國立中興大學機械工程學研究所

碩士學位論文

(初稿)

應用模擬分析與實驗設計法探討晶格支撐結構以最小化選擇性雷射熔融之熱變形

Study on the Lattice Support Structures to Minimize Thermal Distortion in Selective Laser Melting Using Simulation and Design of Experiments

指導教授: 莊俊融 Jyun-Rong Zhuang

研究生: 鍾沛栩 Pei-Hsu Chung

中華民國一一三年

摘要

選擇性雷射熔融(Selective laser melting, SLM)是一種建構複雜3D幾何模型的製造技術，由於其具備可製作複雜幾何工件與最小化材料浪費的優勢，故經常應用在人工關節植入物的製造中。晶格結構(Lattice structure)亦為保有結構剛性同時減少材料耗費的設計方式，因其複雜結構與SLM有良好的相性，故有作為支撐結構降低元件熱變形與殘留應力的潛力。然而現行研究大多探討晶格結構的剛性等機械性質，而缺少對其熱傳性能的探討。因此，需要提出方法以衡量晶格結構作為支撐結構時的熱傳能力。本研究旨在以實驗設計法(Design of Experiment, DOE)探討晶格支撐結構設計參數對SLM股骨元件熱效應的影響。首先，本研究提出單晶格夾層法(One-Lattice sandwich method)模擬其熱行為，並提出溫降時間與最高熱通量等量化指標以衡量晶格熱傳性能，結果發現Octet類型在簡單測試中具有最高剛性與最佳散熱能力。接著，為驗證晶格結構於複雜幾何上的性能，本研究將股骨元件之懸垂區域網格化以填入晶格單元作為支撐結構，透過改變晶格類型、尺寸與相對密度進行FEM模擬驗證，結果發現Fluorite類型在複雜幾何測試中具有最佳熱傳與降低熱變形的能力。最後，使用反應曲面法(Response Surface Methodology)探討晶格參數對SLM成品熱誤差的影響，結果發現降低支柱直徑、提升晶格尺寸可有效降低熱變形。

關鍵詞:*選擇性雷射熔融、熱誤差、殘留應力、實驗設計法、支撐結構、晶格結構*

圖摘要

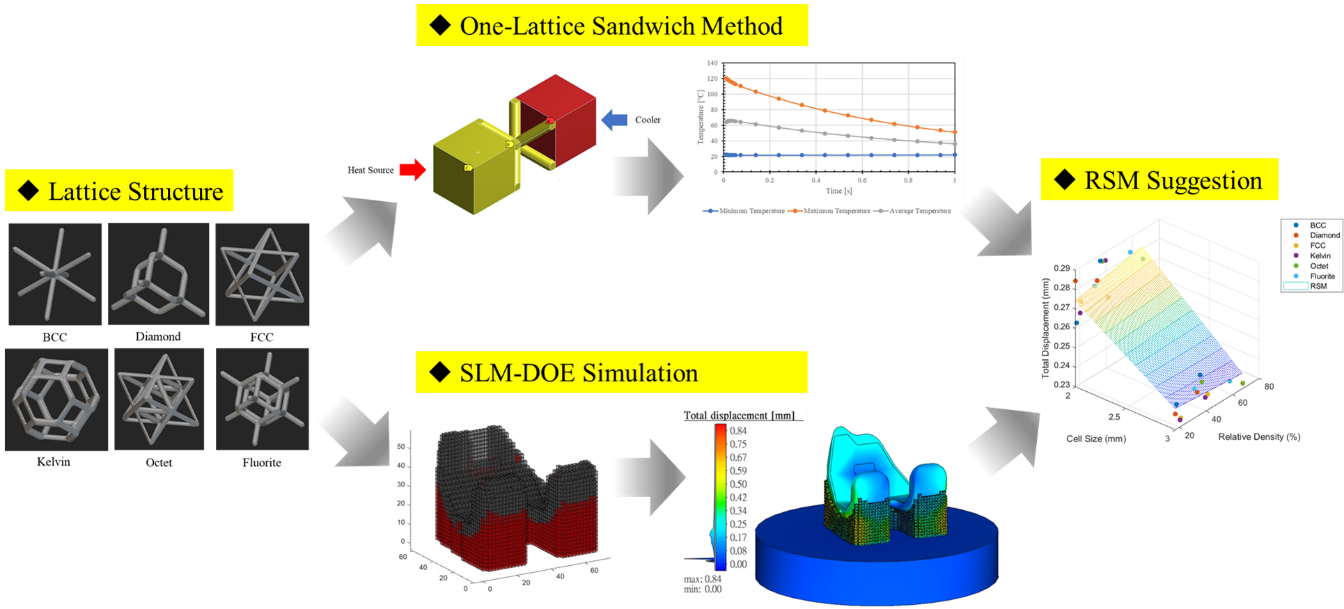


圖 1 圖摘要

Abstract

Selective Laser Melting (SLM) is a manufacturing technique for constructing complex 3D geometries, often used in producing artificial joint implants due to its ability to create intricate parts while minimizing material waste. Lattice structures, known for maintaining structural rigidity while reducing material usage, are highly compatible with SLM. They also have the potential as support structures to reduce thermal deformation and residual stress in components. However, current research primarily focused on the mechanical properties of lattice structures, with limited exploration of thermal conductivity. Therefore, it is necessary to develop a method to evaluate the thermal performance of lattice structures as support materials.

This study investigates the impact of lattice support structure design parameters on the thermal effects of SLM femoral components using the Design of Experiment (DOE). We introduce a One-Lattice Sandwich Method to simulate the thermal behavior of lattice structures, proposing metrics such as temperature drop time and maximum heat flux to quantify thermal performance. Our findings indicate that the Octet type lattice exhibits superior stiffness and heat dissipation performance under the simple geometry test. To validate the lattice structure's effectiveness on complex geometries, the overhanging regions of the femoral component are meshed and filled with lattice units as support structures. Through variations in lattice types, sizes, and relative densities, we identify that the Fluorite type lattice demonstrates the best heat dissipation and thermal displacement-minimizing capabilities under the complex geometry test. Finally, Response Surface Methodology (RSM) is utilized to analyze the effects of lattice parameters on the thermal accuracy of SLM-fabricated parts, revealing that reducing strut diameter and increasing cell size can minimize thermal displacement in femoral components.

*Keywords:* *Selective Laser Melting; Thermal Displacement; Residual Stress; Design of Experiment; Supporting Structure; Lattice Structure*

目錄

[摘要 I](#_Toc170729768)

[圖摘要 II](#_Toc170729769)

[Abstract III](#_Toc170729770)

[目錄 IV](#_Toc170729771)

[圖目錄 VI](#_Toc170729772)

[表目錄 X](#_Toc170729773)

[1 第一章 緒論 1](#_Toc170729774)

[1.1 背景 1](#_Toc170729775)

[2 第二章 文獻回顧 3](#_Toc170729776)

[2.1 支撐結構 5](#_Toc170729777)

[2.2 晶格結構 6](#_Toc170729778)

[2.3 文獻回顧總結 7](#_Toc170729779)

[2.4 研究目的 8](#_Toc170729780)

[2.5 研究原創性與貢獻性 8](#_Toc170729781)

[3 第三章 研究方法 9](#_Toc170729782)

[3.1 單晶格夾層法 10](#_Toc170729783)

[3.2 簡單幾何結構測試 14](#_Toc170729784)

[3.3 晶格結構設計參數最佳化 15](#_Toc170729785)

[4 第四章 參數效應分析 21](#_Toc170729786)

[4.1 單晶格熱性能分析 21](#_Toc170729787)

[4.2 簡單幾何之晶格支撐效應 28](#_Toc170729788)

[4.3 晶格支撐設計參數效應 34](#_Toc170729789)

[5 第五章 結果與討論 40](#_Toc170729790)

[5.1 單晶格熱性能 40](#_Toc170729791)

[5.2 簡單幾何測試 41](#_Toc170729792)

[5.3 晶格參數效應 42](#_Toc170729793)

[6 第六章 結論與未來展望 43](#_Toc170729794)

[6.1 結論 43](#_Toc170729795)

[6.2 未來展望 43](#_Toc170729796)

[Reference 44](#_Toc170729797)

圖目錄

[圖 1 圖摘要 II](#_Toc170729798)

[圖 2 人工膝關節之前視圖與側視圖[3] 2](#_Toc170729799)

[圖 3 人工膝關節置換術出院後30日內因相關問題再住院率趨勢圖[2] 2](#_Toc170729800)

[圖 4 SLM印製過程示意圖[7] 4](#_Toc170729801)

[圖 5 SLM製程圖[5] 4](#_Toc170729802)

[圖 6 支撐結構4大類型[29] 6](#_Toc170729803)

[圖 7 晶格結構設計參數最佳化流程圖 10](#_Toc170729804)

[圖 8 單晶格熱傳測試邊界條件 11](#_Toc170729805)

[圖 9 單晶格剛性測試邊界條件 11](#_Toc170729806)

[圖 10 經由nTopology生成的6種晶格結構[28] 14](#_Toc170729807)

[圖 11 簡單幾何測試：(a)正方體、(b)三角柱、(c)圓弧曲面[29] 15](#_Toc170729808)

[圖 12 股骨懸垂區域辨識 16](#_Toc170729809)

[圖 13 股骨元件懸垂區域之體素化 17](#_Toc170729810)

[圖 14 基於懸垂區域堆疊而成的6種晶格支撐結構 17](#_Toc170729811)

[圖 15 掃描策略[29] 19](#_Toc170729812)

[圖 16 BCC 1×1晶格溫度下降 21](#_Toc170729813)

[圖 17 BCC 1×1晶格熱通量 21](#_Toc170729814)

[圖 18 BCC 3×3晶格溫度下降 21](#_Toc170729815)

[圖 19 BCC 3×3晶格熱通量 21](#_Toc170729816)

[圖 20 BCC 5×5晶格溫度下降 22](#_Toc170729817)

[圖 21 BCC 5×5晶格熱通量 22](#_Toc170729818)

[圖 22 BCC不同數量晶格溫降比較 22](#_Toc170729819)

[圖 23 BCC不同數量晶格熱通量比較 22](#_Toc170729820)

