

Kőzetdeformáció mechanikai és geokémiai folyamatok határán üledékes medencékben

Rock deformation at the interaction of mechanical and geochemical processes in sedimentary basins

FALL András

Bureau of Economic Geology, Jackson School of Geosciences,
The University of Texas at Austin
Austin, Texas 78758, Amerikai Egyesült Államok;
andras.fall@beg.utexas.edu

Abstract

Attesting deformation, natural fractures and faults are pervasive in low-porosity rocks in sedimentary basins. In the diagenetic realm fractures in rocks locally affect the flow of hot, reactive fluids and rock strength. Hot fluids cause dissolution, cement precipitation, and other chemical reactions, which can profoundly modify where fracture porosity, and as a consequence, connectivity exists. Although fractures may form in different settings at different locations, and at different times throughout a basin evolution history, they can potentially show similar patterns and geometric attributes, such as their position relative to bedding, shapes, aperture sizes, and cement infill types and textures. The similarity of patterns and geometric shapes impedes interpretation of intrinsically limited subsurface fracture data. Cement infills and textures, fluid inclusions trapped within, and cement isotopic compositions, on the other hand, can provide powerful evidence useful for unraveling the origin and timing of fracture formation. This presentation offers a glimpse into how geochemical analysis of fracture cements is revolutionizing fracture description and interpretation, and shows how the complexity of cement deposits are the key to unlocking the otherwise difficult-to-interpret simple patterns and geometric shapes of opening-mode fractures.

Kulcsszavak: törések/repedések, erek, fluid zárványok, geokémia, üledékes medencék

Bevezetés

Üledékes medencék deformációját sok esetben törések és vetők jelenléte igazolja, melyek elsősorban alacsony porozitású kőzetekben képződnek, mint például erősen cementált homokkövekben és agyagpalákban. Nagyobb mélységekben, a magasabb hőmérsékletű diagenetikus tartományban (kb. 200 °C-ig), a kőzetekben előforduló törések közvetlen hatással vannak „forró” reaktív folyadékok áramlására [1]. A reaktív folyadékok befolyásolják a kőzetet felépítő ásványok oldódását és a mátrix-pórus- és repedéskitöltő cementek képződését. Így közvetve befolyásolhatják a törések és vetők porozitását, ennek következtében a nyílt törések, kőzetrések közötti kapcsolódásokat, illetve azok folyadékvezető kapacitásának fenntartását [2, 1]. A teljesen nyílt kőzetrések és a csak részben cementezett erek [3], de helyenként akár a legfeljebb nanométer-étmérőjű csatornákat tartalmazó, teljesen cementezett erek is [4], lényegesen hozzájárulhatnak az anyakőzet és tárolókőzetek közötti folyadék-áramláshoz szénhidrogén-telepek kialakulásakor. Továbbá fontos szerepük van a szénhidrogének áramlásában a mátrixpórusokat a termelőkúttal összekötő, a hidraulikus repesztések során létrejött kőzetrések révén [5]. Úgyszintén jelentős szerepük lehet a (hidrotermás)rétegvizek és geotermikus energia kitermelésében, illetve a CO₂, szennyvíz vagy más szennyező anyagok (beleértve nukleáris hulladékot is) biztonságos felszín alatti tárolásában.

