

# 真空預冷及其能源分析

## Vacuum Cooling and Its Energy Use Analysis

### —— 專題研究報告 ——

國立臺灣大學農業機械工程學系教授

陳 貽 倫

Yi-Luen Chen

#### 摘 要

本文引用並分析 8 次萵苣，1 次花椰之真空冷卻實驗及其能源消耗數據。每批萵苣之冷卻過程耗時不需半小時；每公噸萵苣冷卻處理所耗電力不超過 10.5 仟瓦小時；該真空冷卻設施對冷卻萵苣而言，其能源效率係數 (COP) 平均為 2.65。

使用真空冷卻設施，可有下列可能途徑以節約能源：(1) 真空室要滿載；(2) 冷凍系統之壓縮機在閃變點附近才開動；(3) 選用大小合宜、高效率之馬達；(4) 適量提高冷媒壓縮機之進氣壓力以提高冷媒循環之 COP 值；同時，增加其真空室冷凝管熱交換面積；(5) 利用壓縮機冷卻過程中有 7 分鐘的空載時間之冷凍能量來補償其冷卻尖峰負荷，從而降低其總電容量。

#### Abstract

Vacuum cooling performance and energy consumption experiments data of 8 runs for lettuce and 1 run for cauliflower were cited and analyzed. Less than 30 minutes and less than 10.5 kwh/m. ton were required to cool lettuce from 23°C to 2°C. The average coefficient of performance of vacuum cooling equipment was found to be 2.65 when lettuce was cooled.

Conservation of energy could be achieved if, (1) The vacuum tube is fully loaded with produce; (2) The compressor of the refrigeration system would not be turned on until at the flash point; (3) Proper size and high-efficiency motors would be selected for driving the different components of the system; (4) Suction pressure of the refrigerant compressor would be raised by raising the evaporating temperature, and at the same time, increase the heat exchange surface of the condensing coils in the vacuum tube. (5) A way could be found to utilize the refrigeration capacity of the compressor during the 7-minutes idling period of the cooling cycle to compensate the peak load requirement of the cycle, so that more or less flatten load curve would be obtained.

#### 一、前 言

農產品預冷之定義為在產品採收後、包裝前後、運輸、加工、貯藏前之短時間內，將其溫度降至所需。預冷之功能為祛除農產品之田間餘溫，防止在運銷貯藏期內腐敗微生物之迅速生長，抑制酵素

活動和呼吸，因而延長其銷售期，並儘可能保持其原有之鮮度、品味、和品質。蔬果之敗壞如同呼吸，在低溫下進行的慢，在高溫下進行得快，例如，菠菜在 27°C 時，其變為不能賣程度的速率是其在 2°C 時之 13 倍，遲緩預冷 1 小時，零售壽命損失半天。\*

預冷方法有：水冷、風冷、加水接觸，及真空冷卻等四種。

強制通風預冷已大規模應用於番茄、甜瓜、花椰、芹菜、菠菜、切花、蘋果、柑桔、獼猴桃等，是一乾淨、方便、速度較慢之冷卻方式。水冷法較快速，已大規模用於紅白蘿蔔、甜玉米、蘆筍、芹菜、荔枝等果蔬菜，其成本較高、維護較繁、病菌較易藉水傳播，加冰接觸也為有效預冷方法之一，其法為將碎冰和農產品混同裝於容器或堆在容器之上，廣泛地用於葉菜類、紅蘿蔔、芹菜、甜玉米、荔枝等。<sup>2,3</sup>

在幾近真空中，蔬菜或他項農產品表面水分急遽蒸發，導致其本身溫度迅速下降之過程稱「真空冷卻」。具體言之，當真空室壓力降至 4.6mm.Hg (水銀柱) 時，水之汽化溫度到達 0°C 如能保持此低壓相當時間，蔬菜之溫度將降至 0°。水之潛熱甚大，使萵苣含水量蒸發 1%，可使其本身溫度降低 5°C；含水率蒸發 3%，則可降溫 15°C。實驗證明：葉菜類在真空冷卻過程中約失水 1.0~4.7%，平均失水 2.7%，此水分來自蔬菜各部分而非僅來自外表，故蔬菜在冷卻之後不致因失水過多而呈枯萎的外觀。真空冷卻原理早為人所熟知，但應用於大量農產品之運銷則始於 1948 年，自彼時始，真空冷卻成為美國萵苣之標準冷卻處理方式，也廣泛應用於其他葉菜、芹菜、花椰、甜玉米等。<sup>7</sup>

