

無機聚合物的發展現況及研究動態

Recent Developments and Investigations in Geopolymer

周佳靜¹、張天益²

工研院能環所(EEL/ITRI) ¹副研究員 ²研究員

無機聚合物(geopolymer)屬於鹼激發膠凝材料，是近年來發展的一種新型、高性能、無機陶瓷材料。無機聚合物的製程具有低耗能與低廢棄物排放量等優點，且材料具可回收再利用及環境友好等特點，是一種可持續發展的「綠色環保材料」。由於其特殊的三維氧化物網絡結構，使無機聚合物材料在許多物/化性能方面，比高分子材料、水泥、陶瓷或金屬更為優異。目前國際上無機聚合物製備技術日益進步，材料性能也大幅提高，在汽車工業、土木工程、有毒廢料及放射性廢料處理等眾多領域皆具有發展潛力。本文論述無機聚合物材料的發展過程、製備程序，並分析目前所存在的問題。

Geopolymer, an alkali-activated material, is a newly developed, high performance, inorganic ceramic material in recent years. The fabrication of geopolymer is through a low energy consumption and low toxic wastes emission process. It is also an environmental friendly, easily recycleable green material. By dehydroxy polymerization, it transforms into a three-dimension network structure with Si-O-Al-O bonds. Therefore, its physical and chemical properties are superior to those of polymers, Portland cements, ceramics and metals. The preparation technologies and material characteristics of geopolymer were improved remarkably. It can be used widely in many fields, such as automobile industry, civil engineering, poisonous and radioactive waste treatments, and so on. In this paper, the development history, fabrication process and issues of geopolymer are introduced.

關鍵字/Key Words

無機聚合物(geopolymer)、綠色環保材料(green material)、鹼激發膠凝材料(alkali-activated agglutinant material)、縮聚反應(dehydroxy polymerization)

一、前言

無機聚合物(geopolymer)材料係以鹼性激發劑、鋁矽酸鹽煅燒黏土和工業製程廢渣等為主要原料，在適當條件下形成一種與陶瓷性能類似的膠凝材料，其分子鏈由Si、O、Al等原子以共價鍵的形式連接而成，即一類含有多種非晶質(amorphous)至半晶質(semi-crystalline)的三維立體網絡結構之鋁矽酸鹽膠凝成分黏結的化學鍵陶瓷材料⁽¹⁾。具有早期強度佳、抗壓强度高(早強高強)、耐腐蝕性好、耐久性好、抗滲性好、耐高溫、隔熱性能好、生產低耗能等優點，是一種低成本、高性能的綠色材料，因此近年來備受各界關注。

無機聚合物一詞係由Joseph Davidovits於1978年首度提出，原意是指由地球化學作用或地質合成作用而形成的矽鋁酸鹽礦物聚合物。而這一概念發展到現在，則包括了所有採用天然矽鋁酸鹽礦物、礦渣、建築殘餘下腳料或工業固體廢棄物等為原料，利用適當的工法處理，在較低的溫度下通過無機聚合反應(geopolymerization)，製備成以矽氧四面體(SiO_4)及鋁氧四面體(AlO_4)相互鍵結的新型材料，其結構與沸石相似，且與陶瓷性能雷同。

無機聚合物的英文同義詞⁽²⁾包括mineral polymer、geopolymeric materials、aluminosilicate polymer、inorganic polymeric materials等。而在無機聚合的發展過程中，根據這類材料的不同應用，亦曾有過多個翻譯名稱，如化學鍵合陶瓷、低溫不燒陶瓷、土聚水泥、土壤聚合物、礦物聚合材料、礦物聚合物、地質聚合物和地聚合物等。目前無機聚合物主要應用於建築裝飾、道路橋樑、水利與地下工程、航空航太、汽車、有毒及放射性廢料處理、軍事和工

