



# 極限負載於含減薄缺陷結構之結構完整性評估

陸彥儒、王振華

國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系

## 前言

壓力容器是工廠中常見的設備，因為本身所含有高潛在危害特性，若因內容物、操作條件或外在因素致使設備強度有所下降，業者亟需確認殘餘強度及剩餘壽命。依據製程安全管理的角度，是避免化學品從設備內部洩漏出來，此一簡單概念便是包含設備在設計階段及缺陷產生後皆有能力可承載，並且安穩運轉。

國內壓力容器設計多以CNS 9788為主，該方法對應於ASME VIII-1是依公式計算元件尺寸(Design by Rules, DBR)，適用於規則形狀元件。而對於特殊結構或特殊運轉模式時，則以CNS 9799或者水壓試驗。CNS 9799在分析過程中主要是以應力分類法進行分析，該方法對於規則有較好的結果，也是早期ASME VIII-2及EN 13445的主要方法。

該方法現今已不足夠因應壓力容器的設計，其原因有三：一、無法涵蓋所有幾何構建的應力分類，二、對於特殊幾何結構的應力辨識不易，三、對於經驗不足或經驗不同的人，會使得結果有所差異。ASME VIII-2於2007年增加極限負載及彈塑性應力分析方法，該方法在保證安全的前提下，以較大程度的發揮材料在塑性的特性。雖CNS 9799包含極限解析及塑性解析等，但內文的指引仍無法完成相關程序。

另外，當設備上有厚度損失缺陷時，在使用上也多僅於level 1或level 2，又或者對於非規則結構，評估殘餘強度及剩餘壽命時，無法以Level 1或Level 2進行等，進入Level 3評估是唯一一路。無論從設計角度或者缺陷評估的角度，極限負載及塑性崩塌負載皆能找到備能夠操作的最高上限值。本研究以一臥式壓力容器，在含有均勻減薄缺陷情況下，執行Level 3求得設備的極限負載，藉此得到設備的修正後的操作上限。

## ASME

ASME早在1983年頒布III，且在內文說明可利用兩倍彈性斜率法(TES)來塑性崩塌負載，之後再以2/3的方式定義能夠操作的最大上限。然而ASME VIII div2是到2007版才將極限分析法和塑性崩塌負載分析納入其中，且該定義與ASME III的有所不同。

### 極限負載分析

ASME VIII直至2007年的版本才將極限負載及彈塑性應力分析概念加入設計準則中，此設計準則跳脫原本容許應力的限制，有效的使用到瀕臨材料塑性區域的性質。

該分析過程是以容許應力的1.5倍做為降伏應力，已持續加載至設備降伏後，以此對應的操作壓力作為該設備的操作上限。且該分析過程中皆是以小變形理論。且分析過程中能夠簡化分析的對象，可針對主要的局部區域進行類似整體的彈塑性分析。

其極限負載程序如下：

- Step 1 建立設備模型。可針對局部區域考慮即可。
- Step 2 建立設備相關負載條件。包含風力、地震力或高溫材料等特性等。
- Step 3 建立彈全塑材料模型。以容許應力的1.5倍作為材料能夠承受的最大上限。
- Step 4 組合負載條件並施於設備上。
- Step 5 執行極限負載，將設備持續加載至爆破的臨界點。

### 彈性力學

以降伏點作為界限，並以圓柱形結構作為對象，推得可能發散的極限負載。以von mises theory為破壞理論，如下：

$$2\sigma_{eq}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2$$

可得到如下方程式，此為圓柱形薄殼結構的極限負載。

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{R} \sigma_y$$

## API 579

### API 579 均勻減薄

在API 579中對於均勻減薄是透過多點量測取得平均值之後，與設計的最小需求厚度(tmin)相比，只要預估未來時間點高於該厚度，便為可接受的厚度損失。

評估又將易用程度及保守性做區分，Level 1是以tmin為通過基準，Level 2是以設計壓力乘上RSFa後，的tmin作為通過基準，因此在Level 2是能夠比tmin還要更低。而Level 3則是須進入有限元素法，透過取得設備的極限負載或塑性崩塌負載，從而得到設備能夠操作的最大負載數值。在安全上的顧慮是除了現在，未來也要是有足夠強度繼續運轉。因此在評估上並非使用當前厚度作為基準，而是以當前厚度扣除未來腐蝕裕度(FCA)，以此作為設備的建模厚度。