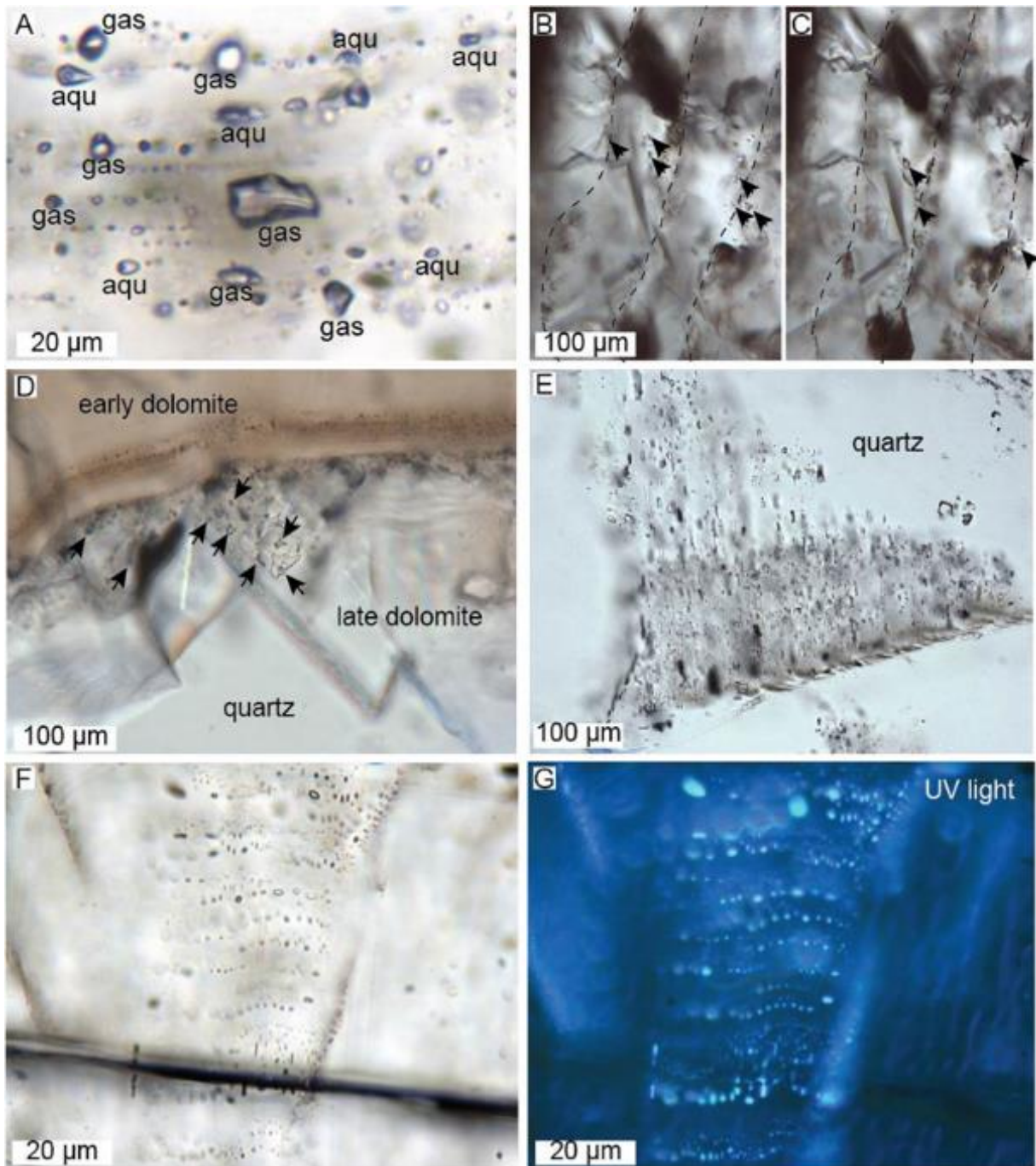
A törések és repedések az üledékes medencék tektonikus, betemetődési és termikus terhelése, a kőzetekben levő fluidumok pórusnyomása, és a kőzet szilárdság-fejlődési fázisainak kombinációi hatására alakulnak ki [6, 7]. Habár a törések különböző helyen, eltérő környezetekben és az üledékes

medence fejlődéstörténetének eltérő időpontjaiban képződhetnek, törésképükben (csoportos vagy elkülönült megjelenés) és geometriájukban (a rétegek dőléséhez viszonyított orientációjukban, formájukban, nyílásméretükben és cementkitöltési típusukban, valamint azok szöveteiben) hasonlóságokat mutathatnak [pl. 1]. Ezen törésképi és geometriai hasonlóságok gátolják a lényegében korlátozott felszín alatti törési adatok begyűjtését és értelmezését. Az ereket kitöltő cementek szövetei viszont potenciálisan erőteljes bizonyítékokkal szolgálhatnak a törések eredetére, és az azokat létrehozó folyamatok időzítésének felderítésére vontakozóan. A deformációval egyidőben (szinkinematikus) és a deformációt követő (posztkinematikus) időszakban képződött cementek fluidzárványokat csapdáznak. A zárványokat szisztematikus, jól meghatározott szerkezeti és petrográfiai kontextusban fluidzárvány együttesek (fluid inclusion assemblage – FIA) formájában történő vizsgálata az elmúlt évtizedben forradalmasította a törési folyamatok megismerését és elemzését. Talán, paradox módon, éppen a cementek és a fluidzárvány együttesek bonyolultságában rejlik a kulcs az I. vagy nyitási módú törések egyébként egyszerű, de nehezen értelmezhető törésképének és geometriájának feloldásához. Az előadásomban ezen néhány módszert és folyamatot szemléltetem, kiemelve azon fontos feltételt, miszerint a cement-szövetek és fluidzárványok rekonstrukcióit helyspecifikusan és egyedileg kell elvégezni minden repedésvizsgálat során.

