

高沸点冷媒HF0/HCF0系の水平管内沸騰・凝縮熱伝達 および圧力損失

著者	劉 宇飛
学位名	博士(工学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2020
学位授与番号	12614 博甲第574号
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001983/

博士学位論文要約 Summary

専攻 Major	応用環境システム学専攻	氏名 Name	劉 宇 飛
論文題目 Title	高沸点冷媒 HFO/HCFO 系の水平管内沸騰・凝縮熱伝達および圧力損失		

1 研究背景および目的

モントリオール議定書の改正により、冷凍空調機器に使用される冷媒は現行の HFC 系冷媒に代わる新規の低温温室効果冷媒およびそれら新冷媒を適用した冷凍空調機器の開発が急務となっている。家庭用空調機に使用されている冷媒 R32 や R410A は臨界温度が低く、作動圧力が高いため、高温水や蒸気を生成するヒートポンプ機器およびバイナリー発電装置の作動媒体には適さないことから、臨界温度が高く、温室効果が小さい作動圧力が低くなる HFO および HCFO 系高沸点冷媒の開発が進められている。一方、冷凍空調機器の運転時の二酸化炭素排出量削減のためには、システム性能の向上が必要であり、システム性能に左右する比重の大きい熱交換器の高性能化は必要不可欠である。熱交換器性能の高性能化として、冷媒側伝熱促進は管内面に微細な溝加工を施したら旋状の溝付管が開発されており、空気側の伝熱促進を図るとともに単位面積当たりの伝熱促進の増大が図られている。

溝付管に関する伝熱性能や溝形状の影響については多数の研究が報告されているが、対象とする冷媒は HCFC および HFC 系であり、新規冷媒の HFO および HCFO 系冷媒の熱伝達および圧力損失特性に関する詳細な研究は少なく、次世代熱交換器の熱設計やサイクル性能解析を行う際に必要となるそれらの冷媒伝熱特性の把握は十分とは言えない。

そこで本研究では、高温用ヒートポンプやバイナリー発電サイクルに適用できる低 GWP 冷媒の沸騰および凝縮熱伝達および圧力損失特性を実験的に検証し、次世代の熱交換器設計に有用なデータベースの構築を行うとともに、溝付管による伝熱促進効果、これまでに提案されている平滑・溝付管内の熱伝達および圧力損失に関する整理式の適用性を検証したのちに、最適な予測式の提案を行った。実験では、外径 9.52 mm の平滑管と溝形状が異なる 2 種類の溝付管を使用し、HFC 系の R134a や R245fa の代替候補である低 GWP 冷媒の HFO 系 R1233zd(E), R1336mzz(E), R1336mzz(Z), HCFO 系 R1224yd(Z) およびそれら混合冷媒を対象に行った。

2 実験方法

実験装置は、ギヤポンプにより冷媒を圧送する強制循環ループである。冷媒循環ループは、冷媒ポンプ、コリオリ式質量流量計、水予熱器、電気予熱器、テストセクション、冷却器および液溜めで構成されている。水予熱器、テストセクション、冷却器および液溜めにはそれぞれ所定の温度および流量に調整された熱源水を供給している。水予熱器では液冷媒と熱源水の熱交換により、所定の飽和温度以下の温度となるように調節し、水予熱器出口のサイトグラスにて冷媒のサブクール液状態を確認する。水予熱器を出た液冷媒は電気予熱器にて冷媒の一部を蒸発させる。冷媒の熱平衡クオリティは電気予熱器の投入電力量によって調整され、テストセクションで蒸発もしくは凝縮される。冷媒流量は主に冷媒ポンプの回転数で調整され、テストセクション入口圧力が一定となるように冷却器の冷水温度を調整した。混合冷媒の実験では、ポンプ出口に設置したサンプリングポートにて、循環冷媒をベッセルに採取し、ガスクロマトグラフで組成分析した。

3 実験結果

第4章では、純冷媒 R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(E) および R1336mzz(Z) の平滑管および溝付管の沸騰流の実験を行い、摩擦圧力損失および沸騰熱伝達率の実験結果を示すと同時に、先行研究で

