les céramiques réfractaires : introduction, description et classification

publié le 11.05.26 |par jacques poirier

ce premier article du dossier les céramiques réfractaires : des matériaux indispensables à l'industrie primaire présente les caractéristiques, les secteurs d'utilisation et les différentes classifications de ces matériaux.

1. contexte

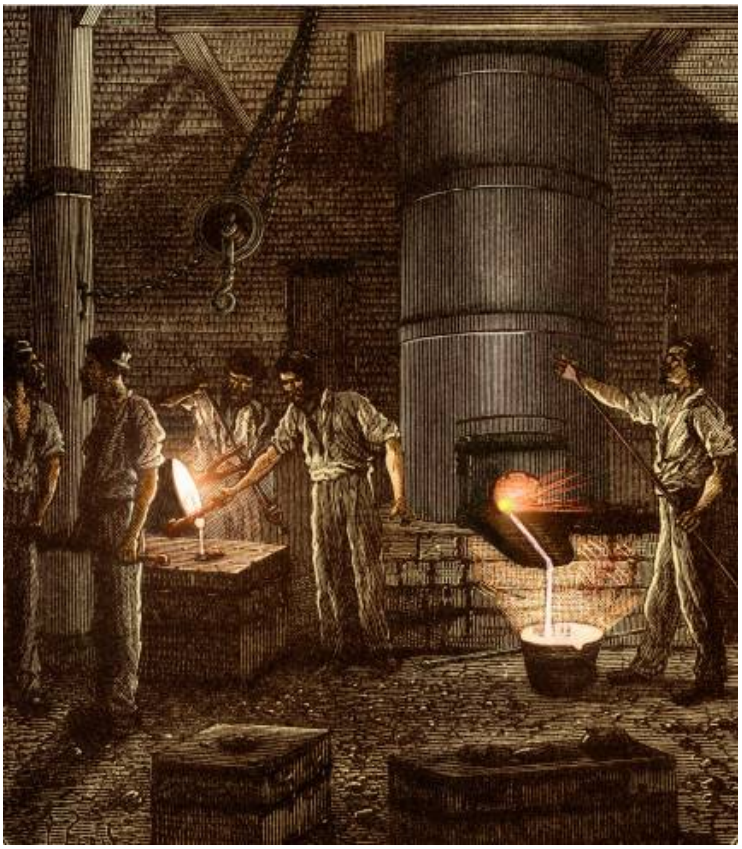


figure 1 - représentation d'un four à cubilot
le cubilot est un four vertical d'élaboration des métaux par la combustion de coke. dans ce four, le métal à fondre, généralement des ferrailles, est en contact direct avec le combustible. ce contact à haute température entraîne une carburation importante (à des niveaux de 2 à 3 % de carbone) et réserve pour cela le cubilot à la production de fonte.

auteur(s)/autrice(s) : science photo library / terry, sheila source : science photo library

étymologiquement, le terme « réfractaire » recensé en 1539 par robert estienne provient du latin *refractarius* qui signifie résister, refuser de se soumettre. pour un matériau, sa signification est : qui résiste à de hautes températures.

les réfractaires constituent un groupe important de céramiques [1] . ils sont majoritairement composés de mélanges d'oxydes à haute température de fusion. ce ne sont ni des métaux ni des alliages métalliques. ils doivent résister à 1 500 °c minimum sans ramollir et sans s'affaisser sous leur propre poids selon la norme (iso/r836) du test

de résistance pyroscopique[1].

ils sont utilisés dans tous les revêtements intérieurs des fours industriels. leur spécificité est de résister à des conditions extrêmes sans fondre, sans se décomposer et sans réagir notablement avec les charges élaborées à l'intérieur des fours.

1.1. une véritable course technologique aux hautes températures [2]

l'histoire des réfractaires s'enracine dans la nuit des temps et est intimement liée à la conquête des hautes températures, depuis que l'homme a acquis la maîtrise du feu (figure 1).

selon la mythologie grecque, prométhée aurait dérobé le feu sacré de l'olympe pour en faire don aux humains. d'après la théogonie d'hésiode, il aurait également crée les hommes à partir d'eau et de terre (une motte d'argile) et, malgré l'opposition de zeus, leur aurait enseigné la métallurgie et d'autres arts. prométhée a ainsi symboliquement apporté la technique aux hommes.



figure 2 - fac-similé du "panneau des chevaux" de la grotte de vallon-pont-d'arc (dite grotte chauvet). reproduit par un plasticien-préhistorien de l'art dans le cadre de recherches menées par le laboratoire travaux et recherches archéologiques sur les cultures, les espaces et les sociétés (traces, cnrs / université toulouse ii jean-jaurès / ministère de la culture).