真空冷卻之速度主要視產品之表面積與容積之比例 (下稱面/容比) 大小及其組織脫水之難易而定，菠菜、萵苣葉之面/容比大，容易冷卻；芹菜、花椰、高麗菜之面/容比小，冷卻較慢；水果、

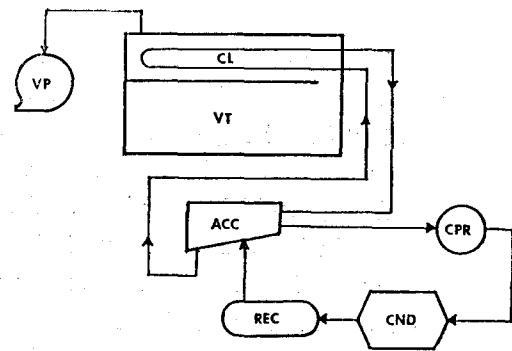
根、莖蔬菜就不適于真空冷卻；表面乾燥少水而組織嚴密如番茄者也不適真空冷卻，自表一數據，可略窺一斑。

真空冷卻之優點為：它適合任何包裝容器，只要有適當透氣孔即可。農產品可在田間包裝，再予冷卻，節省搬運工時。冷卻迅速是其另一優點，在實際運銷作業上，冷卻萵苣只需 30 分鐘，預先包裝之葉菜只需 15 分鐘。真空冷卻之設備投資大，需經常運轉使用才為有利，鑑於有相當多的蔬菜已長期商業化應用此種冷卻方式，足見在應用上已經經濟合算。惟在成本之計算、能源之使用效率之資料未多見諸文獻。本文之目的為藉實驗數據，了解真空冷卻實際性能，計算一真空冷卻設備之能源使用情形，分析研究其節約能源之可能性，比較真空冷卻和其他種冷卻方式在能源使用上之效率。

## 二、真空冷卻設備

本文所載之真空冷卻設施位於美國 Nunes 地方，其設施主要由下列各件組成，其相互配置關係如圖一。

1. 真空冷卻室 (Vacuum tube)
2. 冷卻室冷凝管 (Vacuum tube Condenser Coils)
3. 低壓液氨積集槽及邦浦 (Low-Pressure Ammonia Accumulator with pump)
4. 真空邦浦 (Vacuum Pump)
5. 高壓 NH<sub>3</sub> 接受槽 (High-Pressure Ammonia Receiver)
6. 冷媒壓縮機 (Refrigerant Compressor)



- VP 真空邦浦  
 CL 冷卻室冷凝管  
 VT 真空室  
 ACC 低壓液氨積集槽  
 REC 高壓氨接受槽  
 CND 冷媒冷凝器  
 CPR 壓縮機

圖一、農產品真空冷卻設施主件配置

表一、不同蔬菜之真空冷卻性能例<sup>1</sup>

品名	時間 (min)	品溫 (°C)		備註
		初期	終期	
香芹菜	7	18.8	0.3	萬豆1967
甘藍	15	21.0	2.1	萬豆1967
葱	7	17.5	0.0	萬豆1967
甜玉米	24	32.0	1.5	萬豆1967
甜玉米	29	19.4	5.0	Barger
菜豆	26	28.0	8.0	萬豆
草莓	26	19.4	7.8	萬豆
大芹菜	8	11.4	4.2	萬豆
紅蘿蔔	10	16.6	12.8	萬豆
黃瓜	17	22.2	19.2	萬豆
蕃茄	17	24.6	22.0	萬豆
椒	9	18.0	12.9	萬豆

此設施各組件之能量及動力配備如下：

1. 真空冷却室

內部空間：長×寬×高 = 14m×2.7m×2.7m  
 可容紙箱裝高苜 648 箱；每箱寬×  
 高×長 = 27cm×41cm×55cm；  
 每箱高苜淨重約23公斤。