Bizonyítékok szerkezeti és geokémiai folyamatok kölcsönhatására

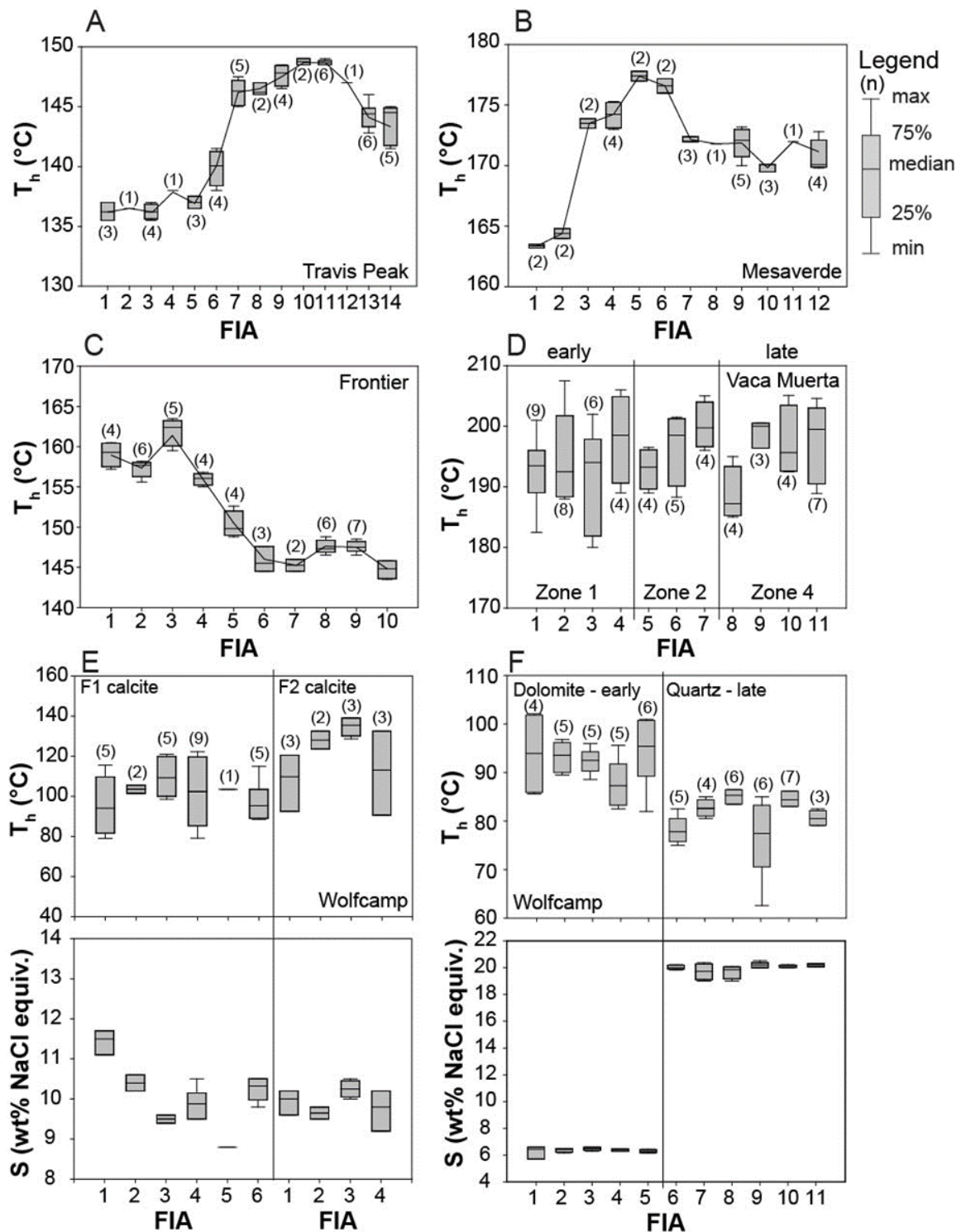
A fluidzárványok az egyetlen olyan eszközt képviselik, amely segítségével közvetlenül tanulmányozhatjuk nemcsak a deformációs és cementeződési folyamatokat, hanem a cementeződésért felelős pórusfolyadék hőmérsékleti, nyomási és folyadékösszetéti tulajdonságait is. Ezenkívül a töréscementek szövetét, fluidzárványait és izotópos összetételét egy jól meghatározott petrográfiai, szerkezeti és időzítési kontextusban vizsgálva nemcsak a deformációs folyamatokra lehet következtetni, hanem az üledékes medencék evolúciójának fontos állomásaira, pillanataira is, ideértve többek között az általános diagenetikus folyamatok jellegét, kiterjedését és ütemezését, a pórus-folyadék evolúcióját, valamint a medence víz- és szénhidrogén tárolóinak feltöltéstörténetét.