### API 579 極限負載分析

極限負載的概念API 579早於ASME VIII div 2，在2000版中便將其引入評估方法當中。對於含體積型缺陷的設備，是以受損與未受損的極限負載的比值定義為殘餘強度係數(RSF)，並將0.9設為容許界限，即RSFa。而對均勻減薄缺陷，簡化處理方法，以平均厚度的量測看是否低於最小所需厚度作為界線。

API 579改版至今，內文有關該負載的方法以去除，並建議請參考ASME VIII div2的部分。換句話說，API 579內文所需的負載分析方法並非如ASME III所建議的兩倍彈性斜率法，而為加載後能收斂的最後一負載。

## 實驗方法及規劃

以一臥室壓力容器作為分析對象，該設備是依循ASME VIII-1 DBR所設計而成的臥式壓力容器。該設備將以ASME VIII-2 DBA極限負載方法，計算設備的最大能夠運轉的壓力，即爆破壓力(burst pressure, BP)。在ASME VIII-2中並未設定在此壓力多少以下為可操作的上限。該界限可參考2000版的API 579，以2/3的極限負載或塑性崩塌負載作為設備可操作的上限。負載的疊加是先以彈塑性力學推得圓柱形設備的極限負載，在以此反推需疊加的負載間距。遠離推估的負載時，負載跨距能夠稍大，在靠近推估負載時，負載跨距便要縮小，以求得能使設備收斂的最大負載。

