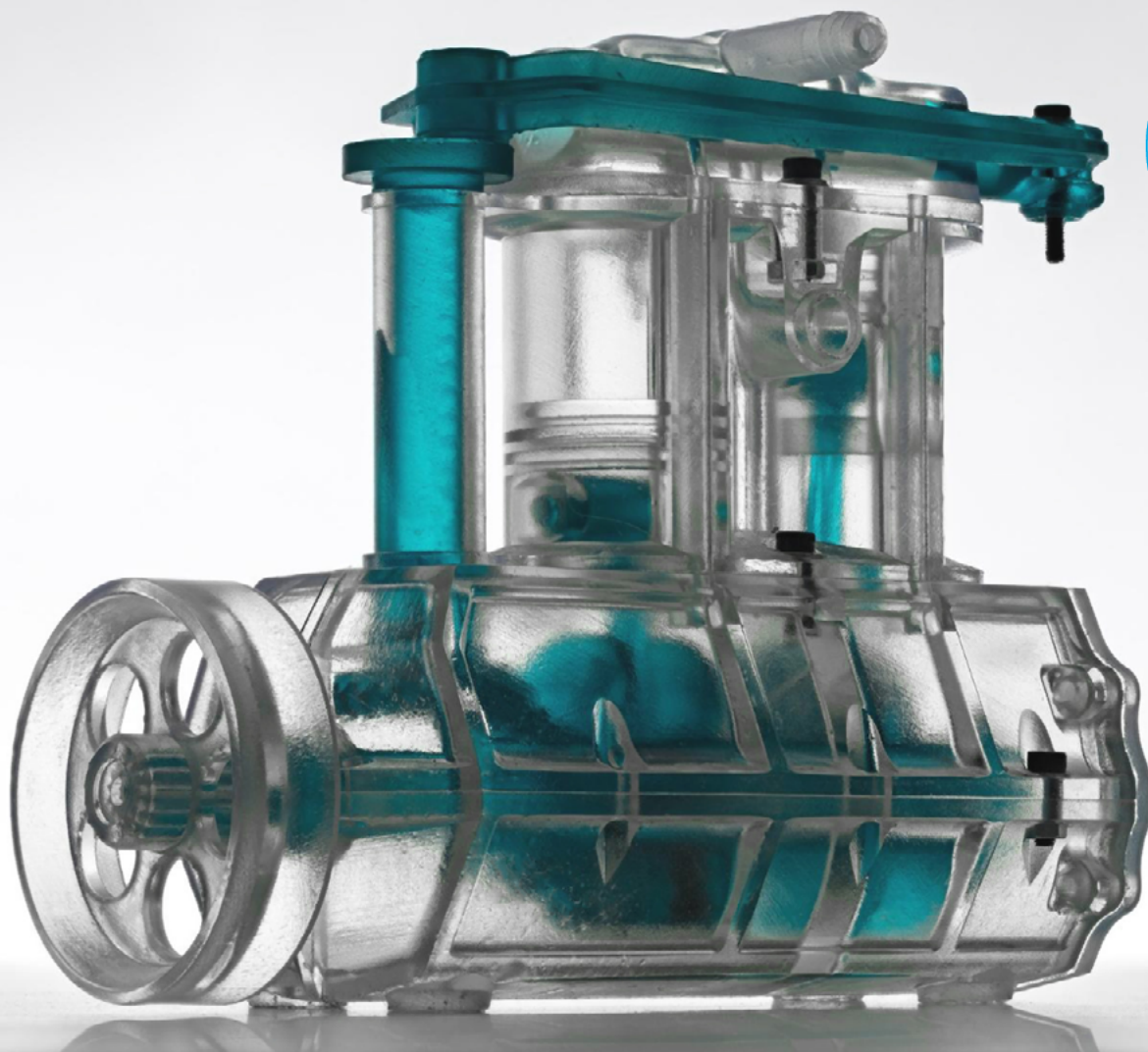




FORMLABS 白皮書：

工程配適度：優化功能性 3D列印組件設計

公差和合適性是工程師用來提升機械組件功能和生產成本的重要概念。Formlabs廣泛研究了原廠材料的準確性，並試著最大限度地提高列印物件和列印機之間的穩定性。本白皮書中的數據和最佳做法可以幫助Form2用戶設計預期工作的功能組件，達成最少的後處理或試用及錯誤。

