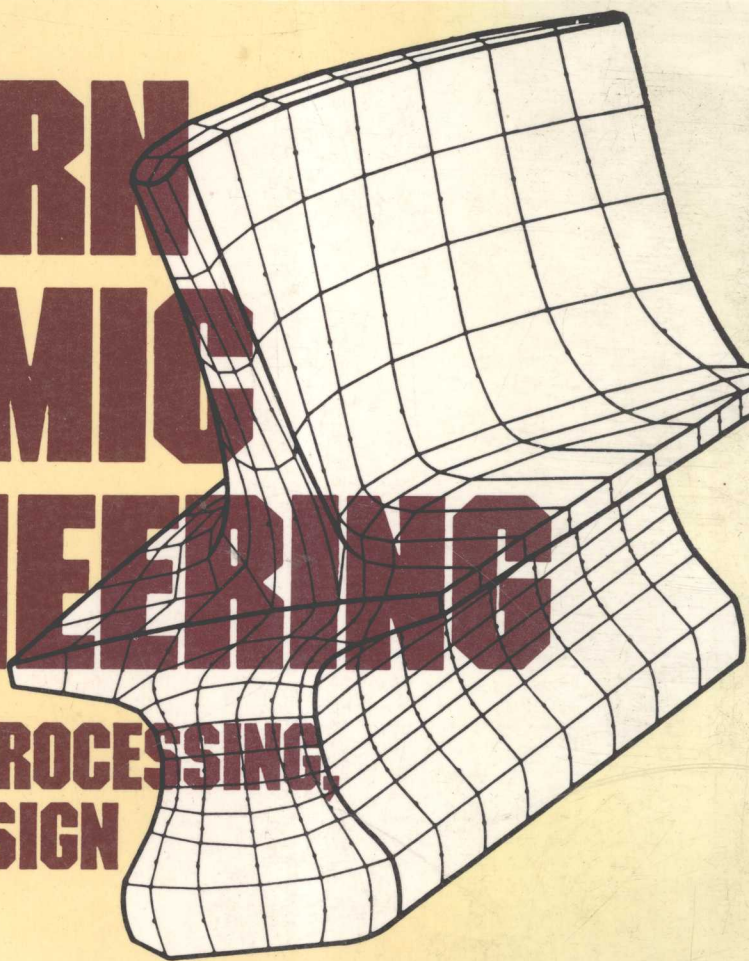


現代陶瓷工程學

于若軍 編譯

MODERN CERAMIC ENGINEERING

PROPERTIES, PROCESSING,
AND USE IN DESIGN



全華科技圖書股份有限公司 印行



全華圖書

法律顧問：陳培豪律師

現代陶瓷工程學

于若軍 編譯

出版者 全華科技圖書股份有限公司

地址 / 台北市龍江路76巷20-2號2樓

電話 / 5 8 1 1 3 0 0 (總機)

郵撥帳號 / 0 1 0 0 8 3 6 - 1 號

發行人 陳 本 源

印刷者 華 一 彩 色 印 刷 廠

門市部 全友書局(黎明文化大樓七樓)

地址 / 台北市重慶南路一段49號7樓

電話 / 3 6 1 2 5 3 2 • 3 6 1 2 5 3 4

定 價 新臺幣 240 元

初版 / 74年12月

行政院新聞局核准登記證局版台業字第〇二二三號

版權所有 翻印必究

圖書編號 021971

原 序

陶瓷材料對現代工業和民生工業愈來愈重要，但是大多數的工程師和技術人員都很少接受陶瓷學上的訓練，也就無法體認和運用陶瓷材料的獨特性質。本書的目的是為了對工程師、學生、教師和技術人員提供關於高級陶瓷的結構、性質、製程、設計觀念和應用等基本概念，特別強調瞭解陶瓷為什麼與金屬和有機物不同，然後應用這些知識選擇最適合的材料。在本書中，我們將討論一些高級陶瓷的特殊用途，其中包括：熱機（heat engine）的組件、裝甲（armor）、永久磁體（permanent magnet）、磷光體（phosphor）、點火器（igniter）、電容器介電體（capacitor dielectric）、熱障塗膜（thermal barrier coating）和氧氣感測器（oxygen sensor）。

本書原先構想成適合作為非陶瓷或材料科系工科學生的教本，但是執筆之後擴大成為陶瓷和非陶瓷專業人士適用的教本和參考書。

本書區分成三大篇，按篇逐步延伸，但每一篇也可以單獨閱讀。

第一篇的標題為“結構和性質”，說明陶瓷的物理性質、熱性質、機械性質、電性質、磁性質和光學性質之起因，並與金屬和有機材料比較之；又討論最適用於各種應用的特殊陶瓷材料性質和其潛在限度。