數量：2 台

能量：每天（14小時）可處理40~45,000箱。

2. 冷却室冷凝管 是由1388支 6 公尺長之 6 分管組成。

3. 冷媒冷凝器 屬蒸發式；其組件動力如下：

水邦浦	1 台	10HP
風扇	1 台	10HP
油邦浦	1 台	7.5HP
其他馬達		2 HP

小計約 30HP

4. 真空邦浦

型式：旋轉葉輪式

數量：2 組，每組 2 台

動力：每組150HP

在運轉初期，兩台邦浦並聯操作，使真空室空氣儘早排除及至室內真空度到達 5 mm.Hg 時，立即變更其抽氣管道接法，使成串聯操作，以維持室內高度真空。

5. 冷媒壓縮機

型式：螺旋式

冷媒：NH<sub>3</sub>

數量：2 台（其中一台350HP者備用）

動力：500HP，350HP

6. 冷媒邦浦

數量：2 台

動力：7.5HP/台

7. 空氣壓縮機：用於真空室門之開關，當此空氣壓縮與輸送機及堆高機聯合使用時，能在一分鐘內將真空室內之產品裝卸完畢。

數量：1 台

動力：25HP

三、測定項目與方法

測定項目有：(1)高苜處理量；箱數、每箱重量、總重量；(2)高苜處理前後溫度；(3)冷媒壓縮機進氣壓和排氣壓；(4)冷媒壓縮機耗電功率及功率因素；(5)真空邦浦耗電功率及功率因素；(6)其他馬達耗

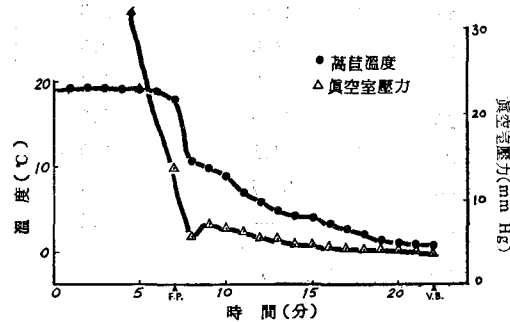
電功率及功率因素；(7)時間

溫度測定使用熱綫 7 支，其中 1 支測高苜紙箱內之乾球溫度，另一支測其濕球溫度，其餘 5 支皆插入同紙箱高苜菜內。溫度數據由多點溫度紀錄儀自動紀錄。功率 (watt) 及功率因素由瓦特及功率因素綜合電表測定。所耗電力 (kwh) 則由功率乘以時間得之。

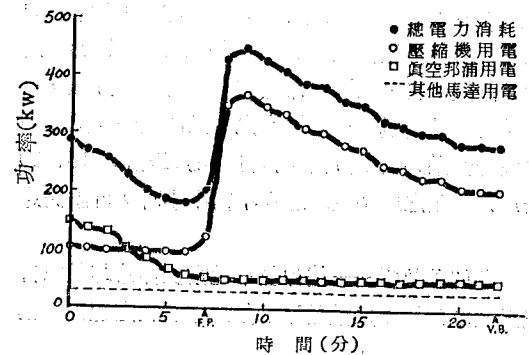
四、測定結果

以同樣方法測定上述各項目共13次，前 4 次記錄不全。其中第10次實驗對象為花椰菜，其餘皆為高苜。第 8、11、13次真空室未滿載，其餘皆近滿載。表二、三及圖二、三為第 5 次實驗之結果。據此等結果可顯示真空冷却之一般性能和動力消耗。表四為各次真空冷却實驗數據摘要。

真空邦浦耗電、冷媒壓縮機耗電及其餘馬達之耗電功率、三者合而為總消耗電力。在冷却過程中，前兩項有相當大的起伏變化如表三，而最後一項消耗約恒為30kw。



圖二、真空室壓力變化與高苜溫度  
 U.C.DAVIS, 1986



圖三、高苜真空冷却過程中所耗電力變化  
 U.C.DAVIS, 1986

表二、冷却過程中高苜溫度與真空室真空變化  
(第5次實驗數據)

