

國防部補助專題研究計畫結案報告

新穎陶瓷阻尼材料製備的電腦模擬研究

計畫類別：■個別型計畫

執行機構及系所：陸軍官校化學系

計畫主持人：劉權文助理教授

中 華 民 國 1 1 3 年 1 2 月 1 2 日

國防部 113 年度「補助軍事院校教師從事學術研究」

研究計畫名稱:

新穎陶瓷阻尼材料製備的電腦模擬研究

委託單位: 國防部

研究單位: 陸軍軍官學校

研究計畫主持人: 劉權文 助理教授

國防部編印

中華民國 113 年 12 月 12 日

目次

目次	1
壹、計畫提要	2
貳、研究緣起與背景	3
參、研究目的及研究重點	6
肆、研究架構	7
伍、研究方法及步驟	8
陸、結果與討論	12
柒、結論	15
捌、參考資料	16

壹、計畫提要

台灣提供了我們安全富裕的生活環境，也讓我們危機意識消磨不少。國際情勢的日趨嚴峻深深刺激著我們，也讓我們感受到戰爭離我們並不遠。對岸一直不放棄武力犯台，我們自然也不願意放棄現有和平、自由的生活。唯有我們一直強化自己的軍事力量，敵人才能放棄武力犯台，否則一切只能是空談。

本計畫以近期國際間發生的烏俄戰爭、哈瑪斯恐怖攻擊所見的戰爭走向為出發點，探討戰爭時能廣泛應用於維護人員、裝備、建築安全的阻尼材料。以電腦模擬的方式，先期研究陶瓷阻尼材料的作用機制，並提供改質可行性建議，以作為後續研究的參考，減少研究資源浪費、縮短研究時間、增進研究成果。並加入學生的參與，以提升學生的見聞高度，使學生對先進新穎陶瓷阻尼材料的認識與瞭解更加深刻，達到培養學生成為科技軍官的願景。

貳、研究緣起與背景

隨著近年來國際情勢發展，目前烏俄戰爭已經打兩年多了，依然沒能坐在談判桌上談停火，更遑論停戰，所以歐亞區域和平，目前還遙遙無期。近日中東地區也因為恐怖組織「哈瑪斯」對以色列進行恐怖攻擊，造成以色列平民的大量傷亡，進而引發以色列派出軍隊圍剿加薩地區的「哈瑪斯」恐怖組織。期間雙方你來我往發射了數以千枚的飛彈，造成大量加薩百姓的傷亡，更引動了中東地區的極大震盪。這些都在跟我們說：「戰爭離我們並不遠」

阻尼材料的基本原理是透過吸收外加能量，通常是機械震動，並將其轉化為動能、電能、熱能、磁能等，將外加能量與以分散、消耗。阻尼材料依種類區分為以下四種：

(一)高分子阻尼材料：

(A)纖維型阻尼材料：通常用於防彈纖維，其代表纖維為 UHMWPE、Kevlar-29、玻璃纖維、尼龍纖維及 PBO 等為代表。目前一般以 2D 結構編織並層層疊加，以達到防彈作用。

(B)橡膠型阻尼材料：橡膠型阻尼材料被廣泛應用於減少機械震動、降低噪音等領域。其典型物質為氯化丁基橡膠(CIIR, Chlorobutyl Rubber)、聚甲基丙烯酸酯(PMMA, poly (methyl methacrylate)、丁腈橡膠(NBR, Nitrile Butadiene Rubber)、酚醛樹脂(PF, Phenol Formaldehyde resins)、聚氯乙稀(PVC, Polyvinyl Chloride)、三元乙丙橡膠(EPDM, Ethylene Propylene Diene Monomer)、乙稀-醋酸乙稀酯橡膠(EVM, Ethylene-Vinyl Acetate)及聚氨酯(PU, Polyurethane)等為代表。

(C)泡沫型填充塑料：如苯基矽橡膠、三聚氰胺、聚酯纖維、聚醚、聚酰亞胺、聚胺酯等材料通過特殊發泡處理後，其阻尼性能遠優於其實心材。苯基矽橡膠經發泡處理後，既可調整發泡大小，又可節省成本，研究指出其發泡至孔徑 100 μm , 密度 0.74 g/cm^3 時，其阻尼峰值較其實心材增加 14 % [1]。

(D) 高分子阻尼塗料：高分子阻尼塗料，一般指高分子材料中的軟物質，包含(a)黏彈性阻尼材料(b)電流變體智能阻尼材料(c)磁流變體智能阻尼材料。其中黏彈性阻尼材

料又因其結構關係使其具有相當優秀的吸振阻尼特性比高阻尼合金高出 1~2 個數量級數。

(二)合金阻尼材料：

不同類型的阻尼合金，其特性、性能及工作條件各不相同，端視各工作或要求須要找做合適者，方能使各阻尼合金充分發揮其特性。

(A)複相型阻尼合金：複相型阻尼合金以 Fe-3C-2Si-0.7Mn、Zn-27Al、Zn-22Al 等為代表。其性能分別為：(a) Fe-3C-2Si-0.7Mn，室溫阻尼值為 $20\sim40 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 $<100 \text{ MPa}$ ，耐蝕性能差，工作溫度 $<120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]。(b)Zn-27Al，室溫阻尼值為 $10\sim25 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 $400\sim440 \text{ MPa}$ ，耐蝕性能一般，工作溫度 $<150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]。(c)Zn-22Al，室溫阻尼值為 $10\sim45 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 280 MPa ，耐蝕性能一般，工作溫度 $<150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]。

(B)位錯型阻尼合金：位錯型阻尼合金以 Mg-0.6Zr、Mg-0.5Si 等為代表。其性能分別為：(a) Mg-0.6Zr，室溫阻尼值為 $\sim 130 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 148 MPa ，耐蝕性能差，工作溫度 $<150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [5]。(b)Mg-0.5Si，室溫阻尼值為 $10\sim65 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 209 MPa ，耐蝕性能差，工作溫度 $<150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [6]。