Ahhoz, hogy egy töréshistóriát vizsgáló tanulmány során megbízható eredményt érjünk el különböző módszereket megfelelő sorrendben kell elvégezzünk, amelynek talán a legfontosabb része a *cementek szöveti és fluidzárvány petrográfiaja* [8]. Ezen módszer alkalmazásának kritikus célja a tényleges, a vizsgált deformációval közvetlenül összefüggő cementek és fluidzárványok pontos azonosítása és relatív korának meghatározása (*1. ábra*) [lásd 9, 10, 11, 12], valamint e folyamatokhoz nem kapcsolódó szövetek és zárványok kizárása. Ezt követően a *mikrotermometria* eszközt nyújt paleotermák lehetséges nagyságrendjének, illetve a folyadékösszetétel lehetséges variációs trendjeinek a meghatározására (*2. ábra*). Amellett, hogy bepillantást enged a medence egészére kiterjedő evolúciós trendekbe is [9, 10], a hőmérséklet és a folyadékok összetétele hathatósan befolyásolja az anyagőzet és a töréscementek oldódásának/kicsapódásának nagyságrendjét és sebességét is, valamint a szénhidrogének termikus érettségi fokát.



1. ábra

Fluidzárványok néhány sajátos előfordulása homokkövek és agyagpalák repedéseiben. A. Együtt levő vizes oldat és szénhidrogén zárványok kvarc töréscementben, Piceance-medence, Colorado; B-C. Két optikai síkban fényképezett töréssel párhuzamosan csapdázódott fluidzárvány együttesek kalcit töréscementben; D-E. Zónás dolomit valamint kvarc töréscementek zárványai, Wolfcampi Agyagpala, Delaware-medence, Ny. Texas; F-G. Törésfallal párhuzamosan csapdázódott egyfázisú olajzárványok fehér-, illetve UV fényben, Barnett agyagpala, Delaware-medence, Ny. Texas [12].