U.C.DAVIS, 1985

時 間 (min)	真 空 度 (mm.Hg)	箱 內 溫 度 (°C)			備 註
		高 苜 *	乾 球	濕 球	
0	—	19.2	20.6	15.6	← 開始抽真空
1	333.2	19.1	18.9	15.6	
2	—	19.1	18.3	16.1	
3	84.3	18.9	18.9	16.1	
4	41.1	18.8	18.9	16.7	
5	23.4	18.6	19.4	16.7	
6	—	18.6	20.6	16.7	
7	13.8	17.9	21.7	17.2	← 閃變點F.P.
8	5.8	10.6	19.4	10.0	(Flash point)
9	7.2	9.7	17.8	8.9	
10	6.85	8.7	16.7	8.9	
11	6.3	7.0	15.0	8.3	
12	5.85	5.7	13.9	7.2	
13	5.5	5.0	13.3	6.7	
14	5.15	4.2	11.7	6.1	
15	4.9	4.0	11.7	6.1	
16	4.65	3.4	11.1	5.6	
17	4.45	2.8	10.0	5.6	
18	4.3	2.0	8.9	5.0	
19	4.2	1.4	7.8	3.9	
20	4.15	1.1	6.7	3.3	
21	4.1	0.9	6.7	3.3	
22	3.95	0.9	6.7	2.8	← 真空破壞 V.B.
23	—	0.4	12.2	3.3	(Vac. break)

\* 五個測定點之平均值。

### 五、討論與結論

1. 冷却效果——從圖二之冷却曲線可知真空冷却對於高苜等表面積大之葉菜類蔬菜有優異之冷却效果。自抽真空開始至閃變點(Flash point)需時約7分鐘，自閃變點至冷却完成需時約15分鐘。藉輸送帶、堆高機及氣動操作之自動門設備，其產品之裝卸作業只需1分鐘，每批(約640箱，15,000公斤)蔬菜之整個處理過程不需半小時，可謂快速。

2. 能源效率——能源效率是指操作冷却設施自農產品本身挪去之熱量除以該設施所耗之能源，也稱能源效率係數，

$$COP = \frac{W.C.\Delta T}{Q}$$

C：產品比熱

式中

COP：能源效率係數 (Coefficient of Performance)

W：產品重量

ΔT：產品冷却前後之溫差

Q：設施運轉之能源消耗

以第五次實驗為例，W=17455kg；C=0.956kcal/kg·c；ΔT=18.3°C；Q=119kwh，代入上式得：

$$COP = 17455 \times 0.956 \times 18.3 / 119 \times 860 = 3.0$$

高苜冷却8次實驗之COP平均值為2.65；花椰菜實驗，其COP值為1.0，因後者組織緊實，冷却需時較久。

Griersons 等 (1970) 在其柑桔風冷文中定義其風冷設施之效率為：「自產品挪去之熱除以冷却設施之冷凍能量。」彼等以風冷柑桔結果所估其設施之效率如0.21~0.35；在同樣定義下，Bennett<sup>5</sup> 等 (1969) 試驗風冷蘋果，所估設施之效率為0.32~0.45；Soule<sup>10</sup> 等 (1969) 試驗風冷柑桔、葡萄柚，其設施效率估為 0.17 ~ 0.58；Bennett<sup>4</sup> (1963) 以桃子作水冷試驗，其設備能源效率估為 0.42~0.90。

果蔬農產品預冷能源消耗之研究甚少見諸文獻，而以上數文中，其冷却產品對象不同，其效率定義也非十分精確，故所得數據失之粗略，惟據以大致比較，真空冷却該是較具效率之一種冷却方式。

### 3. 能源節約和使用合理化——真空冷却設備龐

大，電力消耗驚人，如能設計妥善、運作合理，應可減少投資，降低其使用成本。

(1)第11, 13次實驗，真空室未滿載，其每箱耗電量分別為0.31和0.36Kwh/Box；其他滿載實驗則耗電量省甚多，其原因為後者場合，有更多產品分攤真空邦浦和空轉之電力消耗。

(2)在裝卸期間以至閃變點之前，約有7分鐘之久，壓縮機不需壓送NH<sub>3</sub>至冷凝管，此時壓縮機仍在空轉而消耗電力。以第5次實驗為例，其空轉功率為98kw，其電力消耗為 98kw×7min/60min/hr = 11kwh。該批產品之冷却處理需耗電力總數為 119kwh，故在此7分鐘期間，若能关掉壓縮機，使其停止運轉可節省能源11/119 = 9%。

表三、冷却過程中電力消耗變化  
(第五次實驗數據)

