

# PDR-RTO 火炬高浓度 VOC 废气处理及能源回收技术

张荣兴、黄承荣

台湾奥特拉斯能源系统股份有限公司

## 摘要

高温脉冲波反应器 ( Pulse Detonation Reactor ) 是一种崭新的利用可控制气体逆流爆轰冲击波的连续化学反应器，其内部利用爆轰促进器促进可燃性气体及空气的混合，使可燃性气体自动产生连续的混合、点燃、逆流爆轰、熄焰的程序，使得可燃性气体能连续利用爆轰冲击波的高温、高压进行反应或被破坏，然后结合 RTO 及废热回收锅炉，有效率的回收能源，达成 VOC 废气的有效处理及能源回收，创造快速投资回收效益，是火炬气体一种全新的处理及能源回收技术。

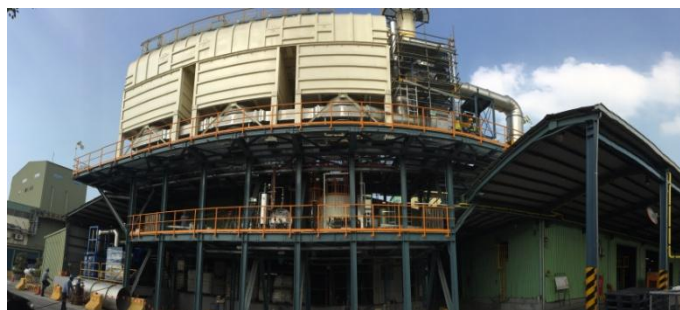
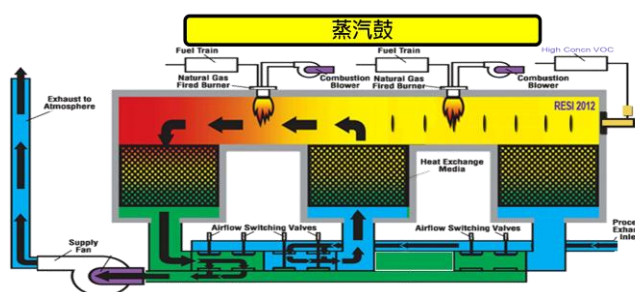


图-1 结合高温脉冲波反应器的 3-蓄热槽再生热氧化处理器 ( PDR-RTO )，为台湾丰映科技集团专利产品。

## 绪论

火炬是传统石油、化工、化学工厂防止可燃性气体释放的最后一道防线。这把长明灯已经在业界使用超过百年，对地球暖化、空气污染造成一定的影响，是业界一直希望解决的重要课题之一，也是民众最反对的项目。但是火炬气体由于具有流量不稳定、浓度变化大、常含有大量氮气以避免回火意外等特性，不容易使用传统燃烧技术处理及回收能源。火炬 VOC 废气处理技术除了压缩回收之外，最终处理途径一定需要使用热处理技术，传统的燃烧处理能量密度约为  $100 \text{ W/cm}^2$ ，且会面对缩载比 ( Turn-Down Ratio ) 小、容易熄火、回火等技术问题。如能使用爆轰技术，则可以利用其能量密度高达  $10^{10} \text{ W/cm}^2$  的特性，很容易地将 VOC 废气破坏处理。

高温脉冲波反应器 ( Pulse Detonation Reactor, PDR ) 是一种崭新的类似汽车引擎的高温反应器，在反应器内部可控制体积范围内，其内部利用爆轰促进器促进可燃性气体及空气的混合，使可燃性气体自动产生连续的混合、点燃、逆流爆轰、熄焰的程序，使得可燃性气体能连续利用爆轰冲击波的高温、高压进行反应或被破坏。VOC 气体经

PDR 破坏处理后，再结合再生式热氧化器 ( RTO ) 及废热回收锅炉，有效率的回收能源，达成 VOC 废气的有效处理及能源回收，创造快速投资回收效益，是火炬气体一种全新的处理及能源回收技术。

## 高温脉冲波反应器

爆轰 ( Detonation ) 是指可燃性气体与适量的空气或氧气的气体混合物，存在于一管状容器中，在管内某一点将气体混合物点燃时，火焰面会非常快速进行称为爆燃 ( Deflagration )，并与其进行方向前方的压缩波结合生成冲击波，然后会突然增加燃烧传播速度，使其速度达音速以上并趋于安定，此现象称为爆轰，而此局部经压缩产生冲击波的反应区域称为爆轰冲击波 ( Detonation Wave )。爆轰冲击波通过后，气体混合物的化学组成即发生变化，此爆轰冲击波若撞击到物质，不但在极短时间内给予强烈的冲击压力及高温，同时也会产生机械的破坏作用。

