CO₂ 是熱泵系統工質替代中最有潛力的天然工質之一。CO₂ 跨臨界系統氣體冷卻器端的溫度滑移可以與變溫熱源較好的匹配，它在熱泵熱水器方面的應用具有其他供熱方式無法比擬的優勢。日本主要家電公司聯合科研院所紛紛對 CO₂ 熱泵熱水器進行了深入的研究和開發，本文對其研究開發現狀進行了分析，總結了開中存在的問題和關鍵技術。結果表明 CO₂ 熱泵熱水器與電或燃氣熱水器相比較具有較高的性能系統（COP），其商業開發已經初步開始，市場前景極為廣闊。

1 引言

CO₂ 作為製冷工質具有一些獨特的優勢：對環境無害的自然界天然存在的物質（ODP=0，GWP=1）；優良的經濟性，且無回收問題；良好的安全性和化學穩定性，CO₂ 安全無毒，不可燃，適應各種潤滑油及常用機械零部件材料，即便在高溫下也不分解產生有害氣體；具有與製冷迴圈和設備相適應的熱力學性質，CO₂ 的蒸發潛熱較大，單位容積製冷量相當高；具有良好的輸運和傳熱性質，CO₂ 優良的流動和傳熱特性，可顯著減小壓縮機與系統的尺寸，使整個系統非常緊湊。由於 CO₂ 的臨界溫度很低（304.21K），因此 CO₂ 的放熱過程不是在兩相區冷凝，而是在接近或超過臨界點的區域的氣體冷卻器中放熱。在 CO₂ 跨臨界製冷迴圈中，其放熱過程為變溫過程，有較大的溫度滑移。這種溫度滑移正好與所需的變溫熱源相匹配，是一種特殊的勞倫茲迴圈，當用於熱泵迴圈時，有較高的放熱系統，如圖 1 所示。在超臨界壓力下，CO₂ 無飽和狀態，溫度和壓力彼此獨立，能夠實現滿足實際需要的多種控制策略。當蒸發溫度、氣體冷卻器出口溫度保持恆定時，隨著高壓側壓力的變化，循環系統的 COP 存在最大值，通過優化調節可節省壓縮功。與常規製冷劑相比，CO₂ 跨臨界迴圈的壓縮比較小，約為 2.5~3.0，可以提高壓縮機的運行效率，從而提高系統的性能係數。所以前國際製冷學生主席 G.Lorentzen[1]認為 CO₂ 是無可取代的製冷工質，並提出跨臨界迴圈理論，指出其可望在熱泵領域發揮重要作用。（見圖 1）

在世界大多數家庭的能量需求中，約有 1/4~1/3 來源於對熱水的需求。日本在過去 30 年中，家庭對熱水的需求量逐年上升，到 1999 年家用熱水耗能已占家庭總耗能的 34%[2]。因為在日最高溫度低於 0℃ 的寒冷地區，傳統空氣源熱泵的制熱量和效率隨環境溫度的降低下降很快，熱泵的使用受到限制，主要應用燃油和電熱熱水器。由於 CO₂ 熱泵熱水器的低溫性能良好，因此開發 CO₂ 熱泵熱水器市場前景廣闊，意義重大。

2 日本家用 CO₂ 熱泵熱水器的研究開發現狀

在日本，CO₂ 熱泵熱水器以其良好的節能生態性能贏得了“EcoCute（生態精靈）”的稱號。從 2001 年投放市場以來，銷售量穩步上升。由於它價格較貴（超過 5000 美元），從 2002 年 10 月開始採用政府補貼的辦法促進銷售。2003 年日本 CO₂ 熱泵熱水器的產銷量為 7 萬套，預計到 2010 年將達到近 50 萬套，市場發展十分迅速。根據制熱量、水箱容量和地區適應性的不同，現今日本市場上有 16 種不同類型的 CO₂ 熱泵熱水器[3]。（見圖 2）