目錄

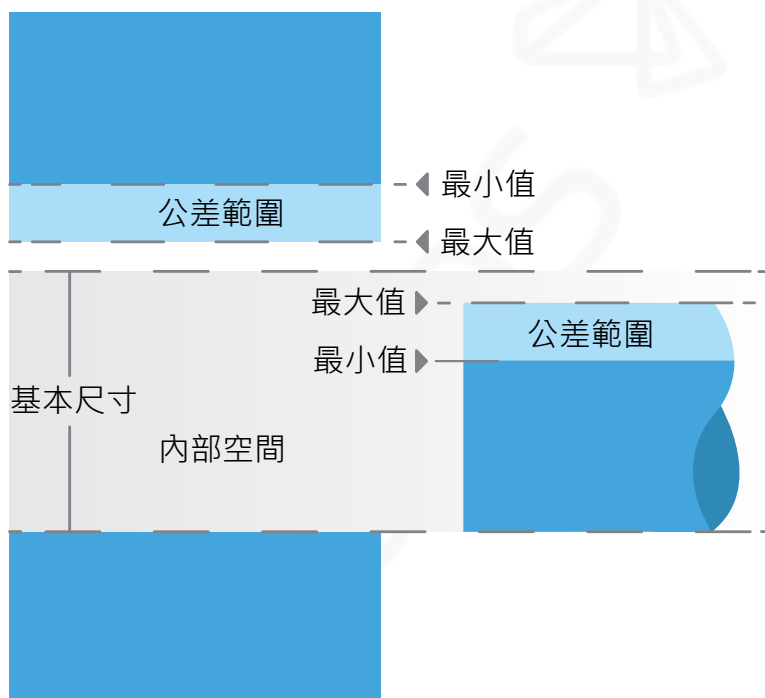
3D列印的公差值	3
適合的選擇.	4
測量及應用公差.	6
摩擦力.	9
潤滑	11
接合物件.	11
加工列印物件	12
結論	13

