

# 以自緊應力演算法推估 Rheinmetall Rh-120 光膛砲管性能之研究

徐祥禎<sup>1</sup> 陳建霖<sup>2</sup> 黃桂美<sup>3</sup> 顏靖斌<sup>1,4\*</sup>

<sup>1</sup>義守大學工業管理學系

<sup>2</sup>義守大學機械與自動化工程學系

<sup>3</sup>國防部軍備局生產製造中心第202廠

<sup>4</sup>國家中山科學研究院

## 摘 要

Rheinmetall Rh-120 光膛砲是德國萊茵金屬研製的坦克砲，為全世界標準坦克砲。因應未來國防武器自製政策，本研究乃以該砲管自緊應力分析為研究主題，探討自緊對砲管射擊應力之影響，研究方法採用 Le Duc 方法及萊茵金屬公司自緊應力演算法進行推估與分析。最後獲得自緊對射擊應力與自緊百分比對射擊應力之影響結果，經由推估分析結果得到以下結論：(1) 自緊預置應力抵消射擊應力使砲管皆處於安全範圍。(2) 較合宜之自緊百分比為 60-70%。

**關鍵詞：**Rh-120光膛砲，自緊應力分析，Le Duc方法，自緊應力演算法

## Research on the Estimate of the Rheinmetall Rh-120 Barrel Performance by Autofrettage Stress Algorithm

Hsiang-Chen Hsu<sup>1</sup>, Jiann-Lin Chen<sup>2</sup>, Kuei-Mei Hung<sup>3</sup> and Ching-Pin Yen<sup>1,4\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Management, I-SHOU University

<sup>2</sup>Department of Mechanical and Automation Engineering, I-SHOU University

<sup>3</sup>The 202nd Arsenal, Materiel Production Center, AB, MND

<sup>4</sup>National Chung-Shan Institute of Science & Technology Managers

## ABSTRACT

The Rheinmetall Rh-120 is a smoothbore tank gun developed by Rheinmetall and is recognized as the global standard. This study focuses on analyzing the autofrettage stress in the Rheinmetall Rh-120 and investigates the impact of the autofrettage stress on the barrel firing stress in response to the future national defense weapons domestic production policy. For the estimation and analysis, the Le Duc method and Rheinmetall's autofrettage stress algorithm were used. Finally, this study revealed the result of the autofrettage stress and the effect of the percentage of the autofrettage stress to firing stress. The results led to the following conclusions: (1) The autofrettage stress counteracts the creep stress, ensuring that the gun barrels remain within a safe range. (2) The appropriate percentage range for the thickness of the autofrettage is between 60 and 70%.

**Keywords:** Rheinmetall Rh-120, autofrettage stress analysis, Le Duc method, autofrettage stress algorithm

## 一、前言

戰車砲(Tank Gun)是指安裝在戰車上的火砲，是戰車的主要火力來源，戰車砲追求高初速以及彈道平直來迅速打擊目標，戰車砲主要使用穿甲彈、高爆彈攻擊對方的戰車、裝甲車輛和為步兵提供火力支援。戰車砲主要分為光膛式和線膛式兩類，在戰車上多裝在可以 360 度迴旋的裝甲砲塔內以獲得最大的攻擊效能，並配備裝甲防護與觀瞄射控設備、自動裝填彈機和砲塔迴轉機構組成戰車的武器系統[1]。

Rh-120 光膛砲(Rheinmetall Rh-120)是德國萊茵金屬公司(Rheinmetall)為配合豹 2 坦克而研製的戰車砲，現今此砲已成為全世界標準專用之戰車砲。此砲口徑為 120mm，可分成早期 44 倍徑的 L/44 型與後期型 55 倍徑的 L/55。Rh-120 光膛砲的砲管採用電渣重熔製造技術，砲管內壁鍍鉻，早期型的 L/44 在使用壽限內可發射 650 發砲彈[2]。

火砲射擊時會產生極高膛壓，單純改進砲管材質加厚砲管已經沒用，因為高壓下金屬內膛會形變破裂，而外層的砲管材質尚未受到膛壓作用，故發射幾次之後，砲管外觀尚好，但內膛已經破裂，再發射難免膛炸，如能在火砲加工製造階段，引入自緊工法，藉此程序使管壁產生預置應力及改變其結構，均可有效提升火砲抗壓強度[3]。

砲管自緊加工是經過一定的工藝手段在砲管內膛加工施以高壓，使砲管壁發生一定程度的塑性變形，當此高壓解除後，在靠近內膛的管壁中形成壓縮殘餘應力，藉此部分的抵銷砲管發射時膛壓造成的工作應力，並延遲內膛表面疲勞裂紋的擴展，從而提高砲管管身彈性強度和疲勞壽命，該技術首先是法國火砲設計師馬拉瓦爾(Malavai)於 1906 年提出的，但因當時缺乏理論依據，直到 1913 年才在砲管上第一次實際套用。

自緊理論是由英國麥克雷(Macrae)[4]於 1931 年發表了“金屬過度應變”論文後，該技術的基本理論便日趨成熟。到了第二次世界大戰時，各參戰國紛紛套用自緊技術提高火砲砲管的彈性強度，同時激發了英美等國自緊理論的研究熱情。

我國目前向國外採購武器除售價昂貴、後續保修問題更形複雜，故國防政策逐漸朝向武器自製發展[5]，而國內現階段自製火砲仍缺乏完整理論基礎及實務經驗，故本文以此為出發點，期望能藉由火砲實體進行自緊性能數據

之模擬分析，以探究及獲得此領域之開發經驗，作為未來研發工作之基礎。

## 二、模型建立

### 2.1 砲管最小設計膛壓(Minimum Gun Design Pressure)

依照北約組織(North Atlantic Treaty Organization)軍規標準 NATO 4385 規範[6]，120mm 光膛砲最小設計膛壓如圖 1，該圖顯示各段光膛砲砲管距離之可承受膛壓安全值，必須大於最小設計膛壓，其值亦為砲管安全最大膛壓(Safe Maximum Pressure, SMP)；各段砲管距離之膛壓值，需小於安全最大膛壓 SMP，整理如表 1。

表 1. 砲管安全最大膛壓對照表[6]

| L (砲管長度)<br>(mm) | SMP (砲管安全最大膛壓)<br>(MPa) |
|------------------|-------------------------|
| 0                | 726.30                  |
| 1905.70          | 726.30                  |
| 1945.70          | 695.50                  |
| 1950.00          | 466.80                  |
| 2414.00          | 466.80                  |
| 2414.00          | 380.60                  |
| 2760.00          | 362.00                  |
| 2760.00          | 305.00                  |
| 3560.00          | 305.00                  |
| 3560.00          | 280.00                  |
| 5300.00          | 210.00                  |

