диэлектрической проницаемости присущи породам, в состав которых входят рудные минералы.

В сухих пористых породах величина с значительно ниже, чем в плотных. Это связано с тем, что диэлектрическая проницаемость воздуха (и других газов) близка к единице (табл. 7.2).

Фаза	Удельное электрическое сопротивление, $\rho_э$, Ом.м	Относительная диэлектрическая проницаемость, ε_r
Воздух	∞	1,00058
Вода	$10 – 10^5$	81
Лед	$6{,}7.10^5$	79
Нефть	10^{10}	2,0 – 2,7

Для полиминеральной горной породы

$$\lg \varepsilon_\Sigma = \Sigma\, v_i \lg \varepsilon_i$$

Где v_i и ε_i – относительное содержание и относительная диэлектрическая проницаемость i – го компонента.

Для вычисления средних значений ε_r **пористой породы** можно применить формулу логарифмического средневзвешенного, т.е.

$$\varepsilon_{r\ ср} = \varepsilon_м^{\ 1-P} \qquad (11.10)$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ.

Перенос зарядов из одной точки проводника в другую, осуществляемый электронами и ионами, носит название электрической проводимости. Векторный показатель, характеризующий количество элементарных зарядов, проходящих через единицу сечения проводника в единицу времени, называют плотностью электрического тока j:

$$j = n q v \qquad (11.11)$$

(обратить внимание на то, что j и v - векторные величины)

где n - число заряженных частиц в единице объема; q – заряд частицы; v - средняя скорость направленного движения зарядов.

Так как $v = u E$, где u--подвижность частиц,

$$j = \sigma_э E_э \qquad (11.12)$$

Это уравнение представляет собой закон Ома в дифференциальной форме, причем коэффициент $\sigma_э = nqu$, зависящий от вида и состояния проводящей породы, называется ее **удельной электрической проводимостью**.

Она измеряется в сименсах, деленных на метр (С /м). Величина, обратная $\sigma_э$., называется **удельным электрическим сопротивлением**, измеряемым в омах на метр (Ом -м) .

Подобно тому, как диэлектрическая проницаемость характеризует электрические свойства диэлектриков, удельная электрическая проводимость является электрическим параметром проводников. Горные породы в основном входят в группу полупроводников, характеризующихся свойствами как диэлектриков , так и проводников (породам присущи некоторые значения удельной электрической проводимости $\sigma_э > O$).

Прохождение тока через горные породы может осуществляться с переносом вещества (ионная, ионно-электронная проводимость) и без переноса его (электронная и дырочная проводимость) .

Ионный характер проводимости имеют все аморфные минералы, галогенные соединения, нитраты, сульфаты и т. д. Электронная проводимость характерна для окислов и сульфидов большинства тяжелых металлов.

Но величине, электрической проводимости все вещества делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики. Разная электрическая проводимость веществ с позиций квантовой теории объясняется различиями в энергетической схеме их кристаллов.

Свободным носителем тока может быть лишь электрон, удаленный от ядра атома на достаточно большое расстояние и находящийся в зоне проводимости. Для того чтобы электрон мог попасть в зону проводимости, необходимо некоторое энергетическое воздействие на него. Величина такого воздействия зависит от ширины так называемой

запрещенной зоны, отделяющей валентную зону обращения электронов от зоны проводимости.

У проводников (металлов) запрещенная зона отсутствует.

Приобретая под влиянием внешних факторов дополнительную кинетическую энергию, электроны легко переходят в зону проводимости и становятся способными переносить заряды.

У полупроводников запрещенная зона $Q_э$. имеет определенную ширину. Она выражается количеством энергии, которую необходимо затратить электрону для того, чтобы перейти в зону проводимости. Для горных пород - полупроводников величина $Q_э$ чаще всего составляет О,16-10^{-19} -3-10^{-19} Дж (О,1--2 эВ). В этом случае электроны могут перейти в зону проводимости лишь под воздействием, превышающим величину Q э.

Есть два основных отличия полупроводников от проводников. Первое из них состоит в том, что электрическая проводимость проводников значительно выше, чем полупроводников, причем граничной считают электрическую проводимость порядка 10 См/м.

Второе отличие--возрастание электрической проводимости полупроводников с повышением температуры (температурный коэффициент положителен), в то время как электрическая проводимость проводников при этом уменьшается (электрическое сопротивление растет--температурный коэффициент отрицателен).