3D 列印的公差值

在傳統加工中，嚴格的公差與所增加的成本呈指數關係。嚴格的公差比起寬鬆的公差需要額外和時間較長的加工步驟。加工零件依照給定應用允許的最寬公差設計。

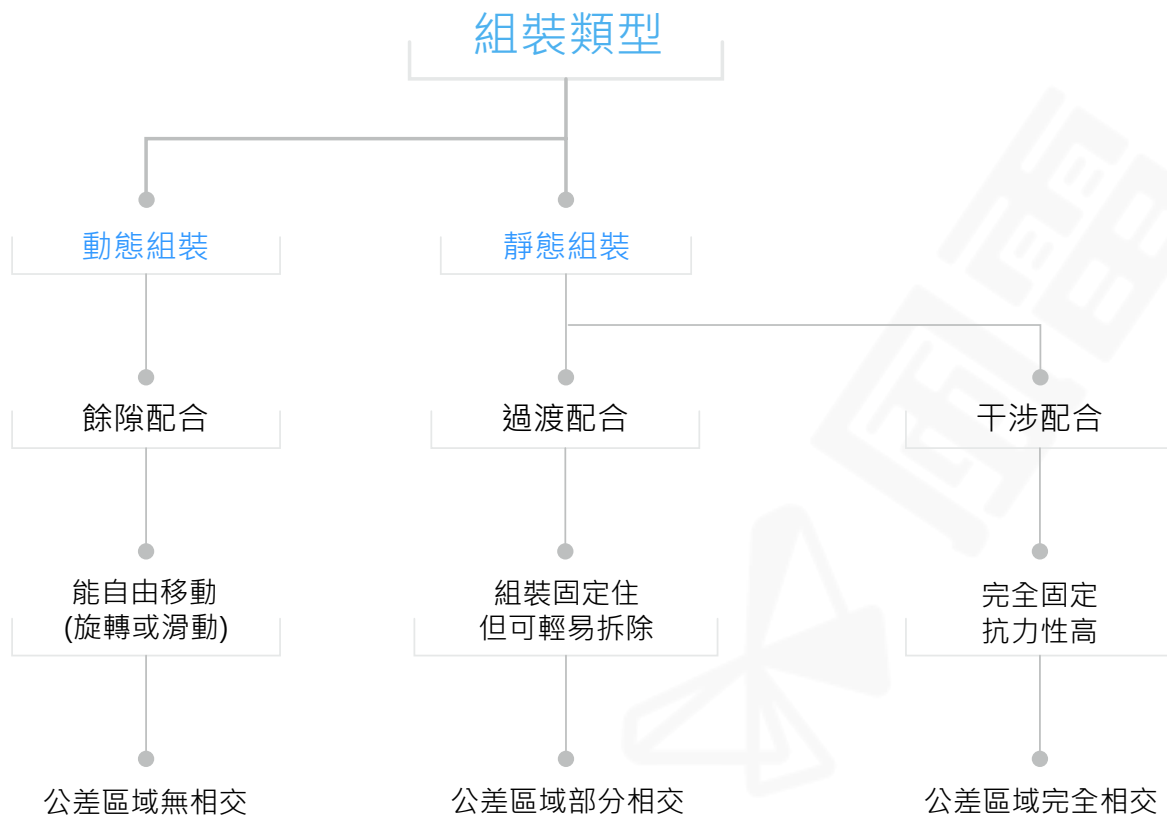
與傳統機械加工不同，隨著時間零件逐漸細化到更嚴格的公差，雷射成型技術（SLA）具有單一自動化生產階段。適當的尺寸公差降低了後處理時間且易於組裝，並降低了傳統繁瑣步驟的材料成本。特定材料不正確的公差也可能導致物件的斷裂，特別是對於脆性材料中的壓配合物件。

列印更大的組零件，或當多個物體組裝時，適當的公差尺寸顯得十分有價值。



列印物件的後處理步驟包括清洗，打磨和潤滑。在設計組合零件時需要較小的公差配合，因此打磨是達到完整表面的理想方法。設計更大的物件，或當產生多個物件時，小範圍的尺寸公差變得十分有價值。

完整表面 組合物件的接觸面達到極為平滑且互相完整擬合的狀態



適合的選擇

組物件的功能性需求將定義零件如何組裝在一起。物件需要自由移動的間隙或表面之間活動的空間。這必須透過確保活動表面的公差區域不重疊來達成。如果物件之間不須要活動空間，則適合以過渡配合設計物件，讓物件易於組裝和拆卸。過渡配合具有部分重疊的公差區。

干涉配合提供剛性，堅固的連接，但在組裝中需要施更多的力。

注意：干涉配合具有完全重疊的公差帶，並且需要使用具有更大伸長率的樹脂，例如類PP，高韌性，彈性或一般樹脂。

製造中的少量公差意味著組合物件之間是一個連續體，而不是三個完全獨立的層次。更大的間隙符合行動自由的精確度。更緊密的過渡配合更堅固，但在連接上造成更多的磨損。需要更多力量加入的餘隙配合將更具挑戰性。

餘隙配合

滑動配合

轉動配合

過渡配合

鍵合

推動配合

干涉配合

力配合

壓配合

公差配合可以分為三類 - 餘隙，過渡和干涉配合 - 每類都由兩種類型的擬合來定義。

餘隙配合

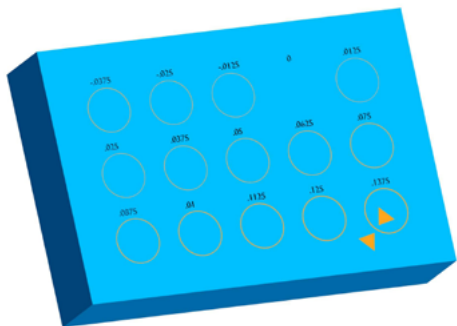
滑動配合在物件接觸面會有一些空間。**轉動配合**幾乎不會有空間。轉動配合會有更大的摩擦力，但會更準確的作動。