[圖 24 單晶格剛性比較 22](#_Toc170729821)

[圖 25 BCC單晶格溫度下降 23](#_Toc170729822)

[圖 26 BCC單晶格溫降趨勢圖 23](#_Toc170729823)

[圖 27 FCC單晶格溫度下降 23](#_Toc170729824)

[圖 28 FCC單晶格溫降趨勢圖 23](#_Toc170729825)

[圖 29 Kelvin單晶格溫度下降 23](#_Toc170729826)

[圖 30 Kelvin單晶格溫降趨勢圖 23](#_Toc170729827)

[圖 31 Octet單晶格溫度下降 24](#_Toc170729828)

[圖 32 Octet單晶格溫降趨勢圖 24](#_Toc170729829)

[圖 33 Fluorite單晶格溫度下降 24](#_Toc170729830)

[圖 34 Fluorite單晶格溫降趨勢圖 24](#_Toc170729831)

[圖 35 Diamond單晶格溫度下降 24](#_Toc170729832)

[圖 36 Diamond單晶格溫降趨勢圖 24](#_Toc170729833)

[圖 37 單晶格最高溫度下降趨勢比較圖 24](#_Toc170729834)

[圖 38 BCC單晶格熱通量 25](#_Toc170729835)

[圖 39 BCC單晶格熱通量趨勢圖 25](#_Toc170729836)

[圖 40 FCC單晶格熱通量 25](#_Toc170729837)

[圖 41 FCC單晶格熱通量趨勢圖 25](#_Toc170729838)

[圖 42 Kelvin單晶格熱通量 26](#_Toc170729839)

[圖 43 Kelvin單晶格熱通量趨勢圖 26](#_Toc170729840)

[圖 44 Octet單晶格熱通量 26](#_Toc170729841)

[圖 45 Octet單晶格熱通量趨勢圖 26](#_Toc170729842)

[圖 46 Fluorite單晶格熱通量 26](#_Toc170729843)

[圖 47 Fluorite單晶格熱通量趨勢圖 26](#_Toc170729844)

[圖 48 Diamond單晶格熱通量 26](#_Toc170729845)

[圖 49 Diamond單晶格熱通量趨勢圖 26](#_Toc170729846)

[圖 50 單晶格最高熱通量下降趨勢比較圖 27](#_Toc170729847)

[圖 51 正方體監測點 28](#_Toc170729848)

[圖 52 正方體總變形 29](#_Toc170729849)

[圖 53 正方體總變形趨勢圖 29](#_Toc170729850)

[圖 54 正方體熱應力 29](#_Toc170729851)

[圖 55 正方體熱應力趨勢圖 29](#_Toc170729852)

[圖 56 三角柱監測點 30](#_Toc170729853)

[圖 57 斜率15°三角柱總變形 30](#_Toc170729854)

[圖 58 斜率15°三角柱總變形趨勢圖 30](#_Toc170729855)

[圖 59 斜率15°三角柱熱應力 30](#_Toc170729856)

[圖 60 斜率15°三角柱熱應力趨勢圖 30](#_Toc170729857)

[圖 61 斜率30°三角柱總變形 30](#_Toc170729858)

[圖 62 斜率30°三角柱總變形趨勢圖 30](#_Toc170729859)

[圖 63 斜率30°三角柱熱應力 31](#_Toc170729860)

[圖 64 斜率30°三角柱熱應力趨勢圖 31](#_Toc170729861)

[圖 65 斜率45°三角柱總變形 31](#_Toc170729862)

[圖 66 斜率45°三角柱總變形趨勢圖 31](#_Toc170729863)

[圖 67 斜率45°三角柱熱應力 31](#_Toc170729864)

[圖 68 斜率45°三角柱熱應力趨勢圖 31](#_Toc170729865)

[圖 69 不同斜率對總變形比較圖 31](#_Toc170729866)

[圖 70圓弧曲面監測點 32](#_Toc170729867)

[圖 71 曲率半徑2 cm圓柱總變形 33](#_Toc170729868)

[圖 72 曲率半徑2 cm圓柱總變形趨勢 33](#_Toc170729869)

[圖 73 曲率半徑2 cm圓柱熱應力 33](#_Toc170729870)

[圖 74 曲率半徑2 cm圓柱熱應力趨勢 33](#_Toc170729871)

[圖 75 曲率半徑3 cm圓柱總變形 33](#_Toc170729872)

[圖 76 曲率半徑3 cm圓柱總變形趨勢 33](#_Toc170729873)

[圖 77 曲率半徑3 cm圓柱熱應力 33](#_Toc170729874)

[圖 78 曲率半徑3 cm圓柱熱應力趨勢 33](#_Toc170729875)

[圖 79 曲率半徑4 cm圓柱總變形 34](#_Toc170729876)

[圖 80 曲率半徑4 cm圓柱總變形趨勢 34](#_Toc170729877)

[圖 81 曲率半徑4 cm圓柱熱應力 34](#_Toc170729878)

[圖 82 曲率半徑4 cm圓柱熱應力趨勢 34](#_Toc170729879)

[圖 83 不同曲率半徑對總變形比較圖(印製方向與圓弧表面法向量之夾角) 34](#_Toc170729880)

[圖 84 股骨表面19監測點 35](#_Toc170729881)

[圖 85 晶格支撐6種類型對股骨熱變形影響比較 36](#_Toc170729882)

[圖 86 晶格支撐6種類型對股骨應力影響比較 36](#_Toc170729883)

[圖 87 細胞尺寸、支柱直徑對股骨總變形反應曲面 37](#_Toc170729884)

[圖 88 細胞尺寸、相對密度對股骨總變形反應曲面 37](#_Toc170729885)

[圖 89 細胞尺寸、支柱直徑對股骨應力反應曲面 38](#_Toc170729886)

[圖 90 細胞尺寸、相對密度對股骨應力反應曲面 38](#_Toc170729887)

[圖 91 細胞尺寸、支柱直徑對股骨熱柔性反應曲面 39](#_Toc170729888)

[圖 92 細胞尺寸、相對密度對股骨熱柔性反應曲面 39](#_Toc170729889)

表目錄

[表 1、晶格結構全因子參數設計 18](#_Toc170729890)

[表 2、雷射印製參數 19](#_Toc170729891)

[表 3、掃描策略參數 19](#_Toc170729892)

[表 4、環境溫度參數 19](#_Toc170729893)

[表 5、模型與底板之熱傳係數 20](#_Toc170729894)

[表 6、單晶格剛性、溫降與熱通量指標統整 27](#_Toc170729895)

# 第一章 緒論

## 背景

自2018年以來，台灣65歲以上人口佔總人口比例突破14%，象徵台灣正式邁入高齡社會[1]。長期照護議題備受關注，帶動相關醫療產業蓬勃發展，除了帶來龐大的經濟產值，亦是為了達成《禮運大同篇》中「老有所終」的願景。在這些醫療產業中，其中一項便是全人工膝關節置換術(Total knee arthroplasty, TKA)，其目的在於透過將磨損的老舊膝關節替換為人工膝關節植入物(Artificial knee implant)，使長者恢復行動能力。根據國健署統計[2]，台灣退化性膝關節炎的盛行率約15%，亦即有350萬人飽受膝關節退化疼痛之苦，然而平均每年只有約2萬人次置換膝關節。造成採取手術比例低的原因，在於患者對於該手術存在心理恐懼，擔憂術後疼痛、復原、以及需再次入院置換等風險，甚至選擇忍痛、減少移動等委曲求全的方式。因此對於人工膝關節的製造方法與安裝技術需要格外重視，使老年人更加信任人工膝關節置換術的成功率。

在臨床上，該手術能否成功的關鍵，在於人工膝關節之股骨金屬套、脛骨金屬板、塑膠墊片三項元件是否精確地安裝至原生骨頭並發揮連結與活動的功能[3]，如圖 2所示。一旦原生骨頭與植入物之間偏移超過1 mm [4]，就會大幅影響關節間的接觸力與磨損速度，進而產生術後感染、疼痛、不穩定等後遺症。近年來隨著醫學與製造技術的提升，接受人工膝關節置換術後一個月內需要再住院的比例已能穩定維持在0.4%以下，如圖 3所示。然而若要使人工膝關節置換術更加可靠，就需要採取先進及精密的製造方式，以提升患者對該療法的信任度。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 2 人工膝關節之前視圖與側視圖[3] |

|  |
| --- |
|  |
| 圖 3 人工膝關節置換術出院後30日內因相關問題再住院率趨勢圖[2] |

# 第二章 文獻回顧

近十年來，AM因其能製造複雜幾何零件的能力引起工業界的廣泛關注[5]。相較於傳統的製造技術(如鑄造、銑削等)，能突破其製造限制並根據電腦輔助技術(CAD)生產高自由度的零件。特別是在工業4.0的背景下，積層製造技術能幫助業者最大限度減少材料的浪費，在生產複雜零件的同時亦能降低成本，因此被視為環保、可持續的技術。金屬積層製造依其製造過程可分為四項主要的技術：材料擠出(Material extrusion)、黏合劑噴射(binder jetting)、粉末床融合(Powder bed fusion)和定向能量沉積(Directed energy deposition)。