有关气体爆燃与爆轰的研究，始自十九世纪末，但是绝大部分的研究都着重在爆炸防止、防灾、武器、炸药、爆炸与爆破工程相关的研究；近年来，还有部分研究是着

重在利用爆轰冲击波产生超音速的特性，发展超音速高速飞行器或各种武器应用。

进行爆轰过程的理论分析时，可以将爆轰所产生的物理现象与化学反应简化为一个含化学反应的一维定常传播的爆轰冲击波强间断面。对于爆轰冲击波的强间断面两侧的混合气体状态，可以建立三个守恒方程，分别为质量守恒、动量守恒及能量守恒，如下列方程式所示：

$$\rho_1(D_2 - u_1) = \rho_2(D_2 - u_2) \quad (1)$$

$$P_1 + \rho_1(D_2 - u_1)^2 = P_2 + \rho_2(D_2 - u_2)^2 \quad (2)$$

$$E_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{(D_2 - u_1)^2}{2} = E_2 + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{(D_2 - u_2)^2}{2} \quad (3)$$

其中，状态 1 为爆轰冲击波前尚未进行反应的状态，状态 2 为爆轰冲击波后已进行反应的状态。E 为气体能量，D 为爆轰冲击波传递速度，P 为气体压力，u 为气体速度，ρ 为气体密度。

而伴有化学反应和释放部分反应热 Q 的理想气体，其状态方程可以写成：

$$E = \frac{1}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} - \lambda Q \quad (4)$$

其中， $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ ， $C_p$  为定压比热， $C_v$  为定容比热。方程式 (3) 及方程式 (4) 中不仅包括物质热运动的内能，而且还包括化学反应能。在激波关系中  $E = E(P, V)$ ，而在爆轰冲击波关系中由于存在化学反应，因此，能量 E 除了是压力 P 与体积 V 的函数以外，也与化学反应进展所伴随产生的反应能量有关，也就是  $E = E(P, V, \lambda)$ ，其中 λ 为化学反应进展度。λ=0 表示尚未进行化学反应的初始状态；λ=1 表示反应终态。

由方程式 (1) 和方程式 (2) 用无因次参数表达，可以得到火焰速度与波面两侧状态参数的关系式为：

$$\frac{P_1}{P_2} - 1 = \gamma_1 M_1^2 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \quad (5)$$

$$M_1 = \frac{(D_2 - u_1)}{c_1} \quad (6)$$

其中 M 为火焰面相对于前驱冲击波通过后的状态的马赫数，c 为音速。由方程式 (3) 和方程式 (4) 用无因次表示可以得到 Hugoniot 方程式，

$$\left(\frac{P_2}{P_1} + \alpha\right) \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - \alpha\right) = \beta \quad (7)$$

其中

$$\alpha = \frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_2 + 1} \quad (8)$$

$$\beta = \alpha \left[ \left( \frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1} + \frac{2\gamma_1 Q}{c_1^2} \right) - \alpha \right] \quad (9)$$

由方程式 (5) 和方程式 (7) 联立求解，可求得火焰阵面后的气体密度参数与压力参数为：

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\gamma_1(\gamma_2 + 1)}{\gamma_2(\gamma_1 + \gamma_2 A)} \quad (10)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2 \gamma_1 A}{(\gamma_2 + 1)\gamma_1} \quad (11)$$

其中

$$\nu = \frac{1}{M_1^2} = \frac{c_1^2}{(D_2 - u_1)^2} \quad (12)$$

$$A = \sqrt{\left[ \left( \frac{\gamma_1 - \nu}{\gamma_2} \right)^2 - K\nu \right]} \quad (13)$$

$$K = 2 \left[ \frac{\gamma_1(\gamma_2 - \gamma_1)(\gamma_2 + 1)}{\gamma_2^2(\gamma_1 - 1)} + \frac{\gamma_1^2(\gamma_2 - \gamma_1)Q}{\gamma_2^2 c_1^2} \right] \quad (14)$$