過渡配合

通過**鍵合**，組件將準確地插入到另一個物件中或其周圍，只需要輕輕的力道來安裝和拆卸它。**推動配合**將需要更多的力量來插入和移除零件，但仍然可以用手做到。

干涉配合

力配合需要很大的力來安裝，可能需要額外的手動工具，如錘子等，而沒有要拔除的打算。**壓配合**將需要通過諸如心軸壓機的工具施加更多的力來安裝。

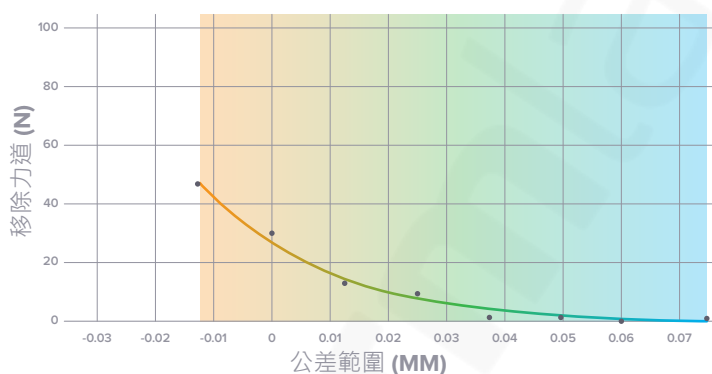


測量及應用公差

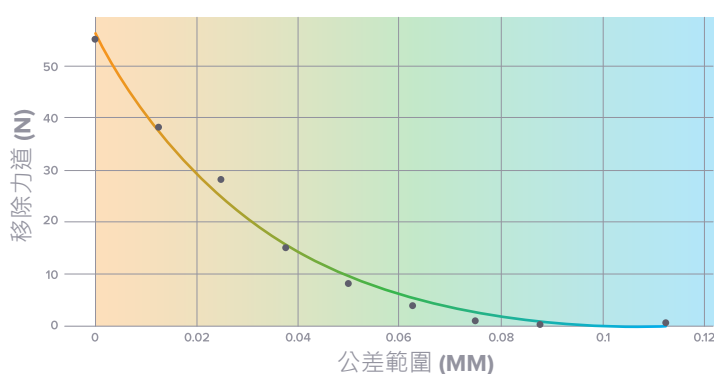
Formlabs測試了各種常見的幾何形狀，以找到和現實生活中每種不同需求契合的材料。這裡測試的兩種SLA材料是高韌性和類PP樹脂，設計用於承受機械和摩擦應力的功能性原型。以下範例說明為什麼將每個材料用於正確的應用是十分有益且重要的。圖表中的公差配合由顏色編碼：藍色是餘隙配合，綠色是過渡配合，橙色是干涉配合。

孔和軸

孔和軸通常需要餘隙配合，範圍可以根據需要的精度從滑動配合到運行配合。運行中的配合將需要足夠的潤滑來自由運動。孔和軸是對於類PP及高韌性樹脂的合適條件十分有用的測試。



高韌性樹脂：0.05 mm 以上的公差會形成孔和軸之間的間隙配合。在0.0mm和0.0375mm之間形成過渡配合 - 能夠以正常的手壓力道將軸插入孔。低於0.0 mm (干涉配合)，軸變得難以插入，並迅速超過力計的55 N極限。該軸能夠在-0.0375mm的公差，以心軸壓力機插入，但是無法被拔除。

