

高品質氧化鋯粉體之應用

遲秉成 李亮志

摘要

由於氧化鋯具有不同晶相，利用其相變化及氧離子擴散特性，具有許多重要的高科技應用。使用超細研磨技術，可以將高純度(>99.9%)單斜晶粉末奈米化(nanoized)，應用在積層陶瓷電容(multi-layer ceramic capacity, MLCC)，當作添加劑(additive)來改變電容值；也可與聚酯或尼龍粒製作成遠紅外線纖維(far infrared fiber)達到吸熱排汗、保溫健康的功能；另一個系列 3Y 氧化鋯遠較氧化鋁具有高強度(>1200MPa)與韌性(>4 MPa·m^{0.5})特性，因此可用來做研磨用的 Y-TZP 磨球、精密測量用的標準球、或是需要高速運轉的軸心(shaft)與軸套(sleeve)；在高溫環境及能源領域，採用 8Y 氧化鋯的高溫離子導電(>450°C)特性，測量鋼水中與汽車排氣中氧含量用的氧氣感測器(oxygen sensor)、燃料電池(fuel cell)中固態電解質(electrolyte)皆可使用該材料。由於國內廠商已經可以自製粉體，提供上述客製化(customized)氧化鋯粉末，供後段業者使用。由於掌握關鍵性原料，不必再受限日本原料廠商，相信未來市場開發潛力無窮。

關鍵字: 氧化鋯、奈米化、Y-TZP 磨球、氧氣感測器、固態電解質

1. 前言

氧化鋯(zirconia)的兩個主要來源為自然界的鋯英砂(zircon, $ZrSiO_4$)及斜鋯礦(baddeleyite)，其中全世界 80%鋯英砂主要產地集中在澳洲、南非以及美國三個國家，⁽¹⁾主要應用在耐火材料(refractory)、脫蠟鑄造(investment casting)及高品質粉體之原料；斜鋯礦主要產地則在南非、巴西及蘇聯⁽¹⁾，其主要應用在陶瓷染料(ceramic pigment)及磨料(abrasive)市場，而氧化鋯及其相關衍生的用量每年約 36,000 噸。⁽²⁾

氧化鋯是一種極具工業應用潛力的耐高溫材料，除了可以提供高強度、高韌性、高硬度(僅次於鑽石及少數陶瓷)，以及優異的耐磨性與化學腐蝕性。

氧化鋯在室溫為單斜晶相(monoclinic phase)，隨著溫度上升到1170°C時會轉變成正方晶相(tetragonal phase)，溫度再上升至2370°C時則轉換成立方晶相(cubic phase)，而立方晶相則在2680°C溶解成液相⁽³⁾，Wolten⁽⁴⁾指出由正方晶轉換成單斜晶是一種麻田散型(Martensitic transformation)的轉換，而這種相轉換會引起3-5%體積變化，因此會造成微裂

縫(micro-crack)，因此後來研究出添加若干氧化釷(Y_2O_3)、氧化鈣(CaO)或氧化鎂(MgO)等相安定劑(stabilizer)，使得氧化鋯全部維持在高溫的立方晶相，稱做全安定化氧化鋯(full stabilized zirconia, FSZ)，或保有部分的正方晶，稱為部分安定氧化鋯(partially stabilized zirconia, PSZ)，而釷系氧化鋯隨添加3~8mole%氧化釷用量多寡，可形成正方晶或立方晶相含量之不同的微結構，可分別應用在電子、紡織、機械或能源材料及元件上。

2. 奈米氧化鋯粉末在電子材料與紡織之應用

近來電子產品已朝向輕薄短小的發展趨勢，使得被動元件(passive component)在體積的微化下必須提供更高的性能，因此要求陶瓷粉末的粒徑由原來次微米(sub-micron)尺度下縮小至奈米(nano-meter)的尺度，而奈米粉體相較次微米粉體有相當大的改變，主要是與比表面積(specific surface area)有關，因為將粉末奈米化便可提高燒結速率、降低燒結溫度，同時減小燒結體晶粒大小，以增高韌性(toughness)與強度(strength)。