在上述技術中，粉末床融合又稱為選擇性雷射熔融(Selective laser melting, SLM)[6]，該技術原理為使用雷射光將散佈在工作檯上的金屬粉末加熱，使金屬粉末之晶粒融合，以逐層疊加的方式建構複雜三維幾何模型[7]，如圖 4所示。該技術因可製造複雜幾何元件與最小化材料浪費的能力，被視為可滿足人工膝關節精度要求的加工方式。其完整流程依序包含：輸入模型圖檔、偵測懸垂區域、印製、熱處理、切除底板、移除支撐結構，如圖 5所示。雖然這項技術提供製造複雜零件的可能性，但其在雷射逐層掃描過程中會產生高溫梯度，進而導致熱變形與殘留應力等缺陷[8]。更嚴重的狀況下，還會導致成品有裂紋、分層、收縮、翹曲等失效情況，因此被視為需要克服的關鍵問題。第一種解決方式是透過熱處理改善印製成品之顯微結構，以達到改善其機械性能的目標[9]，然而此後處理需耗費額外的成本，對於無相關設備的小型工廠而言並不友善；第二種方式是使用支撐結構將零件連結到底板，提供機械性拉力以防止變形、翹曲等瑕疵，然而支撐結構需耗費額外的材料，且移除支撐結構的步驟亦會增加後處理成本；第三種方式是對工件本身進行最佳化設計，藉由將最終使用性能等限制納入邊界條件中，進而找出工件最佳幾何形狀，然而對某些業者而言並不希望修改工件原始設計。基於上述，如何解決熱變形、殘留應力的問題同時最小化處理成本是目前的熱門研究方向。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 4 SLM印製過程示意圖[7] |

|  |
| --- |
|  |
| 圖 5 SLM製程圖[5] |

## 支撐結構

支撐結構設計是金屬積層製造技術中常見的準備工作之一[10]，其具有四個主要功能：1.支撐懸垂區域、孔或橋以實現可印製性；2.印製過程中保持零件的可製造性；3. 便於從底板和工件上移除；4.協助熱擴散或防止掃描中雷射熔化引起的殘餘應力。

要為具有給定構建方向的工件生成支撐結構，有兩個主要步驟：辨識懸垂區域、生成拓樸結構以將懸垂區域與底板連接起來[11]。在Zhang[12]等人的研究中，認為需要對醫療部件等需要複雜結構的懸垂區域做進一步分析及最佳化，將懸垂區域細分為懸垂面、懸垂邊與懸垂點。選擇支撐點是生成支撐結構中極其關鍵的步驟，因其對於印製工件的變形量與導熱效果會起到直接性作用。因此應該先保證支撐結構之機械性能，而後將熱效應納入最佳化流程中。目前生成支撐結構的方法包含：1. 直接投影生成法(Direct projection-based method)，意即將懸垂區域投影到底板上，然後沿著投影射線生成具有預定義橫截面輪廓的線性薄壁，此法因操作簡單而被許多商用軟體採用，如圖 6之(1)所示。2. 晶格填充方法(Lattice filling method)[13]，意即在基於投影的方法中，使用預定義的細胞晶格單元代替實體壁，其可以形成多孔支持以減少材料的量，如圖 6之(2)所示。Venugopal[26]等人提出一種可變密度晶格結構的多材料拓樸最佳化方法，將預先定義幾何形狀的晶格結構填充進懸垂區域中，以最小化柔性與提升傳熱能力。3. 樹狀支撐方法(Tree-type supporting method)[14]，意即透過支撐錐與節點生成規則來生成樹狀支撐結構，其可查找最小累加路徑、直徑可變以確保不同分支層的支撐強度如圖 6之(3)所示。Subedi[15]等人對於LPBF提出逐層的樹狀支撐結構生成演算法，其在提供足夠支撐力以外亦做實驗驗證其預防熱缺陷的效果。然而此方法的操控難度、計算成本較高，若能在拓樸最佳化算法上提高效率，有潛力成為提供支撐結構最佳化設計方案的算法。4. 柱狀支撐方法(Bridge-type supporting method)[16]，意即以柱狀結構提供支撐，其在於考慮最大橫向橋樑長度限制以進一步簡化生成，如圖 6之(4)所示。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 6 支撐結構4大類型[37] |

## 晶格結構

晶格結構(Lattice structure)逐漸在精密工業界受到廣泛關注，因其能在最小化材料耗費的同時維持剛性、強度及耐久性等重要的材料能力。其主要方法是將預定義的細胞重複排列並填充進零件內部，從而達成材料輕量化並提升機械、聲學與介電性能。該結構由於其複雜且精細的幾何形狀，難以使用傳統方法製造，因此經常搭配可生產高複雜元件的金屬積層製造技術使用。晶格結構已經被廣泛應用在航太、船舶與醫療產業中，例如Armanfar[17]等人將晶格結構嵌入船體中，從而提升結構剛性並減輕船體重量，Longhitano[18]等人設計各種孔徑的Ti6Al4V晶格結構，藉由PBF製造並進行腐蝕、磨損與摩擦腐蝕測試，而後觀測微觀結構以分析試品於骨科的匹配性。然而，晶格結構在SLM製程中產生的孔隙率、尺寸誤差與微觀結構缺陷可能對晶格性能產生負面影響，例如降低強度、剛性及耐久性。SLM製程參數的最佳化可以減少上述缺陷，但由於該製程本身熱固耦合效應的複雜性，這些缺陷一定程度上是固有的。因此，如何因應目標規格而設計晶格結構的幾何形狀，是確保性能與預防缺陷的重要問題。

許多學者曾經提出設計與監測晶格結構的方法，以提升晶格的機械性能並預防缺陷。Han[19]等人藉由μCT掃描分析晶格類型、大小與相對密度對孔隙率、尺寸誤差的影響，但僅憑掃描之影像數據無法驗證剛性、抗振等重要機械性質；Xu[20]等人對晶格結構進行參數最佳化以適應增強纖維積層製造，然而參數最佳化的目標是提升結構剛性，對熱傳性能則無探討；Wang[21]等人提出拓樸最佳化公式生成3D列印晶格支撐結構，提升剛性的同時確保自支撐性與可製造性，然而其自支撐限制在演算法的數值誤差可能破壞自支撐性，且亦未提及熱傳能力；Huang[22]等人提出晶格-樹狀複合支撐結構生成演算法，滿足複雜幾何形狀零件的製造需求，但其演算法未考慮邊緣容易因熱梯度導致殘留應力引發翹曲的可能性，以及點陣結構與懸垂辨識造成演算法的複雜性；Yang[23]等設計出可自支撐的BCC晶格並填充進光學鏡面內作為支撐結構，提供剛性、抗振能力並減輕整體重量，同時提出座標轉換方程式以適應曲面定義域，然而其在座標轉換後造成晶格形狀改變可能破壞自支撐性，且亦未考慮熱傳能力；Vaidya[24]等人應用Dijkstra最短路徑演算法填充實心或空心晶格，以減少支撐體積與接觸面積，但尚未經過實驗驗證其結構的可製造性與剛性；Liu[25]等人提出基於應力驅動的多智能系統(Multi-Agent System)共型晶格填充策略，在考慮可製造性的同時能使剛性較傳統晶格提升1.4倍，然而使用反應曲面法(Response Surface Methodology)加速性能評估的方式可能造成數值誤差，且亦未考慮晶格熱行為；Venugopal[26]等人提出多材料的拓樸最佳化插值法生成晶格結構，且能同時考慮柔性與熱柔性作為目標函數，然而僅在矩形設計域進行數值測試，尚未能適應實際應用之複雜幾何元件。

## 文獻回顧總結

雖然目前已有許多關於支撐結構生成法與晶格結構的研究，然而其限制如下：

1. 多數僅探討如何在給定區域中產生具自支撐力的幾何結構，例如剛性、強度、抗振性等機械性能，對於溫度、熱通量、熱變形等熱傳性能則較少著墨。
2. 大部分監測晶格結構的方法需透過壓縮試驗、CT掃描來評估剛性、孔隙率等機械性能，但由於晶格本身的微觀複雜性，缺少以數值模擬低成本的方式預測晶格性能的方法。
3. 許多文獻採取拓樸最佳化的方法修改晶格以應用於複雜幾何結構，然而這類演算法計算成本高且容易破壞晶格原有的自支撐性。

基於上述原因，如何找出指標性因子以評估晶格結構的熱行為，並在SLM中生成可最小化成品熱變形的晶格支撐結構，同時確保其自支撐性適用於各種複雜幾何元件，是目前待解決的研究問題。

## 研究目的

本研究旨在晶格結構降低SLM股骨元件熱變形。首先，提出單晶格夾層法(One-Lattice sandwich method)模擬其熱行為，透過nTopology[27]生成6種類型的晶格，並提出溫降時間與最高熱通量等量化指標以衡量晶格熱傳性能。接著，本研究應用DOE[28]驗證晶格結構於複雜幾何上的熱行為，將股骨元件之懸垂區域網格化以填入晶格單元作為支撐結構，透過改變晶格類型、尺寸與相對密度進行FEM模擬驗證，以探討晶格設計參數對SLM成品熱變形的影響。

## 研究原創性與貢獻性

本研究原創性如下：

1. 鮮少有研究探討晶格結構的熱傳性能，因此本研究提出單晶格夾層法(One-Lattice sandwich test)以模擬驗證其熱行為。
2. 鮮少有研究探討晶格作為SLM支撐結構時的熱行為，因此本研究使用簡單幾何元件測試晶格類型對水平面、斜面、圓弧曲面的熱變形與熱應力之影響。
3. 鮮少有研究討論晶格結構對SLM成品熱變形的影響，因此本研究以全因子設計法提出可降低股骨元件熱變形的最佳設計參數。

本研究貢獻性如下：

1. 提出熱傳量化指標評估晶格結構的性能。
2. 提出晶格結構應用於不同幾何結構時的熱效應以及最佳晶格類型選擇。
3. 提出可最小化SLM成品熱變形的晶格支撐結構設計參數。

# 第三章 研究方法

晶格結構(Lattice structure)最初是描述自然界中原子、分子或離子重複對稱排列的現象，並在化學、生物與材料等領域皆有廣泛研究[29]。近年來，晶格結構在工業領域中受到廣泛青睞，因其能夠在維持剛性、強度等機械性質的同時最小化材料耗費，逐漸應用在航太與醫療產業中。因其表面積-體積比高，晶格結構也是熱交換器的潛在候選者[30]。然而，過去關於晶格結構的研究大多探討剛性、壓縮能量吸收等機械性能，對於晶格結構的熱傳性能則缺少統一的衡量指標。此外，雖然已有許多文獻提出SLM支撐結構最佳化算法，然而卻鮮少研究探討支撐結構設計參數對於成品熱行為的影響。因此，本研究提出晶格結構設計最佳化方法以衡量其在SLM製程中的熱效應與熱傳能力，其流程如圖 7所示，概述如下：