auteur(s)/autrice(s) : claude delhaye / cnrs images licence : reproduit avec autorisation

à l'origine, il y eut la glaise calcinée par le feu du foyer. l'argile trouvée en abondance mélangée avec de l'eau puis cuite a donné naissance au premier réfractaire et par la suite à l'émergence d'une industrie-clé.

les performances des céramiques réfractaires doivent beaucoup au savoir-faire du passé, d'abord aux fondeurs et aux métiers des arts céramiques, en particulier la faïence et la porcelaine, puis aux industries du bâtiment (briques de construction, terre cuite, sanitaire …).

les matières premières, les techniques d'élaboration, les compositions ont évolué au cours du temps pour répondre à des exigences de températures de plus en plus élevées. ceci a pris plus de 12 000 ans. l'avènement de l'ère industrielle, et plus particulièrement des procédés d'élaboration de l'acier, repousse les limites d'usage des réfractaires au-delà des 1500°c.

leurs performances doivent également beaucoup à la science. au xxi^{e} siècle, le réacteur expérimental iter (international thermonuclear experimental reactor), génère dans le cœur de la machine un plasma chaud à une température de 150 millions de degrés pour déclencher des réactions nucléaires de fusion. iter met en œuvre des matériaux réfractaires.

1.2. une réelle demande de nombreux secteurs économiques clés [3]

les technologies impliquant les hautes températures conduisent à utiliser des enceintes ou des réacteurs limités par des parois ou des barrières thermiques en réfractaires. ces matériaux sont donc présents au cœur chaud de la majorité des processus de transformation de la matière, de production d'énergie ou de confinement de la chaleur, impliquant des températures allant de 600°c à plus de 2000°c. la figure 2 définit le rôle des céramiques réfractaires.

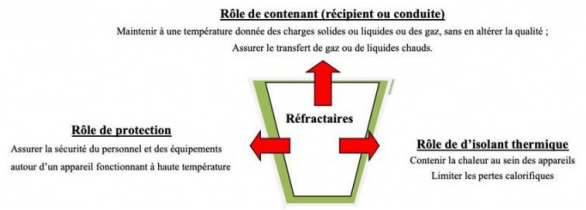


figure 3 - rôles des céramiques réfractaires

auteur(s)/autrice(s) : jacques poirier licence : cc-by-nc-nd

sans être exhaustif, les secteurs d'utilisation des réfractaires, par consommation décroissante, sont les suivants :

- *les secteurs d'élaboration des matériaux* tels que la sidérurgie, la métallurgie des non ferreux, la cimenterie, l'industrie du verre, de la céramique et des matières premières qui visent en permanence une amélioration de leurs procédés d'élaboration et de leurs rendements énergétiques ;
- *l'énergie :* qu'il s'agisse de la pétrochimie, de la production d'électricité à partir des énergies fossiles ou des applications énergétiques émergentes. dans ce dernier domaine, on citera notamment la gazéification du charbon, la production de biocarburants, de chaleur et d'électricité à partir de la biomasse, les piles à combustible sofc (solid oxide fuel cell), les futures générations de réacteurs nucléaires et le réacteur de fusion nucléaire expérimental iter (international thermonuclear experimental reactor), qui nécessitent de nouveaux matériaux céramiques ;

- ***l'environnement,*** **et plus particulièrement les fours de traitement et de valorisation des déchets : incinération des déchets ménagers et industriels, vitrification de l'amiante, des résidus d'épuration des fumées d'incinération des ordures ménagères (refiom) et des résidus d'épuration des fumées d'incinération des déchets industriels (refidi)… ces fours transforment des déchets, confinant durablement les composants toxiques ;**
- ***les secteurs traditionnels de la thermique et la chimie :*** **chaudières, fours, évaporateurs, réacteurs de gazéification, installations de purification… ;**
- ***l'aéronautique, l'aérospatiale et l'armement*****, où les barrières thermiques en céramiques sont utilisées pour résister aux produits agressifs générés par les moteurs de propulsion, mais également pour réaliser les revêtements extérieurs des engins spatiaux, qui doivent résister à l'échauffement lors de la rentrée dans l'atmosphère. ces céramiques à hautes performances sont fabriquées en quantités limitées, avec des exigences de tenue et de fiabilité élevées et des procédés de fabrication sophistiqués et coûteux. le bouclier de tuiles réfractaires de la navette spatiale est l'une des réalisations les plus médiatisées. ces industries de pointe ont favorisé l'émergence de matériaux et de structures combinant haute réfractarité, dureté et légèreté.**

quelques exemples d'application sont présentés à la figure 3.