業鑄造等領域，如防火板、瓷磚、鋁鑄造模具材料和汽車排氣管的熱護罩等。

目前可商品化的無機聚合物，則多是指具有加水拌和後能夠形成無機聚合物能力的粉體材料，本身為尚未聚合的配合料。其硬化機制與水泥類似，為系統膠體之粒子與粒子間產生聚合作用，脫水後經縮聚作用硬化成形，在室溫下硬化時間約為2~3小時，而4小時後即有80%之抗壓強度。兩者最大不同是水泥硬化後鍵結形式為水合鍵結，無機聚合物則是離子鍵結⁽³⁾，其結構在高溫環境下並不會遭到破壞。由於無機聚合物具備原料取得容易、製程及設備簡單、污染性低、在低溫環境下即可製得等特點，未來將其發展成為新的工業應用材料，具有相當的潛力。

二、無機聚合物的發展歷程

人類對於無機聚合物科學的研究源自於科學家們對水泥硬化機制研究的成果。而無機聚合材料的應用歷史則可以追溯到古代，即以高嶺土、白雲岩或石灰岩與鹽湖成分 Na_2CO_3 、草木灰成分 K_2CO_3 及矽石混合物，加水拌合後產生強鹼NaOH和KOH與其它組成發生反應，生成礦物聚合黏結劑而製成人造石。無機聚合物的研究發展歷程可粗分為探索期和發展期兩個階段⁽⁴⁾，其以1972年為分界線。

探索期是從1930年代開始，美國的Purdon應用研究添加礦渣對矽酸鹽水泥的硬化機制時發現，NaOH可起催化作用，並提出所謂「鹼激發」理論。1950~1960年間前蘇聯科學家Glukhovski、Kphbehko等研究發現除氫氧化鈉外，鹼金屬的氫氧化物、碳酸鹽、硫酸鹽、磷酸鹽、氟化物、矽酸鹽和鋁矽酸鹽等，都可以

作為反應的激發劑，將鹼激發劑的種類大幅度增加(圖一)。

而1970年代開始進入無機聚合材料的發展期，Davidovits等法國科學家用X射線繞射分析金字塔成分的研究結果顯示，從不同區域採集的樣品中發現，其化學組成為85~99%石灰石與0.5~2.5%石英，且含有少量石膏、白雲石等礦物相，但構造中含有大量孔隙且密度低，表示古代建材是複雜的人造材料。1976年其在國際理論和應用化學聯合會(IUPAC)中提出，應對這類鹼激發材料統一進行命名，當時確定的名稱是聚鋁矽酸鹽(polysialate)；在另一篇美國專利中則採用無機聚合物來取代聚鋁矽酸鹽。此後，其不斷改進無機聚合物形成的化學機理和力學性能表徵，並證實該材料在許多工業領域的應用。1987年賓州大學教授Della. M. Roy⁽⁶⁾，於「Science」發表名為「New strong cement materials: chemically bounded ceramics」的綜述性文章，此文以水泥為對比物質，詳細描述化學鹼性聚合陶瓷的優異性能，並對其應用前景進行客觀的預測，因此提高各國研究無機聚合物的興趣，並促進其蓬勃發展，隨後應用領域也不斷地被擴展。

無機聚合物由於具有原料豐富、生產技術簡單、綠色環保和生產耗能低等特點，成為近年來國際上研究的焦點。國外已出現了许多有關無機聚合材料的研究機構(如法國的「Geopolymer Institute」、美國的「Waterways Experiment Station」等)和商業產品(如美國的PYRAMENT牌水泥、德國TROLIT牌黏結劑、芬蘭的「F膠凝材料」和法國GEOPOLYMERAM牌陶瓷等)，目前已有大量的研究成果申請專利。由於無機聚合反應