一般奈米粒子分散製程大都以機械研磨方式⁽⁵⁾，在分散劑水溶液或有機溶液中將粉體表面潤濕(wetting)，然後再以機械力量將團聚粒子(agg-lomorate)打開，最後將已潤濕和分離之粉體微粒分散到一均勻相中，並使每一粒子長久分離，形成安定化(stabilization)，而奈米粉體的長期穩定化及生成嚴重的聚結⁽⁶⁾，就是兩個亟需解決的問題，目前我們已

能利用超細分散技術將氧化鋯粉末分散至30~40 nm(圖1)。在電子顯微鏡的觀察下，由於顆粒間凡德瓦吸引力(van der Waals force)，仍有軟聚結的現象。

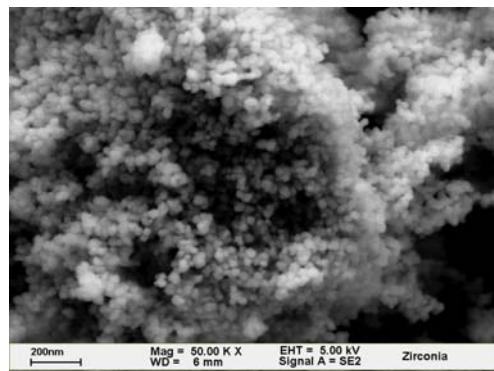


圖1 台灣廠商所製作奈米氧化鋯粉末以LEO1530 電子顯微鏡觀察，其平均粒徑為30~40nm。

紅外線(波長從0.75~1000微米)是太陽光線中的一種輻射線，其屬於不可見光，紅外線又依波長大小可分成近、中、遠紅外線三種，在醫學上有專家⁽⁷⁾指出以氧化鋁(Al_2O_3)、氧化鋯(ZrO_2)、二氧化鈦(TiO_2)及三氧化釷(Y_2O_3)等礦物所製程的精密陶瓷粉末，所吸收及激發出來的遠紅外線能量最強。而以波長在4~14微米的遠紅外線又稱為生育光線，當人體需要散熱冷卻時，流汗的生理現象產生，體表汗珠伴隨著能量，透過吸濕排汗的衣服，將熱能釋出，同時具有遠紅外線之纖維可以加速吸濕層的乾燥，並保持人體皮膚乾爽予以保溫，因此可被應用在復建醫療及預防保健上。目前日本將上述氧化物與聚脂粒(polyester)混合製作成機能性高濃度母粒(master batch)，然後經抽紗拉出遠紅外線細絲纖維，由於陶瓷為硬度極高(莫氏硬度7~9)的顆粒，在經過紡口時，若

顆粒過大($>2\ \mu\text{m}$)易造成磨損斷紗，因此將氧化鋯等陶瓷粉體奈米化，除了可以減少紡口的磨耗，還可以將添加到聚酯粒的奈米陶瓷粉末含量降低，便具有遠紅外線的效果。國內已有多家業者^(7,8)開發出 PET 與尼龍母粒，並製作成遠紅外線保溫棉。

3. 含 Y_2O_3 氧化鋯在結構耐磨元件之應用

3.1 Y-TZP 磨球(grinding media)

由表 1 的比較中，可以了解 3Y 氧化鋯相較其他陶瓷材料具有高強度、高韌性，比重(specific density)大，很適合用來做在電子陶瓷廠中研磨陶瓷粉末用或顏料的磨球。

表 1 精密結構陶瓷的各項物理性質

	氮化矽	氧化鋯	碳化矽	氧化鋁
化學式	Si_3N_4	ZrO_2	SiC	Al_2O_3
密度, g/cm^3	3.2	6.0	3.1	3.8
線性熱膨脹係數, $\times 10^{-6}\ 1/^\circ\text{C}$	3.2	10.5	3.9	7.1
維氏硬度, Hv	1500	1200	2200	1600
彈性模數, GPa	320	220	380	350
泊松比	0.29	0.31	0.16	0.25
三點彎曲強度, MPa	1100	1400	500	300
破壞韌性, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$	6	5	4	3.5