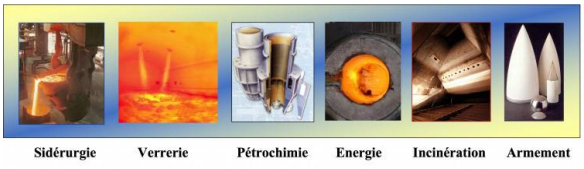


figure 4 - exemples d'application des réfractaires.

auteur(s)/autrice(s) : jacques poirier licence : cc-by-nc-nd

1.3. des matériaux stratégiques

ces céramiques, produites en grande quantité, sont des matériaux essentiels pour notre monde moderne. en effet, ils sont indispensables à d'importants secteurs économiques (figure 4). à ce titre, ce sont des matériaux stratégiques, même si leur contribution économique reste modeste.

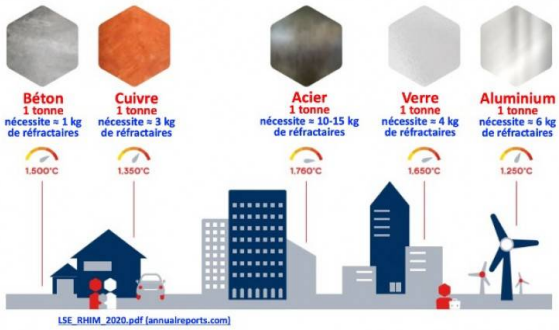


figure 5 - consommation des réfractaires par classe de matériaux

auteur(s)/autrice(s) : rhi magnesita licence : reproduit avec autorisation

la sidérurgie utilise 70% des réfractaires produits dans le monde (55% en europe). ainsi la profitabilité de l'industrie réfractaire est extrêmement dépendante de l'industrie sidérurgique (niveau de production de l'acier et investissements sidérurgiques).

l'influence d'autres secteurs que la sidérurgie : ciment, céramiques, verre, métallurgie des non ferreux, traitement des déchets, *etc.*, est très importante, avec des produits réfractaires à haute valeur ajoutée. la figure 5 présente le marché des réfractaires dans l'union européenne.

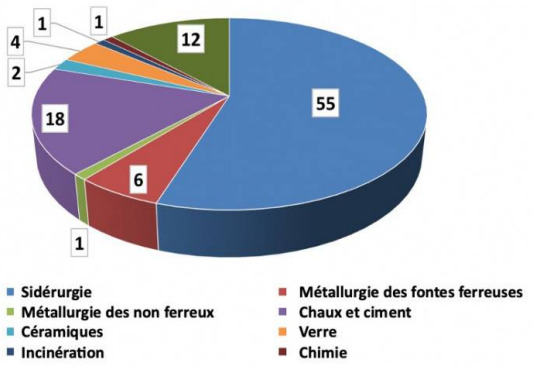


figure 6 - marché des réfractaires – union européenne (exprimé en % massique).

auteur(s)/autrice(s) : fédération européenne des fabricants de produits réfractaires licence : reproduit avec autorisation

sans ces matériaux de grande diffusion, notre vie quotidienne serait sans aucun doute beaucoup moins agréable. en effet, nous ne disposerions pas d'acier, de fonte, d'alliages métalliques, de verre, de cracking de pétrole à un prix raisonnable, de ciment, et donc de voitures, d'avions et des principaux objets de la vie quotidienne.

2. une grande diversité de matériaux

2.1. classification des réfractaires [3]

d'un point de vue minéralogique, les réfractaires sont des matériaux polycristallins, souvent polyphasés, majoritairement à base de mélange d'oxydes à haute température de fusion. leur structure est assez similaire à celle des roches naturelles. jusqu'à leur température limite d'utilisation, les réfractaires gardent leur cohésion sans changement notable de dimension. au-delà, ils vont subir une fusion progressive. la variété des matériaux réfractaires est telle que leur classification peut être abordée de différentes manières.