第二篇的標題為“陶瓷的製程”，討論製造陶瓷組件的過程，並且探討影響性質的材料缺陷最可能在那一個製程步驟中發生，又提供讀者偵測這些缺陷的方法和消除這些缺陷的技術。

第三篇的標題為“陶瓷的設計”，是應用前兩篇所學習到的性質、製程和檢驗原理，來選擇和設計高級工程用的陶瓷組件材料。

作者在準備、教授阿利桑納州立大學 (Arizoa State University) 的三學分陶瓷課程及美國金屬學會 (American Society for Metals, ASM) 的課程時，體認到需要一本對陶瓷材料加以廣泛討論的新教本或參考書。

阿利桑納州立大學的課程是從 1975 年開始設立的，其目的是提供工科學生和非陶瓷專業的工程師對陶瓷材料及其獨特的性質、製程和設計要求有更進一步的認識。每次教授這個課程時，就嘗試採用不同的教科書，包括了 Kingery、Bowen 和 Uhlmann 所著的“陶瓷學概論” (Introduction to Ceramics)，Van Vlack 所著的“工程師適用的物理陶瓷學” (Physical Ceramics for Engineers)，及 Burke、Lenoe 和 Katz 所編的“高功能應用的陶瓷” (Ceramics for High Performance Application)。這三本書都非常優秀，但都不適合這個課程的目的。“陶瓷學概論”這本書太過繁細，而且沒有涉及到製程、製程對性質的影響、加工、非破壞檢驗、損壞分析和陶瓷的設計方法。“工程師適用的物理陶瓷學”這本書雖然較偏重工程導向，但是仍舊無法涵蓋這個課程的範圍。“高功能應用的陶瓷”這本書大多探討燃氣渦輪機和高級熱機的應用，所以範圍也過於狹隘。結果，ASU 的課程最後是以許多參考資料和個人經驗所整理的筆記來教授之。

作者還教過 ASM 的兩個三日課程，名稱分別為“工程用的高強度陶瓷” (High-Strength Ceramics for Engineering Application) 和“陶瓷對現代工程的衝擊” (Impact of Ceramics on Modern Engineering)；及一個三日課程中的半日授課，名稱為“高溫的構造材料” (High-Temperature Structural Materials)。這些課程都是對來自各種不同專業的工程師和技術人員講授的。如同 ASU 課程的情形，沒有合適的教本或參考書可用，於是又將筆記進一步修訂，尤其是關於結構和製程對性質、設計方法、損壞分析、特定應用的討論部份，以準備這些課程的需要。

從 ASU 和 ASM 課程，作者清楚體認到需要一本新的教本或參考書，於是便根據這些課程的筆記加上許多研究文獻，經過兩年編寫才完成了這本書。

有許多組織和個人都支持這項努力，所以作者打算藉這個機會儘可能地表達感謝之意。（以下的誌謝辭，從略）

David W. Richerson

譯者序

雖然人類歷史上首先採用的材料，除了原始的石材之外，可能就是粘土製品的陶瓷（如彩陶、黑陶等）；但是，陶瓷真正成為一門應用科學還是在1935年Muller提出燒結理論才開始的。

尖端科技目前的趨勢是朝向“輕、短、小、多”，這些特性正是陶瓷材料所具備的，尤其陶瓷的特殊性質和多重功能更是其他材料所不及的。因此，時至今日，陶瓷不僅在材料領域中佔有一席之地，而且也將成為廿一世紀的材料主流。縱然如此，陶瓷仍有許多難以克服的困難；例如，陶瓷的韌性便是不易突破的瓶頸之一。於是，如何取捨各種材料的長處，來針對應用上的要求作適當的設計，甚至開發成新的複合材料，或許才是首要的課題。這仍有待吾人的努力，以迎接“超”技術的革命（有人稱之為第三次工業革命）。

譯者編譯這本書的目的，是因為本書大部份以應用實例（甚至包括一些正在開發者）為著眼，對陶瓷的性質、製程和設計都有深入淺出的探討，非常適合國內的陶瓷工程人員作為參考書，也極為適合有志從事陶瓷工作的學子作為教科書。

本書編譯過程中，承蒙全華圖書公司負責人陳本源先生和全體編輯同仁的鼎力相助，譯者在此致最深忱的謝意。此外，譯者的父母、家人和朋友在精神上的鼓舞、支援，也非筆墨所能表達譯者的感謝之意。

本書譯者由於才疏學淺，疏漏之處尚望讀者懇予指正。倘書中有未能表達原著的本意之處，其責任自應由譯者負之。

于 若 軍 謹序

民國74年10月20日於臺北

編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

現在我們就將這本「現代陶瓷工程學」呈獻給您。陶瓷的應用正方興未艾無可限量。本書著重實際的應用，係譯自 Riche-
rson 的 “Modern Ceramic Engineering” 一書，內容共分
為陶瓷結構、製成、設計三篇，主要探討陶瓷、金屬和有機材料的優缺點及如何選用陶瓷材料和解決陶瓷材料所遇到的一些問題等，並且每篇附有精詳的實例供讀者參考，極適合大專機械或相關科系引為輔助教材。