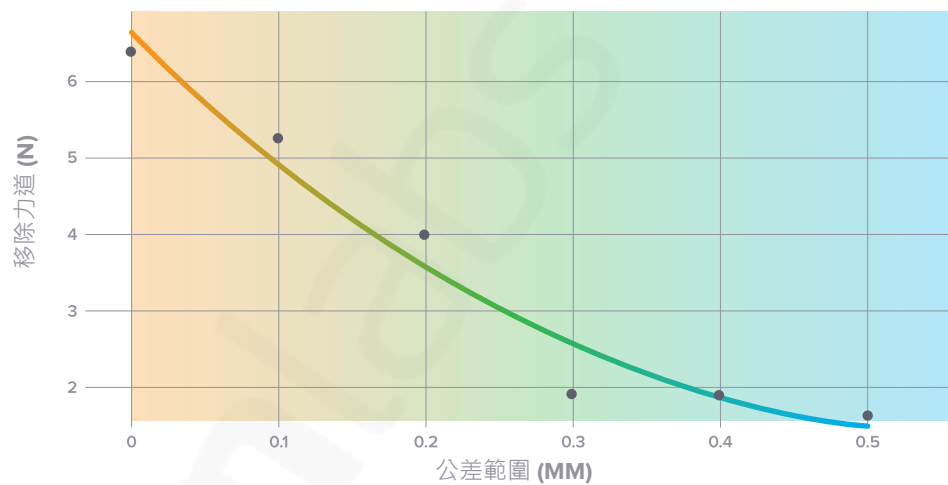


類PP樹脂：在此測試中，類PP物件在0.0625的公差範圍時，會從過渡配合慢慢轉變為餘隙配合。在 0.0125 mm 或以下的公差範圍，會形成干涉配合，且軸變得難以插入。而即使在-0.0375的公差範圍下，軸仍然可以接合，這是因為類PP樹脂的高拉伸強度。



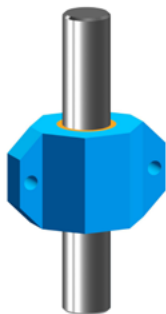
球體和插座

球體和插座間應存在允許球在插座中自由旋轉的間隙。然而，球的半徑和插座開口之間存在很大的干擾。插座開口需要能變形足夠插入，但在正常情況下又必須不會自動滑出。



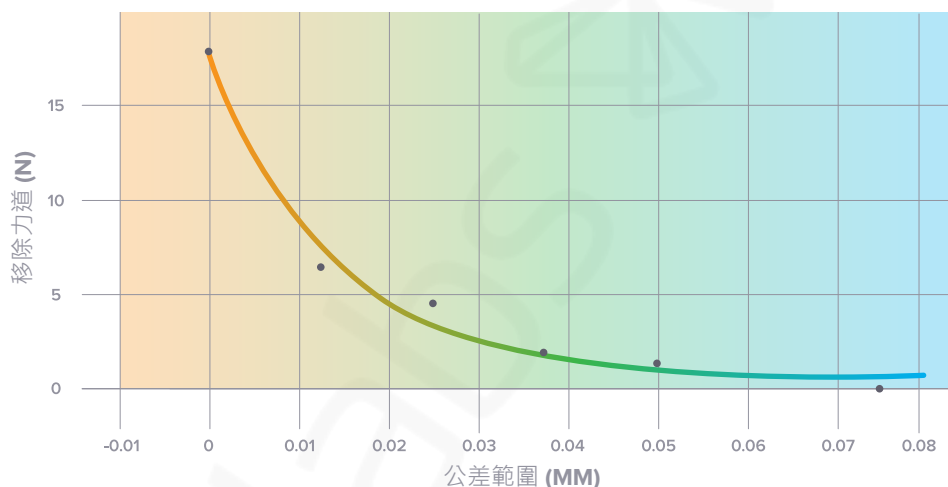
類PP樹脂測試結果：在此測試中，0.2 mm 和 0.3 mm 範圍間存在一個拐點，使得球和插座能輕易組裝及分離。在 0.0 mm 和 0.2 mm 範圍間的干涉配合，球體能夠在插座內平順轉動，同時又固定在插座內，是對於應用球體插座的人體模型十分理想的數值，且能夠良好固定人體模型的手腳擺向。大於 0.3 mm 的範圍間，球體較為鬆動，在插座中可自由移動，小於 0.0 mm 的範圍間，球體無法插入插座內。