	Zeolite molecular sieve	Alkali-activation (slag)	Hydrosodalite (kaolin)	Geopolymer
1930			1934: Olsen (Netherland)	
1940		1940: Purdon (Belgium)	1945: US Bureau of Standard (USA)	
	1945: Barrer (UK)		1949: Borchert, Keidel (Germany)	
1950	1953: Barrer, White (UK)	1953: Trief Cement (USA)		
	1956: Milton (USA)	1957: Glukovsky (Ukraine) soil-silicate concrete		
1960			1963: Howell (USA)	
			1964: Berg & al. (USSR)	
			1969: Besson & al. (France)	
1970			1972: Davidovits (France)	1976: Davidovits (IUPAC terminology)
			Soilface Process	1979: Davidovits (France) Geopolymer

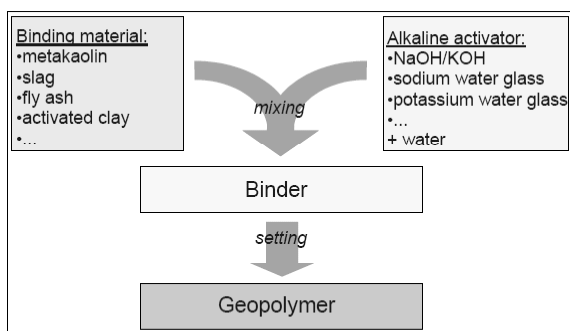
▲圖一 無機聚合物材料發展歷程⁽⁵⁾

在較低溫度下進行，避免高溫可能導致的添加物變質、添加物與基體的熱失配與化學不相容等問題，從而可採用多種外添加劑進行增強、增韌，提高材料的性能。目前國外已用金屬纖維、玻璃纖維、碳纖維和碳化矽纖維等對其進行增強，並取得較好效果。此外，也有利用聚乙烯、聚氯乙烯纖維進行增強以製造人造大理石的研究。從國外研究現況可以看出，無機聚合物材料已逐漸引起材料學界的重視，材料的增強和改性是目前研究的重點及焦點。然而，目前國內對無機聚合物材料的基礎研究基本上還處於初期階段，僅有幾位教授進行相關技術探討，如北科大的鄭大偉教授、成功大學的黃忠信教授等。筆者建議應積極進行相關基礎研究，以作為未來發展此一技術的基石。

三、無機聚合物的製備過程

最早製備無機聚合物大多都以煅燒高嶺土為主要原料，將高嶺土在600~700℃煅燒數小時以後，轉變為偏高嶺土。偏高嶺土具較高活

性，其為一種非晶質至半晶質的混合體，結構鬆散，具有微米級與亞微米級的細度。無機聚合物的製備一般採用矽酸鈉或矽酸鉀混合調節，pH值為12~14，然後與偏高嶺粉混合成漿狀澆入模具，在室溫至70℃靜置養護，幾十分鐘至數小時後硬化並很快產生強度(圖二)。根據以上所述可知，無機聚合物材料生產技術較簡單，製備過程為：選取天然矽鋁酸鹽礦物或工業固體廢棄物為原材料，調配所需原料粉體，加入配料混拌，進行注模或半乾壓成型，試體內部可溶解物質組成溶解，再生成凝膠相，凝膠相逐漸固化為製品。生產過程中視需要進行燒結或蒸氣養護等程序，一般固化溫度在常溫至70℃之間，藉由各物料之間的低溫化