導 論

本書的目的是提供有關陶瓷技術和其實際應用的知識。本書的編寫方式是採取非數理導向，並且強調基本材料和所必需具備的性質觀念，以提供讀者對較重要的陶瓷材料和設計上考慮要素相關的知識。

本書分成三大篇：

第Ⅰ篇：結構和性質

第Ⅱ篇：陶瓷的製程

第Ⅲ篇：陶瓷的設計

我們在第Ⅰ篇中將探討陶瓷的物理性質、熱性質和機械性質，及其與原子鍵結、晶體結構和微結構的關係。並且還強調陶瓷與金屬和有機材料的比較，及引進陶瓷的設計觀念。

第Ⅱ篇將研究陶瓷的製造過程，說明從選擇原料經過成形、緻密化到品質管制的每一個步驟細節，每一個製程步驟都是以其對陶瓷組件成品的性質和合格率來加以討論。瞭解組件的製造方式能夠幫助工程師解決應用上的問題。

在第Ⅲ篇中，我們應用前兩篇所涵蓋的資料來設計陶瓷，其中特別強調陶瓷所要求的設計方法與金屬和塑膠之間的差異；並且也將說明斷裂分析的重要性和技術問題。最後一章則將討論對特定應用選擇適用的材料。

陶瓷幾乎與工業和日常生活的每一個面向都息息相關，所以瞭解了陶瓷是什麼和陶瓷能作什麼，可以大大地擴展工程師、技術人員的視野和效度（effectiveness）。

下面的練習將幫助我們說明陶瓷材料的各種工程應用。在開始閱讀本書的正文之前，請讀者根據以往的經驗，寫出最適用於下列每一項應用的陶瓷材料和使這種（或這些）陶瓷成為最佳抉擇的特殊性質。

- (1) 噴砂嘴 (sandblast nozzle)。
- (2) 窯爐襯裡的隔熱耐火材料 (insulating refractory)。
- (3) 密封 (seal)。
- (4) 陶器 (pottery)。

- (5) 高溫的熱交換器 (heat exchanger)。
- (6) 裝甲 (armor)。
- (7) 永久磁體 (permanent magnet)。
- (8) 可以將熱源迅速帶走的陶瓷淬火塊 (quench block)。
- (9) 大空梭之類的載人太空飛行器重回大氣層所必需的防熱材料。
- (10) 在所有方向上性質都相同 (即等向性) 的透明材料。
- (11) 在一個方向上的熱膨脹很高而其他方向上的熱膨脹很低的材料。
- (12) 生坯成形成所要求的形狀後，在緻密化或燒成作業時不會使原來尺寸改變的材料。
- (13) 球磨用的助磨介質 (grinding medium)。
- (14) 由低成本的纖維和有機材料製成的構造用複合材料。
- (15) 在高溫暴露下會使基板的溫度顯著降低的熔化顆粒噴霧塗膜。
- (16) 泥漿注造 (slip casting) 用的低成本模具材料。
- (17) 隔開和保護熱電偶導線的材料。
- (18) 能夠承受嚴重熱震的材料。
- (19) 電子元件的基板。
- (20) 摻雜二極體 (diode) 或其他電子元件用的高純度擴散爐的爐具 (kiln furniture)。
- (21) 以 1600 因數使電容器 (capacitor) 儲存電荷能力增加的陶瓷材料。
- (22) 用於高溫窯爐隔熱而密度非常低的材料。
- (23) 護罩 (radome)。
- (24) 燃氣渦輪機的定子 (stator)。
- (25) 可以在現場使用的高溫膠結劑。
- (26) 用於切削工具和砂輪的材料。

雖然這些項目祇是許多陶瓷和其應用的一小部份，但是也足以說明陶瓷的應用範圍有多麼廣及工程師熟悉專有名詞的定義和陶瓷材料的種類有多麼重要。爲了更進一步說明這個觀點，請讀者再作答另外一個問題：“在你的專業範圍內有那些應用使用到陶瓷？”請列舉 10 項較爲簡單的應用，再列舉 20 項較具有挑戰性但還是可以達成的應用。