高韌性樹脂測試結果：球體插座模型經過高韌性樹脂列印測試，由於其高摩擦力和高強度，無法以手工插入。類PP樹脂由於耐磨性，更適合於球體幾何形狀。



桿和套管

套管是一種滑動軸承，用於沿桿進行平滑且自由的運動。桿和套管之間應有間隙配合。此間隙取決於不同應用，可以更大或更小。



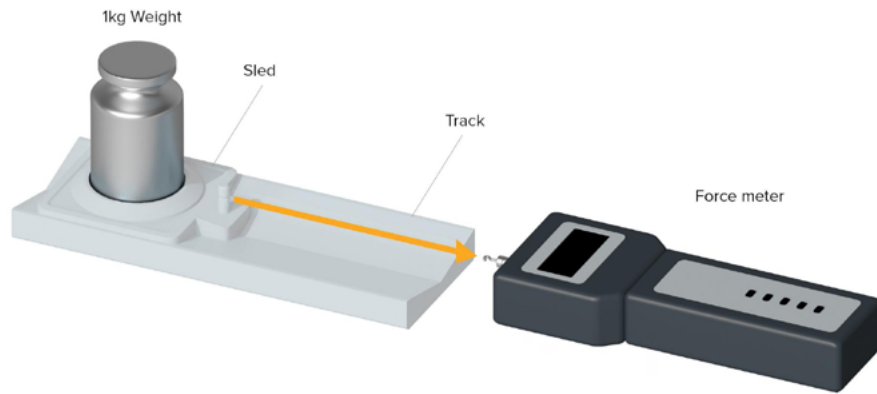
類PP樹脂測試結果：以類PP樹脂列印的襯套在拋光鋼導桿上具有平滑和低摩擦的運動狀況。設計的公差為0.025毫米，套管表現出平穩的運行間隙配合。在0.025mm以上的情況下，套管完全沒有抓住導桿，自由滑動。在0.0mm和0.025mm之間，套管需要輕微的力量將其推到導桿上。在0.0mm以下的間隙下，觀察到干涉配合，需要大量的力將套管滑過導桿，儘管由於材料的順應性而可以插入桿上。但在此應用中，零件無法作為軸承使用。

正確潤滑後，類PP樹脂是快速製作套管、齒輪系統和可移動物件的光滑聚丙烯樣產品的理想選擇。對於需要持續許多運動週期而不磨損的動力組件，最好使用嵌入在高韌性樹脂物件中的現成聚甲醛套管。

注意：高韌性樹脂適合列印不需要經歷長期摩擦的強結構物件。

摩擦力

兩個物件之間的摩擦力是和表面的力（與公差配合直接相關）的乘積和每種材料特有的常數（摩擦係數）。摩擦係數可用於預測零件對運動和磨損有多少阻力，以及您對於Formlabs樹脂相較其他普通樹脂更多更好的性能期望。



Formlabs使用滑塊，滑軌和計量表測試摩擦係數。

以下是以100mm設置列印的物件彼此間未經潤滑的摩擦係數：

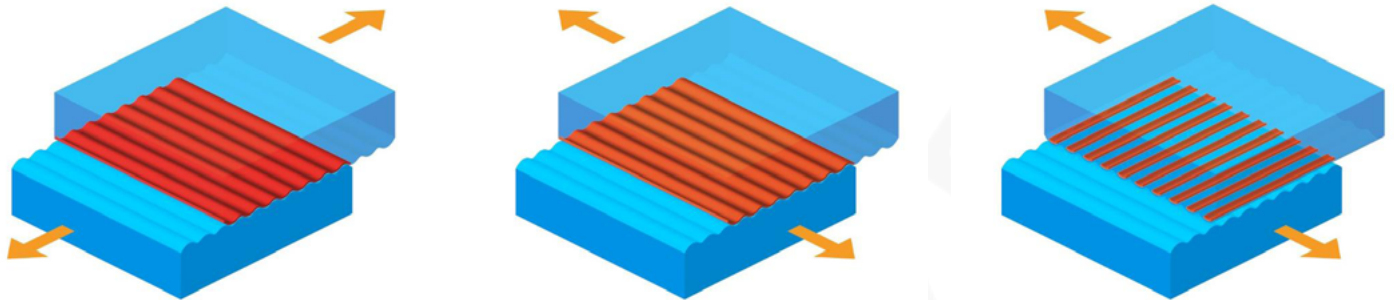
	靜摩擦係數 (μ_s)	動摩擦係數 (μ_k)
類PP 類PP	0.32	0.14
高韌性 高韌性	0.77	0.2
類PP 高韌性	0.57	0.16