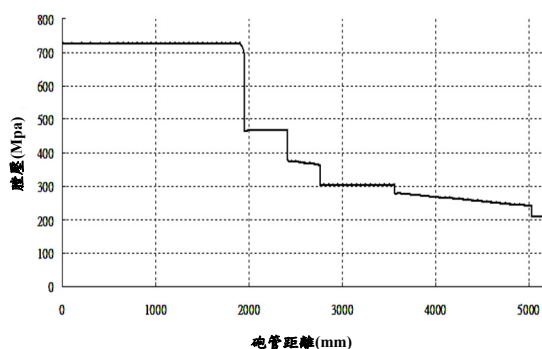


圖 1. 砲管最小設計膛壓[6]

### 2.2 砲管壁厚比理論公式

對一特定之砲膛口徑，壁厚比決定砲管所需之外徑，依據圓管應力分析[7]，如  $P$  為設計壓力、 $\sigma_r$  為徑向應力、 $\sigma_t$  為切線應力、 $\sigma_z$  為軸

向應力、 $\sigma_y$  為砲管材料彈性降伏強度、 $W$  為壁厚比，當砲管在一定的材料降伏強度  $\sigma_y$  下，承受應力係在內壁時最大，關係如下所述：

$$W = \frac{R_o}{R_i} \quad (\text{砲管外徑/砲管內徑}) \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{P(W^2+1)}{W^2-1} \quad (2)$$

$$\sigma_r = -P \quad (3)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (4)$$

另透過等效應力 Von Mises 屈服準則分析 [8]，可得下列公式：

$$2\sigma_y^2 = (\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 \quad (5)$$

經整理可得：

$$\frac{\sigma_y}{P} = \frac{\sqrt{3W^4+1}}{W^2-1} \quad (6)$$

從而可解得壁厚比為：

$$W = \sqrt{\frac{1+2\frac{P}{\sigma_y}\sqrt{1-\frac{3}{4}(\frac{P}{\sigma_y})^2}}{1-3(\frac{P}{\sigma_y})^2}} \quad (7)$$

以上推導係砲管未經自緊前，在一定砲管材料及膛壓下，砲管可承受最大應力之壁厚比分析。

### 2.3 建立模型

本研究以 Rh-120(L/44)光膛砲為分析主體，假設砲管材料降伏強度為 160 kpsi 時，以砲管安全最大膛壓（如表 1）結合光膛砲藥室及砲管內徑尺寸參數[6]，導入方程式(2.7)，因方程式(2.7)根號內須為正值，故  $P < 637.87\text{Mpa}$  為方程式(2.7)之限制條件，而 0~1945.7mm 之安全最大膛壓均大於 637.87Mpa，所以無法用壁厚比來解決安全膛壓問題，先以假設  $W=2$  後，再以自緊方式處理，始可符合承受安全最大膛壓規範。最後，將砲管位置  $L$ 、壁厚比  $W$ 、外徑  $R_o(\text{mm})$ 、內徑  $R_i(\text{mm})$  等數值節錄彙整成表 2，即可繪出本文之研究模型如圖 2。

表 2. Rh-120(L/44)砲管各對應位置尺寸

| 砲管位置<br>L(mm) | 安全膛壓<br>P(Mpa) | 內徑<br>R <sub>i</sub> (mm) | 壁厚比<br>W | 外徑<br>R <sub>o</sub> (mm) |
|---------------|----------------|---------------------------|----------|---------------------------|
| 0.00          | 726.30         | 157.65                    | *2.0000  | 315.30                    |
| 1905.70       | 726.30         | 120.00                    | *2.0000  | 240.00                    |
| 1945.70       | 695.70         | 120.00                    | *2.0000  | 240.00                    |
| 1950.00       | 466.80         | 120.00                    | 1.9652   | 235.82                    |
| 2414.00       | 466.80         | 120.00                    | 1.9652   | 235.82                    |
| 2414.00       | 380.60         | 120.00                    | 1.6061   | 192.74                    |
| 2760.00       | 362.00         | 120.00                    | 1.5514   | 186.16                    |
| 2760.00       | 305.00         | 120.00                    | 1.4122   | 169.46                    |
| 3560.00       | 305.00         | 120.00                    | 1.4122   | 169.46                    |
| 3560.00       | 280.00         | 120.00                    | 1.3614   | 163.37                    |
| 5300.00       | 210.00         | 120.00                    | 1.2423   | 149.08                    |

\* 因  $P > 637.87\text{Mpa}$  時  $W$  無解，故假設  $W=2$

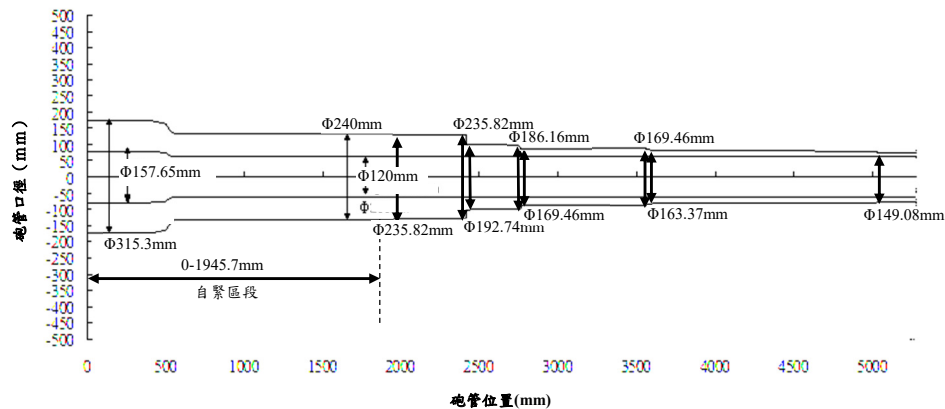


圖 2. Rh-120(L/44)光膛砲研究模型

### 三、Le Duc 分析法

砲彈於射擊時，因發射藥燃燒產生之推進力使砲管內產生膛壓並加速彈體前進，美軍常用 Le Duc 方法計算內彈道壓力及膛內彈體速度，其簡化了複雜的發射藥燃燒計算過程，且產生之結果與實際差異在可接受範圍[9]，Le Duc 方程式摘述如下：（參數示意圖如圖 3）

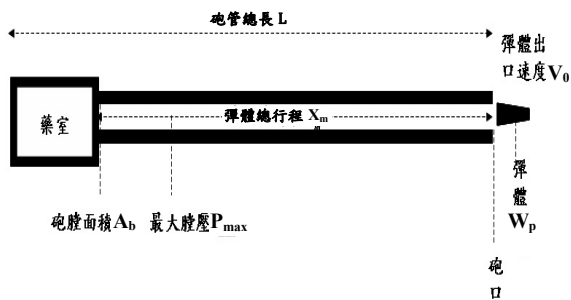


圖 3. 計算參數示意圖

如已知彈體於砲口之初速為  $V_0$ 、砲管內最高膛壓  $P_{max}$ 、彈體在膛內總行程  $X_m$

$$\text{彈體速度-位置 } V = \frac{ax}{b+x} \quad (8)$$

$$\text{膛壓-位置 } P = \frac{W_p a^2 b x}{A_b g (b+x)^2} \quad (9)$$

$$\text{最高膛壓 } P_{max} = \frac{4W_p a^2}{27A_b g b} \quad (10)$$

令  $K = \frac{4W_p}{27A_b g}$ ，則由公式(8)、公式(10)可得

$$b = \frac{a X_m}{V_0} - X_m \quad (11)$$

$$a = \frac{X_m P_{max} \pm \sqrt{(X_m P_{max})^2 - 4K V_0^2 X_m P_{max}}}{2K V_0} \quad (12)$$