▲圖二 無機聚合物材料製備程序⁽⁷⁾

學反應，即可使膠凝相固化，因此生產耗能低。除了改變溫度控制條件外，採用熱壓成型可得到力學性能優良的材料，亦可採用微波燒結法，以大幅縮短材料固化時間。

四、無機聚合物的反應機制

截至目前為止，研究無機聚合物之形成與其反應機制的學者論點頗多，但仍無統一之論點。儘管無機聚合材料在機理研究方面有許多新的進展，但大多還是侷限於對組成比較簡單的單個礦物之研究。無機聚合物的聚合反應經驗式為： $nM_2O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$ (n表示聚合物的縮聚程度：1~1.6，M為金屬陽離子，如： K^+ 、 Na^+ ， $x>2$ ， $y:3\sim7$)。Xu等人在矽鋁酸鹽礦物在無機聚合反應研究中指出，聚合作用過程中矽鋁酸鹽(Al^{3+} 呈IV或V配位)與鹼性矽酸鹽溶液之間產生Si-O-Al-O的聚合鍵結，而形成三維立體架狀矽鋁酸鹽結構，此為無機聚合物之基本結構，以polysialate表示。由於矽鋁作用中矽氧及鋁氧四面體個數與比例不同，因而使矽鋁聚合物的基本結構隨著改變，當Si:Al $\leq 3:1$ 時，大部分矽鋁聚合物可分為三種類型(表一)。

▼表一 無機聚合物之結構種類⁽⁸⁾

結構形式	鍵結示意圖	縮寫名稱
$z=1$ ，Poly(sialate) $R_n - [-Si-O-Al-O-]_n$		R-PS
$z=2$ ，Poly(sialate-siloxo) $R_n - [-Si-O-Al-O-Si-O-]_n$		R-PSS
$z=3$ ，Poly(sialate-disiloxo) $R_n - [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-]_n$		R-PSDS

註：z代表矽鋁聚合物基本結構中之矽鋁比

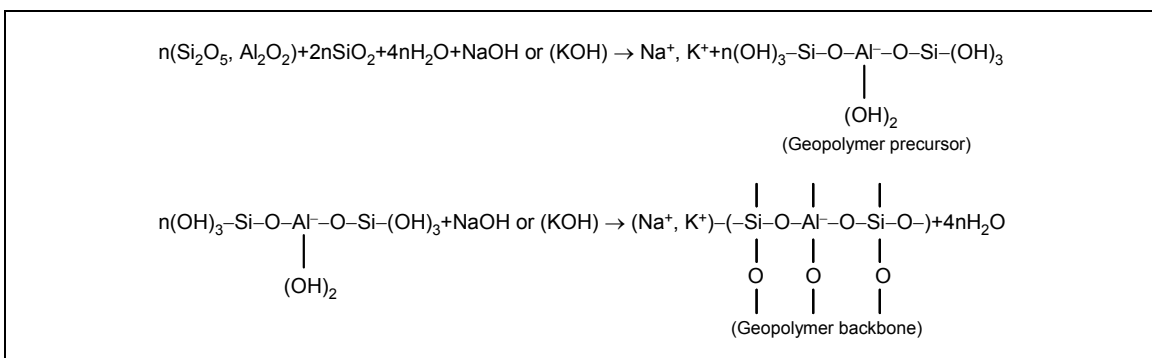
此聚合反應式顯示任何矽鋁物質都可作為製備無機聚合物的原料，此材料基體相之化學組成與沸石相似，而結構上呈現非晶質或半晶質，製備過程需要類似於水熱合成沸石的條件，但其反應速率要快很多。矽鋁聚合物的硬化機制至今尚未有明確的解釋，目前只能由實驗中研究礦物材料及鹼性溶液間的溶出情形，間接臆測矽鋁聚合物的硬化情形。其可大致分為三個方向進行：(1) 添加的礦石材料在鹼性溶液中的溶解度；(2) 無機聚合物前導物質的膠結程度與性質；(3) 固化環境氣氛的影響。

五、無機聚合物的性能特性

無機聚合物的力學性能指標可與陶瓷、水泥、鋁和鋼等材料相媲美，具有早強特徵、低導熱性、低密度、耐燃，而在1,000~1,200℃時仍不氧化、不分解、不燃燒、不會在高溫下分解放出有毒氣體，且隔熱與保溫性佳，同時在高溫下仍可保持較高的結構性能和力學性能，是一種理想的高溫結構材料。此外，其界面接合性強，對環境的膨脹收縮率低，故耐久性好；製備過程中所產生的污染低且二氧化碳的排放量為水泥的1/3；不但耐腐蝕、滲透率低且具抗核輻射的特性。以下將詳細介紹有關無機聚合物的特性。