(C)孪晶型阻尼合金：孪晶型阻尼合金以 M2052、Ni-40Ti-10Cu 等為代表。其性能分別為：(a)M2052，室溫阻尼值為 $20\sim60 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 500 MPa ，耐蝕性能差，工作溫度 $<70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]。(b)Ni-40Ti-10Cu，室溫阻尼值為 $\sim 53 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 580 MPa ，耐蝕性能優異，工作溫度 $<80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [8]。

(D)鐵磁型阻尼合金：鐵磁型阻尼合金以 Fe-13Cr-2Al、Fe-13Cr-2.5Mo、Fe-16Cr-2.5Mo 等為代表。其性能分別為：(a) Fe-13Cr-2Al，室溫阻尼值為 $10\sim40 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 $<400 \text{ MPa}$ ，耐蝕性能優異，工作溫度 $<300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [9]。(b)Fe-13Cr-2.5Mo，室溫阻尼值為 $10\sim48 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 $<470 \text{ MPa}$ ，耐蝕性能優異，工作溫度 $<300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]。(c)Fe-16Cr-2.5Mo，室溫阻尼值為 $10\sim60 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 $<500 \text{ MPa}$ ，耐蝕性能優異，工作溫度 $<300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [11]。

(E)鐵錳基阻尼合金：鐵錳基阻尼合金以 Fe-17Mn 阻尼合金為代表。其性能如下，

室溫阻尼值為 $5\sim 30 \times 10^{-3} Q^{-1}$ ，抗拉強度為 $>700 \text{ MPa}$ ，耐蝕性能差，工作溫度 $<300^\circ\text{C}$ [12]。

(三)陶瓷阻尼材料：不同於高分子阻尼材料，陶瓷阻尼以其特有結構，當其受到外力衝擊時，藉由其結構中摩擦、拉伸及剪切等力學作用消耗能量，以達成減震效果。目前廣泛應用於建築減震、噪音控制、壓電控制及無人機減震等。當前更有學者研發透明陶瓷以取代防彈玻璃，提供更安全、有效、持久的防護[13]。

(四)複合阻尼材料：當前學者除了追求單一材質的強化，更有學者將兩者以上材質相互摻合，進一步開發出新穎高阻尼材質。有學者將高分子阻尼材料中纖維阻尼材質和橡膠阻尼材質、泡沫型填充塑料或高分子阻尼塗料相結合，形成輕薄防護牆的防彈材質[14]。也有學者將合金阻尼材質與橡膠阻尼材質相結合，形成以合金阻尼為外骨骼，橡膠材質為內部填充物的結構，使其具有合金阻尼的堅固性，又具備橡膠阻尼的抗壓性，最為建築結構的強力支撐[15]。

本研究以陶瓷阻尼材質氧化鋇 ZrO_2 為出發點，希望能藉由陶瓷阻尼材料的製備電腦模擬，構築以分子動力學架構新穎陶磁阻尼材料氧化鋇 ZrO_2 的方法，以利於陶瓷阻尼材料氧化鋇 ZrO_2 後續研發時，能以電腦模擬方法先行建構可能結構，並以點腦模擬方式先期探討其性能是否達成我等需求，包含力學性能、光學性能及導熱性等。

參、研究目的及研究重點

本研究的目的是以電腦模擬方式研究新穎陶瓷阻尼材料的製備電腦模擬，並藉此教育學生分子動力學的研究方法與應用，更能使學生進一步接觸新型防彈材料的相關性能，使學生於無形中對國防科技產生興趣。且因本研究所採用軟體為 Material Studio(簡稱 MS)為全英文軟體，更可在使用過程中增進學生英文能力。

本研究重點置於以新穎陶瓷阻尼材料的分子混合系統的分子模擬建模、系統模型壓縮至實驗密度的軟體操作訓練、壓縮結果的數據分析及課前研究任務研討、課中研究情形回報、課後研究結果與討論，在學習分子動力學過程中進一步激發學生對國防先進科技的認知與了解。

肆、研究架構

本研究主要可區分二部份，第一部分是分子動力學計算；第二部分是量子力學計算。先期以第一部分的分子動力學使系統內所包含的成分均勻混合，並針對混定後系統進行分析比對。本研究之研究架構以資料蒐整為研究起點，並經過文獻探討後訂定研究方向與研究題目。研究題目確定後，優先以主要參考文獻建立初始對照組與參考組分子模型，並經由分子動力學逐步壓縮至實際密度。隨後比較參考組與對照組相關力學分析後之參數，如楊式模數、體積模數、剪切模數等機械性能，並以 Python 程式語言自行編寫相關分析程式，分析系統分子動力學軌跡以求得新穎陶瓷阻尼材料分子於系統中之導熱係數、結構分析等數據，據以歸納新穎陶瓷阻尼材料之優異性，以為爾後優化材料數據之參酌，最後將研究成果彙整後以英文撰寫投稿至國際期刊，研究架構圖如圖 4 所示。