在方程式 (10) 中的正号『+』A 及方程式 (11) 中的负号『-』A 对应爆轰支的弱解，而方程式 (10) 中的负号『-』A 及方程式 (11) 中的正号『+』A 对应爆燃支的强解。当 A=0 时，在爆轰支和爆燃支上各有一个唯一的解，这两个解分别被称为 CJ 爆轰解和 CJ 爆燃解。对于 CJ 爆轰解，此时火焰阵面已经赶上前驱冲击波阵面。根据 CJ 理论，只考虑反应的初态和终态，不接触反应区的参数，对于 CJ 爆轰参数，可以通过质量守恒、动量守恒、能量守恒，再加上 CJ 爆轰的条件，联立得出。CJ 爆轰速度或者 CJ 爆燃速度值可以通过唯一解的条件 A=0 得出，其对应的 CJ 压力  $P_{CJ}$  及 CJ 气体体积  $V_{CJ}$  分别为：

$$u_{CJ} = \frac{D - \frac{\gamma_1 P_1}{\rho_1 D}}{\gamma_1 + 1} \quad (15)$$

$$P_{CJ} = \frac{P_1 + \rho_1 D^2}{\gamma_1 + 1} \quad (16)$$

$$V_{CJ} = \frac{\gamma_1 (P_1 + \rho_1 D^2)}{(\gamma_1 + 1) \rho_1^2 D^2} \quad (17)$$

其中

$$D = \sqrt{\frac{2\gamma P_1 + 2(\gamma_1^2 - 1)\rho_1 Q + \sqrt{[2(\gamma_1^2 - 1)\rho_1 Q]^2 + 2\gamma_1(\gamma_1^2 - 1)P_1 \rho_1 Q}}{2\rho_1}} \quad (18)$$

$$\nu_{CJ} = \frac{1}{M_{CJ}^2} = \left( \frac{\gamma_1 + K}{\gamma_2} \right) \pm \left[ \left( \frac{\gamma_1 + K}{\gamma_2} \right) K \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

气体爆燃与爆轰与一般的化学反应主要的差异在于爆燃及爆轰是以反应波的形式按照一定的速度传播前进、自动进行。燃烧反应的能量是经由热传导、热辐射及燃烧气体产物的扩散作用传递到尚未燃烧的反应物；爆轰则是利用爆轰冲击波的强大冲击压缩作用，将能量传递给尚未燃烧的反应物。

传统技艺使用的燃烧反应的传递速度通常低于音速，每秒数毫米到每秒数公尺；爆轰过程的爆轰冲击波传播速度则远大于声速，其速度一般高达每秒数千公尺，例如氢气 (20%) 在空气中的爆炸冲击波速度可达每秒 1700 公

尺。传统的燃烧过程的传播，易受外界条件尤其是环境压力的影响；但是爆轰的爆炸冲击波的传递速度极快，且几乎不受外界条件的影响，其爆轰速度在一定条件下是一个固定的常数。

台湾发明专利 I 448657 號、I 504844 號、及中国发明专利 ZL 2012 1 0143533.6 是利用爆轰理论创造出一种使用爆轰技术进行化学反应的方法及应用该方法的高温脉冲波反应器，利用该发明的高温脉冲波反应器连续产生气体逆流爆轰冲击波，并利用爆轰冲击波的高温高压特性连续进行化学反应，可以有效的应用于半导体产业的全氟化物 PFCs 废气处理、VOC 废气处理、油品或有机固体的高温气化、活性炭制造、人造纳米钻石制造、纳米材料制造、纳米燃料电池制造等广泛的用途。

### PDR 的作动机制

PDR 基本上是一种崭新的自动爆轰反应器，利用安装在高温脉冲波反应器内部的爆轰促进器促进可燃性气体反应物及空气的混合，使得气体混合物在高温脉冲波反应器本体内，均匀的由进料端往反应产物出口方向流动，如图 2 进料步骤 110 至充满步骤 120 所示。当气体混合物抵达安装于爆轰促进器下游端的点火装置组位置时，气体混合物将被点火装置组点燃，如图 2 点燃步骤 130 所示。

由于在点火装置组下游并无可燃性气体，因此，火焰会往高温脉冲波反应器的进料端方向回火，产生逆流火焰，如图 2 爆燃步骤 140 所示；火焰再经过爆轰促进器提供良好的混合，使得该可燃性气体混合物快速燃烧、增温、增压、增速，进而产生逆流爆轰 ( Countercurrent Detonation )，如图 2 爆燃加速步骤 150 所示。爆轰冲击波继续压缩可燃性气体混合物进行反应，并继续加速达到 CJ 冲击波速度，如图 2 爆轰步骤 160 所示。当爆轰冲击波抵达高温脉冲波反应器的进料端时，利用爆轰冲击波的瞬间压力，使得火焰熄焰，如图 2 熄焰步骤 170 所示；由点燃步骤 130 进行到熄焰步骤 170 的速度极快，所需时间只需几毫秒到零点几秒的时间，视爆轰促进器的设计而定。高温脉冲波反应器的反应器出口法兰与后续设备连接，操作时利用爆轰冲击波的反震波将反应产物由反应器出口法兰排出，如图 2 反震排出步骤 180 所示。进行上述过程时，进料均可以稳定的继续进行，并连续重复可燃性气体反应物及空气的混合、点燃、逆流爆轰、熄焰的程序，使得化学反应物能在高温脉冲波反应器内连续利用爆轰冲击波的高温、高压进行反应或被破坏。