U.C. DAVIS 1985

時間 (min)	真空邦浦		冷媒壓縮機				備註
	耗電 (kw)*	功率因素	耗電 (kw)	功率因素	進氣壓 (psi)	排氣壓 (psi)	
0	74.6	45.4	102.8	55.2	109	37	← 開始運轉
1	67.3	76.1	102.8	55.4	109	37	
2	64.9	75.5	98.1	54.1	104	36	
3	50.0	70.0	97.3	53.5	103	35	
4	38.6	58.5	95.8	53.6	102	35	
5	31.3	53.5	97.3	53.8	102	35	
6	28.1	48.5	95.3	53.8	102	36	
7	26.5	46.0	121.6	68.6	112	42	← 閃變點
8	24.5	43.3	352.0	86.6	141	38	
9	25.8	48.0	367.0	87.6	152	37	
10	25.3	47.7	350.0	87.1	153	37	
11	25.3	46.6	336.0	86.7	155	37	
12	25.2	46.7	311.0	85.3	154	37	
13	25.1	45.3	305.0	84.9	153	37	
14	25.1	46.2	280.0	84.2	150	37	
15	25.3	44.8	274.0	83.2	148	37	
16	25.0	45.5	254.0	82.0	145	37	
17	25.0	45.2	243.0	80.7	143	37	
18	24.7	44.0	228.0	79.8	140	37	
19	24.8	42.9	231.0	79.6	140	37	
20	25.2	43.1	211.0	78.0	139	37	
21	25.1	43.0	209.0	76.9	138	38	
22	24.7	42.4	208.0	77.3	136	35	← 真空破壞
23	25.4	76.0	1—0	—	—	—	

\* 一台耗電量，共二台，其真空邦浦耗電量為此表紀錄之二倍。

表四、真空冷却各次實驗數據摘要

U.C. DAVIS, 1985

實 驗 編 號	5	6	7	8	9	10*	11	12	13
產品初溫, °C	18.9	15.6	22.8	22.8	25.0	18.3	23.9	26.7	25.0
產品終溫, °C	0.6	2.2	1.7	5.6	4.4	1.7	1.1	0.6	1.7
溫差, °C	18.3	13.4	21.1	17.2	20.6	16.6	22.8	26.1	23.3
處理量, kg	17,455	14,727	17,864	8,136	17,227	18,318	8,455	15,818	8,273
壓縮機耗電, kwh	84	73	93	47	96	206	65	120	71
真空邦浦電, kwh	24	21	25	18	25	90	25	27	27
總耗電, kwh	119	105	130	74	134	349	100	160	110
每箱耗電, kwh/Box	0.18	0.16	0.20	0.23	0.21	—	0.31	0.25	0.36
COP	3.0	2.1	3.2	2.1	2.9	1.0	2.1	2.9	1.9
壓縮機功率因素	0.8	0.77	0.8	0.7	0.8		0.73	0.83	0.72
真空邦浦功率因素	0.57	0.50	0.52	0.53	0.52		0.52	0.54	0.52
尖峯負荷電力, kw	448	415	460	352	468	412	388	491	401
平均負荷電力, kw最	231	286	311	234	308	199	261	343	255
最低負荷電力, kw	182	182	177	176	175	176	183	186	186
平均負荷/尖峯負荷	0.52	0.69	0.68	0.66	0.66	0.48	0.67	0.70	0.64

\* 第10次實驗對象為花椰菜，其餘皆為高苣。

(3)包括冷媒壓縮機在內之水蒸汽(來自菜蔬)冷凝系統是真空冷卻設施中之主要能源消耗組件。良好之設計、適當之選擇配合,以及正確之運用和維護可節省不少電力<sup>9</sup>。

壓縮機之冷媒排氣壓(Head Pressure)大小決定於冷媒冷凝器(Condenser)之冷卻溫度;其進氣壓(Suction Pressure)則決定於蒸發溫度,調查四座真空冷卻設施:在運轉時,其排氣壓大致在150~160 psig範圍,而進氣壓則在15~55psig範圍,變化幅度較大。根據冷凍原理,若能在冷凍循環中,降低其排氣壓,或升高其進氣壓,可改善其COP值。例如,設一理想之NH<sub>3</sub>冷媒壓縮循環,其排氣壓為149psig,進氣壓為20psig(飽和蒸汽溫度-14.4°C),其理論COP值計算為4.9。今若將其進氣壓提升為40psig(飽和蒸汽溫度-3.3°C),其他條件不變,則其理論COP值為7.04,故在真空室冷凝管設計上,若能增加熱交換面積,則可提高冷媒進氣壓而提高其冷媒效率,從而節省能源。另外,防止真空室之漏氣、冷凝管之清洗、冷凝器之水質處理,作好壓縮機進氣管之絕熱等,均有助於能源之節省<sup>9</sup>。