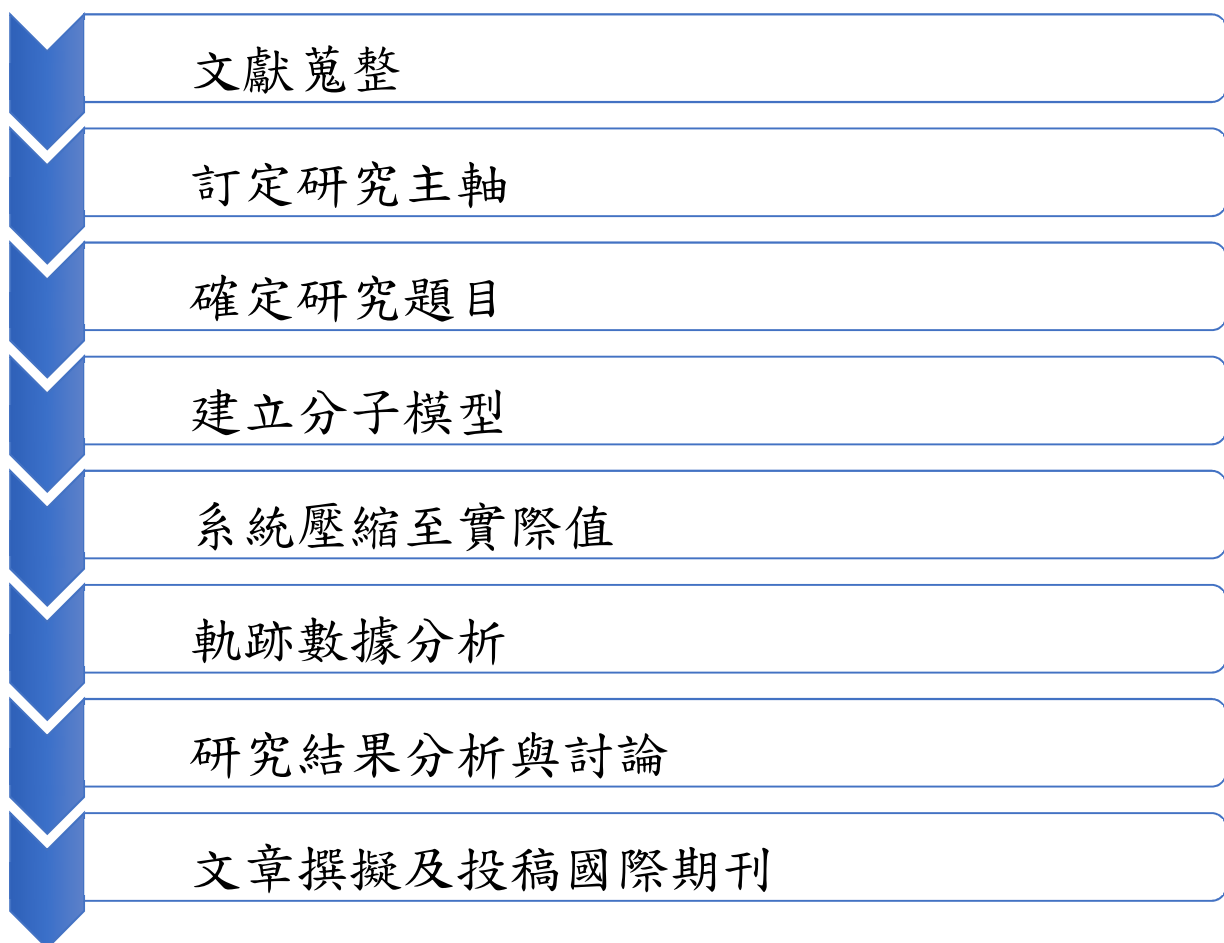


圖 1. 研究架構圖

伍、研究方法及步驟

本研究以陶瓷的燒結一般程序為出發點，將水、黏合劑、抗絮凝劑及陶瓷粉末均勻混合形成初始系統後將水逐步抽離後，使其成為乾燥系統，並將其形塑成正方體結構，後續進行低溫加熱以自編 python 程式消除黏合劑，最後將系統溫度加熱至 1080 °C 左右高溫，使其陶瓷粉末形成液態，以利其相互融合形成一體後緩慢降溫至常溫，即得最後結構。後續再和無機晶體資料庫既有結構資料相對照，以比對採模擬建構生成之陶瓷結構與無機晶體資料庫之差異。

本研究以氧化鋯(ZrO_2)陶瓷燒結的程序為主，參照專利(CN100436372C)文件中的製備方法，在 600°C 空氣中預先煅燒氧氯化鋯($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)3 小時後，取 94.5 wt% 與氧化釔(Y_2O_3)5.25 wt%、氧化鋁(Al_2O_3)0.25 wt% 使用球磨機混合 6 小時。接著在空氣 70 %、氯化氫($\text{HCl}_{(\text{g})}$)氣體 30 % 中，置於 1080°C 高溫爐中煅燒 1 小時，隨後研磨產物即得氧化鋯粉末[16]。及文獻 t- ZrO_2 的製備流程以為參照[17]，詳如圖二所示。