1. 本研究提出單晶格夾層法(One-Lattice sandwich method)，意即將單一晶格結構作為兩夾板之間的隔層並給定兩側溫度差，透過FEM模擬該系統熱交換行為，並定義溫度下降時間、最高熱通量兩項指標，以量化晶格單元之熱傳性能。
2. 本研究使用簡單幾何測試(Simple geometry test)，使用簡單幾何元件測試晶格作為SLM支撐結構的熱效應。透過設計正方體、三角柱、1/4圓柱3種幾何結構，並依序應用不同晶格支撐結構，以探討晶格種類對於水平面、斜面、圓弧曲面之總變形與熱應力之影響。
3. 本研究使用全因子設計法(Full factorial design)探討晶格結構設計參數熱效應，透過SLM中以晶格結構作為股骨元件支撐結構，分析晶格類型、細胞尺寸、支柱直徑對股骨成品熱變形、殘留應力之影響。

藉由上述方法，本研究預期提出晶格結構熱傳性能之量化指標，使加工人員能高效率評估SLM支撐結構熱效應及選擇最佳設計參數。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 7 晶格結構設計參數最佳化流程圖 |

## 單晶格夾層法

晶格結構最常見的應用方法是填充進大型結構內部，發揮維持剛性的同時減輕材料重量的功能，例如飛機或船舶的隔板中。然而，這類應用方法經常會面臨隔板兩側環境不一致的情況，例如飛機在高空中機艙內外溫差與壓力差等問題，且已有研究評估該情況下晶格結構的熱交換行為[31]，但目前研究仍缺少評估晶格結構熱傳性能的統一指標。因此，本研究提出夾層法(One-Lattice sandwich method)來評估晶格結構的熱傳性能，意即將單晶格結構夾在兩塊隔板之間，並在兩側施加不同邊界條件以模擬實際應用情境。

經典熱傳導公式如( 3‑1 )所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑1 ) |

其中代表熱通量(W)；代表熱傳導係數(W/m∙K)；代表物體截面積(m2)；代表物體兩側溫差(℃)；代表物體厚度(m)。

晶格結構的熱交換能力來自於其高表面積-體積比，故亦須考慮其表面的熱對流現象，經典熱對流公式如( 3‑2 )所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑2 ) |

其中代表熱通量(W)；代表熱對流係數(W/m2∙K)；代表物體表面積(m2)；代表物體表面溫度(℃)；代表流體溫度(℃)。

本研究使用Ansys 2020 R1執行模擬測試，其邊界條件如下：設置單立方晶格尺寸1 mm，兩側有實心立方體1 mm3將晶格夾在中間，其中一個立方體維持常溫22℃作為冷卻端，另一個立方體給定初始溫度122℃作為熱源，材料為316L Steel、熱對流係數為12.1 W/m2∙K [32]，整體設置如圖 8所示。此外，亦模擬壓縮試驗以測試單晶格之剛性，其邊界條件為晶格一側固定、另一側給定0.1 mm的位移[33]，得到壓縮面的反作用力後，即可以虎克定律計算單晶格之剛性，整體設置如圖 9所示。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 8 單晶格熱傳測試邊界條件 |
|  |
| 圖 9 單晶格剛性測試邊界條件 |

單晶格剛性透過壓縮試驗與虎克定律(Hooke’s Law)求得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑3 ) |

其中代表受力向量(N)；代表剛性矩陣(N/mm)；代表位移向量(mm)。

為了定義單晶格熱傳性能之量化指標，本研究從基本熱傳導方程式描述物體之熱行為[34]。考慮會自行發熱物體之三維隨時間溫度方程式( 3‑4 )：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑4 ) |

其中代表物體單位體積的熱量(J/m3)；代表物體單位體積產生的熱量(W/m3)；代表熱擴散係數；代表熱傳導係數(W/m∙K)；代表熱容量(J/K)；代表密度(kg/ m3)。

若物體不會自行發熱，式( 3‑4 )可以改寫為：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑5 ) |

我們可以使用分離變數法求解溫度方程式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑6 ) |
|  |  | ( 3‑7 ) |

其中是為了求解常微分方程所給定的常數。當時，溫度隨時間下降方程式求解如( 3‑8 )所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑8 ) |

當已知熱源的位置及初始條件時，熱方程可以使用脈衝響應函數(Green’s function)[35]的形式表示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑9 ) |

其中為狄拉克單位脈衝函數(Dirac delta function)。將方程式( 3‑9 )求解後，可以得到熱通量的基本解(Heat kernel)[36]如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑10 ) |

藉由虎克定律( 3‑3 )、溫度方程式( 3‑8 )與熱通量方程式( 3‑10 )，本研究將衡量單晶格機械與熱傳能力的指標定義如下：

1. 剛性K (N/mm)：模擬壓縮試驗中測得之反作用力除以給定之位移量，用以評估晶格的結構支撐力。
2. 初始溫差A (℃)：溫降方程式式( 3‑8 )中*e*前的係數，若越接近給定溫差100℃代表由模擬數據迴歸而得的方程式越接近解析解。
3. 溫降係數λα (1/s)：式( 3‑8 ) 的指數係數，反映溫度下降的速率。
4. 溫度下降時間η (s)：使系統最高溫與系統最低溫之差ΔT降低50%所需的時間。此項指標等效於式( 3‑8 )中的係數λα。
5. 最高熱通量Φmax (W/m2)：系統在達成熱平衡前出現的最高熱通量。此項指標旨在作為材料可承受的閥值，預防過程中的熱集中以及結構軟化。

在有限元素分析中，晶格結構通常會因其微小且複雜的幾何結構造成大量計算成本。使用單個晶格進行測試，一方面是為了以最簡單的情況分析不同種類晶格的差異，一方面是希望能建立單晶格等效數學模型，以降低未來模擬所需之運算時間。

本研究分析的6種類型的晶格結構是使用nTopology[27]生成，其中包含體心立方(Body-centered cubic, BCC)、鑽石立方(Diamond cubic)、面心立方(Face-centered cubic, FCC)、凱爾文立方(Kelvin cubic)、八位組立方(Octet cubic)和螢石立方(Fluorite cubic)，晶格的幾何形狀如圖 10所示。此外，本研究亦使用邊長1 mm之實心立方體REF進行相同的測試，作為6種晶格結構比較時的參照物。

|  |
| --- |
| 一張含有 藝術, 設計, 折紙, 幾何 的圖片  自動產生的描述 |
| 圖 10 經由nTopology生成的6種晶格結構[27] |

## 簡單幾何結構測試

在SLM的製造流程中，已有研究將晶格應用於支撐結構，以防止工件在印製過程中坍塌。然而，目前少有研究探討晶格類型對工件表面簡單幾何的影響，諸如平面、斜面、曲面等結構。從圖 10中可見，BCC、Diamond、Fluorite注重角落的支撐，FCC、Kelvin、Octet則注重面的支撐，因此不同晶格會對不同表面幾何有不一致的影響。若能發現何種晶格對於不同工件幾何結構具有最佳的適應性，將能夠協助加工者因應個別元件挑選適合的晶格支撐。

為了探討6種晶格結構對SLM工件幾何的影響，本研究使用簡單幾何測試(Simple geometry test)。建立3種簡單幾何結構模型作為加工元件，包含：(a)邊長3cm的正方體；(b)寬3cm的三角柱，分為懸垂面15°、30°、45°作為不同斜率測試；(c)寬3 cm的圓柱，分為曲率半徑2 cm、3 cm、4 cm作為不同曲率測試，如圖 11所示。針對每個幾何模型，依序套用6種晶格作為支撐結構，以觀察平面、斜面、曲面上的總變形、熱應力效應。本研究使用Simufact Additive[37]進行SLM模擬驗證，其餘製程變因與3.3章節中所描述的邊界條件完全相同。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 11 簡單幾何測試：(a)正方體、(b)三角柱、(c)圓弧曲面[37] |

## 晶格結構設計參數最佳化

在SLM的工作流程中，工件是以逐層疊加的方式製造而成，因此經常需要支撐結構來防止工件在印製過程中坍塌。晶格結構是SLM中可作為支撐結構的一個選項，因其能在維持剛性提供支撐力的同時降低材料耗費，與金屬積層製造相輔相成。近年來，如何利用支撐結構在滿足剛性、提供支撐力的前提下發揮散熱功能以降低熱變形，成為備受關注的研究方向。然而，現行研究大多僅探討晶格結構的剛性等機械性能，卻鮮少分析晶格結構的熱傳能力。因此，本研究使用全因子設計法(Full factorial design)探討晶格類型、細胞尺寸、支柱直徑3項設計參數對股骨元件熱變形的影響，以期能夠提供加工者可降低SLM成品熱變形的最佳晶格結構設計參數。

在生成支撐結構前，需要先決定工件的印製方向，好的印製方向可以最小化支撐結構體積與印製時間，甚至消除懸垂區域。然而在絕大多數情況下，複雜幾何工件的懸垂區域是無法避免的，此時就需要將支撐結構填入懸垂區域中，以防止工件在印製過程中塌陷。目前的懸垂判定方法主要是利用臨界懸垂角(Maximum supporting angle)來辨識懸垂區域，其公式如( 3‑11 )所示

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑11 ) |

其中*n*為懸垂面法向量；*d*為印製方向；*α*max為臨界懸垂角，亦即AM限制中能維持懸垂結構不崩塌的臨界角度。臨界懸垂角通常由金屬粉末本身性質所決定，但一般而言該角度通常預設為45∘，且為多數商用軟體採用。圖 12中的著色區域為Simufact Additive模擬軟體[37]對於股骨元件的懸垂區域辨識結果。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 12 股骨懸垂區域辨識 |

將懸垂區域垂直投影至底板上，所得到的空間即為需要填入支撐結構的空間。為了將晶格單元填入，需要將股骨元件的懸垂區域下方的空間化為體素網格，此步驟稱為體素化(Voxelization)，使用Matlab執行的結果如圖 13所示。體素化的結果是3維網格陣列，其中包含值非0即1的像素與座標資訊，若某座標處的像素值為0表示該處沒有物質，若某座標處的像素值為1表示該處有物質。藉由體素化結果，可以將晶格單元依座標資訊填入需要支撐的懸垂區域，以堆疊的方式生成晶格支撐結構。在週期性晶體結構之數學模型中[38]，任何晶格點都由其晶格點的位置和向量來描述，如式( 3‑12 )所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3‑12 ) |