資料來源：Bearing for Extreme Special Environments /KOYO Engineering J. English Edition, No. 156E (2000)

由表 2 各類材質磨球的機械性質比較下，鉻鋼珠的強度及硬度較 Y-TZP 磨球為低，因此磨耗率(wear rate)較 Y-TZP 磨球為差。在低污染的電子陶瓷原料研磨要求下，目前會導致鐵金屬污染的鋼珠研磨已不適合，在奈米及潔淨度要求較嚴苛的環境下，工業界皆以 Y-TZP 磨球為研磨介質的首要選擇，同時在要求粉末的細度(fineness)及純度(purity)下，一般研磨介質已由金屬材料改為陶瓷材料，粉體藉由機械研磨所造成的污染：90%來自研磨球；5%來自研磨轉子(rotor)，另外 5%來自研磨桶壁內襯(lining)⁽⁹⁾，因此磨球的耐磨性(wear resistance)在顧客使用上，便顯的十分重要。

表 2 各類材質磨球機械性質比較表

	密度 (g/cm^3)	硬度 (kg/cm^2)	強度 (MPa)	韌性 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$)
Y-TZP 磨球	5.95-6.0	1000~1400	800~1200	6~10
矽酸鋯磨球	3.85~5.0	600	200-300	5
無鉛玻璃珠	2.6~4.4	200~800	100~300	0.2~0.8
鋼珠球	7.8	400~800	600~800	15

資料來源：Ceramic Media with improved efficiency

在陶瓷耐磨性質中，氧化鋯晶粒大小(grain size)必需小於 $0.4\ \mu\text{m}$ 以下⁽¹⁰⁾，才會顯現出高韌性與強度，要符合上述微結構的粉末要求，是必須利用超細分散技術，將粉末粒徑縮小至 300nm 以下，且粒度呈現單峰分布(single mode)且幅寬窄小，目前國內台灣廠商⁽¹¹⁾可以

提供與日本 T 廠廠牌顯微結構相同(圖 2) 的 Y-TZP 磨球。使用以下耐磨測試方法：磨球重量 1800g(以小數點以下兩位的天平秤重)，被研磨粉末為 3Y 氧化鋯粉 300g，加入去離子水 200g 後，一同放入一公升尼龍球磨罐(轉速 75 rpm)球磨，經 48 小時後，將磨球取出洗淨在 105°C，烘乾 12 小時後秤重，再計算各廠家磨球之磨耗率，由表 3 數據顯示：台灣廠商所自製磨球磨耗率(10.9 ppm/hr)已優於日本 T 廠牌(13.2 ppm/hr)，品質已超越日本磨球水準。

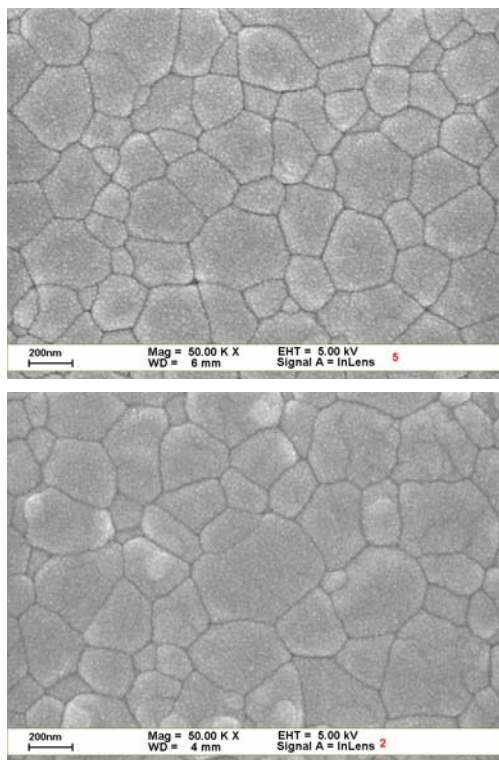


圖 3 日本 T 廠牌磨球(上方)與台灣 T 廠所自製磨球(下方)顯微結構 SEM 照片(以 1280°C、18 分鐘進行熱腐蝕)，經測量 40~50 個晶粒後，其平均晶粒與最大晶粒大小分別為 0.31 and 1.17 μm ，與 0.33 and 1.01 μm 。

