

Ю.П. Рибальченко

(Україна, Дніпропетровськ, Державний ВНЗ "Національний гірничий університет")

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОГНЕТРИВКОЇ ФУТЕРОВКИ МЕТАЛУРГІЙНИХ АГРЕГАТІВ

Вступ

Теоретичне дослідження процесів перенесення тепла у вогнетривких матеріалах належать до найбільш складних завдань теплофізики дисперсних середовищ. Нині відомо багато механізмів перенесення тепла в теплоізоляційних матеріалах. Це перенесення тепла кондукцією в твердій фазі і газах, конвекція, випромінювання, гомогенні і гетерогенні фізико-хімічні процеси (випар - конденсація, хімічні реакції, об'ємна і поверхнева дифузія і т. д.) [1]. Таким чином, встановлення механізмів теплоперенесення у вогнетривках пов'язане не тільки з аналізом експериментальних залежностей, побудовою математичних моделей, кількісною оцінкою параметрів цих моделей, але і з конкретними умовами їх роботи. Процеси перенесення тепла у вогнетривкій футеровці металургійних агрегатів (доменна піч та ін.) мають свої специфічні особливості, обумовлені високими температурами і тисками, при яких вони відбуваються.

Постановка завдання

Для вирішення завдання побудови моделі процесу теплоперенесення у вогнетривках, адекватних умовам і режимам їх роботи, необхідно проаналізувати і узагальнити результати чисельних теоретичних і експериментальних досліджень, оцінити міру впливу різних механізмів теплопровідності, провести ідентифікацію параметрів теоретичної моделі з метою визначення кількісних значень її параметрів.

Мета роботи

Розробка інформаційних основ технології розрахунку температури вогнетривкої футеровки доменних печей при різних механізмах теплопровідності, що дозволяє за допомогою термодатчиків, встановлених у кладці, отримати реальну температуру футеровки з урахуванням коефіцієнта теплопровідності.

Визначення механізмів перенесення тепла у вогнетривках

Серед найбільш актуальних проблем чорної металургії можна виділити проблему підвищення надійності проектування і роботи різноманітних теплових агрегатів, основними конструкційними і теплоізоляційними матеріалами яких є вогнетриви.

Слід відзначити виключно широкий спектр умов застосування вогнетривів. Вони використовуються в широкому температурному діапазоні до 1800 °С і вище, в різних газових середовищах (від глибокого вакууму до тисків понад 10⁷ Па).

Складний характер структури і різноманіття механізмів передачі у вогнетривких матеріалах обумовлюють застосування терміну ефективна теплопровідність λ . Ефективна теплопровідність пористих матеріалів визначається цілим набором механізмів: кондукція в твердій і газоподібній фазі, конвекція, випромінювання, процеси взаємозв'язаного тепло- і масопереносу. Складові ефективної теплопровідності можна визначити таким чином:

$$\lambda = \lambda_{\kappa\partial} + \lambda_{\kappa\text{в}} + \lambda_{\text{випр}} + \lambda_E ;$$

$$I_{\kappa\partial} = I_{\text{ТВ}} \cdot f \left(\text{П}, \frac{I_{\Gamma, \text{П}}}{I_{\text{ТВ}}} \right)$$

тут λ , $\lambda_{\text{ТВ}}$, $\lambda_{\Gamma, \text{П}}$ – відповідно ефективна теплопровідність матеріалу, теплопровідність твердої фази і газу в порах; П – пористість; $\lambda_{\kappa\partial}$, $\lambda_{\kappa\text{в}}$, $\lambda_{\text{випр}}$, λ_E – складові ефективної теплопровідності матеріалу, пов'язані з кондукцією, конвекцією, випромінюванням і фізико-хімічними процесами.

Із аналізу різних механізмів перенесення виходить, що ефективна теплопровідність матеріалу в загальному випадку залежить від граничних умов і не є тільки властивістю матеріалу. Так, $\lambda_{\kappa\partial}$ монокристалів при низьких температурах залежить від їх розмірів; $\lambda_{\kappa\text{в}}$, λ_E – залежать від розмірів, форми і орієнтації зразка в полі сили тяжіння; $\lambda_{\text{випр}}$ залежить від розмірів і форми зразка, оптичних властивостей меж, спектрального складу випромінювання, що падає, і т. д. Нині в теплотехнічних розрахунках у більшості випадків передбачається, що теплопровідність не залежить від граничних умов і є властивостями матеріалу. Наприклад, при аналізі процесів випромінювання передбачається, що зразки є "оптично товстим шаром"; при аналізі конвекції обмежуються діапазоном зміни тиску газу, в якому її вкладом в теплопровідність можна нехтувати. Для промислових вогнетривів у більшості випадків такий підхід є фізично виправданим.