2.1.1. par la nature chimique et minéralogique du constituant principal

il existe essentiellement trois grandes familles de réfractaires (figure 6) :

- les réfractaires du système sio_2-al_2o_3, qualifiés de *réfractaires acides*. ils sont produits par assemblage de matières premières de silice, d'argile, d'andalousite[2], de mullite[3] et d'alumine[4] ;
- les réfractaires qualifiés de *réfractaires basiques* à base de matières premières de magnésie, dolomie[5], chromite[6]. les diagrammes d'équilibre mgo-cr_2o_3 et mgo-cao permettent de visualiser la composition de ces réfractaires, dont la température de début de fusion est beaucoup plus élevée que celle des réfractaires de la famille sio_2-al_2o_3 ;

- **les *réfractaires spéciaux* non classifiés sous les qualificatifs de réfractaires acides ou basiques. il s'agit de réfractaires à base de carbone, graphite, carbures, nitrures, spinelles, zircone zro_2, zircon zro_2-sio_2 , des oxydes de formule $mgal_2o_4$ (spinelles) sans oublier les matériaux ultra-réfractaires tels que l'oxyde de thorium pour des utilisations spéciales.**

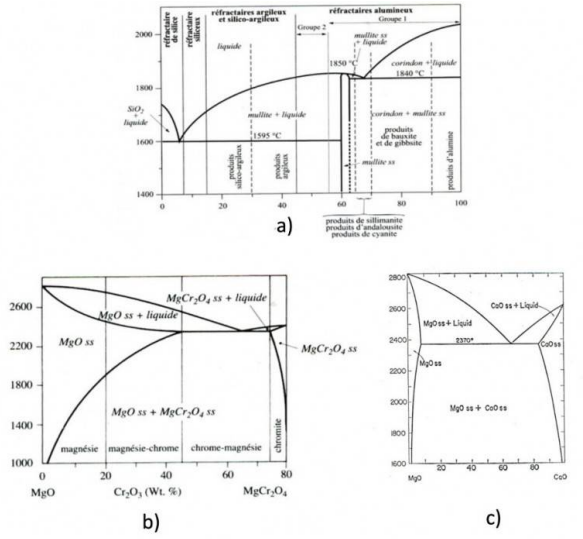


figure 7 - diagramme de phase présentant les familles de réfractaires [4] sio2-al2o3 b) mgo-cr2o3 c) cao-mgo

auteur(s)/autrice(s) : m. e. levin, r. c. robbins, f. h. mc murdie. phase diagrams for ceramists, volume i, the american ceramic society, inc (1964) licence : reproduit avec autorisation

2.1.2. par la forme

il existe :

- **les produits façonnés prêts à l'emploi : il s'agit de briques ou de pièces de forme, de dimension et de format divers ;**
- **les produits non façonnés [5] (dits aussi monolithiques) qui nécessitent au contraire une mise en forme par coulage, projection ou damage[7] ;**
- **les produits semi-rigides, en général des nappes, des plaques, des panneaux à base de fibres qui peuvent être « déformés » au cours de leur mise en œuvre.**

2.1.3. par leur densité et leur porosité

il s'agit là d'opposer les produits denses et des produits légers qui sont thermiquement isolants. par définition, les produits légers isolants (façonnés, non façonnés ou fibreux) possèdent une porosité totale supérieure à 45% en volume. en deçà de cette valeur, on considère que le réfractaire est un produit dense.

2.2. les matières premières utilisées pour la fabrication des réfractaires [6]

les températures de fusion des matières premières doivent être élevées, nettement au-delà des températures d'élaboration de l'acier. les composants chimiques principaux pour les réfractaires sont donc :

- les oxydes stables purs, d'abord sio_2, al_2o_3, mgo et plus secondairement cao, cr_2o_3, zro_2. la silice a une température de fusion ($t_{f,sio2}$ = 1710°c) basse comparée à celle des autres oxydes ($t_{f,al2o3}$ = 2045°c , $t_{f,mgo}$ = 2852°c $t_{f,zro2}$ = 2715°c ,…) ; cependant, cette température $t_{f,sio2}$ reste élevée en comparaison des températures dans la plupart des installations utilisant des réfractaires du système sio_2-al_2o_3 (1000 à 1550°c) ;
- le carbone.

les familles de composition chimique et les phases minérales des réfractaires sont donc en nombre limité. la figure 7 représente les phases stables obtenues avec ces oxydes purs, mais aussi les nouvelles phases obtenues en les faisant réagir entre eux.