目 錄

第一篇 結構和性質

1

1

原子鍵結和晶體結構

3

1.1 原子中的電子組態

4

1.2 鍵 結

5

1.3 多晶型和變態

18

1.4 非晶質結構

20

1.5 分子結構

22

問 題

27

解 答

28

參考資料

30

2

物理性質、熱性質、電性質、 磁性質和光學性質

31

2.1 物理性質

32

2.2 熱性質

36

2.3 電性質

43

2.4 磁性質

52

2.5 光學性質

55

問 題

59

解 答

60

參考資料

62

3

機械性質及其測定 65

3.1 彈 性 66

3.2 強 度 71

3.3 斷裂韌性 87

問 題 88

解 答 89

參考資料 90

4

時間、溫度和環境效應對性質的影響 93

4.1 潛 變 94

4.2 靜態疲勞 105

4.3 化學的效應 107

4.4 沖 蝕 120

4.5 衝 擊 122

4.6 熱 震 126

問 題 128

解 答 128

參考資料 128

第二篇 陶瓷的製程 131

5

粉末的製程 133

5.1 原 料 134

5.2 粉末的整粒 139

5.3 預固結 152

5.4 總 結 156

參考資料 156

6

成形的製程 159

6.1 壓 製 160

6.2 注 造 168

	6.3 塑性成形	178
	6.4 其他的成形製程	184
	參考資料	189
7	緻密化	191
	7.1 燒結理論	192
	7.2 改良式的緻密化製程	209
	參考資料	226
8	成品加工	229
	8.1 材料移除的機構	230
	8.2 對強度的影響	233
	參考資料	241
9	品質管制	243
	9.1 製程中的品管	244
	9.2 規格和檢定	245
	9.3 證實試驗	247
	9.4 非破壞性檢驗	249
	參考資料	263

第三篇 陶瓷的設計

265

10	設計上的要素	267
	10.1 應用上的要求	268
	10.2 性質上的限制	269
	10.3 製造上的限制	270
	10.4 成本的考慮要素	273
	10.5 信賴度的要求	273
	10.6 總 結	273
	參考資料	274

11	設計的方法	275
	11.1 經驗的設計	276
	11.2 肯定的設計	276
	11.3 機率的設計	278
	11.4 線型彈性破壞力學法	284
	11.5 合併的方法	284
	參考資料	284
12	損壞分析	287
	12.1 斷口型相學	288
	12.2 總 結	320
	參考資料	321
13	應用：材料的選擇	323
	13.1 噴砂嘴	324
	13.2 隔熱耐火的窖爐襯裡	324
	13.3 密 封	325
	13.4 陶 器	327
	13.5 高溫熱交換器	327
	13.6 裝 甲	328
	13.7 永久磁體	329
	13.8 陶瓷淬火塊	329
	13.9 載人太空船的防熱片	330
	13.10 等向性透明材料	331
	13.11 具有異向性熱膨脹的材料	331
	13.12 緻密化過程中不會改變尺寸的陶瓷	332
	13.13 球磨機用的助磨介質	332
	13.14 低成本的纖維——有機物複合材料	333
	13.15 熱障護膜	333
	13.16 低成本的泥漿注造模	334
	13.17 熱電偶導線保護管	334
	13.18 抗熱震性的材料	334

13.19	電子元件的基板	335
13.20	二極體製造用的爐具	335
13.21	高電荷儲存能力的元件	336
13.22	低密度的窯爐隔熱材料	336
13.23	護 罩	336
13.24	燃氣渦輪機的定子	336
13.25	高溫膠結劑	337
13.26	切削工具和砂輪用的研磨料	337
	參考資料	338

第一篇

結構和性質

第 1 章	原子鍵結和晶體結構	3
第 2 章	物理性質、熱性質、電性質 、磁性質和光學性質	31
第 3 章	機械性質及其測定	65
第 4 章	時間、溫度和環境效應對 性質的影響	93

以前未曾學過陶瓷學的人多半會問：“什麼是陶瓷(ceramic)？”或者是“陶瓷和金屬有什麼不同？”一般人都認為陶瓷很脆，並且具有高的熔點，是熱和電的不良導體，又不具磁性；而金屬則具有延性，是熱和電的良導體，又可能具有磁性。這些陳舊的觀念，對陶瓷或金屬都不完全是正確的。實際上，我們很難清楚地將陶瓷歸成一類，又將金屬歸成另外的一類。毋寧說，有一些中間化合物既具有一些陶瓷的特性，又具有一些金屬的特性。

一種材料的本性，大部份是受其內部的原子和鍵結機構所控制。所以，在第1章，我們先討論原子鍵結的型式，所生成的結構，及最可能結合成陶瓷、金屬和有機材料的原子元素。第2章則以材料內的原子元素、鍵結機構和晶體結構的觀點，討論物理性質、電性質、磁性質、熱性質和光學性質。我們在第3章，也以相同的觀點，來說明機械性質。第4章探討與時間相關和環境相關的性質。我們在第2、3和4三章中，都是以一些陶瓷材料的性質，來說明其應用上的限度。

1

原子鍵結和晶體結構

1.1	原子中的電子組態	4
1.2	鍵 結	5
1.3	多晶型和變態	18
1.4	非晶質結構	20
1.5	分子結構	22