其中代表晶格單元整數；代表沿主晶體方向的單位向量；代表晶體角的數量。

本研究採用前述圖 10中6種晶格結構建立支撐結構，依照懸垂區域體素化堆疊的結果如圖 14所示。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 13 股骨元件懸垂區域之體素化 |

|  |
| --- |
|  |
| 圖 14 基於懸垂區域堆疊而成的6種晶格支撐結構 |

晶格結構的幾何形狀由細胞尺寸(Cell size)與壁厚度(Wall thickness)兩項參數決定。為了方便計算熱傳中之截面積，此處以晶格內支柱直徑(Strut diameter)等效於壁厚度。相對密度(Relative density)亦為衡量晶格結構的常見參數，在此處相對密度由晶格壁厚度所決定，為壁厚度之應變量。為了探討晶格種類、細胞尺寸與支柱直徑3項參數對SLM骨骨成品熱變形的影響，本研究採用全因子設計法建立24組工況，以找出適合作為SLM支撐結構的最佳設計參數，全因子參數設計如表 1所示。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 表 1、晶格結構全因子參數設計 | | | |
| Cell Type | Cell Size [mm] | Strut Diameter [mm] | Relative Density [%] |
| BCC | 2 | 0.2 | 17.68 |
|  |  | 0.3 | 35.51 |
|  | 3 | 0.2 | 17.68 |
|  |  | 0.3 | 35.51 |
| Diamond | 2 | 0.2 | 16.99 |
|  |  | 0.3 | 33.13 |
|  | 3 | 0.2 | 16.99 |
|  |  | 0.3 | 33.13 |
| FCC | 2 | 0.2 | 21.05 |
|  |  | 0.3 | 41.37 |
|  | 3 | 0.2 | 21.05 |
|  |  | 0.3 | 41.37 |
| Kelvin | 2 | 0.2 | 20.36 |
|  |  | 0.3 | 39.40 |
|  | 3 | 0.2 | 20.36 |
|  |  | 0.3 | 39.40 |
| Octet | 2 | 0.2 | 36.90 |
|  |  | 0.3 | 67.60 |
|  | 3 | 0.2 | 36.90 |
|  |  | 0.3 | 67.60 |
| Fluorite | 2 | 0.2 | 31.53 |
|  |  | 0.3 | 58.00 |
|  | 3 | 0.2 | 31.53 |
|  |  | 0.3 | 58.00 |

本研究使用Simufact Additive[37]進行SLM模擬驗證，為了確保股骨元件熱變形結果係受晶格設計參數影響，需控制其餘製程變因。雷射印製參數如表 2所示，詳述如下：雷射功率(*P*)為200W、掃描速度(*V*)為1000mm/s、雷射吸收率25%、光斑直徑100μm、粉末層厚30μm、重新鋪粉時間10秒，搭配Uni-directional雷射掃描路徑(如圖 15所示)，其雷射掃描之設定條件如表 3所示:掃描寬度(*Sw*)為5mm、無掃描重疊範圍(*So*)、孵化距離(*Hd*)為0.07mm且無暫停時間(*Tp*)。使用的金屬粉末材質為316L Stainless Steel，印製過程中機台腔室、粉末及底板初始溫度如表 4所示，印製模型、底板在印製過程中與後處理的各項熱傳係數如表 5所示。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 15 掃描策略[37] |

|  |  |
| --- | --- |
| 表 2、雷射印製參數 | |
| Laser power (*P*) | 200 W |
| Laser speed (*V*) | 1000 mm/s |
| Efficiency | 25% |
| Beam width | 100 μm |
| Layer thickness | 30 μm |
| Recoater time | 10 Sec |

|  |  |
| --- | --- |
| 表 3、掃描策略參數 | |
| Scan width () | 20 mm |
| Scan overlap () | 0 mm |
| Hatch distance () | 0.07 mm |
| Pause time () | 0 Sec |

|  |  |
| --- | --- |
| 表 4、環境溫度參數 | |
| Powder temperature | 25℃ |
| Chamber temperature | 50℃ |
| Initial Base Temperature | 200℃ |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 表 5、模型與底板之熱傳係數 | | |
| Units: W/m2-K | | |
| Model/Supporting structure | | |
| Condition | Pre-processing | Post-processing |
| Emissivity | 0.85 | 0.6 |
| Heat transfer coefficient | 12 | 20 |
| Baseplate | | |
| Condition | Pre-processing | Post-processing |
| Emissivity | 0.6 | 0.6 |
| Heat transfer coefficient | 20 | 20 |
| Contact HTC | 100 | 100 |

# 第四章 參數效應分析

## 單晶格熱性能分析

為了證明單晶格夾層法的有效性，本研究首先對不同晶格數量的隔層進行有效性測試。所驗證的晶格類型選擇最常見的BCC，晶格數量分別為1×1、3×3、5×5的方形陣列，並施加3.1章節敘述的邊界條件。數值模擬得出的溫度下降與熱通量如圖 16至圖 21所示，三種情況的最高溫度下降趨勢線比較如圖 22、最高熱通量下降趨勢線比較則如圖 23所示。從趨勢圖中可以看出，三種晶格陣列的溫度下降曲線幾乎是完全重疊，熱通量下降曲線則會隨晶格數量增加而稍微提升。可見在晶格結構重複排列的情況下，溫度下降趨勢不會受到水平陣列數量變化影響，而僅受到垂直方向隔層厚度影響，符合理論熱傳導公式( 3‑1 )；而熱通量的些微提升可能來自水平方向的熱傳導，意即晶格與晶格之間接觸面的熱傳導。藉由以上結果，可以確保單晶格分析的有效性，足以反映不同晶格數量隔層之熱行為。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖 16 BCC 1×1晶格溫度下降 | 圖 17 BCC 1×1晶格熱通量 |
|  |  |
| 圖 18 BCC 3×3晶格溫度下降 | 圖 19 BCC 3×3晶格熱通量 |
|  |  |
| 圖 20 BCC 5×5晶格溫度下降 | 圖 21 BCC 5×5晶格熱通量 |
|  |  |
| 圖 22 BCC不同數量晶格溫降比較 | 圖 23 BCC不同數量晶格熱通量比較 |

為了比較晶格結構的機械性能，本研究使用壓縮試驗計算單晶格的剛性，以衡量晶格作為SLM支撐結構時的承重能力。藉由3.1章定義的邊界條件使用Ansys 2020 R1進行模擬測試，得出的單晶格剛性為：BCC之K=2152.5N/mm、FCC之K=18316N/mm、Kelvin之K=8397.5N/mm、Octet之K=24393N/mm、Fluorite之K=12776N/mm、Diamond之K=3812.2N/mm，其剛性比較如圖 24所示。對於股骨元件重262公克的條件而言，晶格結構可充分提供SLM製程中所需的支撐力。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 24 單晶格剛性比較 |

為了比較晶格結構類型的熱效應，本研究提出夾層法並定義溫度下降時間η與最高熱通量Φmax兩項指標，以量化並分析晶格結構的熱傳性能。藉由3.1章定義的邊界條件使用Ansys 2020 R1進行模擬測試，得出的單晶格溫度下降時間為：BCC之η = 0.547s、FCC之η = 0.334s、Kelvin之η = 0.412s、Octet之η = 0.256s、Fluorite之η = 0.271s、Diamond之η = 0.523s，其溫度下降模擬圖與降溫趨勢圖如圖 25至圖 34所示。此外，本研究亦將實心立方體REF作為隔層與6種晶格結構的溫度下降曲線比較，得出降溫能力由強至弱排序為Octet > Fluorite > Kelvin > FCC > Diamond > BCC，如圖 37所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖 25 BCC單晶格溫度下降 | 圖 26 BCC單晶格溫降趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 27 FCC單晶格溫度下降 | 圖 28 FCC單晶格溫降趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 29 Kelvin單晶格溫度下降 | 圖 30 Kelvin單晶格溫降趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 31 Octet單晶格溫度下降 | 圖 32 Octet單晶格溫降趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 33 Fluorite單晶格溫度下降 | 圖 34 Fluorite單晶格溫降趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 35 Diamond單晶格溫度下降 | 圖 36 Diamond單晶格溫降趨勢圖 |
|  | |
| 圖 37 單晶格最高溫度下降趨勢比較圖 | |

單晶格在降溫過程中最高熱通量為：BCC之Φmax = 2.26×107W、FCC之Φmax = 1.96×107W、Kelvin之Φmax = 2.44×107W、Octet之Φmax = 1.61×107W、Fluorite之Φmax = 2.22×107W、Diamond之Φmax = 2.78×107W，其熱通量模擬圖與熱通量趨勢圖如圖 38至圖 47所示。此外，本研究亦將實心立方體REF作為隔層與6種晶格結構的熱通量下降曲線共同比較，得出熱集中效應由高至低排序為Diamond > Kelvin > BCC > Fluorite > FCC > Octet，如圖 50所示。

根據溫度下降方程式( 3‑8 )與熱梯度方程式( 3‑10 )，本研究將上述數據回歸為指數趨勢線，其中的方程式係數統整如表 6。藉由其中的指標，可以簡單地評估各晶格的熱傳能力，進而使加工者根據使用情境選擇最佳晶格結構。此外，亦有可能提出單晶格數學等效模型，以大幅簡化有限元素中的模擬運算成本。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖 38 BCC單晶格熱通量 | 圖 39 BCC單晶格熱通量趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 40 FCC單晶格熱通量 | 圖 41 FCC單晶格熱通量趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 42 Kelvin單晶格熱通量 | 圖 43 Kelvin單晶格熱通量趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 44 Octet單晶格熱通量 | 圖 45 Octet單晶格熱通量趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 46 Fluorite單晶格熱通量 | 圖 47 Fluorite單晶格熱通量趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 48 Diamond單晶格熱通量 | 圖 49 Diamond單晶格熱通量趨勢圖 |
|  | |
| 圖 50 單晶格最高熱通量下降趨勢比較圖 | |