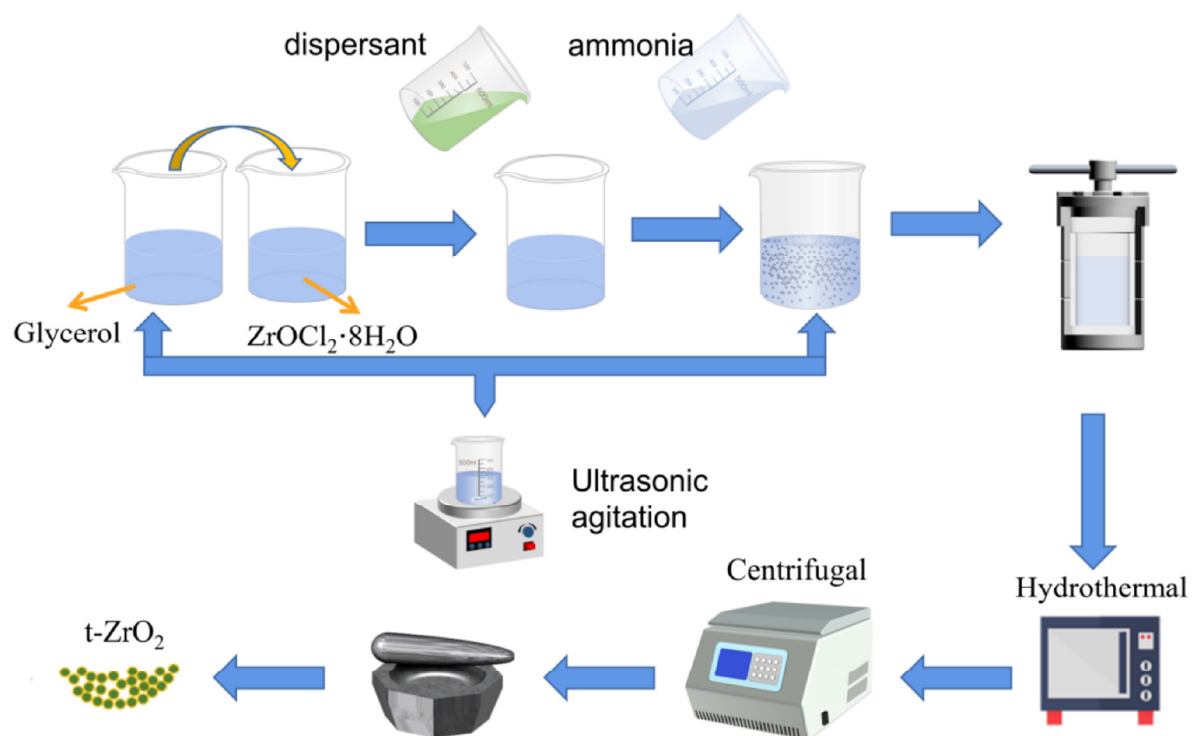


圖 2. ZrO_2 置備流程圖。

在模擬策略中，初步擬定三種模擬策略，爾後隨模擬效果採滾動式修正，詳細敘述如下：

(一)精簡模式(simple model)：

以最後 ZrO_2 結晶結構為出發點，研判 ZrO_2 結晶來源於原料中氧氯化鋯($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)中的氧化鋯離子(ZrO^{2+})與空氣、氧化釔(Y_2O_3)或氧化鋁(Al_2O_3)中的氧離子(O^{2-})相結合而成。所以在模擬中先以氧化鋯離子(ZrO^{2+})、氧離子(O^{2-})採 1：1 比例相混合後(如圖 3 所示)，將系統在 1080°C 狀態下，逐步壓縮至 ZrO_2 結晶密度 6.10 g/cm^3 ，並在壓縮過程中將 Zr 與 O 原子在接近至 $5\text{\AA}$ 時相互結合成鍵，使其成品。最後將模擬系統中未鍵結離子移除以純化晶體結構，並比較模擬結果與無機晶體資料庫數據中鍵長鍵角是否類似。

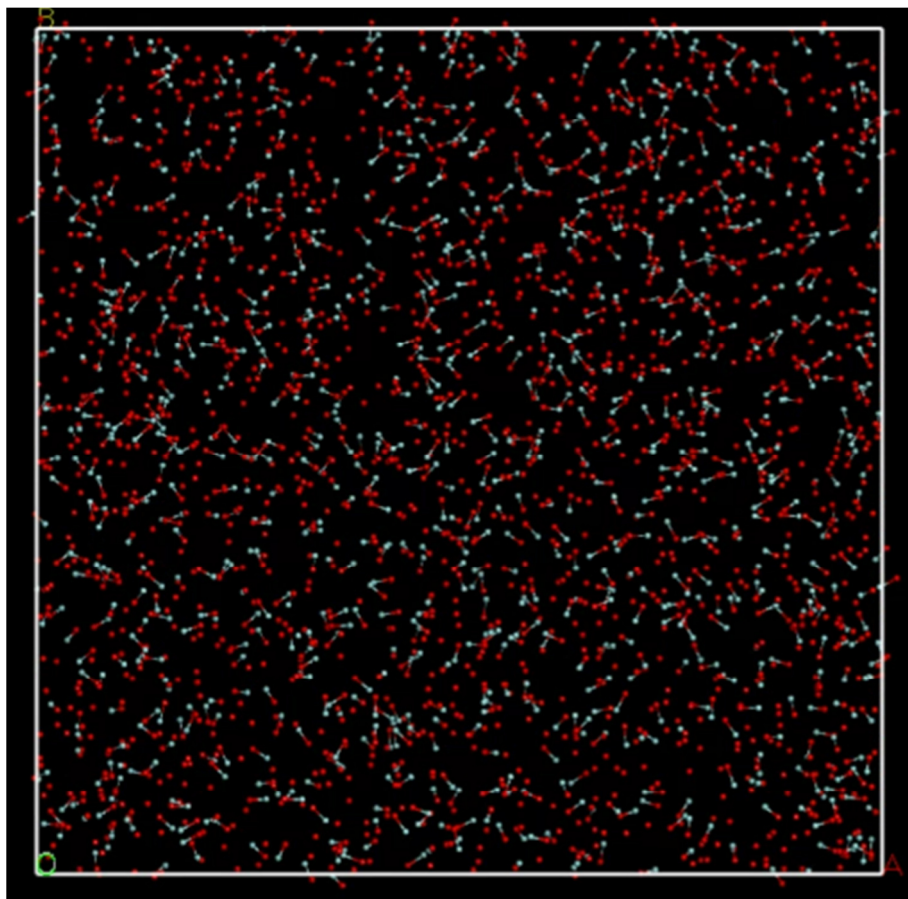


圖 3. 氧化鋯離子(ZrO^{2+})、氧離子(O^{2-})採 1：1 比例混合圖

(二)省略模式(common model)：

省略模式，則假設在 1700°C下，各分子皆解離為離子狀態相互結合反應。所以在模擬實作上，以 Zr^{4+} 離子與 O^{2-} 離子採 1：2 比例相混合(如圖 4 所示)後將 Zr^{4+} 離子與 O^{2-} 離子在高壓、1080°C下，將系統逐步壓縮至 ZrO_2 結晶密度 6.10 g/cm^3 ，並在壓縮過程中將 Zr^{4+} 離子與 O^{2-} 離子在接近至 $5\text{\AA}$ 時相互結合成鍵，使其成品。最後將模擬系統中未鍵結離子移除以純化晶體結構，比較模擬結果方法一、方法二與無機晶體資料庫 ZrO_2 數據比對，判別何者較佳?結構是否類似?