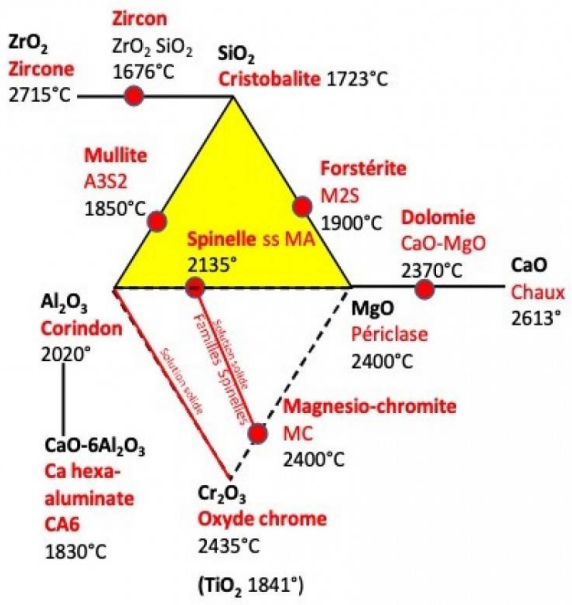


figure 8 - les principales phases des réfractaires : oxydes simples et oxydes mixtes (composés définis ou solutions solides) pouvant se former par frittage réactif.

auteur(s)/autrice(s) : jacques poirier licence : cc-by-nc-nd

si la phase magnésie (mgo), de structure cubique, et la phase chaux (cao) co-existent comme oxydes purs (les domaines de solubilité de cao dans mgo et de mgo dans cao étant très limités), la plupart des oxydes réagissent et forment une nouvelle phase. ces nouvelles phases minérales peuvent constituer une matière première fabriquée au préalable ou peuvent se former directement dans le réfractaire par frittage réactif (voir encart ci-dessous).

le frittage peut être défini comme l'ensemble des transformations qui conduisent, par traitement thermique et sans fusion totale du matériau, d'un assemblage de grains disjoints (la pièce crue) à une pièce consolidée (la pièce frittée). les « soudures » qui se sont opérées entre les grains peuvent être accompagnées ou non d'une densification et (ou) d'une croissance des grains. on peut ainsi avoir :

- consolidation sans densification (réalisation de filtres céramiques)
- densification seule (recherchée pour l'obtention des microstructures très fines)
- densification associée à de la croissance (situation la plus fréquente).

si aucune phase liquide n'apparaît, le frittage est dit « en phase solide » avec deux cas :

- frittage non réactif : un constituant chimique au départ, une pièce composée du même constituant à la fin ;

- **frittage réactif : la densification est accompagnée d'une ou de plusieurs réactions chimiques entre les constituants.**

si une phase liquide apparaît, le frittage est dit "en phase liquide" : la phase liquide (minoritaire pour conserver la tenue mécanique de la pièce) peut provenir de la simple fusion d'un deuxième constituant présent (ajout de frittage ou impureté) ou d'une réaction eutectique entre différents constituants.
selon qu'une contrainte mécanique externe est appliquée ou non, on distingue le frittage naturel et le frittage sous charge.

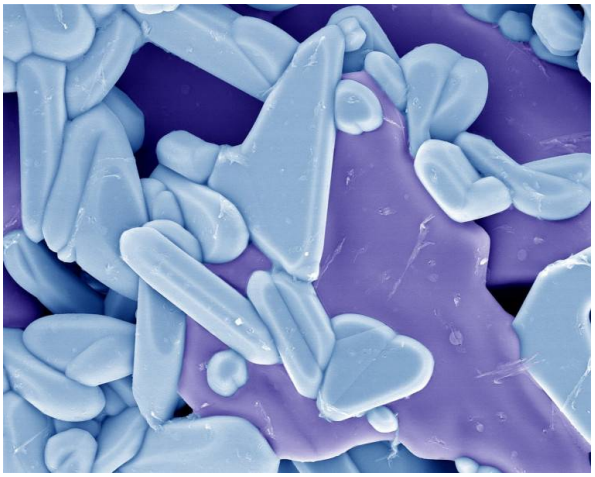


figure 9 - céramique frittée à haute température
observation d'une céramique frittée à haute température. grains d'alumine al_2o_3 (grains violets) et grains d'oxyde de titane tio_2 (grains bleus) frittés entre eux. le frittage consiste à agglomérer les poudres à haute température, en vue d'obtenir un solide poreux et résistant mécaniquement.
(grossissement 2000x ; largeur de l'image : 57 microns)

auteur(s)/autrice(s) : didier cot/cnrs images licence : reproduit avec autorisation
source : cnrs images

si ces phases de composition mixte ont des températures de fusion élevées, elles peuvent réaliser d'excellentes liaisons céramiques réfractaires. par exemple, la mullite est la phase stable quand on mélange sio_2 et al_2o_3. elle a une composition a3s2, ce qui signifie 3 al_2o_3 et 2 sio_2 dans le langage emprunté aux cimentiers. sa température de fusion est de 1850°c et c'est la phase principale liant les réfractaires de la famille al_2o_3-sio_2. une autre phase intéressante est le spinelle ma ou mgo-al_2o_3, utilisé par exemple dans les matériaux de magnésie à liaison spinelle largement utilisés en cimenterie.