測量零件沒有經過任何平滑處理或打磨。類PP樹脂由於其固有的潤滑性而具有最低的Formlabs樹脂滑動摩擦力。相比之下，高韌性樹脂具有更高的滑動摩擦力和更高的靜摩擦力，在測試中引起粘滑性能。類PP樹脂較低的摩擦係數使其最適合用於在動力組件中相互作用的移動物件。

某些滑動物件像是滑軌、活塞和桿，若兩個配合表面的接觸表面積減小，將會具有較低的摩擦。這能夠透過在PreForm中調正定向來改變，因此層“顆粒”圖案在物件之間是垂直的。如果晶粒平行，則層溝槽將嚙合，產生更多的表面積和更高的靜態和動摩擦力。

Formlabs通過在Preform中的設定物件90°定向，測試了具有平行和垂直層積顆粒的類PP物件之間的靜態和動力學摩擦係數。

表面取向摩擦的微觀尺度圖。



大量靜態及動態摩擦

高靜態及中等動態摩擦

最小靜態及動態摩擦

在靜態和動力學測試中，垂直取向具有較低的摩擦係數。靜態摩擦係數通過晶粒取向受到更大的影響：在我們的試驗中，垂直晶粒表面之間的摩擦比平行的顆粒表面低43%。垂直晶粒表面之間的動摩擦力降低了11%。

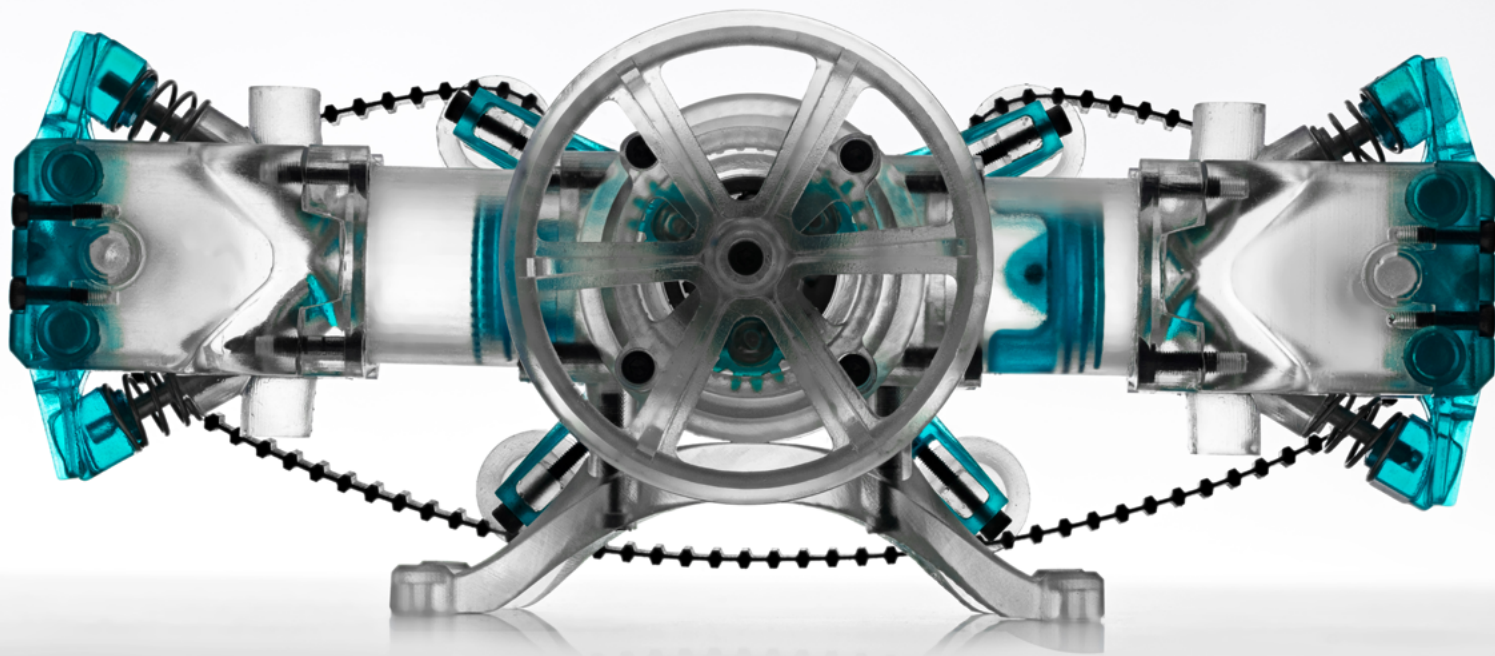
隨著表面經受磨損，物件之間的摩擦隨時間而減少。這通常對動力組件是有利的，砂磨和拋光是磨損的一個例子。然而，過度磨損反而會增加部件之間的間隙。潤滑是減少長期磨損的最佳方法。