Нижче детально розглянуті методи розрахунку ефективної теплопровідності та її складових у вигляді аддитивної функції, без урахування пористості:

$$\lambda = \lambda_{\text{фон}} + \lambda_{\text{фот}} + \lambda_{\text{диф}} + \lambda_{\text{кін}} + \dots .$$

Вирішити поставлену проблему в аналітичному виді практично неможливо. Передусім це пов'язано з великим числом чинників, що впливають на теплопровідність. Крім того, технічно дуже складно створити набір зразків, щоб у них незалежно змінювався один параметр при фіксованих інших. Наприклад, при зміні пористості найчастіше міняється розмір зерен і пор, мікротріщинуватість і структура міжзернових меж. При цьому контроль цих супутніх змін можливий далеко не завжди.

Проте для інженерних додатків не потрібна дуже глибока деталізація процесу. У зв'язку з цим при аналізі теплопровідності необхідно розробити по можливості найбільш прості і наочні методи розрахунку моделі. Помітимо, що будь-яка така модель, природно, може лише приблизно описати поведінку процесу теплопровідності. Так, в моделі можна замінити складну хаотичну струк-

туру на впорядковану, або враховувати вклад пористості інтегрально без розподілу пор за розміром т. д. Завданням цієї роботи є розробка інженерної моделі процесів теплопровідності у вогнетривкій футеровці металургійних агрегатів, адекватному конкретним режимам їх роботи.

З позиції фізики твердого тіла вогнетриви у більшості випадків є полікристалічними або аморфними діелектриками, або напівпровідниками [2-5]. Основна фаза вогнетривкого матеріалу може бути сумішшю або хімічною сполукою декількох речовин. Вона, як правило, містить велике число домішок, має мікро- і макроскопічні дефекти кристалічної решітки. Найважливішою особливістю структури цих матеріалів є наявність включень у вигляді пор і мікротріщин.

У діелектричних кристалах тепло переноситься фононами, які є квантами енергії нормальних коливань атомів кристала. При цьому величина теплопровідності обумовлюється ангармонічним характером коливань атомів. Ангармонізм коливань атомів призводить до взаємодії між фононами, в результаті якої відбуваються процеси розщеплювання фонона на два і більше і утворення одного фонона з декількох. Такі процеси називаються фонон-фононним розсіюванням. Вірогідність їх протікання, як і вірогідність протікання будь-яких процесів розсіювання, характеризується ефективним перерізом розсіювання S . Знаючи ефективний переріз розсіювання, можна визначити довжину вільного пробігу фононів L як

$$L = \frac{1}{n_f S}, \quad (1)$$

де n_f – концентрація фононів. Таким чином, коливання кристалічної решітки можна подати як газ, частинками якого є фонони, що стикаються. Ці частинки долають відстань L із середньою швидкістю v , яка дорівнює швидкості звуку. Газ фононів, ув'язнений в межах поверхонь зразка кристала і має теплоємність одиниці об'єму кристала C_v і концентрацію n_f . Теплопровідні властивості газу фононів можуть бути охарактеризовані так само, як і теплопровідні властивості звичайного газу, частинками якого є молекули.

У кінетичній теорії газів показано [6, 7], що коефіцієнт теплопровідності газів

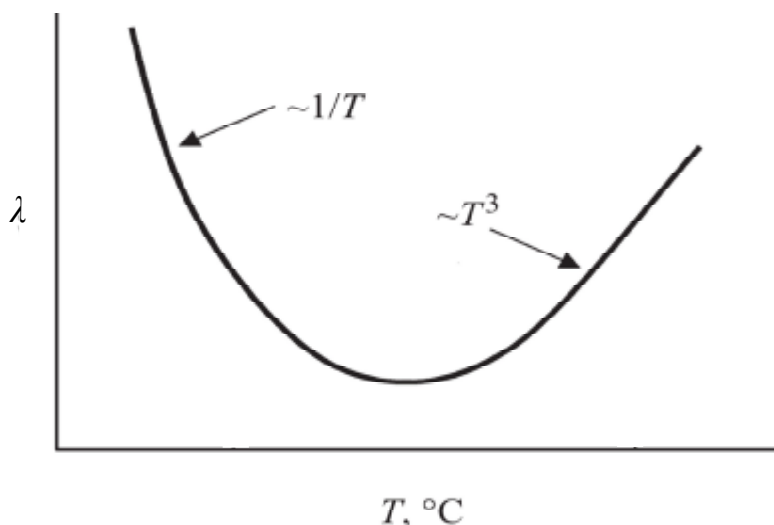
$$I = \frac{l C_n C}{3}, \quad (2)$$

де l – довжина вільного пробігу молекул газу; C – швидкість їх теплового руху; C_v – теплоємність одиниці об'єму газу.