3.2 風扇軸心

運轉中的風扇，異音(noise)及壽命(life time)長期以來是冷卻風扇的重大品質因素。異音令人煩躁，壽命則關係到風扇性能可靠度(reliability)，而軸承(bearing)系統則攸關上述兩項要求，目前國內已有廠商⁽¹²⁾使用氧化鋯工程陶瓷材料之高強度、高韌性、抗高溫及抗磨耗、抗氧化、抗腐蝕等優點，運用在冷卻風扇軸承系統，並取得美國專利(patent No. 6,254,348 B1, Jul. 3, 2001)，而改良之氧化鋯軸心(公差要求 3 μm 、圓筒度要求 1 μm)與傳統 SUS 420 軸心相較，具有以下的優點⁽¹²⁾

(1)陶瓷軸心經過精密及鏡面加工，其表面粗度(Ra)可達 0.04~0.05 μm ，因此當搭配銅鐵合金滑動軸承後，重量可以降低 50%，其產品壽命及噪音穩定性皆優於傳統滾珠及滑動軸承系統；

表 3.日本 T 廠牌與晶陶應材所製作磨球(Φ 2mm)耐磨性質的比較

廠牌別	日本 T 廠	台灣 T 廠
磨球編號	1166-T40	GM020901
磨球測試前重量(g)	1794.62	1797.44
磨球測試後重量(g)	1793.48	1796.50
磨球前後重量損失(g)	1.14	0.94
球磨時間 (hr)	48	48
磨耗率(ppm/hr)	13.23	10.90

(2)陶瓷軸心經高溫燒結(>1450°C)其表面硬度高達 HRC 90~95(或 Hv 1400)，遠較傳統 SUS 420 之硬度 HRC 50 為高，因此耐磨性佳，噪音相較傳統軸心可以降低 2~3 分貝；

(3)經由中山科學研究院測試報告顯示，其陶瓷軸心風扇壽命為 300,000

hr/70 °C，遠超過雙滾珠系統(50,000~65,000 hr/25°C)或滾珠及滑動併用系統(50,000 hr/25°C)，也優於一般含油銅軸承(30,000 hr/25°C)。

4. 離子導體氧化鋯在高溫工業之應用

4.1 氧氣感測器

感測器主要用於工業製程之生產、監控、品質檢驗，用以提升設備之自動化，改善產品之功能，同時由於各產業之科技水準的提高，也使得感測器之使用精度也隨之提高。由於國內產業已由傳統工業逐漸轉型高科技工業，工業化結果導致各種有害性、有毒性之化學藥品使用機會遽增，而化學災害的預防，除有賴平日工安實施，使用氣體測器監控為最直接的工具，其不僅可以用來偵測作業環境中各種有毒、有害及可燃性氣體的含量，也可以用於工業製程，檢驗氣體含量，以改善製程條件，提高品質。像氧化鋯氧氣感測器目前已大量被用於鋼鐵製程中，測量熔融鋼水及加熱爐所排放的含氧量，藉此了解鋼鐵製程中鋼鐵之品質是否達到標準。

由電池的作動原理來看，固體電解質、電極物質及氧氣標準物質此三相是否緊密接觸，將會影響電壓的測量值。假若 ZrO₂ 管與電極觸不良，便會使得電池的阻抗增大，進而造成電壓的不穩定，所以電極黏貼在組立氧氣感測器為一相當重要的步驟。在過去國內之研究⁽¹³⁾中已經建立電導率量測技術達到 600~1450°C，1~10⁻⁴(Ω.cm)⁻¹ 的產品要求。