日本電力工業中央研究院（CRIEPI）與東京電力公司（TEPCO）及 DENSO 公司的 M.Saikawa，K.Hashimoto，K.Kusakari 等人[4]合作於 1998 年 9 月開始進行 CO₂ 熱泵熱水器的基礎理論研究，通過對其進行的性能計算及相應的迴圈特性理論分析，得出 CO₂ 熱泵熱水器的性能高於傳統工質熱磁的結論。

1999 年，M.Saikawa，K.Hashimoto，K.Kusakari 等人建起了 CO₂ 熱泵熱水器（8035100cm）原型機實驗台。原型機的額定供熱功率為 4.5kW，所用壓縮機為直流變頻電動機驅動的半封閉渦旋壓縮機，所用的膨脹閥由針閥和步進電機組成，可以將膨脹閥由關閉到完全打開分為 400 級，便於對膨脹閥開度的控制。在對原型機的性能測試中分別測了膨脹閥開度對系統性能的影響和膨脹閥開度對氣體冷卻器溫度隨供熱量的變化輪廓的影響。空氣熱源的溫度選取東京冬季 23 點到 7 點的平均溫度值，這 8 個小時為用電低峰期，自來水溫度 8.3℃，熱水溫度 65℃，結果表明：隨膨脹閥開度的增大（80~160 級），壓縮機出口壓力下降，供熱量下降，輸入電功率下降，COP 逐漸上升，膨脹閥開度增大到 110 級後趨於常數，約為 2.7。膨脹閥的開度分別調為（90、110、149）級以進行對比，氣體冷卻器中 CO₂ 出口處與水入口處的溫差由小變大，CO₂ 隨供熱量變化的溫度曲線拐點處溫度與水的溫度差由大變小，因為此時壓縮機出口處的壓力由高變低。

2000 年，他們又對原型機進行了改進，並在 DENSO 人工環境實驗室按照東說冬季工況進行了測試。改進型 CO₂ 熱泵熱水器：熱泵單元（813164cm），熱水箱單元（9540130cm，200litters）。

測試參數如下：空氣熱源溫度 3.3℃，自來水溫度 7.2℃，熱水溫度 88.1℃，水流率 0.783L/min，CO₂ 壓縮機的出口壓力 11.6MPa，入口壓力 2.9MPa，CO₂ 質流率 56.7kg/h，供熱功率 4.44kW，壓縮機所耗電功率 1.59kW，則 COP 為 2.79。

可見改進型 CO₂ 熱泵熱水器的性能係數比原來提高了不少。他們還在 TEPCO（東京電力公司）對改進型 CO₂ 熱泵熱水器的全年平均性能係數進行了測算，結果表明包括風扇和水泵耗功在內的全年系統平均 COP 值仍可高達 3.0，而且改進型系統在外界空氣熱源為零下 20℃時，系統仍可提供高達 90℃的熱水。他們認為雖然該系統還需在細節上進行完善，但是技術開發已基本可以結束，市場前景廣闊。2001 年 1 月再次進行了改進，並且已於 2002 年推向市場，其外形如圖 3、4 所示

日本三洋電器公司研發總部生態能源系統研究中心的 HiroshiMukaiyama 等人[5]研製了一台供熱功率為 4kW 的家用 CO₂ 熱泵熱水器。他們採用帶 20~120Hz 的變頻電動機的雙級滾動活塞壓縮機，較有特色。室外熱交換器因為要承受較高的壓力，故採用外徑 7.0mm，壁厚 0.8mm 內壁光滑的銅管。為防止除霜後的水重新結冰，將從氣體冷卻器出來的高壓工質通到室外蒸發器的底部，即使在日本較冷的地區（Hokkaido）測試也沒有發現有重結冰現象發生。