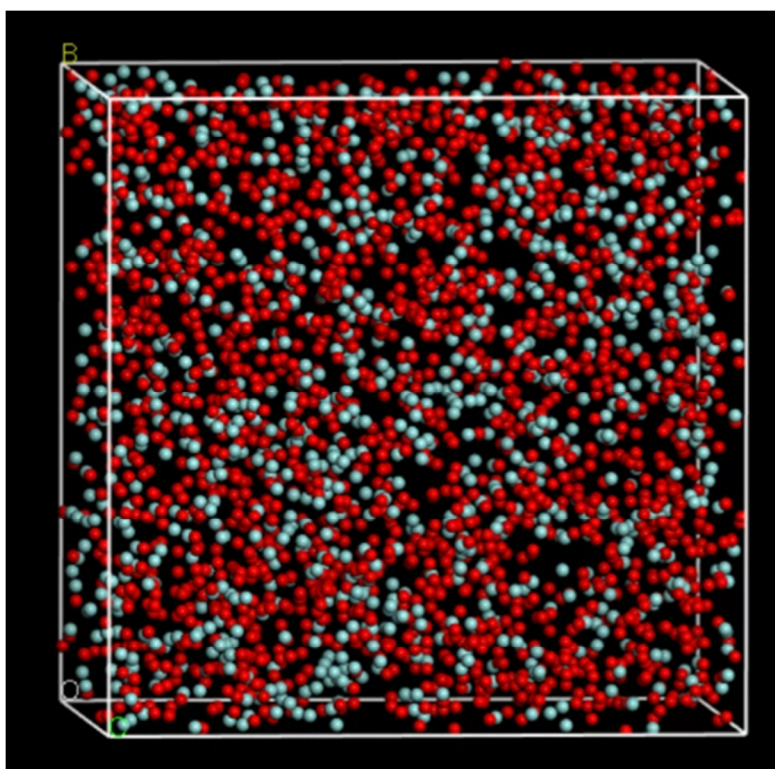


圖 4. Zr^{4+} 離子與 O^{2-} 離子採 1：2 比例混合圖

(三)周延模式(full model)：

依實驗製備過程，首先將含水氧氯化鋇($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)移除水分子，以符合其在 600°C 空氣中預先煅燒氧氯化鋇($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)3 小時的脫水效果。再來，將無水氧氯化鋇(ZrOCl_2)、氧化釔(Y_2O_3)及氧化鋁(Al_2O_3)以 94.5：5.25：0.25 比例以隨機方式混入模擬系統中(如圖 5 所示)，並壓制成型，以符合無水氧氯化鋇(ZrOCl_2)、氧化釔(Y_2O_3)及氧化鋁(Al_2O_3)在球磨機中混合 6 小時之效果。隨後加入氮氣(N_2)、氧氣(O_2)及氯化氫(HCl)依 0.55：0.15：0.30 比例混入系統成型的立方體無水氧氯化鋇(ZrOCl_2)、氧化釔(Y_2O_3)及氧化鋁(Al_2O_3)周邊，並將溫度加熱至 1080°C ，隨著溫度增加，將系統內可能進行的反應逐一連結鍵結，並進行升溫回火以模擬在 1080°C 煅燒的效果，最後移除未反應氣體。再比較模擬結果方法一、方法二、方法三與無機晶體資料庫 ZrO_2 結構數據比對。

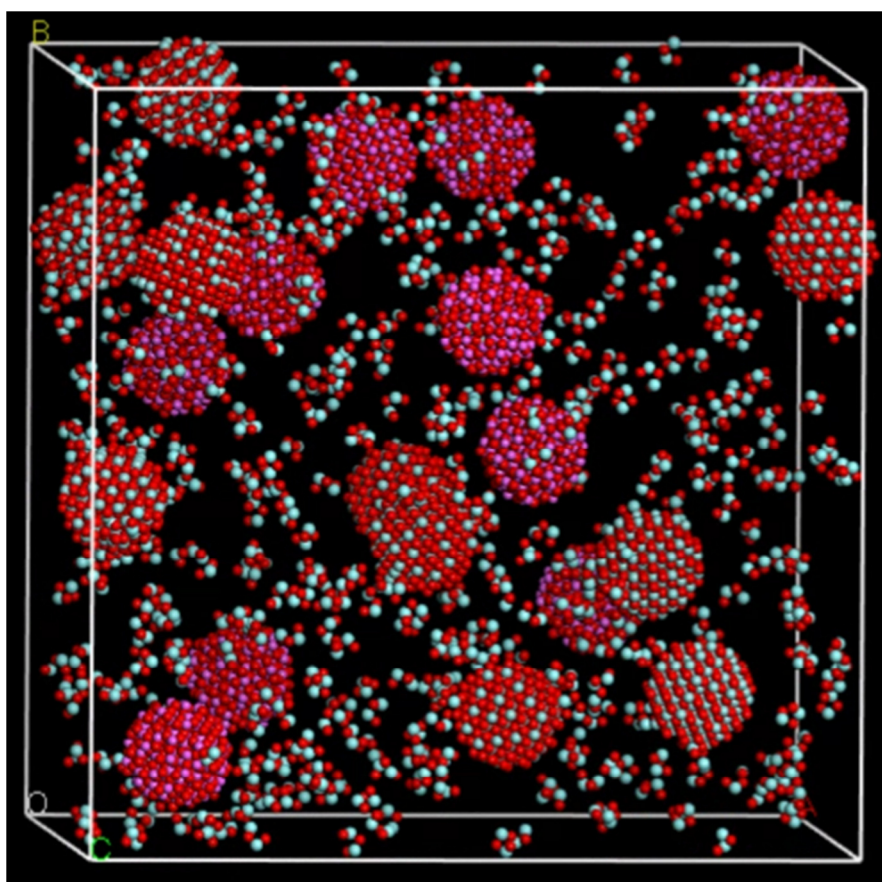


圖 5. 無水氧氯化鋇(ZrOCl_2)、氧化釔(Y_2O_3)及氧化鋁(Al_2O_3)以 94.5：5.25：0.25 比例混合圖

陸、結果與討論

經過一系列長時間的計算，精簡模式(simple model)、省略模式(common model)及周延模式(full model)，在計算速度中表現各不相同。由表 1 及圖 6 中顯示，簡易模式的鍵結數量在 100 ns 時間中，其反應的次數及鍵結的狀況如圖 6 趨勢線所顯示，依循著 $Y = 2.0182X + 0.2$ 的趨勢方程式，並由方程式可見，其分子動力學反應趨向一級反應。而省略模式的趨勢方程式則為 $Y = 0.2424X^2 + 2.7576X + 1.4$ ，顯見其分子動力學反應漸趨向二級反應。表現最佳的周延模式，其趨勢方程式為 $Y = 0.6705X^2 + 6.5038X + 4.0167$ ，其分子動力學幾乎已是二級反應。