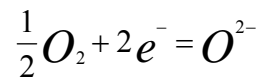
由於氧化鋯感測器被要求在 1600

°C，10-15 秒測量出鋼水之含氧量，所以 ZrO₂ 在高溫熱衝擊下會產生龜裂 (crack)，一但形成龜裂，所測量之電壓值便失真，因此相安定劑(MgO 或 Y₂O₃) 添加量及適當的熱處理使得 ZrO₂ 的顯微結構，所含的立方相、正方相、單斜相各相達到合適比例，以克服熱衝擊，是目前研究之重點。

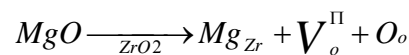
氧化鋯氧氣感測器主要構成組件有：

- (a) 固態電解質：為 Y₂O₃ 或 MgO/ZrO₂ 的陶瓷管，其為 2 價空缺的導體可自高氣分壓擴散至低壓氣分壓；
- (b) 電極物質：一般使用 Pt 或 Mo
- (c) 氧氣標準物質：即參考電極，為 Cr/Cr₂O₃ 的填充物，其粉末粒度，混合比都會影響所量測電動勢的穩定。

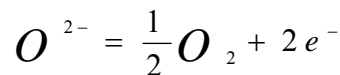
而氧化鋯氧氣感測器本身動作原理即為 Galavanic 電池，就是在氧分壓較高的一端(參考電極 Cr/Cr₂O₃)進行陰極反應



O₂ 得到 e⁻ 形成 O²⁻，而固體電解質 (ZrO₂/MgO) 為 O₂ 的導體，在參考電極端



所產生之 O₂ 透過固體電解本身的 O 的空缺(vacancy)移動至量測電極(鋼水的含氧量)放出 e⁻，進行陽極反應



因此由於 O²⁻ 的濃度差異(由氧分壓較高側 Cr/Cr₂O₃ 擴散至氧分壓較低側熔融鋼水之 O₂) 而產生電動勢(electromotive

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{O_2}(\text{參考電極})}{P_{O_2}(\text{量測電極})}$$

force)可以寫成 Nernst 公式，其中 R 氣體常數(gas constant)， F 為法拉第常數(Faraday constant)。通常 Po_2 (參考電極)是已知，只要量測溫度(T)及電動勢(E)便可以計算出 Po_2 (量測電極)，間接得知鋼水中氧的含量(ppm)。

而一般氧化鋯氣氧感測器的型式有三：

(a) 栓塞型(plug type)

此類型由於兩端皆開口，固體電解質必須安置在石英管(SiO_2)前端，假若接著不緊密，則常常在測試時脫離，造成量測電壓的誤差，目前較不常使用。

(b) 針型(needle type)

此類型為一端開口、一端為閉口，使用氧化之 Mo 線或氧化 Cr 線。

(c) 管型(tube type)

一般市面上最常見之型式即為此種。其固體電解質為一端開口，一端閉口， Mo 電極與固體電解質中，施以 Cr/Cr_2O_3 的填充物，另在 U 型石英管中放 $Pt-Pt13RW$ 的熱電偶，形成 Nernst cell，用以量測電動勢。

4.2 燃料電池用固態電解質

燃料電池(fuel cell)是將化學能轉化成電能的一種裝置，是由英國科學家 William Grove 在 1839 年提出，此類電池不像一般家庭所常用的電池，事先將電能儲存在其中，而是將燃料(一般為氫氣、甲烷或天然氣)在陽極通入，然後在陰極通入氧氣，將 H^+ 或 OH^- 、 O^{2-} 等離子透過電化學的內燃機引擎(一般稱為固態電解質)傳輸，形成電流發電，目前燃料電池依電解質的不同^(14,15)共分：

(a) 鹼性燃料電池(Alkaline Fuel Cell, AFC)，屬低溫型其操作溫度介於室溫

~100°C，特性是必須使用高純度氧氣當作燃料，同時必須使用液態的 KOH 電解液，易與空氣中二氧化碳結合形成氫氧化鉀，進而影響電解質的品質，一般用途在人造衛星或潛水艇上，系統效率約為 40%。