(一)材料強度高且硬化快

無機聚合物具有早期強度佳的特性，24小時強度可達到15~30MPa，28天強度可達到30~60MPa，抗折強度>5MPa⁽⁹⁾，可以滿足建築結構材料的要求。無機聚合物與其它常見工程材料的主要力學性能指標如表二所示，表中顯示無機聚合物材料的彈性模數比環氧樹脂高一個數量級，強度相當；而與水泥和玻璃相比，強度高一個數量級，可明顯看出無機聚合材料的優異性。



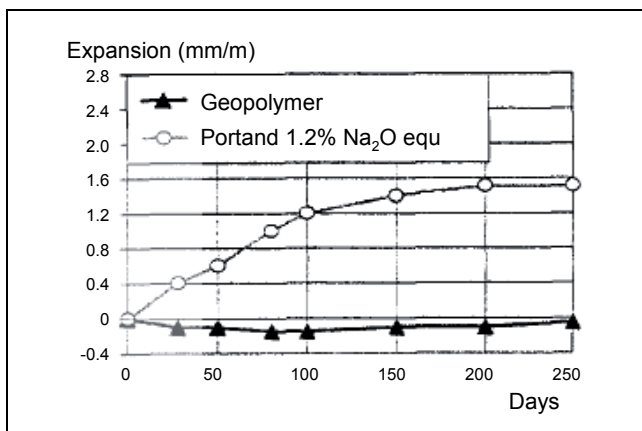
▲圖三 無機聚合物化學反應式

▼表二 無機聚合物與常見工程材料的力學性質

性能	無機聚合物	普通水泥	玻璃	陶瓷	鋁合金	環氧樹脂	聚醯亞胺
密度(g/cm ³)	2.2~2.7	2.3	2.5	2.5	2.7	1.2	1.36~1.43
彈性模數(GPa)	50	20	70	200	70	2.1	—
抗拉強度(MPa)	30~190	1.6~3.3	60	100	30	98~210	71~118
抗彎強度(MPa)	40~210	5~10	70	150~200	150~400	140~210	131~193
衝擊韌度(J/m ²)	50~1,500	20	10	300	10,000		—

▼表三 無機聚合物的耐酸腐蝕性對比

基體相	在不同酸溶液中的分解率 WB/%	
	W(H ₂ SO ₄)=5%	W(HCl)=5%
Portland 水泥	95	78
Portland 水泥/鋼渣混合料	96	15
鈣鋁酸鹽水泥	30	50
無機聚合物材料	7	6

▲圖四 無機聚合物材料與水泥在鹼骨材標準試驗之膨脹率的比較⁽¹¹⁾

碳纖維增強無機聚合物材料研究實驗結果顯示，抗彎強度可達245MPa、拉伸強度327MPa、抗剪強度14MPa，在800℃下可保持63%的原始抗彎強度⁽¹⁰⁾。通常在成型硬化的前4小時，材料強度就可達到最終強度的80%，因而類似於快乾水泥，此類材料用於建築物後，其強度還會隨時間的延長而進一步增加。

(二)耐腐蝕性和耐久性

無機聚合物為三維網絡結構，與生俱來良好的化學穩定性，因此能抵抗酸鹼的腐蝕⁽¹¹⁾。其在5%硫酸中的分解率為水泥的1/13；在5%鹽酸中的分解率只有水泥的1/12，且損失率皆不到10%，表三為各項材料在5%的硫酸與鹽酸溶液中的分解率實驗結果。此類材料在有機溶劑、鹼性溶液和鹽水中都很穩定，而在酸性溶液中，以硫酸溶液系統較為穩定，鹽酸溶液系統穩定性較差。