表 1. 精簡、省略及周延模式在相同時間下鍵結數量表

	10 ns	20 ns	30 ns	40 ns	50 ns	60 ns	70 ns	80 ns	90 ns	100ns
Simple	2	4	7	8	10	13	14	16	19	20
Common	4	8	12	16	22	28	32	38	44	55
Full	9	21	29	43	56	68	80	95	115	140

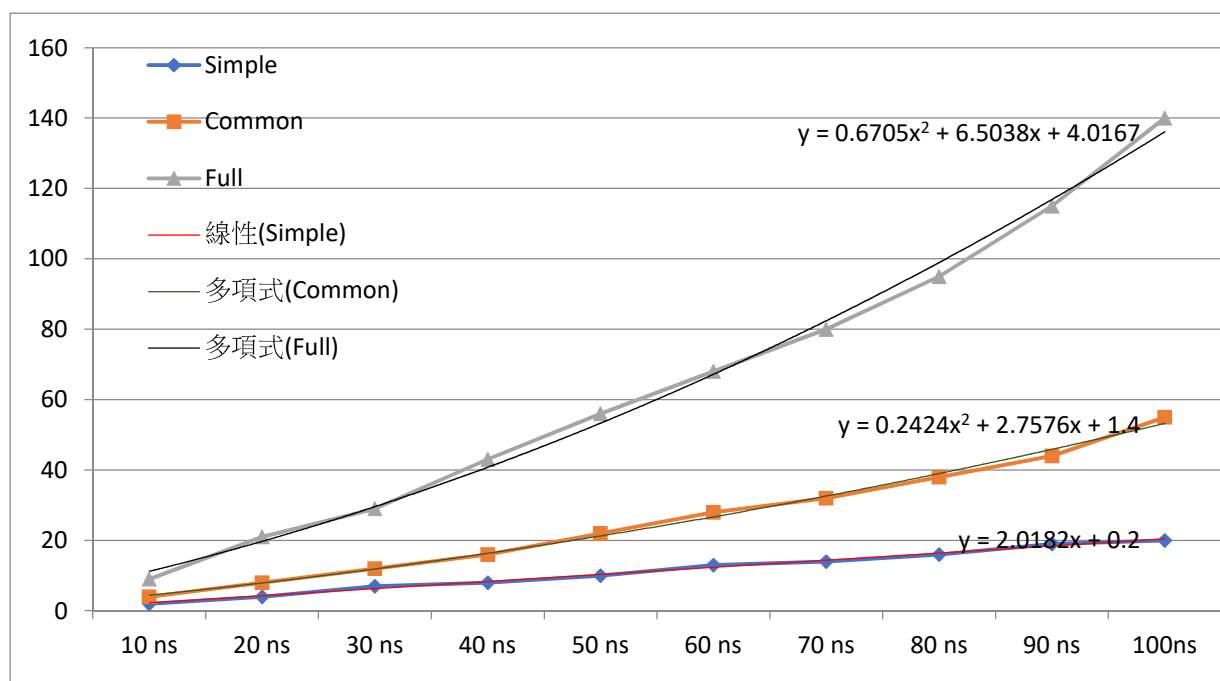


圖 6. 精簡、省略及周延模式在相同時間下鍵結數量圖

表 2 及圖 7 中顯示在精簡、省略及周延模式下各晶體結晶大小平均。由表 2 我們可以看出精簡模式下，雖然離子與離子間距離較遠，不易鍵結，但是一旦鍵結後相較於原本體積會增加不少，所以其結晶成長趨勢方程式依循 $Y = 0.0015X^2 + 0.1761X + 3.09335$ 逐漸成長，其表 2 中 100 ns 的體積大小也與原本增長最多，約增長 64.5 %、相差最大。在省略模式下，其結晶成長速度依循 $Y = -0.00458X^2 + 0.6854X + 4.905$ 方程式的趨勢成長，其 100 ns 後平均體積大小與原本比較差異介於中間，約增長 42.3 %。在周延模式下，其結晶成長速度依循 $Y = 0.002X + 10.16$ 方程式的趨勢成長，其 100 ns 後平均體積大小與原本比較差異最小，約增長 16.7 %。

表 2. 精簡、省略及周延模式在相同時間下凝聚分子大小比較表

	10 ns	20 ns	30 ns	40 ns	50 ns	60 ns	70 ns	80 ns	90 ns	100ns
Simple	3.1	3.6	3.7	3.9	4.0	4.2	4.3	4.5	4.8	5.1
Common	5.2	6.3	6.8	7.1	7.2	7.2	7.3	7.3	7.3	7.4
Full	10.2	10.2	10.2	10.2	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.4