由蒐整 Rh-120(L/44)光膛砲參數(如表 3)及 M829A3 APFSDS-T 尾翼穩定脫殼穿甲曳光彈體參數(如表 4)，代入公式(11)、公式(12)解出， $a=11843$ 、 $b=30984$  與  $a=1790$ 、 $b=708$  兩組數值，將兩組數值各代入公式(9)檢驗後發現， $a=11843$ 、 $b=30984$  之最高膛壓位於 16,089mm，已超出砲管總長度，實屬不合理，故將正確  $a$ 、 $b$  數值代入公式(8)、(9)，則可繪出膛內速度&彈程曲線 ( $v$ - $x$  curve 如圖 4) 及膛壓&彈程曲線 ( $p$ - $x$  curve 如圖 5)，因 Le Duc

分析法以彈體起始處計算，故膛內彈道曲線藥室壓力及自緊部分，另於 4.3 節探討。

表 3. Rh-120 (L/44)光膛砲參數[6]

| 砲膛口徑<br>D                               | 砲管總長<br>L              | 彈體膛內總行程<br>$X_m$                                  |
|-----------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|
| 120 mm                                  | 120 mm ×44<br>=5280 mm | 4683 mm                                           |
| 砲膛面積 $A_b$                              | 最高膛壓 $P_{max}$         | 1MPa                                              |
| $\pi D^2/4$<br>=1.130976 m <sup>2</sup> | 593MPa                 | 10 <sup>6</sup> Pa<br>(1 Pa= 1 N/m <sup>2</sup> ) |

表 4. M829A3 APFSDS-T 尾翼穩定脫殼穿甲曳光彈體參數[10]

| 彈體出口速度 $V_0$ | 彈體重量 $W_p$        |
|--------------|-------------------|
| 1555 m/s     | 22.28Kg (彈芯 10kg) |

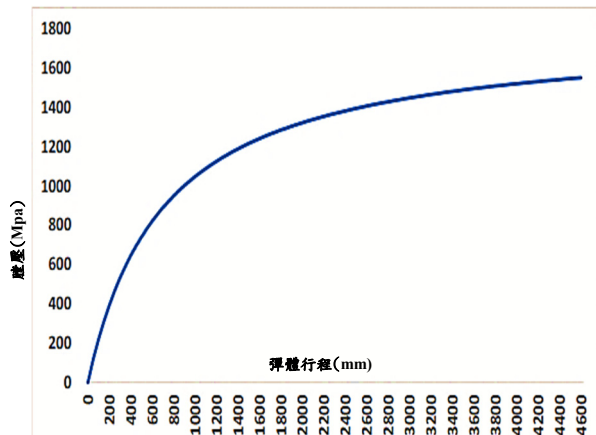


圖 4. 膛內速度&彈程曲線( $v$ - $x$  curve)

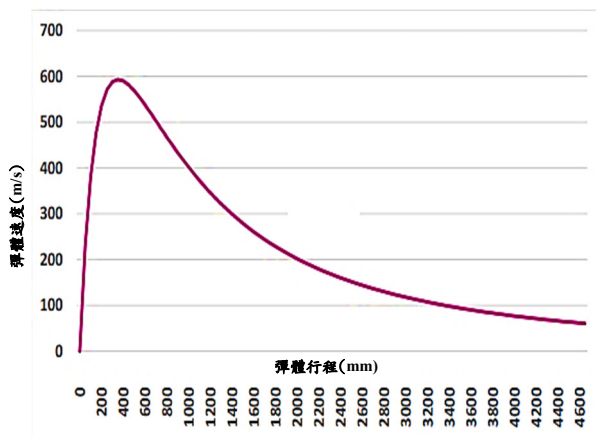


圖 5. 膛壓&彈程曲線( $p$ - $x$  curve)

最後與砲管最小設計膛壓(如圖 1)及 Rh-120(L/44)光膛砲研究模型(如圖 2)整合，可獲得 Rh-120 光膛砲自緊區段分布圖(如圖 6)。



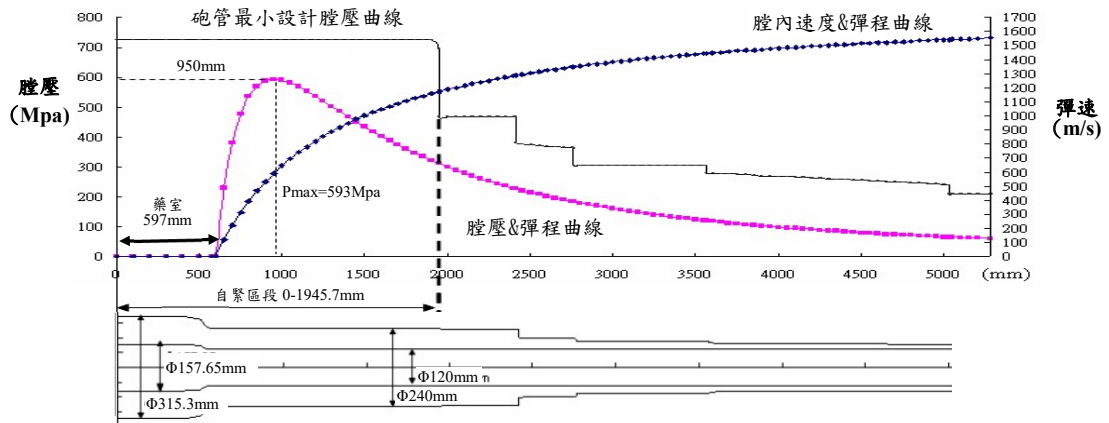


圖 6. Rh-120(L/44)光膛砲自緊區段分布圖

#### 四、自緊應力分析

依第 2.3 章節說明，Rh-120(L/44)砲管在降伏強度為 160 kpsi 時，於 0~1945.7mm 無法用增加管壁厚度來承受安全最大膛壓以維持安全規範，故自緊區間即為 0~1945.7mm（如圖 6 之自緊區段），自緊應力分析則以射擊最大膛壓位置 950 mm 處之截面（如圖 7），在

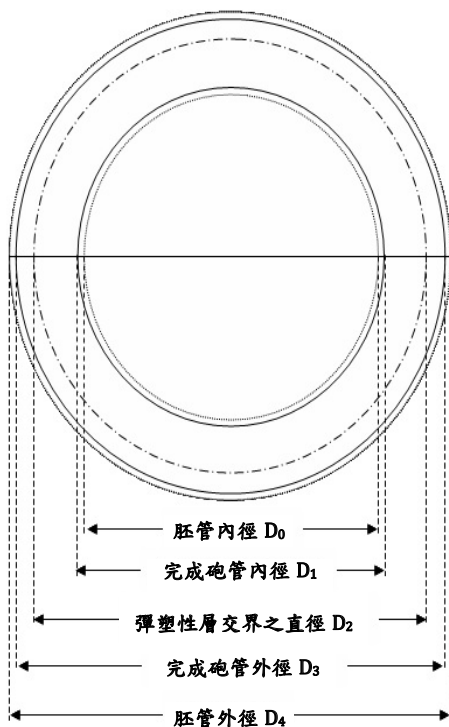


圖 7. Rh-120(L/44)砲管截面位置示意圖(自砲尾算起 950 mm 處)