圖四為無機聚合物與水泥在鹼骨材標準試驗下(ASTM C227)的膨脹率比較⁽¹²⁾，由實驗結果可知無機聚合物基本上沒有膨脹。與水泥相比，無機聚合物不存在鹼骨材反應的問題，因而耐久性佳。Davidovits等人在調查羅馬古競技場、希臘古混凝土牆、埃及古金字塔等古建築後，發現這些古建築物材料具有與無機聚合物類似的分子結構，並認為這是使那些古建築能夠屹立幾千年的主要原因。

(三)低收縮率

與水泥相比，無機聚合物的收縮率低很多，其7天的線收縮率只有水泥的1/5~1/7，28天的線收縮率只有水泥的1/8~1/9(表四)。此外，高溫體積穩定性亦佳，其400℃下的線收縮率為0.2%~1%，800℃下的線收縮率為0.2%~2%，可以保持60%以上的原來強度。

(四)滲透率低，可固化有害廢棄物

無機聚合物可阻止重金屬物質的溶出，其滲透率與水泥相近，可應用於固化有毒金屬和放射性核廢料，如表五所示。

無機聚合物對重金屬離子的固化機制主要是物理吸收，其次也伴隨一部分的化學吸附⁽¹²⁾。一般礦區所剩之礦渣和礦渣污泥所製得的無機聚合物，其金屬離子的溶出量都可大幅下降，如表六所示。工業固體廢棄物製成無機聚合物後，其中的有毒元素或化合物可被固化在材料內部，對於此類材料的耐酸鹼侵蝕和耐氣候變化的性質優良，也就是說對周圍環境的衝擊是較小的，同時不會產生新的污染。

(五)耐高溫且低傳導熱

由於無機聚合物化學穩定性佳，在生產過程中經過煅燒，因此具良好的耐火性能。其耐

火度>1,000℃，而熔融溫度達到1,050~1,250℃，熱傳導係數為0.24~0.38W/mK，與輕質耐火黏土磚接近(0.3~0.4W/mK)。因此，利用天然礦物和固體廢棄物為原料所製得的無機聚合物材料，其具有良好的防火性能，若將其應用在建築結構材料中，可以滿足防火阻燃的消防要求。

▼表四 無機聚合物與水泥的收縮率比較

基體相	在不同時間內的收縮率(%)	
	7d	28d
Portland 水泥 I	1.0	3.3
Portland 水泥 III	1.5	4.6
無機聚合物材料	0.2	0.5

▼表五 無機聚合物滲透率比較

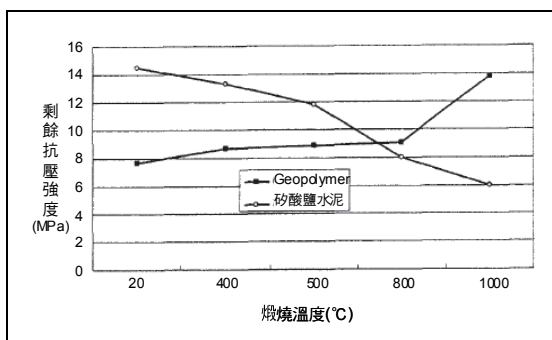
材料名稱	滲透率(cm/s)
黏土	10 ⁻⁷
花崗岩	10 ⁻¹⁰
煤灰水泥	10 ⁻⁶
Portland 水泥	10 ⁻¹⁰
無機聚合物	10 ⁻⁹

▼表六 Kam-Kotia礦山礦渣和礦渣污泥溶出液中金屬離子濃度

溶出液種類	金屬離子濃度(ppm)									
	As	Fe	Zn	Cu	Ni	Ti	Cr	Mn	Co	V
未處理礦渣	42	9,726	1,858	510	5	20	--	--	--	--
聚合物礦渣	2	123	1,115	4	3	7	--	--	--	--
未處理礦泥	--	384	--	--	--	6	55	64	84	9
聚合物礦泥	--	7	--	--	--	3	7	6	9	1