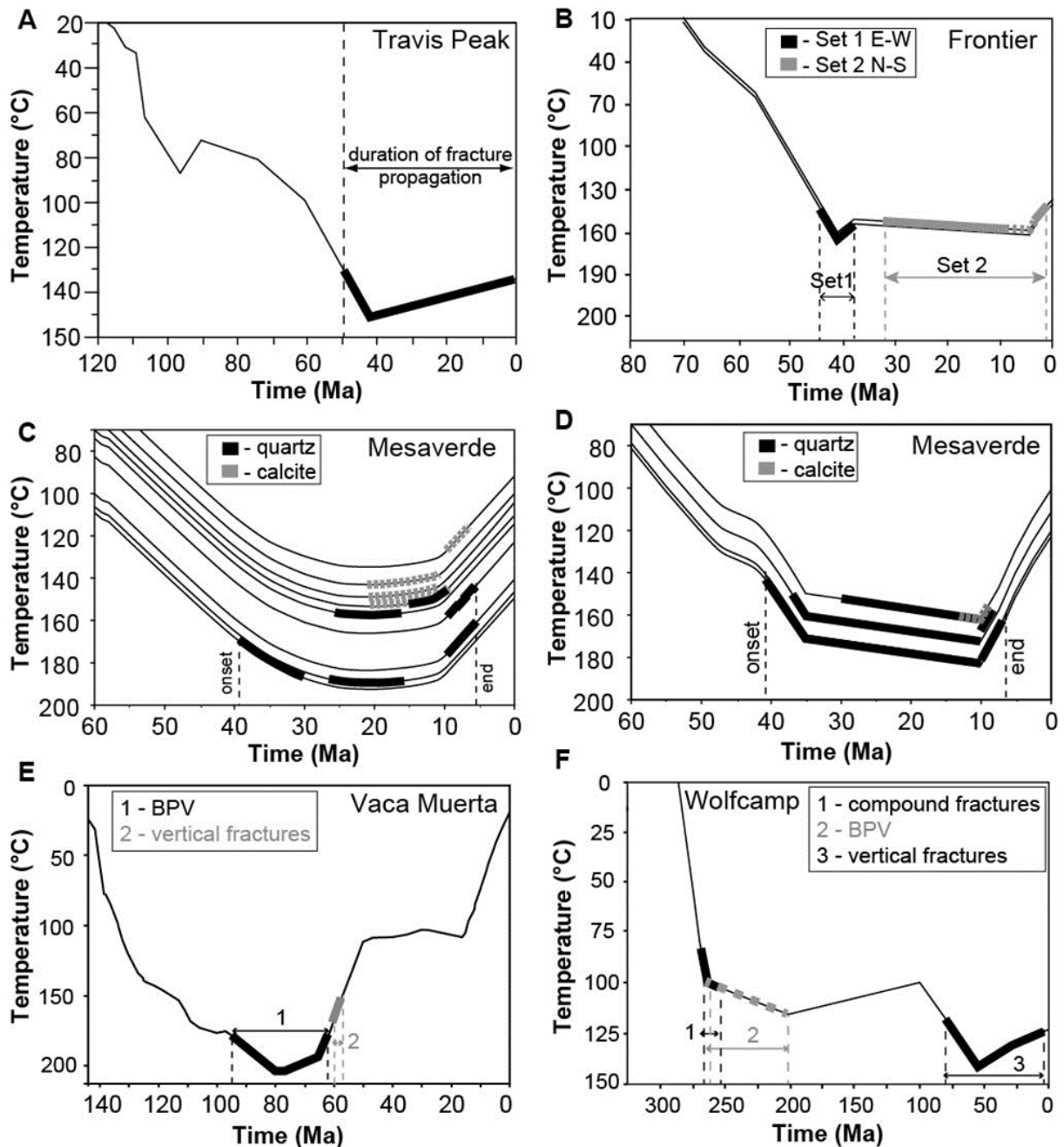


2. ábra

A fluidzárvány együttesek petrográfia által meghatározott relatív időrendben helyezve hőmérsékleti és fluid összetételi trendeket rajzolnak ki a deformáció és azzal azonos idejű cementálódás során. A. Kvarc cement zárványai homokkő repedésekben, Travis Peak Formáció, K. Texas; B. Kvarc cement zárványai homokkő repedésekben, Mesaverde Formáció, Piceance-medence, Colorado; C. Kvarccement zárványai homokkő repedésekben, Frontier Formáció, Wyoming; D. Szálkás kalcit, Vaca Muerta Formáció, Argentina; E-F. Kalcit, illetve dolomit/kvarc cementpárok zárványainak hőmérséklete és szalinitása, Wolfcampi Agyagpala, Ny. Texas [12].

Ezt követően *mikrobarometria* során meghatározhatjuk a fluid zárványok nyomását, amelyből következtethetünk a törések és cementek keletkezésekor jelenlevő pórusnyomás nagyságrendjére és annak evolúciós trendjeire. Ennek fontossága abban rejlik, hogy sok esetben a deformációs folyamatok hajtómotorja a túlnyomás keletkezése, melynek következtében a kőzetek megrepednek [10, 11].