符合能承受安全最大膛壓(726.3Mpa)下，來探討自緊對降低射擊合成應力為何。

本文自緊應力運算係參考夏永寧[11]自緊實例計算模擬，以萊茵金屬公司使用自緊計算公式，再運用本研究分析數據資料推估，進行最大膛壓位置上，砲管截面壁厚區間位置  $D_0$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ （如圖 7）之應力，計算自緊後砲管（以下簡稱自緊砲管）的預置應力，及自緊砲管加工至需求尺寸之砲管（以下簡稱完成砲管）之預置應力、射擊應力與未自緊砲管射擊應力之差異關係。

##### 4.1 自緊加壓、卸壓、預置應力計算

所謂自緊百分比  $C$ ，是指砲管壁厚經自緊後，其塑性層之厚度與原來之壁厚百分比值，即公式(13)。

$$C = \left( \frac{D_2 - D_0}{D_4 - D_0} \right) \times 100\% \quad (13)$$

假設自緊百分比  $C=50\%$ ，相關自緊參數如表 5 所示。

表 5. Rh-120(L/44)光膛砲自緊參數

|                     |          |
|---------------------|----------|
| 自緊百分比 $C$           | 50%      |
| 壁厚比 $W$             | 2        |
| 砲管材料降服強度 $\sigma_y$ | 160 kpsi |
|                     | 1103 MPa |
| 胚管內徑 $D_0$          | 110 mm   |
| 完成砲管內徑 $D_1$        | 120 mm   |
| 彈塑性層交界之直徑 $D_2$     | 190 mm   |

|              |             |
|--------------|-------------|
| 完成砲管外徑 $D_3$ | 240 mm      |
| 胚管外徑 $D_4$   | 270 mm      |
| 射擊膛壓 $P$     | 105.34 kpsi |
|              | 726.3 MPa   |

## (1)基本參數

為簡化算式，而將砲管各層直徑比例設定為以下參數：

$$U_A = \frac{D_1}{D_0} = 1.09 \left( \frac{\text{完成砲管內徑}}{\text{胚管內徑}} \right) \quad (14)$$

$$U_B = \frac{D_2}{D_0} = 1.73 \left( \frac{\text{彈塑性層交界之直徑}}{\text{胚管內徑}} \right) \quad (15)$$

$$U_C = \frac{D_3}{D_0} = 2.18 \left( \frac{\text{完成砲管外徑}}{\text{胚管內徑}} \right) \quad (16)$$

$$U_D = \frac{D_4}{D_0} = 2.45 \left( \frac{\text{胚管外徑}}{\text{胚管內徑}} \right) \quad (17)$$

$$U_E = \frac{D_2}{D_1} = 1.58 \left( \frac{\text{彈塑性層交界之直徑}}{\text{完成砲管內徑}} \right) \quad (18)$$

$$U_F = \frac{D_3}{D_1} = 2.0 \left( \frac{\text{完成砲管外徑}}{\text{完成砲管內徑}} \right) \quad (19)$$

$d=1.11$  運算常數[12]。

(2)自緊壓力  $P_A$ 

$$P_A = -(\sigma'_{r2} - d\sigma_y \ln U_B) = -\sigma'_{r0} \quad (20)$$

$$\sigma'_{r2} = -\frac{d\sigma_y}{2} \left( 1 - \frac{U_B^2}{U_D^2} \right) \quad (21)$$

將  $U_B$ 、 $U_D$  代入公式(20)、公式(21)，可得  $\sigma'_{r2} = -44.83$  kpsi、 $P_A = 141.89$  kpsi。

## (3)加壓時之應力

a.徑向應力  $\sigma'_r$ 

已知  $\sigma'_{r2} = -44.83$  kpsi

$\sigma'_{r0} = -141.89$  kpsi

$$\sigma'_{r1} = \sigma'_{r2} - d\sigma_y \ln U_E \quad (22)$$

將  $U_E$  及  $\sigma'_{r2}$  代入公式(22)，可得  $\sigma'_{r1} = -126.44$  kpsi。

$$\sigma'_{r3} = -\frac{d\sigma_y}{2} \left( \frac{U_B^2}{U_C^2} - \frac{U_B^2}{U_D^2} \right) \quad (23)$$

將  $U_B$ 、 $U_C$ 、 $U_D$  代入公式(23)，可得  $\sigma'_{r3} = -11.68$  kpsi。

b.切線應力  $\sigma'_t$ 

$$\sigma'_t = d\sigma_y + \sigma'_r \quad (24)$$

將  $\sigma'_r$  以  $\sigma'_{r0}$ 、 $\sigma'_{r1}$ 、 $\sigma'_{r2}$  代入公式(24)，可得  $\sigma'_{t0} = 35.71$  kpsi、 $\sigma'_{t1} = 51.16$  kpsi、 $\sigma'_{t2} = 132.77$  kpsi。

$$\sigma'_{t3} = d\sigma_y + 2\sigma'_{r2} - \sigma'_{r3} \quad (25)$$

將  $\sigma'_{r2}$ 、 $\sigma'_{r3}$  代入公式(25)，可得  $\sigma'_{t3} = 99.63$  kpsi。

$$\sigma'_{t4} = \sigma'_{t2} + \sigma'_{r2} \quad (26)$$

將  $\sigma'_{t2}$ 、 $\sigma'_{r2}$  代入公式(26)，可得  $\sigma'_{t4} = 87.95$  kpsi。

## (4)卸壓時之應力

a.切線應力  $\sigma''_t$ 

$$\sigma''_{t0} = \frac{P_A}{U_D^2 - 1} (U_D^2 + 1) \quad (27)$$

$$\sigma''_{t1} = \frac{P_A}{U_D^2 - 1} \left( \frac{U_D^2}{U_A^2} + 1 \right) \quad (28)$$

$$\sigma''_{t2} = \frac{P_A}{U_D^2 - 1} \left( \frac{U_D^2}{U_B^2} + 1 \right) \quad (29)$$

$$\sigma''_{t3} = \frac{P_A}{U_D^2 - 1} \left( \frac{U_D^2}{U_C^2} + 1 \right) \quad (30)$$

$$\sigma''_{t4} = \frac{2P_A}{U_D^2 - 1} \quad (31)$$

將  $P_A$  及  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 、 $U_D$  代入公式(27)至公式(31)，可得  $\sigma''_{t0} = 198.37$  kpsi、 $\sigma''_{t1} = 171.20$  kpsi、 $\sigma''_{t2} = 85.26$  kpsi、 $\sigma''_{t3} = 63.98$  kpsi、 $\sigma''_{t4} = 56.48$  kpsi。

b.徑向應力  $\sigma''_r$ 

$$\sigma''_r = -(\sigma''_t - \sigma''_{t4}) \quad (32)$$

將  $\sigma''_t$  以  $\sigma''_{t0}$ 、 $\sigma''_{t1}$ 、 $\sigma''_{t2}$ 、 $\sigma''_{t3}$ 、 $\sigma''_{t4}$  代入公式(32)，可得  $\sigma''_{r0} = -141.89$  kpsi、 $\sigma''_{r1} = -114.72$  kpsi、 $\sigma''_{r2} = -28.79$  kpsi、 $\sigma''_{r3} = -7.5$  kpsi、 $\sigma''_{r4} = 0$  kpsi。