雖然6種晶格結構皆可提供足夠的支撐力，但實際應用中仍期望挑選越高剛性的晶格，以儘可能減少變形。為了最佳化散熱能力，溫度下降時間應當越低越好，表示晶格可快速藉由熱傳導達成系統冷卻；過程中最高熱通量應當越低越好，表示晶格在散熱過程中因熱集中產生結構軟化、失效的風險越低。綜合上述，Octet應為6種晶格結構中機械與熱傳性能最佳者，原因來自其較高的結構剛性、較高的相對密度使單位體積吸收的熱能降低、以及較高的截面積使熱傳導能力提升。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 表 6、單晶格剛性、溫降與熱通量指標統整 | | | | | |
| Cell Type | Stiffness | Temperature drop | | | Heat flux |
| K [N/mm] | A [℃] | λα [1/s] | η [s] | Φmax [W/m2] |
| BCC | 2152.5 | 97.95 | 1.227 | 0.5475 | 2.262×107 |
| FCC | 18316 | 96.11 | 1.959 | 0.3343 | 1.668×107 |
| Kelvin | 8397.5 | 96.86 | 1.605 | 0.4124 | 2.438×107 |
| Octet | 24393 | 95.72 | 2.536 | 0.2563 | 1.488×107 |
| Fluorite | 12776 | 96.75 | 2.449 | 0.2713 | 2.224×107 |
| Diamond | 3812.2 | 97.89 | 1.284 | 0.5235 | 2.780×107 |
| REF | 206230 | 97.04 | 10.29 | 0.0644 | 0.714×107 |

## 簡單幾何之晶格支撐效應

為了探討晶格類型在SLM中對工件表面幾何的影響，本研究將6種晶格分別作為正方體、三角柱、1/4圓柱的支撐結構，以比較印製後的總變形、熱應力效應。首先是邊長3 cm的正方體，將正方體的8個角落作為8個監測點，如圖 51所示。印製完成後的正方體總變形結果顯示，變形量整體呈現層數越高而降低的趨勢，頂面(Node 1~4)變形量有高度的重合性，底面(Node 5~8)與支撐結構接觸部分則因晶格類型不同有所差異，如圖 52與圖 53所示。比較晶格支撐類型，平均變形量由低至高排序為Fluorite < Octet < BCC < Kelvin < FCC < Diamond。印製完成後的正方體熱應力結果則顯示，應力整體亦呈現層數越高而降低的趨勢，且應力集中處位於底面與支撐結構接觸的位置，需要提防翹曲或脫離等情形發生，如圖 54與圖 55所示。值得注意的是，Diamond晶格因其陣列中與其相鄰晶格鏡射排列的特性，導致應力結果交錯且不均勻，故不建議使用該晶格支撐平面。比較晶格支撐類型，平均熱應力由低至高排序為Diamond < Kelvin < FCC < BCC < Octet < Fluorite。綜合上述，在水平面幾何元件的情況下，晶格類型對總變形與熱應力的排序呈現幾乎相反的趨勢。造成該不符虎克定律之現象的原因，可能來自晶格相對密度導致結構剛性不同，並且這項差異足以扭轉印製結果。因此在選擇晶格類型時，需要在降低總變形以及預防殘留應力導致翹曲之間做出取捨。

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| 圖 51 正方體監測點 | |
|  |  |
| 圖 52 正方體總變形 | 圖 53 正方體總變形趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 54 正方體熱應力 | 圖 55 正方體熱應力趨勢圖 |

第二個模型是且寬3 cm的三角柱，分別討論斜面懸垂角15°、30°、45°三種情況，並選擇三角柱的6個角落作為6個監測點，如圖 56所示。印製完成後的三角柱總變形結果顯示，變形量整體亦呈現層數越高而降低的趨勢，然而斜面與支撐結構接觸部分相較垂直面變形量降低趨勢較緩，直到頂面直角處變形量降至最低，如圖 57、圖 58、圖 61、圖 62、圖 65、圖 66所示。比較晶格支撐類型，平均變形量由低至高排序為Fluorite < Octet < BCC < Kelvin < FCC < Diamond。印製完成後的三角柱熱應力結果則顯示，應力整體亦呈現層數越高而降低的趨勢，且應力集中處位於底面與支撐結構接觸的位置，故需要預防翹曲和脫落的風險，如圖 59、圖 60、圖 63、圖 64、圖 67、圖 68所示。比較晶格支撐類型，平均熱應力由低至高排序為Fluorite < Octet < BCC < Diamond < Kelvin < FCC。此外，比較不同表面斜率之三角柱，發現懸垂角30°時總變形些微上升，然而整體趨勢一致，如圖 69所示。綜合上述，在斜面幾何元件的情況下，晶格類型對總變形與熱應力的排序呈現高度一致的趨勢，符合虎克定律的預測，唯Diamond因其鏡射排列的特性造成支撐力分佈較不均勻而改變應力的排序。因此在印製具有斜面的元件時，推薦使用Fluorite作為支撐結構。

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| 圖 56 三角柱監測點 | |
|  |  |
| 圖 57 斜率15°三角柱總變形 | 圖 58 斜率15°三角柱總變形趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 59 斜率15°三角柱熱應力 | 圖 60 斜率15°三角柱熱應力趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 61 斜率30°三角柱總變形 | 圖 62 斜率30°三角柱總變形趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 63 斜率30°三角柱熱應力 | 圖 64 斜率30°三角柱熱應力趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 65 斜率45°三角柱總變形 | 圖 66 斜率45°三角柱總變形趨勢圖 |
|  |  |
| 圖 67 斜率45°三角柱熱應力 | 圖 68 斜率45°三角柱熱應力趨勢圖 |
|  | |
| 圖 69 不同斜率對總變形比較圖 | |

最後一個模型是厚3 cm的圓柱，分別討論曲率半徑2 cm、3 cm、4 cm三種情況，並選擇圓弧上的14個節點作為監測點，如圖 70所示。印製完成後的圓弧曲面總變形結果顯示，總變形主要隨印製方向與表面法向量之夾角而變化。變形量在底層有最大值，隨著角度提升到30°逐漸降至最小值，而後又回升到60°有局部極大值，最後降低至頂面的局部極小值，整體趨勢如圖 71、圖 72、圖 75、圖 76、圖 79、圖 80所示。比較晶格支撐類型，平均變形量由低至高排序為Fluorite < Octet < BCC < Kelvin < FCC < Diamond。印製完成後的圓弧曲面熱應力結果則顯示，應力整體呈現層數越高而降低的趨勢，但因為整個圓弧曲面與支撐結構互相接觸，故應力一直維持在較高的值，直到頂部平面才下降，如圖 73、圖 74、圖 77、圖 78、圖 81、圖 82所示。比較晶格支撐類型，平均熱應力由低至高排序為Kelvin < FCC < Octet < Fluorite < BCC < Diamond。此外，比較不同曲率半徑之圓柱，發現曲率半徑2 cm總變形的結果不如3 cm與4 cm的結果契合，但整體仍呈現相似的趨勢，可見若曲率逐漸降低可能越接近斜面的結果，如圖 83所示。綜合上述，在圓弧曲面的情況下，晶格類型對總變形與熱應力的排序幾乎沒有關聯性，故沒有明顯較佳的選擇。然而，比較正方體、三角柱、圓柱的總變形結果，可以發現晶格類型對平均變形量的影響力排序有高度一致性，因此建議使用Fluorite作為最泛用的支撐結構。

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| 圖 70圓弧曲面監測點 | |
|  |  |
| 圖 71 曲率半徑2 cm圓柱總變形 | 圖 72 曲率半徑2 cm圓柱總變形趨勢 |
|  |  |
| 圖 73 曲率半徑2 cm圓柱熱應力 | 圖 74 曲率半徑2 cm圓柱熱應力趨勢 |
|  |  |
| 圖 75 曲率半徑3 cm圓柱總變形 | 圖 76 曲率半徑3 cm圓柱總變形趨勢 |
|  |  |
| 圖 77 曲率半徑3 cm圓柱熱應力 | 圖 78 曲率半徑3 cm圓柱熱應力趨勢 |
|  |  |
| 圖 79 曲率半徑4 cm圓柱總變形 | 圖 80 曲率半徑4 cm圓柱總變形趨勢 |
|  |  |
| 圖 81 曲率半徑4 cm圓柱熱應力 | 圖 82 曲率半徑4 cm圓柱熱應力趨勢 |
|  | |
| 圖 83 不同曲率半徑對總變形比較圖(印製方向與圓弧表面法向量之夾角) | |

## 晶格支撐設計參數效應

為了找出晶格支撐結構最佳設計參數，本研究使用全因子設計法分析細胞尺寸、支柱直徑對SLM股骨元件熱變形的影響。從股骨元件表面選擇19個監測點比較總變形，其中17個點沿著原生骨頭邊界輪廓、2個點在釘子頂端，以確保其與患者骨骼的適配性，如圖 84所示。在支柱直徑0.2 mm、細胞尺寸2 mm的相同情況下，不同晶格支撐結構導致的股骨表面熱變形如圖 85所示，股骨表面熱應力則如圖 86所示。總體而言，6種晶格支撐效果非常相近，唯元件右側邊緣處(Node 15~17)有些差異。將19個監測點取平均值做比較，得出變形量平均值由小到大依序為BCC < Kelvin < FCC < Fluorite < Diamond < Octet。在4.1章節中具有最佳傳熱能力的Octet晶格，在此處產生的變形量反而是最大的，推測原因可能是快速散熱反而導致材料溫度分佈不均，在時間尺度上產生更高的熱梯度以致於微觀結構形成效果不佳，造成金屬粉末在熔融過程中無法良好地融合。這項結論與過去研究思路相反，因其建議降低散熱能力換取SLM製程中工件更均勻的溫度。熱應力平均值由小到大依序為Diamond < Kelvin < Octet < Fluorite < BCC < FCC，且在元件中央部位(Node 9~11)應力較低，顯示在元件周圍邊緣處較容易累積殘留應力，需要注意翹曲等情形。

|  |
| --- |
|  |
| 圖 84 股骨表面19監測點 |
|  |
| 圖 85 晶格支撐6種類型對股骨熱變形影響比較 |
|  |
| 圖 86 晶格支撐6種類型對股骨應力影響比較 |

藉由3.2章節中表 1的全因子設計建立的數據庫，本研究使用反應曲面法(Response surface methodology, RSM)探討細胞尺寸、支柱直徑與相對密度三項變因對總變形、熱應力與熱柔性三項結果之間的關係。