Формула (2) дозволяє судити про закономірності коефіцієнта теплопровідності газу фононів або так званої решітчастої складової теплопровідності твердих тіл. Так, з формули (2) випливає, що температурна залежність решітчастого коефіцієнта теплопровідності визначається добутком $l C_v$, оскільки залежність швидкості звуку твердих тіл від температури невелика.

Температурна залежність теплоємності твердого тіла добре відома і описується теорією Дебая. При високих у порівнянні з температурою Дебая θ температурах теплоємність практично постійна C_v , а в ділянці низьких температур C_v зменшується пропорційно відомому закону T^3 . Що ж до l , то в ділянці високих температур ця величина зменшується зворотно пропорційно до температури, а в ділянці низьких температур вона постійна. Тому в ділянці низьких температур добуток lC_v зростає, а в ділянці високих температур – зменшується і, отже, в цілому ця залежність проходить через максимум. Відповідно до цього добутку змінюється і температурна залежність решітчастої складової коефіцієнта теплопровідності.

На рисунку зображена температурна залежність решітчастої складової коефіцієнта теплопровідності діелектричних матеріалів і вказані переважаючі механізми розсіювання фононів [3]. Річ у тому, що розсіювання фононів, яке і визначає теплопровідність матеріалу, може відбуватися не тільки в результаті їх взаємного зіткнення, але і при взаємодії з дефектами, а при дуже низьких температурах основним є механізм взаємодії фононів з межами кристала.



Схематична залежність коефіцієнта теплопровідності від температури

У діапазоні високих температур переважає механізм теплопровідності, зумовлений фонон-фононою взаємодією. Високі температури призводять до росту концентрації фононів n_f і отже відповідно до формул (1) і (2) до падіння λ . Підвищення концентрації фононів супроводжується також посиленням інтенсивності фонон-фононного розсіювання, що призводить до збільшення перерізу розсіювання S , зменшенню довжини вільного пробігу фононів l і знову ж таки до зменшення λ .

У більшості вогнетривів (Al_2O_3 , MgO , CaO , Cr_2O_3 , BeO та ін.) фононна теплопровідність при низьких температурах висока, а з підвищенням температури знижується і найточніше описується рівнянням Ейкена

$$l_{\text{фон}} = \frac{1}{k_1 T + k_2}, \quad (3)$$

де k_1, k_2 – експериментальні константи.

Таким чином, можна зробити висновок, що фононна теплопровідність зворотно пропорційна температурі ($\lambda_{\text{фон}} \sim T^{-1}$). З експериментальних робіт відомо, що поширення тепла фононною теплопровідністю істотно тільки в інтервалі температур від кімнатної до 800 – 1300 К [8].

У ділянці більш високих температур довжина вільного пробігу фононів у кристалах залишається постійною і подальша зміна теплопровідності обумовлена внеском теплового випромінювання.

Для оцінки величини фотонної теплопровідності вогнетривкого матеріалу використовують формулу.

- Генцеля в інфрачервоній області випромінювання [8], яка має вид

$$I_{\text{фот}} = \frac{16}{3} \cdot \frac{n_{\text{пр}}^2 c_0 T^3}{\alpha_{\wedge}}, \quad (4)$$

де $n_{\text{пр}}$ – коефіцієнт пропускання; c_0 – постійна Генцеля; α_{\wedge} – коефіцієнт поглинання.

Для випадку оптично товстого шару в припущенні ізотропного розсіювання найбільш поширеною є формула Росселанда [9], яка має вид

$$I_{\text{фот}} = \frac{16}{3} \cdot \frac{n_{\wedge}^2 \sigma T^3}{k_{\wedge}}, \quad (5)$$

де n_{\wedge} – показник заломлення середовища; $k_{\wedge} = \alpha_{\wedge} + \beta_{\wedge}$ – коефіцієнт послаблення при довжині хвилі \wedge ; σ – постійна Стефана-Больцмана.