他們[6]在恆溫室中對該系統在不同溫度、濕度的性能進行了測試。計算結果表明 CO₂ 熱泵熱水器總有效溫室效應指數（TWEI）比其他方式的熱水器降低了近一半。在考慮供水泵和室外風扇耗功的情況下，系統年均供熱 COP 隨氣體冷卻器中熱水出口溫度的升高而下降，本文作者根據其實驗結果擬合出公式： $COP_h = -0.0325t + 5.632$, $t = [65^\circ\text{C} \sim 95^\circ\text{C}]$ 。

2002 年，日本大金公司[7]推出了採用單級擺動轉子式壓縮機的 CO₂ 熱泵熱水器（見圖 6）。系統額定耗功 1.21kW，蒸發器置於室外，可提供 65~90°C 的熱水，儲水箱容量為 300 升/370 升，其額定制熱量 4.5kW，標準狀況下（室外空氣溫度 16°C/12°C，進水溫度 17°C，出水 65°C）COP 可達 3.72，雜訊 45 分貝。同期，松下也推出了自己的水箱容量為 370 升的 CO₂ 熱泵熱水器。（見圖 6）

日本東京大學環境研究所 JianfengWang 和 EijiHihara[8]對 CO₂ 熱泵熱水器建立了住址模型並與 R22 熱泵熱水器進行了對比運算。仿真結果表明：CO₂ 熱泵熱水器的 COP 小於 R22 熱泵熱水器；當帶有內部熱交換器時，將達到與 R22 熱泵熱水器相當的水準，但是壓縮機出口溫度將會明顯上升，最優冷凝壓力下的供熱量也會明顯下降。由於其仿真的結果未經實驗驗證，該模型尚有待進一步完善。

3 CO₂ 熱泵熱水器的問題與對策

CO₂ 熱泵熱水器所面臨的問題主要在於繼續提高效率和不斷降低成本。技術進步與工業化批量生產是降低成本的主要動力，而效率的提高則只能依賴於技術的進步。目前來說，CO₂ 熱泵熱水器提高效率的主要途徑有以下幾條：

① 新型高效 CO₂ 壓縮機的開發與改進。例如，以日本三洋公司開發的雙級滾動活塞壓縮機為代表的雙級壓縮機使結構更緊湊，系統佈置更靈活，而且雙級壓縮會減小壓差，減小洩露和機械損失，能夠顯著地提高系統效率和壓縮機的效率，將是未來壓縮機發展的一個方向（見圖 5）。另外日本 DENSO 公司和 Daikin 公司等也在努力開發新型高效 CO₂ 壓縮機。

② 膨脹壓縮機的研製。在 CO₂ 跨臨界迴圈中，降低膨脹部分的損失，是解決效率的有效途徑。利用膨脹機的輸出功率驅動壓縮機完成壓縮過程，使膨脹機與壓縮機組成一體而形成膨脹壓縮機，這種膨脹壓縮機將成為 CO₂ 迴圈中特有的組成部分。

③ 高效 CO₂ 跨臨界迴圈換熱器的研製。例如日本三洋公司開發的防止重結冰的新型換熱器。

④ 合理利用低品味能源或可再生能源並探討熱水供應與其他供熱方式的耦合問題。

⑤ CO₂ 熱泵熱水器先進控制方式的研究。

4 結論

CO₂ 熱泵熱水器與傳統燃氣熱水器相比具有低能耗（一般可節能約 30%），對環境友好的優點；與傳統熱泵熱水器相比具有供熱水溫度範圍大，能提供高溫熱水的優點。

將 CO₂ 熱泵與儲水箱組合可以利用夜間低谷電，提高系統經濟性。若將 CO₂ 熱泵熱水器與蓄熱系統組合，可使儲水箱體積減小，則整個系統更為小巧輕便。開發適於 CO₂ 熱泵熱水器的高效壓縮機和耐用高壓的高效換熱器以及完善的控制策略將是以後 CO₂ 熱泵熱水器研究的三大重點。相信隨著技術的不斷進步，CO₂ 熱泵熱水器將會以其特有的優勢成為 21 世紀熱水器市場上最為耀眼的明星。