(4)圖三之電力消耗曲線顯示:真空冷卻設施之電力消耗之尖峯負荷在閃變點(Flash point)附近。此時真空室到達相當之低壓,農產品表面水分開始沸騰蒸發,大量凝結在冷凝管上。此後,電力負荷節節下降。而在閃變點之前之7分鐘內,其電力負荷最小,冷媒壓縮處於空轉狀態,如能在此7分鐘內,仍能充分利用壓縮機之冷凍能力,預儲冷量而轉用於尖峯負荷期,則可降低其尖峯負荷,從而降低其整個設施之電容量。

(5)選擇適當馬達也是節省能源途徑之一,馬達效率是指馬達輸出之軸馬力除以輸入電功率乘以100之值。表五為多相鼠籠式感應馬達之效率,由此表知:馬達之效率高低差距很大。選用高效率馬達投資較大,但可降低整個設施之電力容量並節省用電<sup>9</sup>。

馬達之功率因素(Power factor)是指通過馬達線圈之電流中,有效部分之分數值。其無效部分電流雖不能產生動力,但仍消耗一些電力並產生熱量。馬達之功率因素數值大小與其本身容量、特性、及其負荷大小有關,實驗數據顯示:冷媒壓縮機馬達之功率因素頗近理想,惟真空邦浦馬達之功率因素過低,可能由於馬達規格過大,常在半載(Part load)之下運轉之故。

表五、多相鼠籠式感應馬達之效率<sup>9</sup>

效率代號	標示效率	最低效率
A	—	95.0
B	95.0	94.1
C	94.1	93.0
D	93.0	91.7
E	91.7	90.2
F	90.2	88.5
G	88.5	86.5
H	86.5	84.0
K	84.0	81.5
L	81.5	78.5
M	78.5	75.5
N	75.5	72.0
P	72.0	68.0
R	68.0	64.0
S	64.0	59.5
T	59.5	55.0
U	55.0	50.5
V	50.5	46.0
W	—	46.0

## 六、參考文獻

- 1.小泉武紀、小野田、明彥,1982,真空冷卻設施之調查研究,農業機械化研究所,日本埼玉縣。
- 2.陳貽倫,1984,蔬菜預冷,農工學報 Vol.30 No.1 pp. 41~53。
- 3.陳貽倫,1984,荔枝預冷及其有關物性,農工學報Vol. 30 N.4。
4. Bennett, A. H., 1963, Thermal Characteristics of Peaches as Related to Hydrocooling, USPA AMS Tech. Bulletin No. 1292.
5. Bennett, A.H., J. Soule, and G.E. Yost, 1969, Forced-air Precooling of Red Delicious Apples, ARS 52-41 USDA.
6. Grierson, W., A.H. Bennett, and E.K. Bowman, 1970. Forced-air Precooling of Citrus Fruit on a moving conveyor, ARS 52-40 USDA.
7. Isenberg, F.M.R., R.F. Kasmire, and J. E. Parson, 1982, Vacuum Cooling Vegetables, Information Bulletin 186, A Cornell Cooperation Extension Publication.

8.Knutson, G., R. Curley and W. Chancellor. 1981, Selecting Electric Motors for Maximum Efficiency, Leaflet 21240, Division of Agricultural Sciences, U.C. DAVIS.

9.Pita, E.G., 1984, Refrigeration Principles and Systems—an Energy Approach, John Wiley & Sons, New York.

10. Soule, J., 1969, Experimental Forced-

air Precooling of Florida Citrus Fruit, Market Research Report No. 845, ARS, USDA.

### 七、誌謝

本文承美國加州大學戴維斯分校農工系 James Thompson先生提供有關資料，謹誌謝。

專營土木、水利、建築等工程

岡德營造有限公司

地址：鳳山市仁愛路十巷5號

電話：7022509

昭雄土木包工業

負責人：張簡久雄

地址：高雄縣大寮鄉鳳林一路128巷162號

明朝土木包工業

地址：高雄縣岡山镇空醫院路37巷11弄20號

電話：6238273