

22^{ème} Congrès Français de Mécanique

Lyon, 24 au 28 Août 2015

Effets des hétérogénéités de microstructure sur la rupture et la ténacité des céramiques poreuses

D. JAUFFRES, S. PASCUAL CEDEÑO,
P. LHUISSIER, C. L. MARTIN

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, SIMAP, F-38000 Grenoble, France
christophe.martin@grenoble-inp.fr

...

Résumé :

Nous utilisons des simulations discrètes pour étudier les effets de la microstructure, à l'échelle des particules, sur les propriétés mécaniques des céramiques poreuses. Pour ces matériaux, le compromis est difficile à trouver entre propriétés fonctionnelles, qui imposent une porosité substantielle, et propriétés mécaniques. Les simulations numériques sont un outil intéressant pour proposer de nouvelles architectures microstructurales qui tentent de résoudre cette contradiction entre fonction et mécanique. Nous montrons en particulier qu'il peut être intéressant d'introduire des hétérogénéités locales pour améliorer, à fraction de porosité donnée, les propriétés mécaniques. Pour la partie expérimentale de ce travail, nous utilisons des billes de verre comme matériau modèle en raison de la taille relativement importante des billes (50-200 microns). Ceci permet un accès direct au nombre de coordination et aux tailles des ponts solides entre particules par tomographie aux rayons X. Les modules d'Young sont déterminés par ondes ultrasonores et la ténacité par des essais de flexion trois points.

Abstract :

We use discrete element simulations to study the effect of microstructure, at the length scale of particles, on the mechanical properties of porous ceramics. For these materials, a compromise is tough to find between functional properties, which impose a substantial amount of porosity, and mechanical properties. Numerical simulations are a useful tool to propose new microstructural architectures that attempt to resolve this contradiction between function and mechanics. We show, in particular, that it may be worthwhile to introduce local heterogeneities to improve, for a given fraction of porosity, mechanical properties. Concerning the experimental part of this work, we use glass beads as a model material due to the relatively large size of the beads (50-200 microns), which allows a direct access to the coordination numbers and the neck sizes by X-ray tomography. Young's moduli are determined via ultrasonic wave velocity measurements

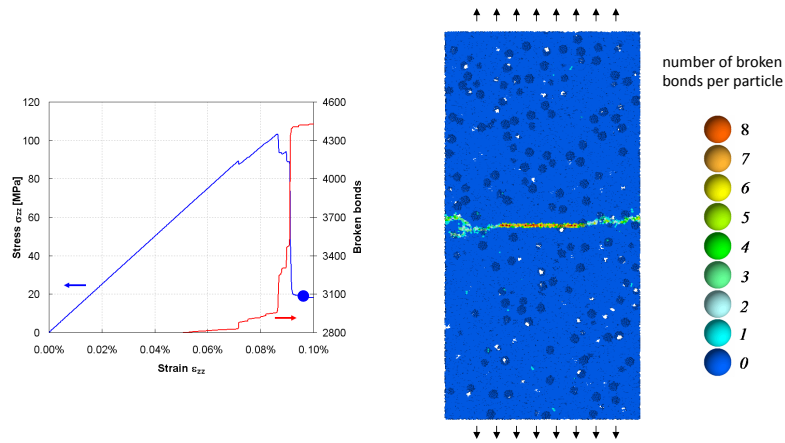


Figure 1: Simulation d'un essai de ténacité sur une céramique poreuse contenant des porogènes.

and fracture toughness via Single Edge Notch Beam (SENB) three points bending tests. Results from modeling and experiments are confronted and discussed.

Mots clefs : Céramiques poreuses; ténacité; Discrete Element Method

Résumé étendu

Les céramiques poreuses ont des applications nombreuses comme la catalyse, les membranes, l'isolation thermique, les électrodes ou les substituts osseux. Les pores doivent être connectés pour fournir une voie d'écoulement aux gaz ou aux liquides dans le matériau [1]. Les gammes typiques de porosité vont de 20 % à 50 % pour remplir les conditions appropriées à ces applications. Ces pores affaiblissent un matériau déjà fragile. Ainsi, il existe une contradiction entre l'exigence d'une grande quantité de porosité et la nécessité d'assurer une résistance mécanique et une ténacité acceptables. Dans ce contexte, l'optimisation de la microstructure sur la base de simulations numériques offre un outil puissant, à condition qu'elles fonctionnent à l'échelle de longueur pertinente, celle des particules de céramique.