Таким чином, здатність твердих тіл пропускати теплові випромінювання повинна зростати пропорційно третього степеня температури ($\lambda_{\text{фот}} \sim T^3$).

При нагріві вогнетривів – гетерогенних багатофазних матеріалів із складною структурою – можуть відбуватися різноманітні фізико-хімічні процеси: гомогенні і гетерогенні хімічні реакції, випар, сублімація, та інші фазові перетворення, поверхнева і об'ємна дифузія, сегрегація мікродомішок, утворення і розпад твердих розчинів, утворення і анігіляція дефектів кристалічної решітки, кристалізація, рекристалізація, спікання, ріст зерен, рух мікро- і макроскопічних включень, коалесценція пор і т.д. [10, 11]. Усі наведені процеси термічно активуються, і концентрація їх продуктів пов'язана з температурою експоненціальною залежністю [12]. Процес перенесення маси супроводжується перенесенням тепла і підвищенням загальної теплопровідності матеріалу. Величина дифузійної теплопровідності оцінюється такою формулою [1]:

$$I_{\text{диф}} = D_n r(T) \frac{\Delta Q^2}{RT^2} \cdot \frac{4m}{d}, \quad (6)$$

де $\rho(T)$ – концентрація домішок; ΔQ – теплота процесу; R – універсальна газова постійна; m – об'ємна концентрація сегрегування речовини; d – діаметр циліндричної пори.

Аналізуючи конвективну складову теплопровідності у вогнетривах, можна показати, що передача здійснюється за допомогою мас газу, який рухається, в порах або макротріщинах лише у вогнетривах з високою газопроникністю при високих тисках. Згідно [13]

$$\begin{aligned}
 I &= I_{\text{кд}} \cdot Nu^*, \text{ тобто } I_{\text{кв}} = I_{\text{кд}} (Nu^* - 1); \\
 Nu^* &= f(Ra^*, L/L_0, j); \\
 Ra^* &= \frac{qbL_0 \Gamma g^2 c_p \cdot \Delta T}{ml_{\text{кд}}} = Gr \cdot Pr^* \cdot Da; \\
 Gr &= \frac{qbL_0 \cdot \Delta T}{n^2}; Pr^* = \frac{n}{a^*}; a^* = \frac{I_{\text{кд}}}{g \cdot c_p}; Da = \frac{k}{L_0^2}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Тут λ – ефективна теплопровідність шару; $\lambda_{\text{кд}}$ – теплопровідність за відсутності конвекції; Gr , Da – критерій Грасгоффа-Дарсі; Nu^* , Pr^* , Ra^* – відповідно модифіковані критерії Нусельта, Прандтля, Релея; L , L_0 , φ – довжина, товщина і кут нахилу шару відповідно до горизонтальної поверхні; q – прискорення вільного падіння; ΔT – перепад температур; β – коефіцієнт об'ємного розширення газу; ν , μ – кінематична і динамічна в'язкість газу; γ – щільність газу; Γ – коефіцієнт газопроникності пористого матеріалу.

Відмітимо, що методи розрахунку конвективної складової для вогнетривів знайшли підтвердження в роботах Мальтера і Шпільрайна [14, 15]. У цих роботах показано, що збільшення тиску азоту до $\sim 5 \cdot 10^5$ Па сприяє зростанню теплопровідності алюмосилікатних вогнетривів не більше ніж на 10-20% і пов'язано в основному зі зменшенням температурного стрибка в тонких порах і мікротріщинах. При тисках близько $1,5 \cdot 10^7$ Па починається помітне зростання теплопровідності, пов'язане з розвитком об'ємної конвекції.

Для подання в аналітичному виді температурної залежності теплопровідності (при невисокому тиску) досить двох показників $\lambda_{\text{фон}}$ і $\lambda_{\text{фот}}$.

$$\begin{aligned}
 \lambda_{\text{фон}} &= \alpha + b \cdot 1/T; \\
 \lambda_{\text{фот}} &= cT^3.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Кожна складова рівнянь (8) відбиває внесок окремого механізму теплопередачі і має певний фізичний сенс. Загальне рішення ефективної теплопровідності можна шукати у вигляді аддитивної функції тобто полінома

$$\lambda(t) = \alpha_1 + b_1 T + c_1 T^2 + d_1 T^3. \tag{9}$$

Для вогнетривів, що містять велику кількість чистих оксидів (наприклад, корундових, окисних) і підпорядковуються закону Ейкена, можна використати апроксимуючу залежність виду

$$\lambda(t) = \alpha_1 + b_1 T + c_1 T^2 + e_1 (t+273)^{-1}. \quad (10)$$

Тут λ – теплопровідність, Вт/м·К; t – температура, °С; коефіцієнти α_1 , b_1 , c_1 , d_1 і e_1 можуть набувати нульових значень.