## (5)自緊後之預置應力

a.切線預置應力  $\sigma'_{tR}$ 

$$\sigma'_{tR} = \sigma'_t - \sigma''_t \quad (33)$$

將  $\sigma'_t$ 、 $\sigma''_t$  以  $(\sigma'_{t0}、\sigma''_{t0})$ 、 $(\sigma'_{t1}、\sigma''_{t1})$ 、 $(\sigma'_{t2}、\sigma''_{t2})$ 、 $(\sigma'_{t3}、\sigma''_{t3})$ 、 $(\sigma'_{t4}、\sigma''_{t4})$  代入公式(33)，可得  $\sigma'_{tR0} = -162.66$  kpsi、 $\sigma'_{tR1} = -120.04$  kpsi、 $\sigma'_{tR2} = 47.51$  kpsi、 $\sigma'_{tR3} = 35.65$  kpsi、 $\sigma'_{tR4} = 31.47$  kpsi。

b.徑向預置應力  $\sigma'_{rR}$ 

$$\sigma'_{rR} = \sigma'_r - \sigma''_r \quad (34)$$

將  $\sigma'_r$ 、 $\sigma''_r$  以  $(\sigma'_{r0}$ 、 $\sigma''_{r0}$ )、 $(\sigma'_{r1}$ 、 $\sigma''_{r1}$ )、 $(\sigma'_{r2}$ 、 $\sigma''_{r2}$ )、 $(\sigma'_{r3}$ 、 $\sigma''_{r3}$ )、 $(\sigma'_{r4}$ 、 $\sigma''_{r4}$ ) 代入公式(34)，可得  $\sigma'_{rR0}=0\text{kpsi}$ 、 $\sigma'_{rR1}=-11.72\text{kpsi}$ 、 $\sigma'_{rR2}=-16.04\text{kpsi}$ 、 $\sigma'_{rR3}=-4.18\text{kpsi}$ 、 $\sigma'_{rR4}=0\text{kpsi}$ 。  
綜整上述(2)至(5)小節各項數據，可得管壁位置與自緊應力對照表(如表 6)。

表 6. 管壁位置與自緊應力對照表

| 位置點                             | 0       | 1       | 2      | 3      | 4      |
|---------------------------------|---------|---------|--------|--------|--------|
| D 直徑(mm)                        | 110.00  | 120.00  | 190.00 | 240.00 | 270.00 |
| $\sigma'_r$ (kpsi)加壓時之徑向應力      | -141.89 | -126.44 | -44.83 | -11.68 | 0.00   |
| $\sigma'_t$ (kpsi)加壓時之切線應力      | 35.71   | 51.16   | 132.77 | 99.63  | 87.95  |
| $\sigma''_r$ (kpsi)卸壓時之徑向應力     | -141.89 | -114.72 | -28.79 | -7.50  | 0.00   |
| $\sigma''_t$ (kpsi)卸壓時之切線應力     | 198.37  | 171.20  | 85.26  | 63.98  | 56.48  |
| $\sigma'_{rR}$ (kpsi)自緊後之徑向預置應力 | 0.00    | -11.72  | -16.04 | -4.18  | 0.00   |
| $\sigma'_{tR}$ (kpsi)自緊後之切線預置應力 | -162.66 | -120.04 | 47.51  | 35.65  | 31.47  |

## 4.2 完成砲管之預置應力與射擊應力計算

胚管自緊加壓後成為自緊砲管，自緊砲管須再將管壁內外尺寸加工至需求尺寸(如內徑為 120mm，外徑為 240mm) 成為完成砲管，因加工後原來之預置應力狀況會發生改變，故須以上述產生相同效果情形下，推算出完成砲管之預置應力與射擊應力，過程如下：

(1)假設在產生相同效果情形下，完成砲管需自緊壓力為  $P_F$

$$P_F = -\sigma'_{r1} + \sigma'_{r3} \quad (35)$$

將  $\sigma'_{r1}$ 、 $\sigma'_{r3}$  代入公式(35)，可得  $P_F = 114.76\text{kpsi}$ 。

(2)完成砲管在  $P_F$  壓力時之應力

a.切線應力  $\sigma_{tF}$

$$\sigma_{tF1} = \frac{P_F}{U_F^2 - 1} (U_F^2 + 1) \quad (36)$$

$$\sigma_{tF2} = \frac{P_F}{U_F^2 - 1} \left( \frac{U_F^2}{U_E^2} + 1 \right) \quad (37)$$

將  $P_F$  及  $U_E$ 、 $U_F$  代入公式(36)、公式(37)，可得  $\sigma_{tF1}=191.26\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{tF2}=99.29\text{kpsi}$ 。

$$\sigma_{tF3} = \sigma_{tF1} - P_F \quad (38)$$

將  $P_F$ 、 $\sigma_{tF1}$  代入公式(38)，可得  $\sigma_{tF3}=76.51\text{kpsi}$ 。

b.徑向應力  $\sigma_{rF}$

$$\sigma_{rF} = -(\sigma_{tF} - \sigma_{tF3}) \quad (39)$$

將  $\sigma_{tF}$  以  $\sigma_{tF1}$ 、 $\sigma_{tF2}$ 、 $\sigma_{tF3}$  代入公式(39)，可得  $\sigma_{rF1}=-114.76\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{rF2}=-22.78\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{rF3}=0\text{kpsi}$ 。