Les céramiques poreuses sont traitées par frittage d'une poudre, avec une taille de particule typiquement de l'ordre du micron. Parce que l'étape de frittage est seulement partielle afin de conserver une certaine porosité, la microstructure finale conserve une signature du caractère granulaire de la poudre initiale. Les particules individuelles sont encore observables après frittage. Les particules sont liées ensemble par des ponts solides. Ce sont ces ponts qui donnent sa cohésion au matériau. Dans ce travail, nous

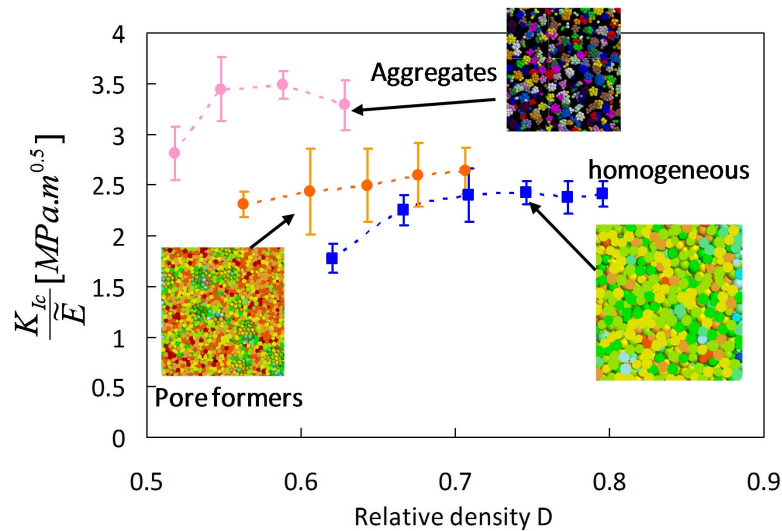


Figure 2: Évolution de l'indice de performance K_{Ic}/E en fonction de la densité relative pour différents types de microstructure.

profitons de la nature discrète des céramiques poreuses partiellement frittées pour modéliser le matériau comme un assemblage tridimensionnel de particules sphériques liées. Le modèle est enrichi à l'échelle de chaque pont solide d'un critère de rupture utilisant l'énergie de surface de la céramique [2]. Les ruptures en mode I et II sont traitées pour chaque pont solide.

Des microstructures 3D désordonnées sont générées par compaction puis frittage des particules. Les échantillons obtenus sont testés en traction et en compression jusqu'à rupture. Certains d'entre eux sont équipés d'une fissure initiale pour mesurer la ténacité K_{Ic} par application de la mécanique linéaire élastique de la rupture. (Fig. 1). Contraintes à rupture et ténacités sont comparées favorablement aux données expérimentales [3, 2].

Les résultats de simulation sont utilisés pour tirer des lois d'échelle entre le module d'Young E et les paramètres microstructuraux (taille des particules, taille moyenne du pont solide et nombre de ponts solides par particules). Nous démontrons que l'introduction d'une certaine hétérogénéité dans la microstructure (comme des porogènes ou des agrégats) améliore l'indice de performance pour des applications à déplacement imposé (Fig. 2).

Nous utilisons des billes de verre de deux tailles différentes (90-100 et 150-160 μm) comme matériau modèle pour la partie expérimentale. Les particules sont suffisamment grandes pour que la taille des ponts solide soit mesurée avec précision (Fig. 3). Les modules d'Young sont déterminés par ondes ultrasonores. La ténacité des échantillons

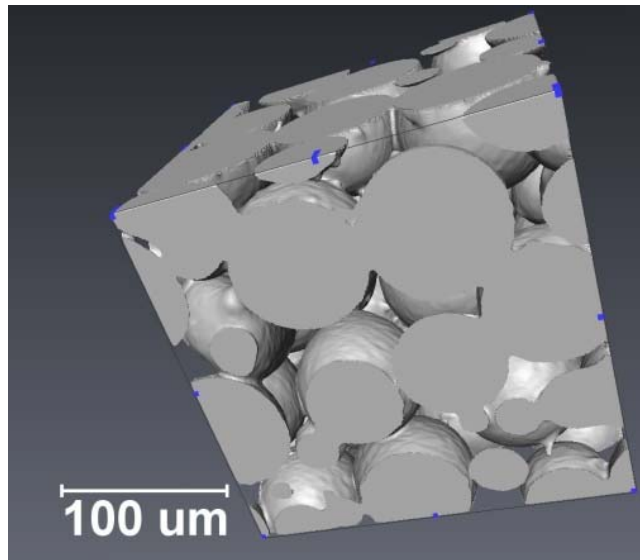


Figure 3: Image obtenue par tomographie X d'un empilement partiellement fritté de billes de verre.

a été obtenue par des essais de flexion trois points. Les résultats de la modélisation et des expériences sont confrontés et discutés.

References

- [1] T Suzuki, Z Hasan, Y Funahashi, T Yamaguchi, Y Fujishiro, and M Awano. Impact of Anode Microstructure on Solid Oxide Fuel Cells. *Science*, 325:852–855, 2009.
- [2] D Jauffrès, C L Martin, A Lichtner, and R K Bordia. Simulation of the toughness of partially sintered ceramics with realistic microstructures. *Acta Mater.*, 60:4685–4694, 2012.
- [3] X Liu, C L Martin, D Bouvard, S Di Iorio, J Laurencin, and G Delette. Strength of Highly Porous Ceramic Electrodes. *J. Am. Ceram. Soc.*, 94:3500–3508, 2011.