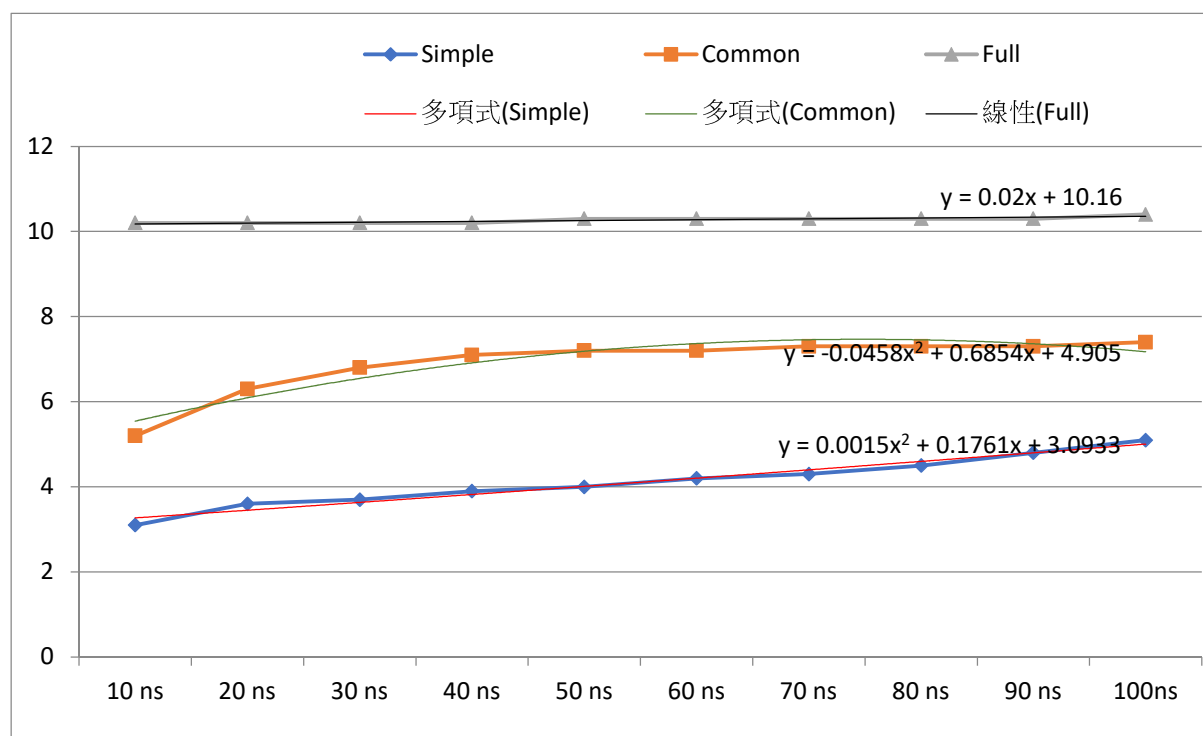


圖 7. 精簡、省略及周延模式在相同時間下凝聚分子大小比較圖

表 3 及圖 8 中顯示在精簡、省略及周延模式下各晶體結晶與無機晶體資料庫的晶體結構相比較。由表 3 我們可以看出精簡模式下，雖然離子開始僅離子內鍵結可與無稽晶體資料庫相比較，所以其初始相似度為 30%，後面隨著結晶成長，相似度趨勢方程式依循 $Y = 0.2992X^2 - 5.7765X + 35.65$ 逐漸減少，最後在 100 ns 後，相似度僅餘 8 %。在省略模式下，雖然分子開始僅分子內鍵結可與無稽晶體資料庫相比較，所以其初始相似度為 50%，後面隨著結晶成長，相似度趨勢方程式依循 $Y = 0.8333X^2 - 13.33X + 58.533$ 逐漸減少，最後在 100 ns 後，相似度僅餘 6 %，是三者中相似度最差者。在周延模式下，初始設定就是從無機機體資料庫中取出，所以其初始相似度為 100%，後面隨著結晶成長，相似度趨勢方程式依循 $Y = -1.0121X + 94.467$ 逐漸減少，最後在 100 ns 後，相似度仍有 86 %，是三者中相似度最佳者。

表 3. 精簡、省略及周延模式在相同時間下凝聚分子與晶體資料庫相似度比較表

	10 ns	20 ns	30 ns	40 ns	50 ns	60 ns	70 ns	80 ns	90 ns	100ns
Simple	30	25	21	18	16	10	9	9	8	8
Common	50	32	24	17	13	9	8	7	7	6
Full	100	90	89	88	88	88	87	87	86	86