(3)完成砲管之預置應力

a.切線應力  $\sigma_{tR}$

$$\sigma_{tR} = \sigma'_t - \sigma_{tF} - \sigma'_{t3} \quad (40)$$

將  $\sigma'_t$ 、 $\sigma_{tF}$  以  $(\sigma'_{t1}$ 、 $\sigma_{tF1}$ )、 $(\sigma'_{t2}$ 、 $\sigma_{tF2}$ )、 $(\sigma'_{t3}$ 、 $\sigma_{tF3})$  代入公式(40)，可得  $\sigma_{tR1}=-128.42\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{tR2}=45.17\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{tR3}=34.8\text{kpsi}$ 。

b.徑向應力  $\sigma_{rR}$

$$\sigma_{rR} = \sigma'_r - \sigma_{rF} - \sigma'_{r3} \quad (41)$$

將  $\sigma'_r$ 、 $\sigma_{rF}$  以  $(\sigma'_{r1}$ 、 $\sigma_{rF1}$ )、 $(\sigma'_{r2}$ 、 $\sigma_{rF2}$ )、 $(\sigma'_{r3}$ 、 $\sigma_{rF3})$  代入公式(41)，可得  $\sigma_{rR1}=0\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{rR2}=-10.36\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{rR3}=0\text{kpsi}$ 。

c.合成應力  $\sigma_R$

$$\sigma_R = \frac{(\sigma_{tR} - \sigma_{rR})}{d} \quad (42)$$

將  $\sigma_{tR}$ 、 $\sigma_{rR}$  以  $(\sigma_{tR1}$ 、 $\sigma_{rR1})$ 、 $(\sigma_{tR2}$ 、 $\sigma_{rR2})$ 、 $(\sigma_{tR3}$ 、 $\sigma_{rR3})$  代入公式(42)，可得  $\sigma_{R1}=-115.70\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{R2}=50.03\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{R3}=0\text{kpsi}$ 。

(4)完成砲管射擊時之應力

a.切線應力  $\sigma_{tW}$

$$\sigma_{tW} = \frac{P}{P_F} \sigma_{tF} + \sigma_{tR} \quad (43)$$

將  $\sigma_{tF}$ 、 $\sigma_{tR}$  以  $(\sigma_{tF1}$ 、 $\sigma_{tR1})$ 、 $(\sigma_{tF2}$ 、 $\sigma_{tR2})$ 、 $(\sigma_{tF3}$ 、 $\sigma_{tR3})$  代入公式(43)，可得  $\sigma_{tW1}=47.14\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{tW2}=136.31\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{tW3}=105.03\text{kpsi}$ 。

b.徑向應力  $\sigma_{rW}$

$$\sigma_{rW} = \frac{P}{P_F} \sigma_{rF} + \sigma_{rR} \quad (44)$$

將  $\sigma_{rF}$ 、 $\sigma_{rR}$  以  $(\sigma_{rF1}$ 、 $\sigma_{rR1})$ 、 $(\sigma_{rF2}$ 、 $\sigma_{rR2})$ 、 $(\sigma_{rF3}$ 、 $\sigma_{rR3})$  代入公式(44)，可得

$\sigma_{rW1}=-105.34\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{rW2}=-31.28\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{rW3}=0\text{kpsi}$ 。

c.合成應力  $\sigma_W$

$$\sigma_W = \frac{(\sigma_{tW} - \sigma_{rW})}{d} \quad (45)$$

將  $\sigma_{tW}$ 、 $\sigma_{rW}$  以  $(\sigma_{tW1}$ 、 $\sigma_{rW1}$ )、 $(\sigma_{tW2}$ 、 $\sigma_{rW2}$ )、 $(\sigma_{tW3}$ 、 $\sigma_{rW3})$  代入公式 (45)，可得  $\sigma_{W1}=137.37\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{W2}=150.97\text{kpsi}$ 、 $\sigma_{W3}=94.62\text{kpsi}$ 。

(5) 未自緊砲管射擊時之應力  $\sigma'_w$

$$\sigma'_w = \frac{P}{P_F} \frac{(\sigma_{tF} - \sigma_{rF})}{d} \quad (46)$$

將  $\sigma_{tF}$ 、 $\sigma_{rF}$  以  $(\sigma_{tF1}$ 、 $\sigma_{rF1})$ 、 $(\sigma_{tF2}$ 、 $\sigma_{rF2})$ 、 $(\sigma_{tF3}$ 、 $\sigma_{rF3})$  代入公式 (46)，可得  $\sigma'_{W1}=253.07\text{kpsi}$ 、 $\sigma'_{W2}=100.95\text{kpsi}$ 、 $\sigma'_{W3}=63.27\text{kpsi}$ 。

綜整 4.2 節，可得管壁位置與各項應力對照表（如表 7），結合材料降伏強度 (160 kpsi)，可繪製圖 8 自緊 50% 對射擊應力之影響。

表 7. 自緊砲管預置及射擊應力對照表

| 位置點                          | 1       | 2      | 3      |
|------------------------------|---------|--------|--------|
| D 直徑(mm)                     | 120.00  | 190.00 | 240.00 |
| $\sigma_{tF}$ $P_F$ 作用下之切線應力 | 191.26  | 99.29  | 76.51  |
| $\sigma_{rF}$ $P_F$ 作用下之徑向應力 | -114.76 | -22.78 | 0.00   |
| $\sigma_{tR}$ 完成砲管之預置切線應力    | -128.42 | 45.17  | 34.80  |
| $\sigma_{rR}$ 完成砲管之預置徑向應力    | 0.00    | -10.36 | 0.00   |
| $\sigma_R$ 完成砲管之預置合成應力       | -115.70 | 50.03  | 31.35  |
| $\sigma_{tW}$ 完成砲管之射擊切線應力    | 47.14   | 136.31 | 105.03 |
| $\sigma_{rW}$ 完成砲管之射擊徑向應力    | -105.34 | -31.28 | 0.00   |
| $\sigma_W$ 完成砲管之射擊合成應力       | 137.37  | 150.97 | 94.62  |
| $\sigma'_w$ 未自緊砲管之射擊應力       | 253.07  | 100.95 | 63.27  |

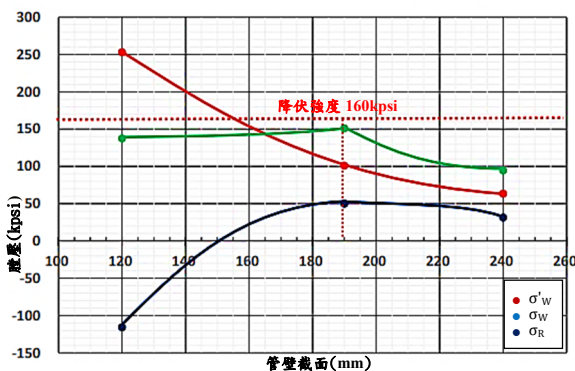


圖 8. 自緊 50% 對射擊應力之影響

### 4.3 藥室自緊分析

砲管藥室段為 0~570mm，依表 1 所示仍須符合承受 726.3Mpa 之安全最大膛壓，因藥室需能容納彈筒置入，故內外徑均較砲膛寬大，如假設依 4.1 章節所述相同條件下 ( $C=50\%$ 、 $\sigma_y=160\text{kpsi}$ 、 $W=2$ 、 $D_1-D_0=10\text{mm}$ 、 $D_4-D_3=30\text{mm}$ )，則可得表 8 與圖 9。

表 8. 藥室自緊對射擊應力之影響

| 自緊百分比 C<br>(自緊壓力 P <sub>A</sub> ) |                | D <sub>1</sub><br>157.65mm | D <sub>2</sub><br>246.48mm | D <sub>3</sub><br>315.30mm |
|-----------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| C=50%<br>(134.56 kpsi)            | σ'w            | 253.07                     | 103.53                     | 63.27                      |
|                                   | σ <sub>R</sub> | -113.34                    | 48.05                      | 29.36                      |
|                                   | σ <sub>W</sub> | 139.43                     | 151.58                     | 92.63                      |