Végül a *törések kormeghatározása* úgy lehetséges, hogy a fluid zárványok hőmérsékletét kereszteljük az üledékes medence betemetődési hőmérsékletgörbéjével, amelyet medence modellezési módszerekkel határozhatunk meg (3. ábra). Ez akkor is lehetséges, ha például karbonát cementek esetében, kapcsolt (clumped) izotópokkal meghatározott hőmérsékleteket vetünk össze medence modellekkel, vagy ha a karbonátok U-Pb izotópjainak arányából abszolút kort határozunk meg.



3. ábra

A szinkinematikus cementek fluidzárványainak hőmérsékleti trendjeinek összevetése betemetődési modellekkel nagy-felbontású abszolút deformációs kort eredményez [12].

Irodalomjegyzék

1. LAUBACH, S.E., LANDER, R.H., CRISCENTI, L.J., ANOVITZ, L.M., URAI, J.L., POLLYEA, R.M., HOOKER, J.N., NARR, W., EVANS, M.A., KERISIT, S.N., OLSON, J.E., DEWERS, T., FISHER, D., BODNAR, R.J., EVANS, B., DOVE, P., BONNELL, L.M., 2019: The role of chemistry in fracture pattern development and opportunities to advance interpretations of geological materials. *Reviews in Geophysics*, **57**, 1065–1111.
2. OLSON, J.E., LAUBACH, S.E., LANDER, R.H., 2009: Natural fracture characterization in tight gas sandstones: Integrating mechanics and diagenesis. *AAPG Bulletin*, **93**, 1535–1549.
3. LAUBACH, S.E., 2003: Practical approaches to identifying sealed and open fractures. *AAPG Bulletin*, **87**, 561–579.
4. LANDRY, C.J., EICHHUBL, P., PRODANOVIĆ, M., WILKINS, S., 2016: Nanoscale grain boundary channels in fracture cement enhance flow in mudrocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, 3366–3376.
5. GALE, J.F.W., LAUBACH, S.E., OLSON, J.E., EICHHUBL, P., FALL, A., 2014: Natural fractures in shale: a review and new observations. *AAPG Bulletin*, **98**, 2165–2216.
6. ENGELDER, T., 1985: Loading paths to fracture propagation during a tectonic cycle—an example from the Appalachian Plateau. *Journal of Structural Geology*, **78**, 459–476.
7. ENGLISH, J.M., LAUBACH, S.E., 2017: Opening-mode fracture systems – Insights from recent fluid inclusion microthermometry studies of crack-seal fracture cements. In: Turner, J.P., Healy, D., Hillis, R.R., and Welch, M. (eds.) *Geomechanics and Geology: Geological Society Special Publication*, **458**, 257–272, London, UK.
8. FALL, A., BODNAR, R.J., 2018: How precisely can the temperature of a fluid event be constrained using fluid inclusions? *Economic Geology*, **113**, 1817–1843.
9. BECKER, S.P., EICHHUBL, P., LAUBACH, S.E., REED, R.M., LANDER, R.H., & BODNAR, R.J., 2010: A 48 m.y. history of fracture opening, temperature, and fluid pressure: Cretaceous Travis Peak Formation, East Texas Basin. *GSA Bulletin*, **122**, 1081–1093.
10. FALL, A., EICHHUBL, P., CUMELLA, S.P., BODNAR, R.J., LAUBACH, S.E., BECKER, S.P., 2012: Testing the basin-centered gas accumulation model using fluid inclusion observations: southern Piceance Basin, Colorado. *AAPG Bulletin*, **96**, 2297–2318.
11. FALL, A., EICHHUBL, P., BODNAR, R.J., LAUBACH, S.E., DAVIS, J. S., 2015: Natural hydraulic fracturing of tight-gas sandstone reservoirs, Piceance Basin, Colorado. *GSA Bulletin*, **127**, 61–75.
12. FALL, A., 2020, Applications of fluid inclusions in structural diagenesis. In Lecumberri-Sanchez, P., Steele-MacInnis, M., Kontak, D. (eds.), *Fluid and Melt Inclusions: Applications to Geologic Processes*. Mineralogical Association of Canada, *Topics in Mineral Sciences*, **49**, p. 17–46, Québec, Canada.