提案されている整理式との比較を行った。

第5章では、従来の整理式で比較的良好な相関を示した森らの整理式をもとに、低圧冷媒の水平平滑管の沸騰熱伝達率を最適に相関する整理式を示した。本整理式は、本研究で得られた R245fa, R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(E), R1336mzz(Z)の実験値に加え、他の研究者によって報告された高沸点冷媒の実験値についても良好な相関を示した。

第6章では、純冷媒 R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(E)および R1336mzz(Z)の平滑管および溝付管の凝縮流の実験を行い、摩擦圧力損失および凝縮熱伝達率の実験結果を示すとともに、先行研究で提案されている整理式との比較を行った。

第7章では、平滑管に対して適用できる凝縮熱伝達率の整理式を示した。凝縮熱伝達率は、平滑管に蒸気せん断力が支配的な強制対流凝縮項で表面張力を考慮し、重力の影響が強い自由対流凝縮項ではヌセルトの水膜理論に基づき断面における液膜面積をポイド率で相関して、それぞれの項を実験データにより最適化を行った。

第8章は、非共沸混合冷媒 R245fa/R1234ze(E)の平滑管および溝付管の沸騰・凝縮流の摩擦圧力損失および熱伝達率の実験結果を示すとともに、冷媒組成による温度グライドが伝熱特性に及ぼす影響を実験的に検証し、非共沸性の影響について考察した。

第9章は、非共沸混合冷媒 R1336mzz(E)/R1336mzz(Z)の平滑管および溝付管の沸騰・凝縮流の摩擦圧力損失および熱伝達率の実験結果を示すとともに、純冷媒 R1336mzz(E), R1336mzz(Z)および R245fa と比較し、伝熱特性を検証した。

4 総括

以下に、本論文で得られた主要な結果を示す。

- (1) 平滑管および溝付管の沸騰流および凝縮流における摩擦圧力損失は、従来提案されている整理式で予測可能である。
- (2) 平滑管の沸騰熱伝達率は、質量速度が $100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以下では R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(E) および R1336mzz(Z)の同程度である。質量速度 $100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の高クオリティ域および $200 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の場合、R1336mzz(Z)は、他の冷媒に比して2.4倍程度と高い値を示した。溝付管の沸騰熱伝達率は、質量速度 $100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上では R1224yd(Z)および R1233zd(E)は、他の冷媒に比して2.0倍程度と高い値を示した。平滑管における凝縮熱伝達率は、流動様相によって異なり、せん断力の影響が支配的となる強制対流凝縮域では熱伝達率は顕著に増加する。従来提案されている整理式は、層状流域で冷媒種類の相違によって予測傾向が異なっている。
- (3) 平滑管の沸騰熱伝達率は、対象とした高沸点冷媒の相違によって特性が異なり、従来の整理式で予測精度不十分である。溝付管の沸騰熱伝達率は、従来の整理式による予測値は溝形状の相違により予測精度が異なり、溝形状による促進効果を予測するには不十分である。従来提案されている整理式による溝付管の凝縮熱伝達率の予測値は、いずれも溝形状の相違により予測精度が異なり、溝形状による促進効果を予測するには不十分である。
- (4) 平滑管および溝付管における熱伝達率は、純冷媒 R245fa および R1234ze(E)よりも小さく、R1234ze(E)の質量分率の増加に伴って温度グライドが増大し、低下する。
- (5) 平滑管および溝付管の沸騰熱伝達率は、R1336mzz(Z)は全質量速度域において R245fa の0.5から0.8倍低い値を示し、R1336mzz(E)は R245fa の0.4から0.7倍低い値を示した。非共沸混合冷媒 R1336mzz(E)/R1336mzz(Z)の沸騰熱伝達率は、温度グライドの影響でさらに低くなり R245fa の0.3から0.5倍低い値を示した。平滑管および溝付管の R1336mzz(Z)の凝縮熱伝達率は、沸騰流と異なり、R245fa と同程度の値を示した。R1336mzz(E)は、R245fa の0.6から0.8倍低い値を示した。非共沸混合冷媒 R1336mzz(E)/R1336mzz(Z)の凝縮熱伝達率は、温度グライドの影響で低湿度域では R245fa の0.3から0.5倍低い値を示した。