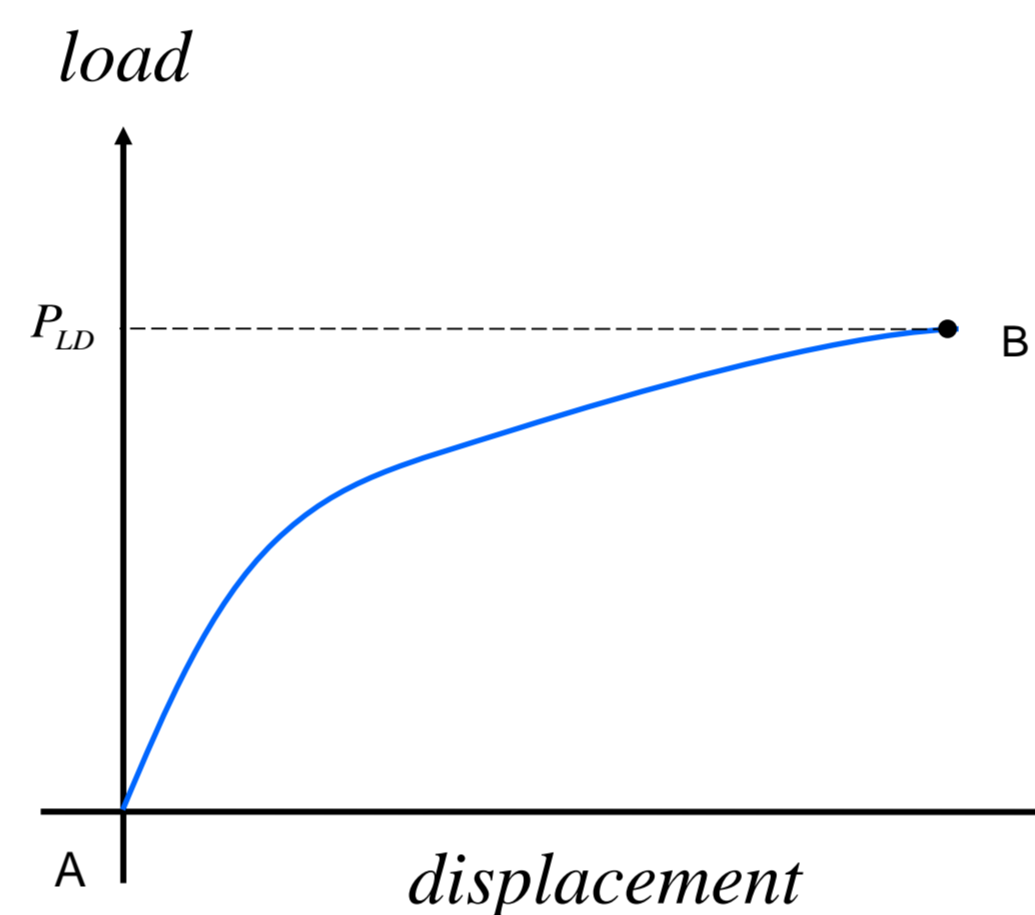


圖1 負載位移曲線

### 實驗參數

表1 設備基本資料

項目	單位	數字
胴體		
tmin	mm	7.62
DP	kg/cm2	17.00
R	mm	500.00
S	kg/cm2	1406.21
σy	kg/cm2	2471.51
E		0.80
正橢圓端版		
R	mm	500.00
長寬比		2.00

表2 FFS 參數表

項目	單位	數字
胴體		
Cr	mm/yr	0.127
age	yr	10
FCA	mm	1.27
trd avg		
trd avg	mm	10.27
tam-FCA		
tam-FCA	mm	9

## 結果與討論

從負載位移曲線的最大破壞負載為53kg/cm2，由彈性力學預估設備破壞的負載與推估數值相差不遠。可知可由理論力學預先推估發散位置，進而得預先安排負載步階的設定，使在靠近轉折處會有相當好的數值。考慮自重後可承受的最大負載與未考慮的相同，亦即自重的影響程度可以忽略。但對於高塔性質，具有高壓縮應力的設備，則必須要考慮。