(b) 質子交換膜燃料電池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)，屬低溫型，其操作溫度介於室溫~80°C，電解質為離子交換膜，其膜表面塗有白金觸媒，其功率密度高，體積小，重量輕，一般用途在小型發電機組或移動式電源，系統效率約為 40%。

(c) 磷酸型燃料電池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)，屬中溫型，其操作溫度介於 150~220°C，其溫度高，因此廢熱可以回收，電解質 100%濃磷酸，亦使用白金觸媒，成本較高，一般用途在汽電共生或分散型發電，系統效率約為 40%。

(d) 熔融碳酸鹽燃料電池 (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)，屬高溫型，其操作溫度 600~1000°C，電解質為碳酸鋰或碳酸鉀，不需使用貴金屬(Pt)當作觸媒，一般用途在汽電共生或大規模火力發電，系統效率約為 50~60%

(e) 固態氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)，屬高溫型其操作溫度 600~1000°C，電解質為立方晶相氧化鋯，其在陽極使用氧化鎳與鈮系氧化鋯材料，不需使用貴重金屬(例如 Pt)，由於 SOFC 有著較傳統發電較經濟的優勢，但由於使用環境溫度過高，因此目前一些研究單位⁽¹⁶⁾正在解決此一問題，除了採用離子導電度較佳的電解質材料(Sc 添加氧化鋯、 CeO_2 、 BiO_2)；另一方

式為改善製程製作出更薄的 YSZ(yttria stabilized zirconia) 電解質，由原來 100~200 μm 減少到 5~10 μm ，由於前者尚有還原氣氛穩定性的問題，以及必須克服低強度、韌性等缺點，因此目前仍以發展開發 nano scale 級 YSZ 粉末 (100~120 m^2/g) 或分散良好 YSZ 懸浮液 (10~40% 的固含量，顆粒大小為 100nm) 為主要方向，此類粉末價格約在 USD 1095~ 1495/kg、懸浮液約為 USD 1895~2400/kg⁽¹⁷⁾ 因此目前目前 SOFC 的設計主要分為兩種：一為管狀(tubular) 以美國 Siemens Westinghouse Power Corporation (SWPC) 為主要生產公司，空氣由管之一端通入，管徑為 22 mm，管長為 1.5 m，電解質厚度約為 40 μm ⁽¹⁸⁾，另一種則為平板式(Plannar)，其為早期生產方式，可以利用簡易液相溶膠法(sol-gel)或刮刀(tape casting)、注漿法(slip casting)來製作，以加拿大 Global Thermoelectric 為主要生產公司。

5. 結論

氧化鋯材料具有獨特的原子鍵結及晶體結構，因此在高溫、導電、機械、光學方面之應用都有其特殊的貢獻。

(1) 高溫耐火領域：由於氧化鋯材料高熔點 ($T_m > 2300^\circ\text{C}$)、抗高溫鋼水侵蝕之特性，最早應用於耐火材料領域。但因為價位的緣故，最近僅用在高附加價值的耐火產品，像鋼水流嘴、噴嘴、閥門、高溫纖維、高溫鍍層等。

(2) 導電特性應用領域： ZrO_2 的電性在十九世紀末即被注意到，研究人員研究添加不同氧化物，在氧化鋯中形成固溶體，使氧化鋯產生離子電導(ionic

conduction) 效應，具有高溫固態電解質的特性，從高溫的發熱元件、磁動力能量產生器 (magneto- hydrodynamic powder generator, MHD) 的高溫電極，以及氧離子的傳導材料，都有其應用實例。最近由於環保法令要求，廢氣排放及反應器之氣氛的控制變得非常重要，研發人員利用氧化鋯在 450°C 以上導電的特性，發展出高溫燃燒監測的廢氣感測器、鋼鐵製程的煙氣感測器、熱處理爐的氧化氣氛的控制器。