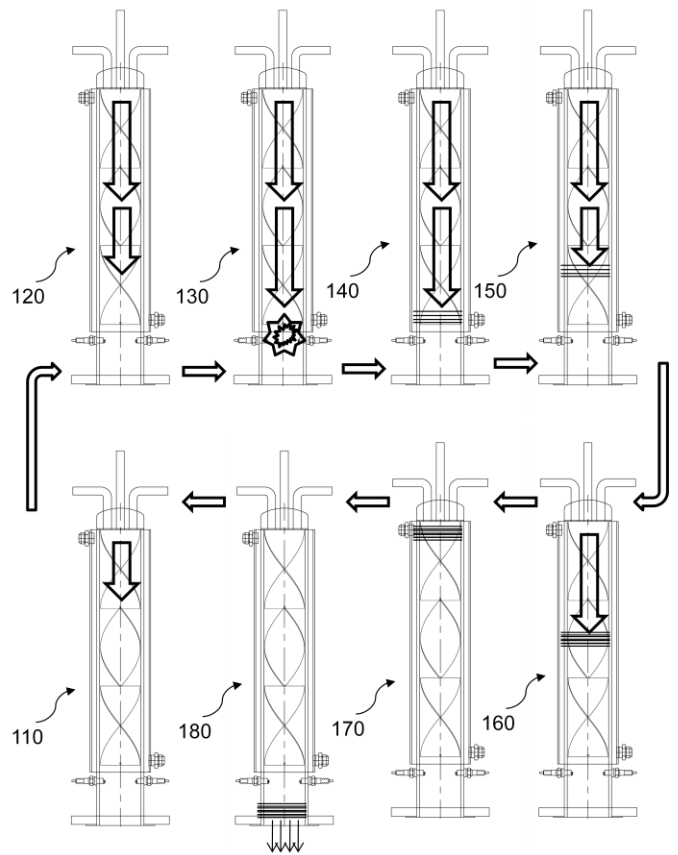


图-2 PDR 作动原理

### PDR-RTO 锅炉

利用 PDR 技术整合 RTO 及废热回收锅炉整合出一个崭新的 VOC 废气处理及能源回收设备，具有以下特色，能有效的协助产业界妥善处理所有含 VOC 废气、回收能源，使得投资能快速回收：

1. 创新的 PDR-RTO 技术，是整合既有的成熟技术，加上实证可靠的高温脉冲波反应器，而构成的符合环保法规要求且运转安全可靠的处理设备。
2. PDR-RTO 基本技术的解析如下：
  - (1)、PDR-RTO 的燃烧室具有用于处理高浓度废气的 PDR 及处理废液的雾化喷嘴：

PDR-RTO 的燃烧室基本技术就是一个具有能源回收设备的直燃式焚化炉 ( DFTO )；

将高浓度 VOC 废气及有机废液直接引入燃烧室焚化，并利用 PDR 的特性，有效控管及安全的处理高浓度且浓度变化较大的 VOC 废气。
  - (2)、PDR-RTO 技术有效利用了 RTO 技术，将低浓度 VOC 废气直接引入 RTO 处理，善用 RTO 的能源回收效率，达到省能源、回收能源的目的。

所使用的蓄熱再生氧化型廢熱回收鍋爐含有至少二個以上的蓄熱槽其內均有陶瓷蓄熱材料堆積成的陶瓷蓄熱床、一高溫氧化反應室位於蓄熱槽上方並與蓄熱槽結合，其內設有高溫脈衝波反應器及熱交換水管群作為能源回收產生蒸汽之用、一蒸汽鼓位於高溫氧化反應室上方，其內具有氣液分離裝置用於收集熱交換水管群所產生的蒸汽及供應蒸汽之用。

(3)、PDR-RTO 的燃燒室具有內置式水管式鍋爐，可以實時將 VOC 及有機廢液燃燒所產生的過剩能源轉化為水蒸汽，除了確保設備安全外，更能經由有效的能源回收，達到投資回收的目的。

PDR-RTO 技術可以利用燃燒室安裝的 PDR 接受火炬的高濃度廢氣；利用 RTO 本體接受後段(兩線干燥床廢氣)VOC 廢氣，並利用高溫燃燒室將 VOC 徹底破壞。