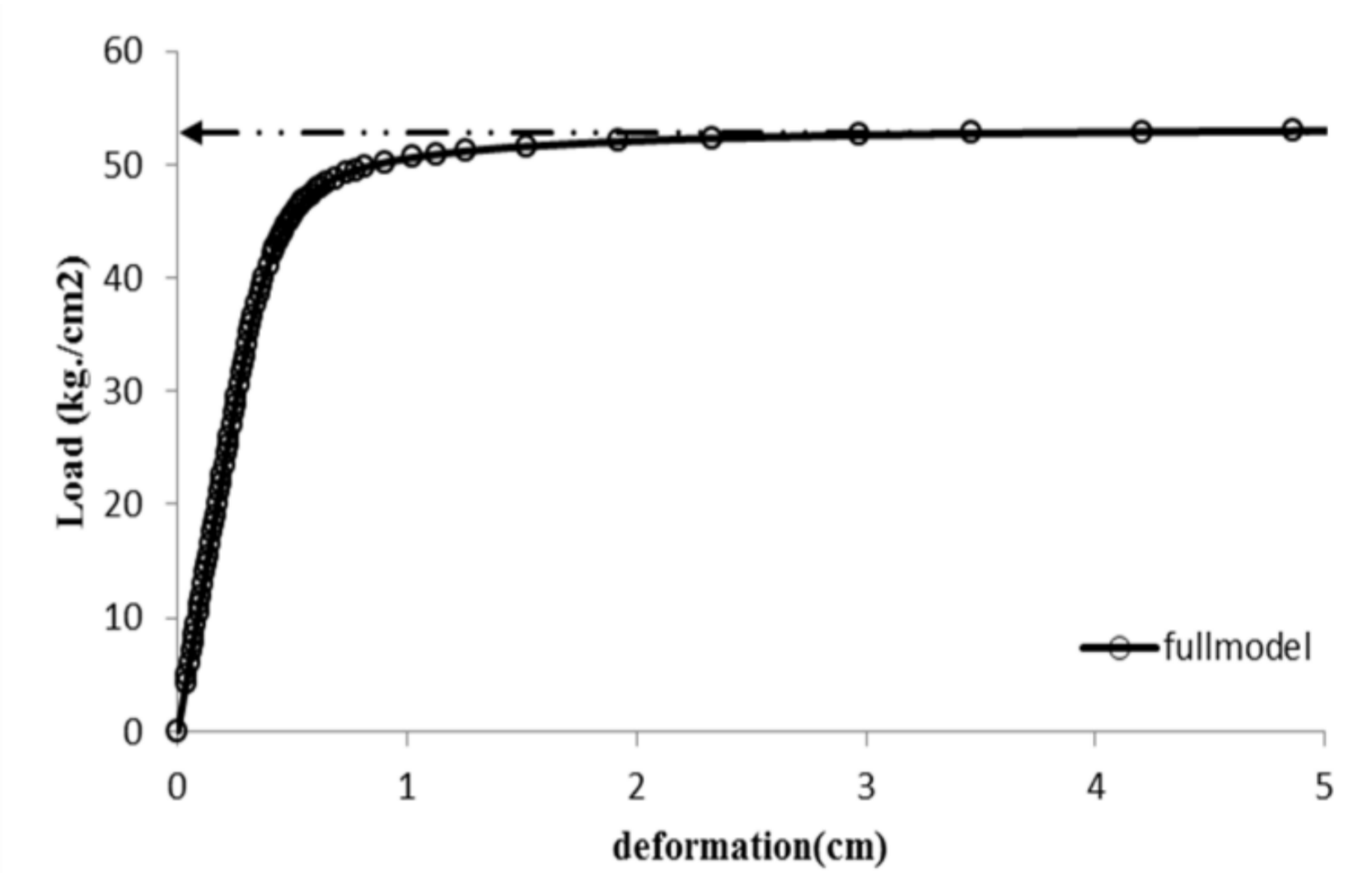


圖4 承受內壓的負載位移曲線

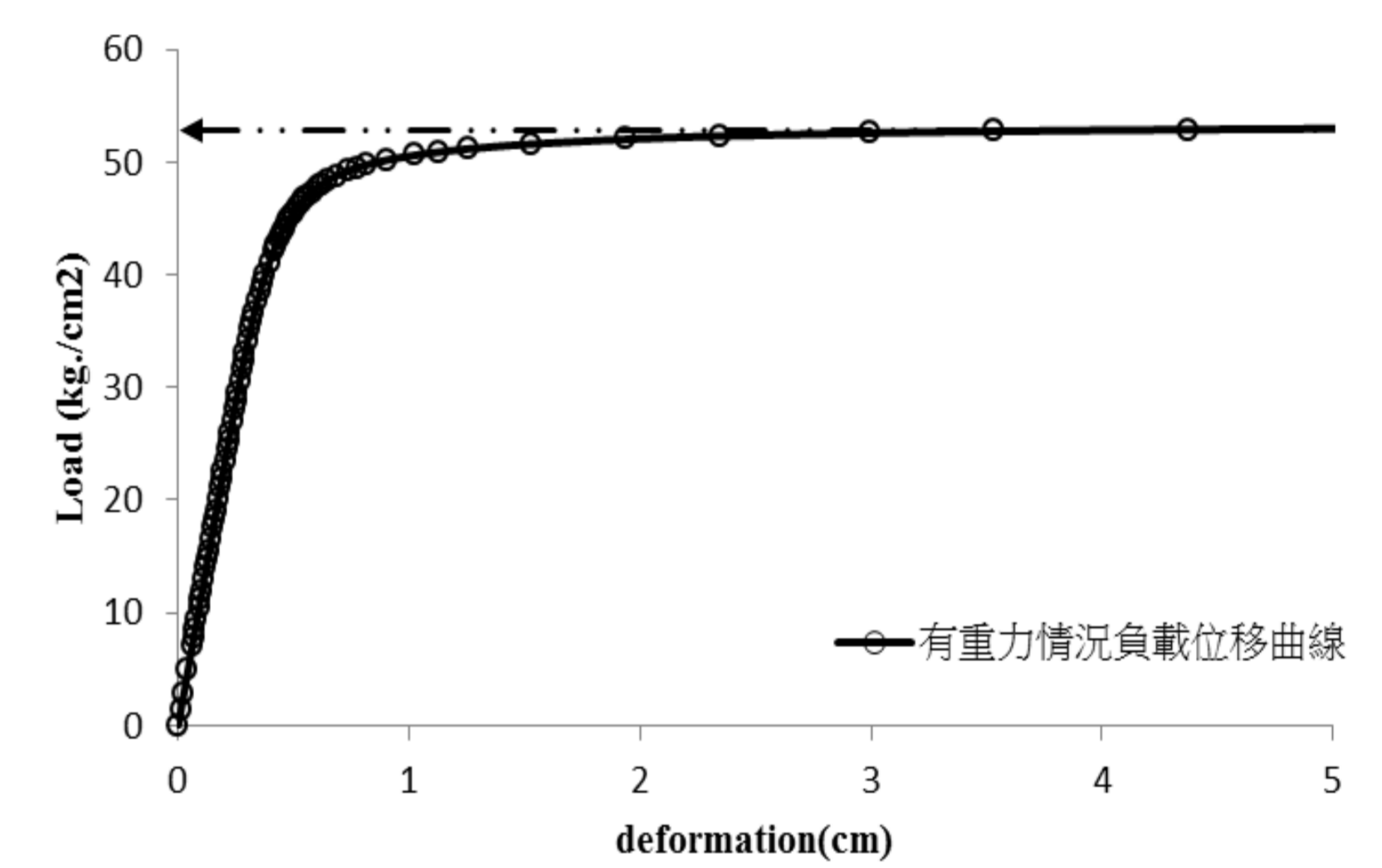


圖5 承受內壓及自重的負載位移曲線

預估設備可能發生爆破的負載，有助於減少設備破壞的機率。其中對於預估負載並非為當下所能承受的最大負載，而是在未來時間點能承受的最大負載。將設備持續加載至發散，並依據圓柱體作為可能發散的對象，以此使用彈性力學預估發散負載。從此結果可看到設備胴體是影響整體結構是否發散的位置。因此量測胴體區域的厚度是相當重要，若僅用單點或少數量來代表，則會得到保守結果。在FFS中提及，對於某一元件區域(胴體、端版)至少量測15點才能夠具有代表。

## 結論

該分析是以極限負載為分析對象，在保證安全的前提下，較大程度的發揮材料在瀕臨塑性的特性。

該方法除了用於壓力容器設計外，也可用於當設備存有均勻減薄時，且無法以Level 1&2判斷時，則可以沿用該方法，求得設備的最大負載。

預估設備可能發生爆破的負載，有助於減少設備破壞的機率。

從此結果可看到設備胴體是影響整體結構是否發散的位置。因此量測胴體區域的厚度是相當重要，若僅用單點或少數量來代表，則會得到保守結果。在FFS中提及，對於某一元件區域(胴體、端版)至少量測15點才能夠具有代表。