on peut déjà noter ici qu'il y a quelquefois une certaine confusion usuelle entre les noms de l'oxyde (par exemple al_2o_3 ou alumine) et celui de la phase stable habituelle (le corindon de structure hexagonale ou corindon α).

pour fabriquer des grains réfractaires à incorporer dans les matériaux, il faut que les fabricants de matières premières réfractaires utilisent des sources d'oxydes et de carbone naturels peu onéreux, mais suffisamment purs. le panel de roches disponibles et de procédés de transformation génère toute une variété de matières premières, dont les plus communes sont présentées dans le tableau 1.

liste des principales matières premières utilisées dans les matériaux réfractaires

famille chimique	matières premières
silico-alumineux sio_2 - al_2o_3	• kaolinite calcinée ≤ 45% al_2o_3 • andalousite (60% al_2o_3)
hautes teneurs en al_2o_3	• bauxite calcinée • corindon brun • corindon blanc • alumine tabulaire
magnésie mgo	• magnésie frittée • magnésie électrofondue
mgo-cao	dolomie calcinée
mgo-sio_2	olivine
spinelles	magnésie + alumine
mgo-al_2o_3-cr_2o_3 …	• spinelles al_2o_3-mgo frittées ou électrofondues • spinelles naturelles chromifères complexes (chromite)
autres	• zircone zro_2 • zircon zro_2-sio_2 • carbure de silicium sic
carbone	graphite naturel

pour une même composition, les matières premières diffèrent par la structure des agrégats, en particulier la taille des cristallites. par exemple, une calcination ou un frittage produisent des cristallites de taille inférieure à ceux issus d'une électrofusion. la deuxième grande différence est en relation avec la pureté de la matière première : une calcination n'éliminera pas les impuretés fusibles alors qu'une succession de procédés chimiques puis de calcination, frittage voire électrofusion va conduire à des puretés beaucoup plus hautes. par exemple, une bauxite calcinée contient 85-90% d'al_2o_3, mais une alumine tabulaire issue d'une bauxite purifiée par le procédé bayer[8] puis frittée à haute température est à 99% d'al_2o_3. si l'alumine est électrofondue, on obtient des agrégats de cristaux de corindon de grande taille, d'où le nom de « corindons brun ou blanc ». on voit apparaître ici toute la complexité des noms des matières premières réfractaires, qui essaient de suggérer les phases et structures que l'on peut obtenir à partir de la diversité des roches et de leurs traitements. de plus, une indication concernant la nature de la liaison réfractaire est indiquée dans les fiches techniques fournies par les fabricants de réfractaires.

toute cette terminologie peut paraître complexe, voire confuse, mais des propriétés d’emploi très diverses peuvent être obtenues en choisissant et combinant les compositions chimiques et minérales, les structures des grains et les procédés de fabrication depuis les roches jusqu’aux réfractaires.

3. références

[1] propriétés et applications des céramiques

sous la direction de p. boch

traité mim - mécanique et ingénierie des matériaux

éditions hermes science publications (isbn 2746201925), 319 p., paris, 2001.

[2] science et technologies céramiques

édité par le groupe français de la céramique, sous la direction de g. fantozzi, s le gallet, j.c. nièpce, edp sciences (isbn 9782759804283), 834 p., 2009.

[3] j. poirier,

céramiques réfractaires

n 4804, éditions techniques de l’ingénieur, paris (2014)

[4] m. e. levin, r. c. robbins, f. h. mc murdie

phase diagrams for ceramists, volume i, the american ceramic society, inc (1964)

[5] refractory castable engineering

a. p.d. luz, m.a.l. braulio, vl c pandolfelli

editor: michel rigaud

göller verlag gmbh, germany, (isbn 978-3-87264-004-8), 2015

[6] ph. blumenfeld, j. poirier

des hauts-fourneaux aux coulées continues : du process métallurgique aux céramiques réfractaires adaptées , n 4850, éditions techniques de l’ingénieur, paris (2022)