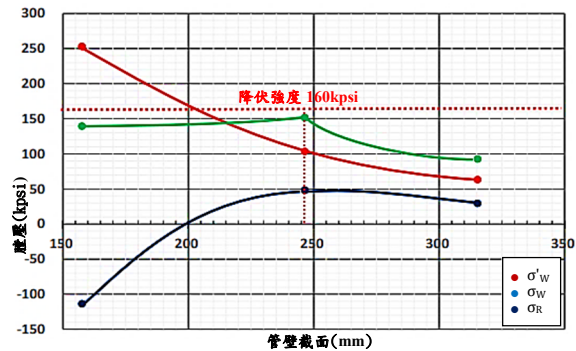


圖 9. 藥室自緊對射擊應力之影響

## 五、研究成果與討論

### 5.1 自緊對射擊應力之影響

依圖 8、圖 9 可獲得以下結論：

- (1) 圖 8 砲管未自緊時，於砲管內壁 120 mm 附近之射擊應力 253.07 kpsi 遠高於材料降伏強度 160kpsi，按材料應變理論，此區域將因過大之應力使砲管產生變形失圓而破壞材料，衍生射擊不準及膛炸等後遺症。
- (2) 圖 8 自緊後於應變區帶(120mm)產生壓縮預置應力（負值），於應變區帶(190mm)產生伸張預置應力（正值），彈性區(190-240 mm)亦為伸張預置應力（正值），預置應力最大值位於應變區邊界(190 mm)。
- (3) 圖 8 自緊產生應變區帶之壓縮應力抵消射擊產生之伸張應力，使射擊應力大幅下降，如砲管內壁處射擊應力由 253.07 kpsi 降為 137.37kpsi，此壓縮預置應力抵消效應使整個壁厚範圍之射擊應力皆於 150.97kpsi 以下，使砲管不再因過大之射擊應力產生變形及材料破壞。
- (4) 圖 9 藥室自緊後射擊應力皆小於 151.58kpsi（降伏強度 160kpsi 以下），亦不會因過大射擊應力產生變形，另藥室設計與火藥燃燒產生壓力尚有彈筒共同承擔，為另一研究主題，故本研究仍以砲膛最高膛壓處做後續分析。

### 5.2 不同自緊百分比對射擊應力影響

從自緊應力分析的過程中可得，若設定



不同之自緊壓力  $P_A$  值進行自緊可獲得不同程度之自緊百分比，而多少自緊百分比對射擊應力之影響較適合，為本節探討之重點。

上章節中，以設定自緊百分比  $C=50\%$  得知須以  $P_A=141.89$  kpsi 作自緊應力分析，現用同樣的方法，分別以  $C=60\%$ 、 $70\%$ 、 $80\%$  之自緊百分比進行  $P_A=148.53$  kpsi、 $153.48$  kpsi、 $156.87$  kpsi 作自緊應力分析，則可得表 9 及圖 10、圖 11、圖 12。

表 9. 不同自緊百分比對砲管各種應力對照表

| 自緊百分比 C<br>(自緊壓力 $P_A$ )               |             | $D_1$   | $D_2$  | $D_3$  |
|----------------------------------------|-------------|---------|--------|--------|
| C=50%<br>(141.89 kpsi)<br>$D_2=190$ mm | $\sigma'_W$ | 253.07  | 100.95 | 63.27  |
|                                        | $\sigma_R$  | -115.70 | 50.03  | 31.35  |
|                                        | $\sigma_W$  | 137.37  | 150.97 | 94.62  |
| C=60%<br>(148.53 kpsi)<br>$D_2=206$ mm | $\sigma'_W$ | 253.07  | 85.88  | 63.27  |
|                                        | $\sigma_R$  | -126.73 | 62.70  | 46.20  |
|                                        | $\sigma_W$  | 126.34  | 148.58 | 109.46 |
| C=70%<br>(153.48 kpsi)<br>$D_2=222$ mm | $\sigma'_W$ | 253.07  | 73.94  | 63.27  |
|                                        | $\sigma_R$  | -133.28 | 74.31  | 63.58  |
|                                        | $\sigma_W$  | 119.79  | 148.25 | 126.85 |
| C=80%<br>(156.87 kpsi)<br>$D_2=238$ mm | $\sigma'_W$ | 253.07  | 64.34  | 63.27  |
|                                        | $\sigma_R$  | -135.71 | 84.82  | 83.42  |
|                                        | $\sigma_W$  | 117.36  | 149.16 | 146.68 |