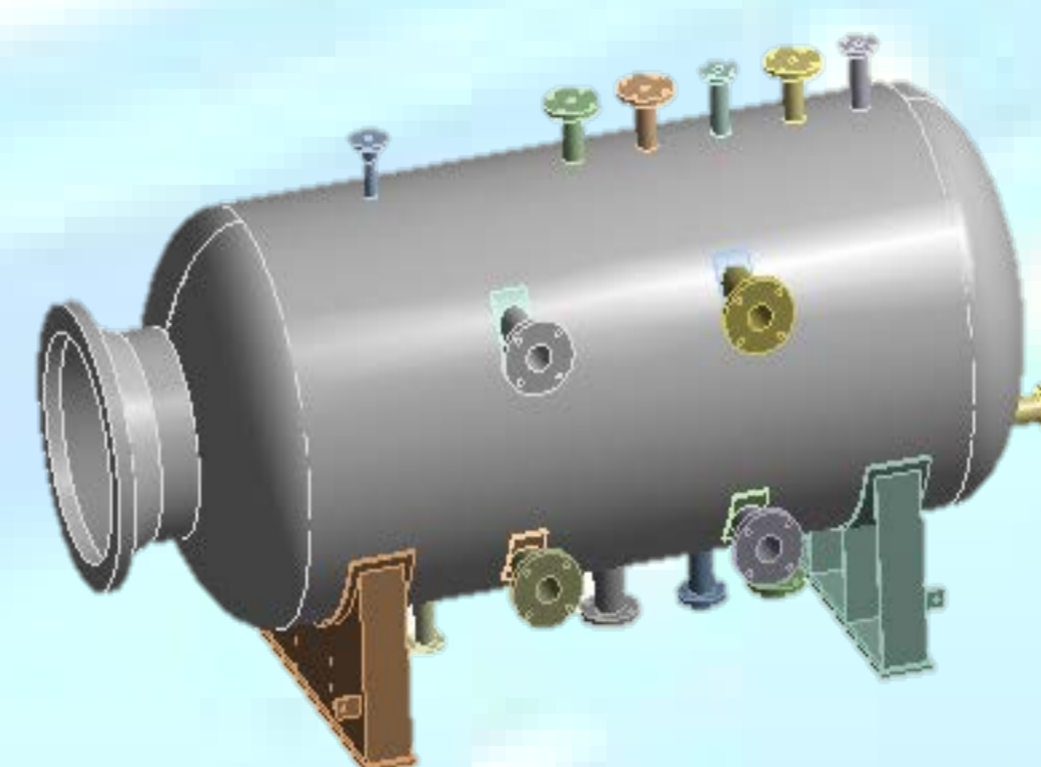


圖2 設備幾何模型

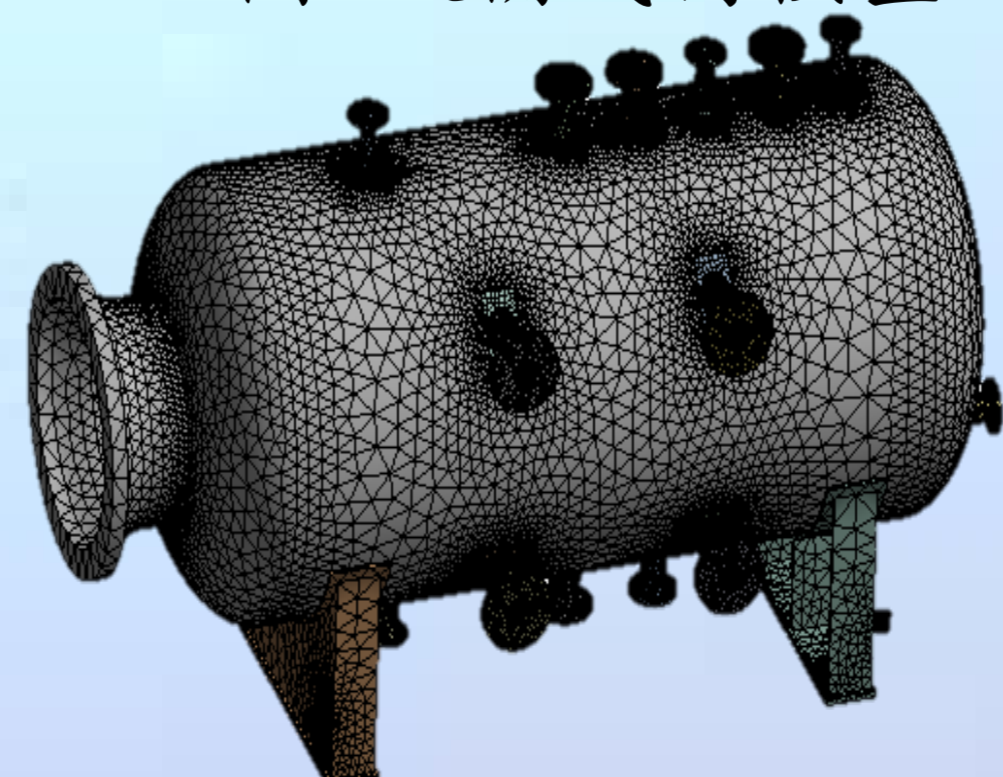


圖3 設備元素模型