[7] céramiques industrielles

sous la direction de g. fantozzi, j.c niepce, g. bonnefont

collection : technique et ingénierie, dunod, (isbn 97821005972222, 2013

[8] ph. blumenfeld, j. poirier

des hauts-fourneaux aux coulées continues : propriétés d'emploi et choix optimal des céramiques réfractaires

n 4851, éditions techniques de l'ingénieur, paris (2022)

[9] p. boisse, a. gasser, j. poirier, j. rousseau

simulations of thermomechanical behavior of composite refractory linings,

composites part b: engineering, 32 [5] 461-474 (2001)

[10] a. gasser, p. boisse, y. dutheillet, j. poirier

experimental and numerical analyses of thermomechanical refractory lining behaviour,

journal of materials: design and applications (imeche), 215 [part l] 41-54 (2001)

[11] n. schmitt, a. burr, y. berthaud, j. poirier

micromechanics applied to the thermal shock behavior of refractory ceramics,

mechanics of materials, 34 725-747 (2002)

[12] j. poirier, p. lefort, s. valette stéphane

corrosion des céramiques, cor 401, éditions techniques de l'ingénieur, paris (2018)

[13] corrosion of refractories: the fundamentals, fire compendium series, volume 2-a, göllerverlag j. poirier, m. rigaud, (2017)

[14] w.e. lee and s. zhang - melt corrosion of oxide and oxide-carbon refractories, international materials reviews, 44 [3] 77-104 (1999).

[15] j. poirier, m.l. bouchetou, f. qafssaoui and j.p. ildefonse

analysis and interpretation of refractories microstructures in studies of corrosion mechanisms by liquid oxides, journal of the european ceramic society, 28 [8] 1557-1568 (2008).

[16] c. denier, z.zhang, e de bilbao.

thermophysical properties of liquid zirconia measured by aerodynamic levitation at high temperature, international journal of thermophysics, 44 [8] (127 (2023)

[17] e. cheremisina, z. zhang, e. de bilbao, j. schenk

density, viscosity and surface tension of high-silicate cao-sio$_2$ and cao-sio$_2$-fe$_2$o$_3$ slags derived by aerodynamic levitation. the behavior of fe^{3+} in high-silicate melts

ceramics international 49(3), 4460-4472 (2023)

[18] e. de bilbao, m. dombrowski, h.pilliere, j. poirier

time-resolved high-temperature x-ray diffraction for studying the kinetics of corrosion of high-alumina refractory by molten oxides

corrosion science 139 346-354 (2018)

[19] m.l. bouchetou, j.p. ildefonse, j. poirier, p. daniellou

mullite grown from fired andalusite grains: the role of impurities and of the high temperature liquid phase on the kinetic of mullitization. consequences on thermal shock resistance.

ceramics international, 31 [7] 999-1005 (2005)

[20] j. berjonneau, p. prigent, j. poirier

thermodynamic modelling of the corrosion of al$_2$o$_3$-mgo refractory castables by secondary metallurgy slags in the steel ladles, ceramics international, 35 [2] 623-635 (2009)

[21] a. v. villalba weinberg, d. goeuriot, j. poirier, c. varona, x. chaucherie

mullite–zirconia composite for the bonding phase of refractory bricks in hazardous waste incineration rotary kiln, journal of the european ceramic society 41 995-1002 [2021]

[22] h. peng

recent progress in microsilica-gel bonded no-cement castables

ceramics international, 49 [14] part b, 24566-24571 (2023)

[23] e. blond, a. k.nguyen, e. de bilbao, th.sayet, a. batakis

thermo-chemo-mechanical modeling of refractory behavior in service: key points and new developments, international journal of applied ceramic technology 17 1693-1700 (2020)

[24] e. de bilbao, p. prigent, c. mehdi-souzani, m.-l. bouchetou, n. schmitt, j. poirier, e. blond, measurement of the volume expansion of sic refractories induced by molten salt corrosion journal of ceramic science and technology, 4 (4), (2013).

[25] e. blond

modélisation du comportement de structures et de matériaux aux hautes températures

habilitation à diriger des recherches, université d’orléans, 10 novembre 2010.