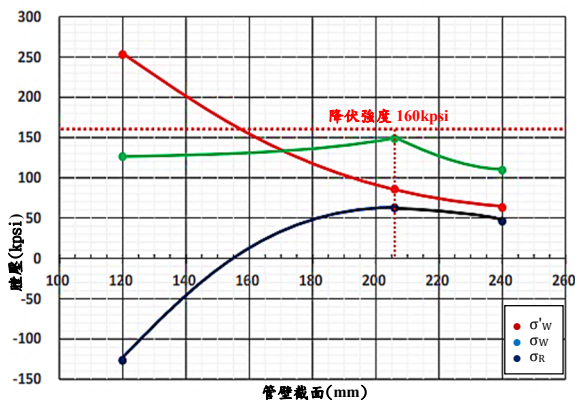


圖 10. 自緊 60% 對射擊應力之影響

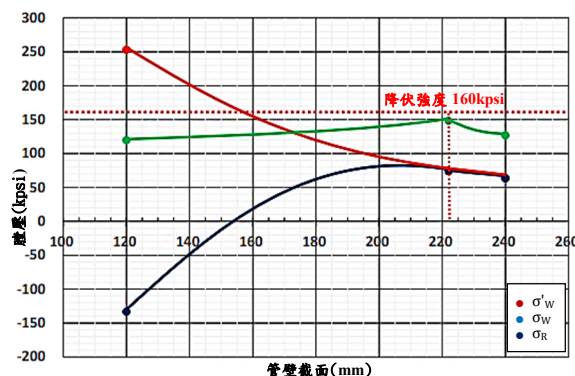


圖 11. 自緊 70% 對射擊應力之影響

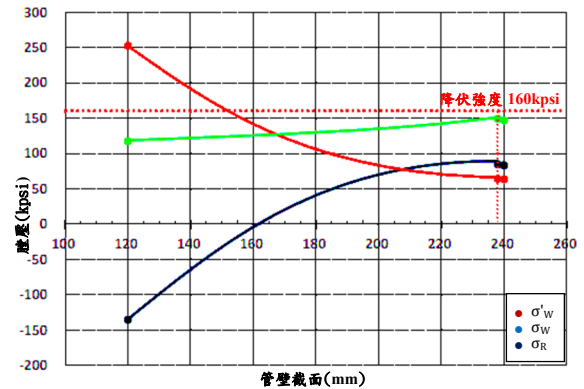


圖 12. 自緊 80% 對射擊應力之影響

## 六、結論

本文以 Rheinmetall Rh-120 光腔砲自緊應力之分析為主題，按參數蒐整、理論分析、逐步演算獲得成果如下：

- (1) 自緊壓力由 141.89 kpsi 調整至 156.87 kpsi，則自緊百分比由 50% 增加至 80%，故自緊壓力越大自緊百分比越大。
- (2) 因自緊完成後，在應變區產生壓縮預置應力，此特性將可使膛壓產生最大之射擊應力降至砲管降伏強度下，故增加自緊百分比對降低應變區之射擊最大應力降至材料降伏強度下的效果越大。
- (3) 由表 10 可知，調高自緊百分比將可降低內壁( $D_1$ )應力，但同時會增加外壁( $D_3$ )應力，故並非自緊百分比越高自緊效果越好，如  $C=50\%$ 、 $\sigma_{W1}=137.37$  kpsi、 $\sigma_{W3}=94.62$  kpsi，相差 42.75 kpsi、 $\sigma_{W2}=150.97$  kpsi； $C=60\%$ 、 $\sigma_{W1}=126.34$  kpsi、 $\sigma_{W3}=109.46$  kpsi，相差 16.88 kpsi、 $\sigma_{W2}=148.58$  kpsi； $C=70\%$ 、 $\sigma_{W1}=119.79$  kpsi、 $\sigma_{W3}=126.85$  kpsi，相差 -7.06 kpsi、 $\sigma_{W2}=148.25$  kpsi； $C=80\%$ 、 $\sigma_{W1}=117.36$  kpsi、 $\sigma_{W3}=146.68$  kpsi，相差 -29.33 kpsi、 $\sigma_{W2}=149.16$  kpsi。

表 10. 各自緊百分比之射擊合成應力

| $P_A$<br>(C)         | $D_1$  | $D_2$  | $D_3$  | $\sigma_{W1}-\sigma_{W3}$ |
|----------------------|--------|--------|--------|---------------------------|
| 141.89 kpsi<br>(50%) | 137.37 | 150.97 | 94.62  | 42.75                     |
| 148.53 kpsi<br>(60%) | 126.34 | 148.58 | 109.46 | 16.88                     |
| 153.48 kpsi<br>(70%) | 119.79 | 148.25 | 126.85 | -7.06                     |
| 156.87 kpsi<br>(80%) | 117.36 | 149.16 | 146.68 | -29.33                    |

就上述數據分析而言，自緊 60-70% 內外壁壓差各為 16.86 kpsi 與 -7.06 kpsi，最大

壓力 148.58 kpsi 與 148.25kpsi 為砲管最小負荷區間，故在本文自緊條件下，自緊 60% 至 70% 會有最佳自緊效果，並使砲管壁厚範圍內承受較平穩之應力曲線。

### 符號說明

胚管：未自緊加壓前之砲管原料  
 自緊砲管：胚管自緊加壓後之砲管  
 完成砲管：自緊砲管加工至需求尺寸之砲管  
 $A_b$ ：砲膛面積  
 $C$ ：自緊百分比  
 $D$ ：砲膛口徑  
 $L$ ：砲管總長  
 $P$ ：設計壓力  
 $P_A$ ：自緊壓力  
 $P_F$ ：在相同效果情形下自緊砲管所需自緊壓力  
 $P_{max}$ ：最大膛壓  
 $R_i$ ：砲管內徑  
 $R_o$ ：砲管外徑  
 $V_0$ ：彈體出口速度  
 $W$ ：壁厚比  
 $W_p$ ：彈體重量  
 $X_m$ ：彈體膛內總行程  
 $a、b$ ：Le Duc 方程式之常數  
 $d$ ：自緊公式之常數  
 $\sigma_r$ ：徑向應力  
 $\sigma_t$ ：切線應力  
 $\sigma_z$ ：軸向應力：  
 $\sigma_y$ ：砲管材料彈性降伏強度  
 $\sigma'_r$ ：自緊加壓時砲管徑向應力  
 $\sigma'_t$ ：自緊加壓時砲管切線應力  
 $\sigma''_r$ ：自緊卸壓時砲管徑向應力  
 $\sigma''_t$ ：自緊卸壓時砲管切線應力  
 $\sigma_{rR}$ ：自緊砲管預置徑向應力  
 $\sigma_{tR}$ ：自緊砲管預置切線應力  
 $\sigma_{rF}$ ：以  $P_F$  完成砲管徑向應力  
 $\sigma_{tF}$ ：以  $P_F$  完成砲管切線應力  
 $\sigma_{rR}$ ：以  $P_F$  完成砲管預置徑向應力  
 $\sigma_{tR}$ ：以  $P_F$  完成砲管預置切線應力  
 $\sigma_R$ ：以  $P_F$  完成砲管預置合成應力  
 $\sigma_{rW}$ ：完成砲管射擊時徑向應力  
 $\sigma_{tW}$ ：完成砲管射擊時切線應力  
 $\sigma_W$ ：完成砲管射擊時合成應力  
 $\sigma'_W$ ：未自緊射擊時由膛壓產生之合成應力

### 參考文獻

- [1] Richard, Q., Techology of Tank, Macdonald and Jane's Publishers, London, vol. 1, pp. 70-71, 1991.
- [2] Larry, B., Carter, R., and Champagne, V., "Army Targets Age Old Problems with New Gun Barrel Materials," AMPTIAC Quarterly, Rome, N.Y, vol. 18, pp. 49-56, 2004.
- [3] David, M., New Tank for the Old, Part 2: Tank Top Upgrades, Armada International, Bangkok, 2002.
- [4] Macrae, A. E., "War Office Overstrain of Metals: and its Application the Autofrettage process of Cylinder and Gun Construction," Nature 128, pp. 49-50, 1931.
- [5] 李喜明，台灣的勝算，聯經出版事業股份有限公司，第 105 頁，2022。
- [6] Manfred, W., NATO STANAG 4385 120mm X 570 Ammunition for Smooth Bore Tank Guns, North Atlantic Treaty Organization, Brussels, 1993.
- [7] Davidson, R. O., AMCP 706-108 Elements of Armament Engineering Part Three Weapon Systems and Components, U.S. ARMY Materiel Command, Chap. 6, pp. 6.1-6.19, 1963.
- [8] Von, M. R., "Mechanik der festen Körper im plastisch- deformablen Zustand," EuDML, vol. 1913, pp. 582-592, 1913.
- [9] 洪春棋，發射藥性能鑑測與膛內彈道匹配問題之研究，中正理工學院兵器系統工程研究所碩士論文，桃園，1988。
- [10] Hudson, J. B., TM 43-0001-28 ARMY Ammunition data Sheets Artillery Ammunition. Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers, and Artillery Fuzes, Headquarters Department of the ARMY Washington Artillery, Chap. 10, pp. 141-1, 2003.
- [11] 夏永寧，砲管自緊之研究與分析，中正理工學院兵器工程研究所碩士論文，桃園，1991。
- [12] 郭蘅，砲管自緊，聯勤第二零二廠，第 5-29 頁，1986。