(3) 結構機械應用領域：七〇年代，澳洲的學者 Garvie 發表，氧化鋯添加氧化鈣 (CaO) 之後，高溫的立方相可以被保留到室溫，而且後續之研究更發現，室溫下之 t-相會產生麻田散型相變態，可以大幅度提高氧化鋯的韌性。因此，最近二十年來，氧化鋯增加了許多結構方面的應用，像是耐磨件(wear resistant parts)、光纖接頭(ferrule)、光纖袖管(sleeve)、高爾夫桿之擊球面、手錶鏈等日用或工業產品。

(4) 化學反應容器：坩堝、刮片、攪拌葉

(5) 光學應用：寶石、粘藥失透劑

在結構陶瓷領域上，室溫耐磨之零組件應用是目前國內精密結構陶瓷之最重要市場，需求量也是最多，行銷之產品包括線導、軸封圈、止水閥、刀具、錶殼及錶帶、高爾夫球打擊面等。上述產品過去主要採用氧化鋁為材料，最近高單價之產品才考慮使用 Y-TZP 氧化鋯為材料，部份安定化氧化鋯相對氧化鋁有更高的強度與韌性，在過去之研究資料顯示，PSZ 之室溫耐磨性會較氧化鋁高出三至五倍，目前成熟之商業化氧

化鋯粉以 Y_2O_3 -TZP 為主，由於過去此類粉末掌握在日本廠商手中，同時日製粉末價格仍遠較氧化鋁為高，造成氧化鋯產品無法大量推廣，因此國內廠商投入生產上游氧化鋯粉末，除了可提供高品質且穩定性質之粉末以外，同時協助顧客開發高科技市場之應用解決方案，並成為顧客之材料諮詢顧問，共同將氧化鋯推廣到更多的應用市場上。

參考資料

- [1] W. Hughes and H. Ray “Prospects for fused zirconia production in new South Wales, Australia,” May 2002
- [2] F. P. Russo and D. A. Partis, “Advanced Materials & Powder,” Am. Ceram. Soc. Bull., July 2000
- [3] R. Stevens “Zirconia and zirconia ceramics,” Magnesium Elektron Ltd., July 1986
- [4] G. M. Wolten, ” Diffusionless phase transformations in zirconia and hafnia,” J. Am. Ceram. Soc. 46 [9] 418-22(1963)
- [5] 徐敬添, “精密濕式次微米/奈米分散技術與應用” 工業技術研究院化工所 2002 年 12 月
- [6] 韋文誠, ”奈米陶瓷粉體之特性及奈米結構應用概況”, 化工技術第九卷第九期 2001 年 9 月
- [7] 遠紅外線產品之應用原理, 經濟部技術處紡織服務網 2002/06/04
- [8] 祖揚(股)公司 產品型錄
- [9] H. Zoz and H. Ren, “ Processing of ceramic powder using high energy milling,” Zoz GmbH, Maltoz – Strasse , D-57482 Wenden, Germany
- [10] S. Lawson, “Environmental degradation of Zirconia Ceramics,” J. Europ. Ceram. Soc. 15(1995) 485~502
- [11] 晶陶應用材料(股)公司, 磨球型錄
- [12] 三匠科技(股)公司, CeraDyna Fan 陶瓷風扇型錄
- [13] 韋文誠, ”精密射出成形氧化鋯套管製程研究” 經濟部所屬事業協助中小企業推動研究發展計畫 88- S-043
- [14] Fuel Cell Handbook , fifth edition 2000
- [15] “Solid Oxide Fuel Cell Materials” Fuel Cell Catalyst Vol . 2, No. 3, Spring 2002
- [16] J. Will, A. Mitterdorfer, C. Kleinlogel, D. Perednis, and L. J. Gauckler, ”Fabrication of thin electrolytes for second-generation solid oxide fuel cells,” Solid State Ionics, 131 (2000)79-96
- [17] NextTech Materials, Ltd., Product & Pricing List, September 2002
- [18] 2002 燃料電池科技研討會, 元智大學綠色科技研究中心 民 91 年 10 月 24 日

TEL: (03)368-5726

FAX: (03)368-7752