[26] m.moreira, p. pelissari, c.parr, c.wohrmeyer, v.c.pandolfelli

data mining on technical trends and international collaborations in the refractory ceramic area

volume 43, issue 4, ceramics international, 2017

[27] m.santos, v. pandolfelli,

challenges for data mining and machine learning in the refractory industry and end-users

fire-ecers summer school: eco design of refractories, aachen, 2022

[28] m. rigaud, j.poirier, m.huger, t.tonnesen, v. pandolfelli

a refractory engineering program for the 21st century

open ceramics 15 100387 (2023)

[29] p. van beurdeen

management and production of iron by h2 – consequences for refractories

fire-ecers summer school: eco design of refractories, aachen, 2022

[30] j. poirier

hydrogen: an issue and a new challenge for the durability of refractories

proceeding of unitecr 2023 (unified international technical conference of refractories), 26th – 29th september 2023, frankfurt am main, germany

CRÉDITS

AUTEUR(S)/AUTRICE(S)

jacques poirier

jacques poirier est professeur émérite à l'université orléans, au laboratoire cemhti-cnrs.
il a été ingénieur sidérurgiste de 1983 à 2020 et professeur des universités de 2001 à 2020.
jacques poirier effectue ses recherches sur les céramiques réfractaires, il a publié plus de 140 papiers et a déposé 14 brevets. il est également président du groupe français de la céramique.

RELECTURE SCIENTIFIQUE ET MISE EN LIGNE

claire vilain

responsable éditoriale de culturesciences-chimie

RELECTURE SCIENTIFIQUE ET MISE EN LIGNE

emma monnier

stagiaire au sein de l'équipe éditoriale du site culturesciences-chimie

LICENCE DU TEXTE DE L'ARTICLE

creative commons - attribution - pas d'utilisation commerciale - pas de modifications

notes

1. la température à laquelle un échantillon de produit, soumis à une élévation graduelle de température dans des conditions normalisées, se ramollit et s'affaisse sous son propre poids.

2. l'andalousite est une espèce minérale du groupe des silicates sous-groupe des nésosubsilicates, de formule al_2sio_5.

3. la mullite est un silicate d'aluminium. ce solide cristallin a été identifié initialement comme un composé stœchiométrique d'oxyde d'aluminium (iii) et d'oxyde de silicium (iv) dont la composition est $3al_2o_3,2sio_2$ soit en masse, 72% d'oxyde d'aluminium et 28% d'oxyde de silicium. la mullite est rare dans la nature, son dépôt naturel le plus important étant celui de l'île de mull où elle s'est formée dans des conditions exceptionnelles, très semblables à celles demandées pour la production de mullite artificielle : hautes températures et pressions relativement basses. la production industrielle de mullite artificielle nécessite de hautes températures. les silicates hydratés d'aluminium, les mélanges artificiels d'alumine et de silice, etc., se transforment en mullite par cuisson à haute température. les silicates d'aluminium anhydres naturels, sillimanite (orthorhombique), andalousite (orthorhombique) et kyanite (triclinique), qui répondent à la formule chimique al_2sio_5, se transforment à haute température en mullite, avec libération de silice, selon la réaction irréversible (transformation irréversible, la mullite étant stable à toutes les températures).

4. l'alumine tabulaire (ta) est une matière première réfractaire d'alumine qui est frittée dans un four vertical à très haute température. il présente les caractéristiques d'une faible porosité ouverte et de gros cristaux à pores sphériques fermés qui sont piégés lors de la recristallisation lors du frittage rapide. l'alumine tabulaire est un matériau très réfractaire, ayant une très bonne résistance aux chocs thermiques.

5. la dolomie est une roche sédimentaire carbonatée composée d'au moins 50% de dolomite, un carbonate double de calcium et de magnésium, de composition chimique $camg(co_3)_2$, les matières premières utilisées pour les réfractaires cao-mgo sont obtenues par calcination de cette roche.

6. les chromites forment des spinelles chromifères de formule générale : $(mg, fe^{2+})(cr,al,fe^{3+})_2o_4$ selon la composition, on distingue les composés définis idéaux : magnésiochromite $mgcr_2o_4$; ferrochromite, ou chromite sensu stricto $(mg, fe^{2+})(cr,al,fe^{3+})_2o_4$.

7. mise en œuvre du réfractaire non façonné par tassage à l'aide d'un outil spécifique (damage au pilon, damage à la main à l'aide d'une dame).

8. le procédé de production industrielle d'alumine à partir de la bauxite a été mis au point en 1887 par le chimiste karl-josef bayer. il est toujours exploité aujourd'hui grâce à des améliorations essentielles apportées au cours du temps. la bauxite est broyée puis mélangée à de la soude à haute température et sous pression. la liqueur obtenue, l'aluminate de sodium, est débarrassée de ses impuretés, puis diluée et refroidie, ce qui provoque la précipitation d'oxyde d'aluminium hydraté. celui-ci est alors calciné pour obtenir l'alumine destinée à la production d'aluminium.