耐火試驗的方法是將試體在室內空氣中養護28天，再將試體放在高溫爐中自然升溫到規定溫度並保溫120min，然後自然降溫到室溫，再依「水泥膠砂強度檢驗方法」測試其剩餘抗壓強度。試驗獲得的煅燒溫度與剩餘強度關係曲線如圖五所示。試驗結果顯示隨著溫度的升高，無機聚合物的強度不僅沒有降低，反而有所提高。

而無機聚合物在高溫下無煙氣等有害物質逸散的問題，因此可作為耐火保溫材料。耐火保溫試驗結果顯示，刷塗在鋼板單側表面1~2mm的無機聚合物，待其固化後，用酒精噴槍灼燒有塗層面40min後，向火面與背火面溫度分別為490℃和200℃，而且表面無裂紋，冷卻後也未裂開，而對照組的無塗層鋼板，兩側溫度則分別為520℃和500℃。



▲圖五 無機聚合物材料的耐火試驗結果⁽¹³⁾

▼表七 生產幾種工業材料的耗能與CO₂排放量比較

材料類型		波特蘭水泥	無機聚合物	玻璃
能 耗 (MJ/ton)	煅燒	3,200	600	—
	粉碎	430	390	—
	總計	3,430	990	—
CO ₂ 排放量(kg/ton)		1,000	100~200	350

(六)製程簡單，能源消耗低且CO₂排放量低

無機聚合物的製備過程大致與普通黏土磚常用的製備方法相似，也不用像高強混凝土需要蒸氣養護的程序，材料的固化溫度一般在室溫下就可以進行，最高溫度也僅到60℃左右，靠著物料之間的低溫脫水縮聚化學反應，就可以使凝膠相固化成型，因此生產耗能低。無機聚合物所用的材料可直接使用，或僅需低溫(350~750℃)處理。Davidovits認為生產無機聚合物材料的耗能是一般水泥的1/6~1/4，而對於其它材料來說，其耗能是陶瓷的1/20、鋼的1/70、以及塑料的1/150。

製備無機聚合物過程中，其廢氣排放量低，因為僅有少部分的原料需要經過低溫煅燒分解的過程，過程中會產生水蒸氣，而燃料消耗量較水泥少3.5倍，因此NO_x、SO_x、CO和CO₂排放量也都很低。基本上每生產一公噸的水泥就會排放一公噸的CO₂氣體，並伴隨其它有毒氣體和粉塵；而製造一公噸的無機聚合物粉末，其CO₂排放量僅是水泥的1/10~1/5⁽¹⁴⁾，並且沒有毒性氣體產生(表七)，因此無機聚合物可說是一種綠色環保的新材料。

六、無機聚合物的應用領域

根據上述無機聚合物的特性，可將此一材料廣泛地應用在建築材料與工業方面，其應用範圍主要有三大方面(圖六)：(1)新型無機聚合物建材：塊材、結構材料、修補材料、混凝土路面、板材；(2)固定有毒及放射性廢料：可用作核放射元素的固封材料及製成薄膜吸附材料；(3)無機聚合物複合材料開發：用於製造核廢料容器、輕質頂板、高強阻燃建築材料、人造大理石和模具等。