首先，本研究將股骨19個監測點的總變形取平均值，而後分別對細胞尺寸-支柱直徑與細胞尺寸-相對密度進行迴歸分析。由於相對密度為支柱直徑、晶格類型共同決定，相對密度可視為支柱直徑的應變量。股骨總變形的迴歸方程式為式( 4‑1 )與式( 4‑2 )，反應曲面則如圖 87與圖 88所示。從反應曲面可以得知，支柱直徑對總變形具有最高影響力、支柱直徑與細胞尺寸交互項次之、細胞尺寸影響最小。故建議降低支柱直徑、提升細胞尺寸以降低總變形。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 4‑1 ) |
|  |  | ( 4‑2 ) |

其中*A*代表細胞尺寸(mm)；*B*代表支柱直徑(mm)；*C*代表相對密度(%)。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖 87 細胞尺寸、支柱直徑對股骨總變形反應曲面 | 圖 88 細胞尺寸、相對密度對股骨總變形反應曲面 |

其次，本研究將股骨19個監測點的熱應力取平均值，而後分別對細胞尺寸-支柱直徑與細胞尺寸-相對密度進行迴歸分析。股骨熱應力的迴歸方程式為式( 4‑3 )與式( 4‑4 )，反應曲面則如圖 89與圖 90所示。從反應曲面可以得知，提升細胞尺寸、支柱直徑與相對密度皆會降低熱應力。此處總變形與熱應力的趨勢看似不符合虎克定律，原因可能出於相對密度會使結構剛性產生變化而非定值，以及變形量會在印製過程中逐層累積。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 4‑3 ) |
|  |  | ( 4‑4 ) |

其中*A*代表細胞尺寸(mm)；*B*代表支柱直徑(mm)；*C*代表相對密度(%)。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖 89 細胞尺寸、支柱直徑對股骨應力反應曲面 | 圖 90 細胞尺寸、相對密度對股骨應力反應曲面 |

最後，本研究將股骨熱柔性(Thermal compliance)分別對細胞尺寸-支柱直徑與細胞尺寸-相對密度進行迴歸分析。熱柔性的物理定義結構所能吸收的熱量，在數學上是由總變形與熱應力相乘而得。股骨熱柔性的迴歸方程式為式( 4‑5 )與式( 4‑6 )，反應曲面則如圖 91與圖 92所示。從反應曲面可以得知，提升細胞尺寸可降低熱柔性，提升支柱直徑與相對密度則可稍微降低熱柔性。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 4‑5 ) |
|  |  | ( 4‑6 ) |

其中*A*代表細胞尺寸(mm)；*B*代表支柱直徑(mm)；*C*代表相對密度(%)。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖 91 細胞尺寸、支柱直徑對股骨熱柔性反應曲面 | 圖 92 細胞尺寸、相對密度對股骨熱柔性反應曲面 |

# 第五章 結果與討論

## 單晶格熱性能

在此章節中，本研究透過單晶格夾層法評估體心立方(BCC)、鑽石立方(Diamond)、面心立方(FCC)、凱爾文立方(Kelvin)、八位組立方(Octet)和螢石立方(Fluorite)作為隔板填充材料的熱行為，並藉由基本熱傳導公式定義溫度下降時間η與最高熱通量Φmax兩項指標，以量化並比較上述6種晶格結構的熱傳性能。

首先，透過比較BCC晶格1×1、3×3、5×5的水平陣列，本研究發現晶格在水平方向的數量不影響溫度下降趨勢，熱通量則會因相鄰晶格間水平方向熱傳導而有少許提升，但對於單層的晶格隔層而言其影響可忽略。藉由該結果，可驗證單晶格測試的有效性。然而，若晶格結構的層數大於一層，溫度下降與熱通量可能因厚度發生改變，但根據基本熱傳導公式，該熱傳性能的改變是可預測的。

接著，本研究對前述6種晶格進行單晶格夾層法測試。比較溫度下降時間η，得知降溫能力由強至弱排序為Octet > Fluorite > Kelvin > FCC > Diamond > BCC；比較最高熱通量Φmax，得出熱集中風險由高至低排序為Diamond > Kelvin > BCC > Fluorite > FCC > Octet。溫度下降時間主要隨晶格截面積提升而降低，而最高熱通量則隨晶格相對密度提升而降低。根據上述結果，使用者可以根據自身需求依序挑選適合的晶格，若使用者對晶格剛性、材料耗費等有特殊要求，亦可以微調晶格設計參數以符合標準。

最後，本研究使用實心立方體REF取代晶格進行夾層法測試，可以比較上述晶格結構與實心立方體的熱傳性能。藉由溫度方程式( 3‑8 )與單晶格熱性能指標統整表 6，可以推導熱阻、熱傳導係數等晶格結構相對於實心立方體的比例，進而建立單晶格等效數學模型，以簡化有限元素法中晶格結構的模擬運算成本與複雜性。

## 簡單幾何測試

在此章節中，本研究設計邊長3 cm之正方體、懸垂角分別為15°、30°、45°之三角柱、曲率半徑分別為2 cm、3 cm、4 cm的圓柱等簡單幾何結構，作為SLM加工元件並分別應用6種晶格支撐結構，以評估晶格種類對平面、斜面、曲面等簡單幾何的總變形、熱應力效應。

在印製正方體的情況下，總變形整體呈現層數越高而降低的趨勢，且在元件與支撐結構接觸部分變形量最大，平均變形量由低至高排序為Fluorite < Octet < BCC < Kelvin < FCC < Diamond。熱應力整體亦呈現層數越高而降低的趨勢，且在元件與支撐結構接觸部分熱應力亦是最大，平均熱應力由低至高排序為Diamond < Kelvin < FCC < BCC < Octet < Fluorite。值得注意的是，總變形與熱應力的排序呈現相反的趨勢，其原因可能來自晶格相對密度改變了支撐結構的剛性，且在水平面時該影響尤為明顯。此外，Diamond因其與相鄰晶格鏡射排列的特性，容易造成熱應力分佈不均勻，故不建議採用。

在印製三角柱的情況下，總變形亦呈現層數越高而降低的趨勢，然而斜面與支撐結構接觸部分相較垂直面變形量降低趨勢較緩，直到頂部平面直角處變形量降至最低，平均變形量由低至高排序為Fluorite < Octet < BCC < Kelvin < FCC < Diamond。熱應力整體亦呈現層數越高而降低的趨勢，且應力集中處位於斜面與支撐結構接觸的位置，平均熱應力由低至高排序為Fluorite < Octet < BCC < Diamond < Kelvin < FCC。整體而言，總變形與熱應力的熱性能排序呈現一致的趨勢，且表面斜率對總變形較無影響，符合虎克定律的預測。

在印製1/4圓柱的情況下，總變形趨勢與圓弧曲面懸垂角有很大的關聯，變形量在底層有最大值，隨著懸垂角提升到30°逐漸降至最小值，而後變形量又回升直到懸垂角60°時有局部極大值，最後降低至頂部平面90°時有局部極小值，平均變形量由低至高排序為Fluorite < Octet < BCC < Kelvin < FCC < Diamond。熱應力整體亦呈現層數越高而降低的趨勢，然而在圓弧曲面上因與支撐結構接觸故應力沒有明顯下降，平均熱應力由低至高排序為Fluorite < Octet < BCC < Diamond < Kelvin < FCC。整體而言，總變形與熱應力的排序沒有明顯的關聯性，然而隨著圓弧曲率越小總變形的變化越緩，顯示除了晶格機械與熱傳性能以外，懸垂角可能也是影響製造結果的重要因素。

綜合上述，在水平面、斜面、圓弧曲面等簡單幾何的情況中，6種晶格支撐結構對總變形的影響幾乎一致，熱應力則因晶格相對密度、懸垂角等因素交互影響而有不同趨勢。變形量皆會隨著層數提高而降低，應力則皆集中在元件與支撐結構接觸部分，需要提防翹曲與脫落等情形。然而，殘留應力通常可以藉由熱處理得到釋放，因此大多數情況下，推薦使用Fluorite做為最泛用的支撐結構。

## 晶格參數效應

在此章節中，本研究使用全因子設計法建立24組模擬工況，並使用反應曲面法探討晶格支撐結構設計參數中晶格類型、細胞尺寸、支柱直徑對SLM股骨元件之總變形、熱應力與熱柔性之影響。

本研究先使用Simufact Additive進行SLM股骨元件製程模擬，並在固定細胞尺寸、支柱直徑的情況下，從股骨表面選擇19個監測點比較6種晶格結構對總變形與熱應力的影響。從結果可以得知，不同晶格結構產生的總變形與熱應力趨勢非常相近，可見各種晶格類型作為支撐結構時對於股骨元件可發揮幾乎相同的支撐效果，而沒有顯著的散熱能力差異，唯殘留應力大多集中在股骨元件邊緣處，需要提防翹曲等情形。

本研究亦使用反應曲面法對晶格設計參數與股骨元件加工結果進行迴歸分析。從分析結果得出，細胞尺寸與總變形呈現負相關，支柱直徑、相對密度對總變形則較無影響；提升細胞尺寸、支柱直徑與相對密度皆可降低熱應力；提升細胞尺寸可降低熱柔性，提升支柱直徑與相對密度則可稍微降低熱柔性。值得注意的是，改變晶格相對密度也會改變結構剛性，因此其固體力學行為仍需進一步分析。根據上述結果，建議提升細胞尺寸可達成較好的散熱效果，從而降低總變形、熱應力，然而在調整晶格大小時應考慮AM製程中的自支撐限制，否則會因橫向距離過長導致結構坍塌。