注意：類PP樹脂設計為最耐磨的Formlabs材料，適用於齒輪，套管和動力組件。

在某些情況下，如滾輪，輪子和機器人夾具，更多的摩擦是有益的。對於這些應用，彈性樹脂具有較高的摩擦係數和較低的潤滑性。

潤滑

潤滑劑對於保持組件在動力學組件中運行平穩至關重要。礦物油是通常用於SLA印刷品的便宜且常用的潤滑劑。矽油潤滑劑，如超潤滑劑，也是很好的潤滑劑，持續時間更長，且不會變粘。



空氣動力，功能性尺吋的平板雙缸內燃機使用類PP和高韌性的樹脂列印，並用礦物油潤滑。

接合物件

為了用粘合劑粘合列印的物件，需要窄的餘隙配合。由於其低粘度，氰基丙烯酸酯（超級膠）將填充薄的間隙。用紫外線或藍紫色（405nm）雷射筆（和UV安全護目鏡）手工固化的樹脂注射器可用於將物件焊接在對接接頭中。

加工列印物件

列印物件最常用的後處理步驟是打磨，拋光和潤滑。偶爾也可以將物件進行加工，像是列印後，物件細節的公差要修改，或者列印後要改變細節等。若手邊有可用工具，且列印物件要更改設計，例如使用鑽床或帶螺紋的鑽孔機加入孔洞等，會比重新列印更有效率。

高韌性及類PP樹脂由於其高強度和伸長率，可承受最佳的Formlabs材料加工。其他Formlabs樹脂也可以進行加工，但它們需要更保守的技術和更快的處理速度。

哪些加工操作適合SLA樹脂？

耐高溫樹脂	打磨 高速切削 高速，小直徑鏜孔和鉸孔
高韌性、類PP、一般樹脂	打磨 面銑和外銑 鑽孔 鏜 擴孔
彈性樹脂	打磨 鑽孔 裁切



結論

基於材料性能和機械功能指定配合是設計工程產品中必不可少的。所顯示的常規幾何形狀的公差配合範圍可以廣泛地應用於許多設計，以達成減少迭代的功能原型。為了更準確和直觀地了解部件如何組合在一起，請將測試模型列印在更多種類的材料中，並了解它們的性能。

除了挑選適合的材質樹脂外，選擇正確的材料對於創建工作列印物件至關重要。Formlabs每種樹脂的拉伸強度，伸長率和耐磨性差異很大。由於材料的高耐磨性和低摩擦力，一些基本的幾何形狀，如棒和套管，在類PP樹脂中將會有更好的運作結果。在高韌性樹脂中，負載下的結構物件最為成功，其具有與ABS塑料相似的高拉伸強度和撓曲模量。

以上內容出自Formlabs原文 : Engineering Fit Whitepaper