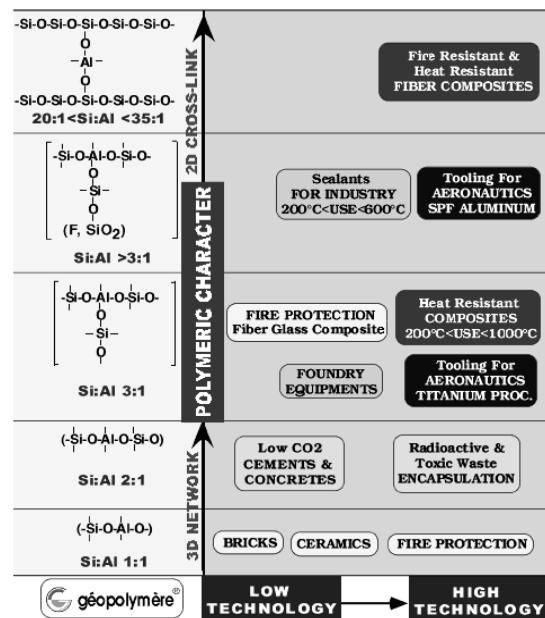
此外，無機聚合物在汽車及航空工業中可製作發動機防熱罩、機艙隔板等，既提高了機械動力效率，又提高了安全係數。在非鐵鑄造及冶金部門，無機聚合物可作為管道和溶池材料。無機聚合物也是一種很好的藝術及裝飾性材料，其具備良好的加工性能，便於成型及製作各種藝術及裝飾品。

七、無機聚合物的發展前景

無機聚合物是一種不同於矽酸鹽水泥的新型膠凝材料，具有高分子、陶瓷、金屬、水泥等的優異性能，同時具有原材料來源豐富、技術簡單、製程污染性低、可回收再利用及節約能源等優點，是一種可持續發展的「綠色環保材料」，其應用領域廣闊及耐久性優良，因此深具發展前景潛力。但無機聚合物在國內的發展尚在初步階段，其形成機制、製備方法、改質技術及應用開發等研究仍是一大挑戰，因此應更積極投入此項材料的研究與應用開發，進一步可協助國內相關產業的發展與提升其競爭力。

參考文獻

1. Davidovits J., "Geopolymer chemistry and properties", Geopolymer 88, 1st European Conference on Soft Mineralurgy, Compiegne, France, 1988, 1:25-48.
2. 馬鴻文、楊靜、任玉峰、凌發科，「礦物聚合材料：研究現況與發展前景」，地學前緣，2002，第9卷第4期，397-407。
3. Davidovits J., Davidovits R., James C., "Chemistry of geopolymeric systems terminology", Proceeding of Geopolymer' 99 Second International Conference, 1999, pp. 9-37.
4. 王剛，「礦物聚合材料—種新型建築材料」，建材發展導向，2004，第2卷第5期，59-61。
5. Davidovits J., "Geopolymer Chemistry and Applications.", ISBN-10:2-9514820-1-9, pp.12.
6. Della M. Roy, "New strong cement materials: chemically bonded ceramics.", Science, 1987, vol.235, pp.651-658.



▲圖六 無機聚合物的應用範圍⁽⁷⁾

7. <http://www.geopolymer.org>
8. Weng L., Sagoe-Crentsil, K., Brown, T., Song, S., "Effects of aluminates on the formation of geopolymers, Materials Science and Engineering", Vol. 117, 2005, pp.163-168.
9. Xu H., Van Deventer J. S. J., "Effect of alkali metals on the preferential geopolymerization of stilbite/kaolinite mixtures.", Ind Eng Chem Res, vol.40, 2001, pp.3749-3756.
10. Foden A. J., Balaguru P., Lyon R. E., "Mechanical properties and fire response of geopolymer structural composites.", vol.41, 1996, pp.748-758.
11. Davidovits J., Properties of Geopolymer cements. Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 1994. pp.131-149.
12. Phair J. W., Van Deventer J. S. J., "Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers.", Miner Eng, vol.14, 2001, pp.289-304.
13. 王旻、馮鵬、葉列平、覃維祖，「用於纖維片材加固混凝土結構的無機黏結材料-地聚物」，工業建築，第34期，2004，pp.16-20。
14. Davidovits J., Davidovits R., "Geopolymer cement useful for building comprises mellilite, aluminosilicate and quartz particles in an amorphous vitreous matrix comprising a poly(sialate-disiloxo) geopolymer", Patent FR2839970, 2003.