# 第六章 結論與未來展望

## 結論

在SLM的加工情境中，雷射產生的高溫梯度容易導致成品產生變形、翹曲等瑕疵，其中一種解決方式是透過支撐結構提供拉力的同時輔助散熱。為了探討晶格作為SLM支撐結構時的散熱效益，本研究首先提出單晶格夾層法並定義溫度下降時間、最高熱通量兩項指標以量化晶格結構之熱傳性能，接著使用全因子設計法探討可最小化SLM股骨成品熱變形之晶格結構最佳設計參數。結果顯示，Octet有最佳單晶格熱傳性能，而Fluorite可作為降低熱變形之最泛用支撐結構。最佳參數設計的晶格結構相較於實心材料可在體積30%的限制下保留50%的熱傳導能力，並且在滿足自支撐限制的前提下，細胞尺寸每增加1 mm可降低股骨元件平均變形0.03 mm。這項研究可以幫助加工者快速評估晶格結構的熱傳性能，進而根據SLM實際加工情境選擇適合的支撐結構設計參數。

## 未來展望

在未來的研究中，尚可以改善現有方法的缺失，並拓展這項方法的實際應用能力。以下是一些未來展望的構思：

1. 實際印製所設計的晶格支撐結構，並量測股骨元件的表面變形量，以驗證模擬預測的可靠性。
2. 使用非線性迴歸或物理訊息神經網路(Physics-informed neural network, PINN)取代反應曲面法進行預測，以提升晶格參數設計對降低熱變形的預測準確度。
3. 增加模擬數據並納入實際量測數據以建立數據庫，並增加輸入參數與輸出結果的範圍，進而建立更泛用的預測系統。
4. 基於量化熱傳性能指標建立單晶格等效數學模型，以降低有限元素法中晶格結構造成的計算成本及複雜性。

Reference

1. 人力發展統計分析圖表彙編-人口推計-國發會全球資訊網. Available at: https://www.ndc.gov.tw/Content\_List.aspx?n=2688C8F5935982DC (Accessed: September 02, 2023).
2. 翁易萱（2022）。以全表現型體關聯性研究探索共病與全人工膝關節置換術術後感染之關係。﹝碩士論文。慈濟大學﹞臺灣博碩士論文知識加值系統。 https://hdl.handle.net/11296/czj327。
3. Lin, C. M., Hung, Y. T., & Tan, C. M. (2021). Hybrid Taguchi–Gray Relation Analysis Method for Design of Metal Powder Injection-Molded Artificial Knee Joints with Optimal Powder Concentration and Volume Shrinkage. *Polymers*, 13(6), 865. https://doi.org/10.3390/polym13060865
4. Kebbach, M., Geier, A., Darowski, M., Krueger, S., Schilling, C., Grupp, T. M., & Bader, R. (2023). Computer-based analysis of different component positions and insert thicknesses on tibio-femoral and patello-femoral joint dynamics after cruciate-retaining total knee replacement. *The Knee*, 40, 152-165. https://doi.org/10.1016/j.knee.2022.11.010
5. Armstrong, M., Mehrabi, H., & Naveed, N. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1001-1029. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060
6. Bihr, M., Allaire, G., Betbeder-Lauque, X., Bogosel, B., Bordeu, F., & Querois, J. (2022). Part and supports optimization in metal powder bed additive manufacturing using simplified process simulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 395, 114975. https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.114975
7. 潘季宏（2023）。基於有限元素分析開發選擇性雷射熔融製程之熱誤差診斷網路:以人工膝關節脛骨元件為例。﹝碩士論文。國立中興大學﹞國立中興大學圖書館。
8. Yan, W., Ge, W., Qian, Y., Lin, S., Zhou, B., Liu, W. K., ... & Wagner, G. J. (2017). Multi-physics modeling of single/multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting. *Acta Materialia*, 134, 324-333. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.05.061
9. Su, J., Jiang, F., Li, J., Tan, C., Xu, Z., Xie, H., ... & Teng, J. (2022). Phase transformation mechanisms, microstructural characteristics and mechanical performances of an additively manufactured Ti-6Al-4V alloy under dual-stage heat treatment. *Materials & Design*, 223, 111240. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111240
10. Wang, Z., Zhang, Y., Tan, S., Ding, L., & Bernard, A. (2021). Support point determination for support structure design in additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, *47*, 102341. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102341
11. Zhang, Y., Wang, Z., Zhang, Y., Gomes, S., & Bernard, A. (2020). Bio-inspired generative design for support structure generation and optimization in Additive Manufacturing (AM). *CIRP Annals*, 69(1), 117-120. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.091
12. Zhang, N., Zhang, L.-C., Chen, Y., & Shi, Y.-S. (2019). Local Barycenter Based Efficient Tree-Support Generation for 3D Printing. *Computer-Aided Design*, 115, 277-292. https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.06.004
13. Hussein, A., Hao, L., Yan, C., Everson, R., & Young, P. (2013). Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(7), 1019-1026. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.020
14. Vanek, J., Galicia, J. A. G., & Benes, B. (2014). Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication. *Computer graphics forum*, 33(5), 117-125. https://doi.org/10.1111/cgf.12437
15. Subedi, S. C., Shahba, A., Thevamaran, M., Thoma, D. J., & Suresh, K. (2022). Towards the optimal design of support structures for laser powder bed fusion-based metal additive manufacturing via thermal equivalent static loads. *Additive Manufacturing*, 57, 102956. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102956
16. Dumas, J., Hergel, J., & Lefebvre, S. (2014). Bridging the gap: automated steady scaffoldings for 3D printing. *ACM Trans. Graph.*, 33(4), Article 98. https://doi.org/10.1145/2601097.2601153
17. Armanfar, A., Alper Tasmektepligil, A., Kilic, R. T., Demir, S., Cam, S., Karafi, Y., Majd, B. A. E., & Gunpinar, E. (2024). Embedding lattice structures into ship hulls for structural optimization and additive manufacturing. *Ocean Engineering*, 301, 117601. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117601
18. Longhitano, G. A., García, I. M., Arenas, M. A., de Damborenea, J. J., Maciel Filho, R., & Conde, A. (2024). Effect of designed pore size on electrochemical, wear, and tribocorrosion behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V lattice structures. *Additive Manufacturing*, 79, 103931. https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103931
19. Han, T., Qi, D., Ma, J., & Sun, C. (2024). Generative design and mechanical properties of the lattice structures for tensile and compressive loading conditions fabricated by selective laser melting. *Mechanics of Materials*, 188, 104840. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2023.104840
20. Xu, K., Li, Y., Chen, L., & Maropoulos, P. (2024). Optimizing lightweight lattice structures through integrated parameterized design and fiber-reinforced additive manufacturing. *CIRP Annals*. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.04.005
21. Wang, W., Feng, D., Yang, L., Li, S., & Wang, C. C. L. (2023). Topology optimization of self-supporting lattice structure. Additive Manufacturing, 67, 103507. https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103507
22. Huang, R., Dai, N., Pan, C., Yang, Y., Jiang, X., Tian, S., & Zhang, Z. (2023). Grid-tree composite support structures for lattice parts in selective laser melting. *Materials & Design*, 225, 111499. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111499
23. Yang, D., Pan, C., Zhou, Y., & Han, Y. (2022). Optimized design and additive manufacture of double-sided metal mirror with self-supporting lattice structure. *Materials & Design*, 219, 110759. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110759
24. Vaidya, R., & Anand, S. (2016). Optimum Support Structure Generation for Additive Manufacturing Using Unit Cell Structures and Support Removal Constraint. *Procedia Manufacturing*, 5, 1043-1059. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.072
25. Liu, F., Chen, M., Liu, S., Xiang, Z., Huang, S., Lim, E. G., & Zhang, S. (2024). Stress-driven generative design and numerical assessment of customized additive manufactured lattice structures. *Materials & Design*, 241, 112956. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112956
26. Venugopal, V., Hertlein, N., & Anand, S. (2021). Multi-Material Topology Optimization Using Variable Density Lattice Structures for Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 53, 327-337. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.089
27. nTop, nTopology Inc., retrieved from https://www.ntop.com/software/products/, accessed by June 1, 2024.
28. Zhuang, J.-R., Lee, Y.-T., Hsieh, W.-H., & Yang, A.-S. (2018). Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti6Al4V powder. *Optics & Laser Technology*, 103, 59-76. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.013
29. Lal Lazar, P. J., Subramanian, J., Manickam, M., & Selvaraj, V. K. (2023). Imperfections and computational modeling of lattice structures developed through powder bed fusion – A short review. Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.269
30. Gao, S., Ding, J., Qu, S., Liu, H., & Song, X. (2023). Numerical and experimental investigation of additively manufactured shell-lattice copper heat exchanger. International Communications in Heat and Mass Transfer, 147, 106976. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106976
31. Ferro, C. G., Pietrangelo, F., & Maggiore, P. (2023). Heat exchange performance evaluation inside a lattice panel using CFD analysis for an innovative aerospace anti-icing system. *Aerospace Science and Technology*, *141*, 108565. https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108565
32. Luo, Y., Zheng, K., Zhao, P., & Zhang, Y. (2023). Machining characteristics of 316L stainless steel in hybrid manufacturing via a three-dimensional thermal-mechanical coupled model. Journal of Manufacturing Processes, 102, 275-296. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.06.021
33. Hu, H., Wang, W., Ning, H., & Liu, B. (2024). Numerical simulation and experimental study on the compression performance of a double layer cross-lattice-core sandwich structure. *Structures*, 64, 106531. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106531
34. Çengel, Y.A.. and Ghajar, A.J. (2020) *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications*. New York: McGraw-Hill Education.
35. Negi, P., Cheng, M., Krishnamurthy, M., Ying, W., & Li, S. (2024). Learning domain-independent Green’s function for elliptic partial differential equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 421, 116779. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.116779
36. Krötz, B., Thangavelu, S., & Xu, Y. (2005). The heat kernel transform for the Heisenberg group. *Journal of Functional Analysis*, 225(2), 301-336. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfa.2005.03.019
37. SimufactAdditive, MSC.SoftwareCorporation. retrieved from https://www.mscsoftware.com/product-/simufact, accessed by July 19, 2023.
38. Talatahari, S., Azizi, M., Tolouei, M., Talatahari, B., & Sareh, P. (2021). Crystal Structure Algorithm (CryStAl): A Metaheuristic Optimization Method. *IEEE Access*, 9, 71244-71261. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3079161
39. Sun, J., Yang, Y., & Wang, D. (2013). Parametric optimization of selective laser melting for forming Ti6Al4V samples by Taguchi method. *Optics & Laser Technology*, 49, 118-124. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.12.002