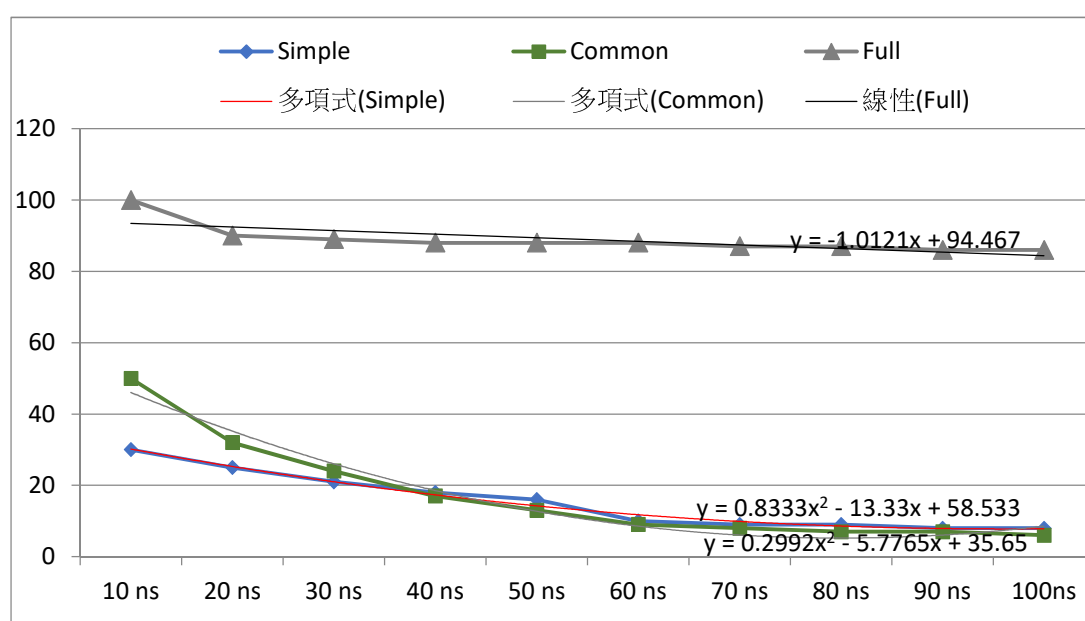


圖 8. 精簡、省略及周延模式在相同時間下凝聚分子與晶體資料庫相似度比較圖

柒、結論

由本實驗結果可以看出，在相同時間下，精簡模式(Simple Model)是採用氧化鋯離子(ZrO^{2+})、氧離子(O^{2-})進行混合及鍵結的方式形成 ZrO_2 晶體，省略模式(Common Model)是採用 Zr^{4+} 離子與 O^{2-} 離子進行混合及鍵結的方式形成 ZrO_2 晶體，周延模式(Full Model)是採用無水氧氯化鋯(ZrOCl_2)、氧化釷(Y_2O_3)及氧化鋁(Al_2O_3)混合方式形成 ZrO_2 晶體。這三種方式相互比較下，精簡模式及省略模式都是以離子狀態進行碰撞後鍵結，所以其長晶過程相當緩慢，並且其中因為結構上並不如預期所以在鍵結過程中常有非預期的鍵結產生，導致最後結果不如預期，甚至可以說是相當糟糕，與無機晶體資料庫對比下相似度都在 10 % 以下。而周延模式雖然考慮較多，且有無水氧氯化鋯(ZrOCl_2)的小結晶再混合體系當中作為晶種，以期能實現 ZrO_2 長晶的過程，但是因為 Material Studio 軟體本身並不具備自行段鍵及自行鍵結能力，都是由我等使用 Python 自編城市進行段鍵與鍵結，所以模擬一開始尚能維持在 90 % 以上的相似度，但是隨著時間的增加，其變異程度愈來愈大，導致最後的相似度僅餘 86 %。然而，除晶形相似度的問題外，另外更麻煩的是，以精簡模式及省略模式的離子狀態要結晶成能夠取出進行機械性能分析的晶形，其所花費時間相當於要長達半年，這其中還需要一些運氣成分在其中，才有可能有適當大小的結晶可用。以周延模式產程的結晶，所花費時間亦不惶多讓，也差不多需要到 8 個月左右。否則取出的結晶切割成正方體後，其狀態其實跟原先的晶體所差無幾，若要其長晶後形成更厚的殼，則所需時間則需要比精簡模式及省略模式更長，如此才能得到。最後總結本次實驗所得到結果，在模擬長晶這部分，因為 Material Studio 程式並不具備自行斷鍵及鍵結功能，所以自行編寫的程式並無法完全排除可能形成的多餘鍵結，導致長晶後結構愈來愈偏差。但是，並不是說模擬長晶不能用，以本次實驗結果顯示，此模擬絲路可行，但目前應該只能用來模擬類似系統長晶後可能出現那些晶格缺陷或是導致晶形不完整的狀況，並尋求其他添加物以改善其形成晶格缺陷的問題。若是要用來形成稍具規模可供進行機械性能研究的晶體，這邊還是建議以無機機體資料庫中所能取得的晶體結構進行擴張，如此一來才能節省計算資源及計算時間，進行更有效率的實驗。

捌、參考資料

1. Hu Y., Zhao Q., Lu A., Wang Z., Shen S., “Preparation and damping properties of phenyl silicone rubber foam”, *Materials Reports*, 2019, 33(5), p. 1752.
2. 陸文龍，王雲華，“高阻尼鑄鐵的機械性能和阻尼性能”，*南京航空航天大學學報*，1997，29(1)，第 85 頁。
3. 趙玉珍，“高阻尼 Zn-27Al 合金阻尼特性及機理研究”，成都，西南交通大學，2004。
4. Tanaka T., Makii K., Ueda H., et al., “Study on practical application of a new seismic damper using a Zn-Al ally with a nanocrystalline Microstructure”, *International Journal of Mechanical Sciencse*, 2003, 45(10), p.1599.
5. 牛瑞龍，“高阻尼和高力學性能的 Mg 合金制備及機理研究”，北京，中國科學院大學，2019。
6. 王敬豐，趙亮，胡耀波等，“阻尼鎂合金的研究現況與發展趨勢”，*材料導報*，2008，22(7)，第 103 頁。
7. Liu W., Li N., Zhong Z., et al., “Novel cast-aged MnCuNiFeZnAl alloy with good damping capacity and high usage temperature toward engineering application”, *Materials and Design*, 2016, 106(15), p. 45.
8. Liu U., Wu S., Chang Y., “Damping characteristics of Ti 50 Ni49.5 Fe 0.5 and Ti 50 Ni 40 Cu 10 ternary shape memory alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions (A)*, 1995, 26(4), p. 851.
9. Lin R., Cao M. Z., Yang R., “Damping capacity of the Fe-Cr-Al based alloys”, *Materials Science Forum*, 2005, 475, p. 261.
10. 李寧，胥永剛，于學勇等，“Fe-13Cr-2.5Mo 阻尼合金的熱處理工藝”，*機械工程材料*，2017，7，第 25 頁。
11. 李春林，“熱處理對 Fe-16Cr-2.5Mo 合金力學性能的影響”，*熱加工工藝*，2017，10，第 248 頁。
12. 于學勇，郭國林，楊莉，“Fe-Mn 基高阻尼合金的研究現狀及展望”，*鑄造技術*，2012，7，第 24 頁。

13. Deng J., Zhang J., Zhang X., Bao K., “Investigation on bullet proof mechanism of YAG transparent ceramic composite targets”, *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(6), p. 620.
14. Rosenber G. N., “On the relation between the Hugoniot elastic limit and the yield strength of brittle materials”, *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(1), pp. 752-753.
15. Xiao H., Huang C., Wang J., Liu T., Guo F., Wang Y., “Progress in damping rubber materials”, *China Synthetic Rubber Industry*, 2018, 41(1), pp. 67-72.
16. 田中一郎, 内田義男, “Zirconium oxide agglutinating body and producing method thereof”, CN100436372C, 2004.
17. Liu S., Wang J., Chen Y., Song Z., Han B., Wu H., Zhang T., and Liu M., “Tetragonal Nanosized Zirconia: Hydrothermal Synthesis and Its Performance as a Promising Ceramic Reinforcement”, *Inorganics*, 2023, 11(15), p. 217, <https://doi.org/10.3390/inorganics11050217>.