PDR-RTO 技術利用內置式水管鍋爐能夠有效的回收能源。

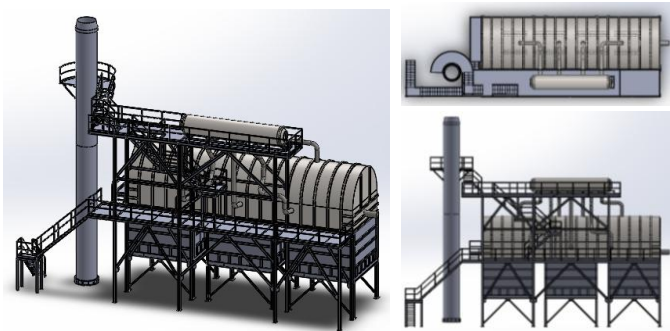


圖-3 PDR-RTO 鍋爐可以同时接受高浓度 VOC 及低浓度 VOC，提供安全有效的处理及高效率的能源回收。

來源	流量 (m³N/h)	VOC 濃度 (ppmV)	溫度 (°C)
LVG Pipeline	330~400	23,000~558,767 極限濃度100%	30-60
Exhaust Gas	35,000	1,000~2,000	50
Future Expansion	35,000	1,000~2,000	50
Average	70,330 m³N/h	1,100~2,100	Ave. Temp. 50°C
Design Basis	1,200 Nm³/min	1,100~2,100	Ave. Temp. 50°C

PDR-RTO 的安全應用，可以利用以上案例做說明，其中廠區有三股廢氣，第一股是高濃度 VOC 廢氣，流量約 350 Nm³/hr，第二及第三股 VOC 廢氣分別是濃度約 1000~2000 ppm 的作業區廢排氣。使用 PDR-RTO 鍋爐加以處理，其中，高濃度 VOC 廢氣由 PDR 導入 RTO 上的燃燒室，低濃度廢氣導入 RTO 進氣系統。

處理效率：VOC 去除率 > 99%

能源回收效率：92~95%

投資回收年限：約 1.5~2.5 年

## 結語

PDR 基本上是一種嶄新的自動爆轟反應器，利用安裝在高溫脈衝波反應器內部的爆轟促進器促進可燃性氣體反應物及空氣的混合，使得氣體混合物在高溫脈衝波反應器本體內，能夠被有效的破壞。然後，結合 RTO 及廢熱回收鍋爐，所使用的蓄熱再生氧化型廢熱回收鍋爐含有至少二個以上的蓄熱槽其內均有陶瓷蓄熱材料堆積成的陶瓷蓄熱床、一高溫氧化反應室位於蓄熱槽上方並與蓄熱槽結合，其內設有高溫脈衝波反應器及熱交換水管群作為能源回收產生蒸汽之用，形成一個具有 VOC 處理及能源回收的高效益處理系統。本項技術具有安全、高處理效率、高能源回收效率的優點。

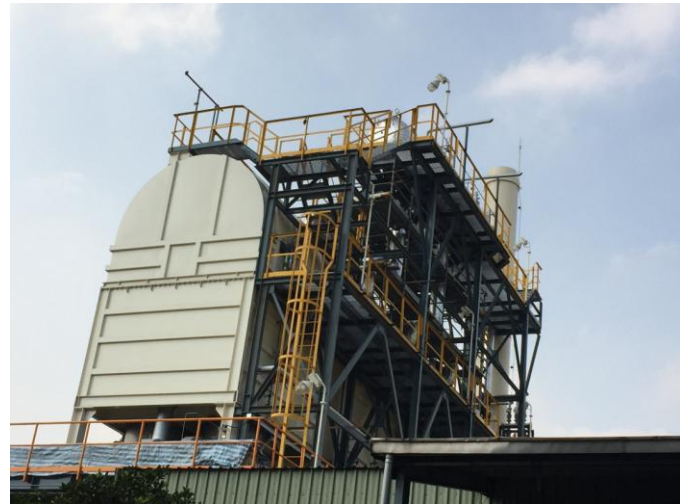


圖-4 PDR-RTO 建廠照片

## 參考文獻

	專利編號	專利名稱
發明專利	I 448657	一種使用氣體逆流爆轟衝擊波的連續化學反應方法及應用該方法之爆轟反應器
新型專利	M440814	用於有害化學廢氣處理的高溫脈衝波反應器
新型專利	M464636	可產生蒸汽的蓄熱再生型氧化器
發明專利	ZL 2012 1 0143533.6	一種連續化學反應方法及應用該方法之爆轟反應器
發明專利	I504844	一種揮發性有機化學廢氣處理並回收能源的方法及使用該方法的蓄熱再生氧化型蒸汽鍋爐