На базі виконаних теоретичних досліджень сформулюємо важливу особливість моделі процесу теплопровідності футеровки металургійних агрегатів: модель ефективної теплопровідності вогнетривів разом з традиційними чинниками – пористість, фазовий склад, середній розмір пор, теплопровідність твердої фази, механізми кондукції, конвекції і випромінювання в порах – повинна враховувати:

а) складові теплопровідності в порах, пов'язані з гетерогенними фізико-хімічними процесами;

в) прозорість для теплового випромінювання твердої фази більшості видів гетерогенних вогнетривів у поєднанні з інтенсивним його розсіюванням на неоднорідностях структури.

Відмітимо, що розроблена модель для розрахунку ефективної теплопровідності та її складових враховує сукупність наведених чинників, а також відомі уявлення про механізм теплопровідності і не є специфічною тільки для вогнетривів. Вона може бути застосована для пористої кераміки, гірських порід, кам'яного лиття, різноманітних будівельних матеріалів, мікротріщинуватих стекл, плазменонапилених покриттів та інших об'єктів схожих груп і класів. Крім того, найбільший інтерес викликає зворотне завдання – визначення параметрів структури на основі вимірної температури в різних газових середовищах.

Висновок

При високих температурах інтенсифікація гетерогенних фізико-хімічних процесів сприяє зростанню відповідних складових теплопровідності в порах і тріщинах та шунтуванню їх теплових опорів. Найбільш важливі процеси, що дають внесок в теплопровідність практично усіх видів щільних вогнетривів, у тому числі високочистих, можуть протікати без утворення газоподібних продуктів: сегрегація, виникнення і дифузія дефектів кристалічної решітки та ін. Чисельні дані довідників за теплофізичними властивостями твердих речовин і оригінальної літератури з експериментального вивчення ефективної теплопровідності вогнетривів, близьких за своїм хімічним складом і пористістю, але зразків, що розрізняються за розмірами і формою, швидкістю зростання температури, а також величиною теплового потоку, можуть змінюватися від 30 до 100 % [1, 10]. З цієї причини виникає проблема встановлення відповідності розрахункових характеристик теплових полів за експериментальними даними про теплопровідність з температурними полями в реальних умовах експлуатації.

Список літератури

1. Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А. Теплофизические свойства огнеупоров. – М.: Metallurgy, 1982. – 152 с.
2. Андриянов Н.Т., Лукин Е.С. Термическое старение керамики. – М.: Metallurgy, 1979. – 100 с.
3. Демиденко Л. М. Высокоогнеупорные композиционные покрытия. – М.: Metallurgy, 1979. – 216 с.
4. Handbook of Materials Selection for Engineering Application. Mechanical Engineering Series 113/ Ed. by G. T. Murray (Dept of Mat. Eng., California Polytechn. State Univ. San Luis Obispo CA) Mareel Dekker, New York, 1997.
5. Огнеупоры и футеровки : Пер. с япон. – М.: Metallurgy, 1976. – 416 с.
6. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Мир, 1964. – 487 с.
7. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. – М.: Мир, 1974. – 472 с.
8. Охотин А.С., Боровикова Р.П., Начаева П.В. Теплопроводность твердых тел: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1984, – 320 с.
9. Росселанд С. Астрофизика на основе теории атома. – Л.: ОНТИ, 1936. – 302 с. с ил.
10. Дулнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справ. издание. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
11. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справ. издание. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
12. Кигери У.Д. Введение в керамику. – М.: Литература по строительству, 1967, – 499 с.
13. Власюк М.П., Полежаев В.Н. Естественная конвекция и перенос тепла в пористых материалах. – Препринт института прикладной математики АН СССР. – 1975. – № 77, 78.
14. Шпильрайн Э.Э., Мальтер В.Л., Гутман М.Б. Исследование эффективной теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов при высоких давлениях и температурах. // В кн.: Теплофизические свойства твердых тел при высоких температурах. – М.: Изд-во стандартов, 1968. – С. 293 – 298.
15. Лейканд М.С., Мальтер В.Л., Матковский К.А. Вакуумно-компрессионные электрические печи. – М.: Энергия, 1971. – 88 с.

Рекомендовано до друку: профессором Корсуном В.И.