Кроме того, наличие примесей в проводниках всегда снижает их электрическую проводимость, а в полупроводниках – повышает ее. По этим признакам почти все минералы и горные породы относятся к классу полупроводников и диэлектриков с разной электрической проводимостью.

Главнейшие породообразующие минералы (слюда, галит, сильвин, кальцит, полевые шпаты, кварц) обладают низкой электрической проводимостью ($\sigma_э = 10^{-12}$--10^{-20} См/м).

Фактически почти весь ток проводимости в этих минералах обусловлен примесными ионами и атомами и лишь незначительная его часть -- небольшим числом свободных электронов самого минерала. Примесная проводимость существенна также и для других минералов, так как ионы и электроны примесей оказываются наименее связанными в кристаллической решетке. Поэтому удельная электрическая проводимость минералов не является строго постоянной величиной и изменяется в больших пределах.

Удельная электрическая проводимость плотных малопористых пород зависит от проводимости слагающих их минералов. Так, при прочих равных условиях удельная

электрическая проводимость породы находится в прямой зависимости от объемного содержания хорошо проводящих минералов.

Если в породе имеются рудные минералы, расположенные в виде прожилков, то присутствие даже незначительного количества этих минералов резко повышает величину $\sigma_э$ пород. Это характер, но для пород, содержащих халькопирит, пирротин, которые имеют полосчатое расположение в отличие, например, от галенита, располагающегося изолированными включениями.

Метаморфизация углей повышает их удельную электрическую проводимость. Особенно резко она увеличивается при содержании углерода более 87% . С увеличением зольности электрическая проводимость углей понижается.

Выветривание пород, повышение пористости, развитая система трещин, не сопровождающиеся увлажнением, также уменьшают электрическую проводимость породы (рис. 7.7).

Конечно, очень сильное влияние на электрическую проводимость оказывает влажность горных пород, тем более что в большинстве случаев вода, содержащаяся в породе минерализована, то есть из-за растворенных в ней веществ, является по сути проводником.

Мелкозернистые породы, особенно если они содержат коллоидные частицы, имеют при прочих равных условиях большую электрическую проводимость, чем крупнозернистые. Например, из осадочных пород, не имеющих рудных минералов, наибольшей электрической проводимостью обладает глина.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Горная порода, имеющая высокое электрическое сопротивление в переменном электрическом поле, характеризуется еще одним параметром--углом диэлектрических потерь δ. Угол δ можно представить как дополняющий до 90" угол сдвига фаз между полным переменным током, проходящим через конденсатор с диэлектриком, и напряжением между обкладками конденсатора.

Поглощение энергии породой с увеличением частоты электрического поля f возрастает; а параметр tg δ определяет количество электрической энергии, переходящей в породе в теплоту.

Удельное количество теплоты (в Дж/м^3), выделившейся в породе,

$$q = 55.5\, \varepsilon_r\, f\, \mathrm{tg}\,\delta\, E_э^2\, 10^{-12} \qquad (11.13)$$

где $E_э$--напряженность электрического поля, В/м;

Тангенс угла диэлектрических потерь большинства скальных пород при частоте поля около 1 МГц находится в пределах 2- 10^{-3} - -10^{-1}.

Величина tg δ минералов зависит от структуры кристаллической решетки и плотности упаковки ионов в решетке. Более плотная упаковка ионов и высокая симметрия кристаллов обусловливают малые значения tg δ минералов. Низкие значения tg δ присущи, например, периклазу и шпинели. Любые искажения кристаллической структуры и примеси увеличивают диэлектрические потери. Поэтому tg δ монокристаллов всегда ниже, чем поликристаллов и пород.

Наличие в минералах кристаллизационной воды также увеличивает их tg δ . Большие значения tg δ присущи также рудным минералам. В каменных углях tg δ возрастает с увеличением их зольности. У слоистых пород tg δ параллельно слоистости выше tg 6 перпендикулярно к слоистости.

Если диэлектрические проницаемости слоев равны, то для слоистой породы вдоль и поперек слоистости tg δ рассчитывают по формулам.

$$X_{\perp}^{-1} = \sum_{i=1}^{n} V_i X_i^{-1}.$$

$$X = \sum_{i=1}^{n} X_i V_i,$$

Где X – тангенс угла диэлектрических потерь, а V- относительное объемное содержание фазы

Увеличение пористости приводит к уменьшению tg δ сухой горной породы.

Из-за снижения tg δ пород с ростом частоты поля уже при частотах свыше 50 МГц значения tg δ большинства пород сближаются.