

4 mm水平細径溝付管内における低GWP冷媒の凝縮熱伝達と圧力損失の予測手法

著者	広瀬 正尚
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	2019
学位授与番号	12614 博甲第534号
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001804/

博士学位論文内容要約

申請者氏名：広瀬正尚（学籍番号 1662016）

論文題目：4 mm 水平細径溝付管内における低 GWP 冷媒の凝縮熱伝達と圧力損失の予測手法

冷凍空調機器に使用される冷媒に関する国際的規制は、地球温暖化を防止するパリ協定の影響を受け強化の一途をたどり、モンテリオール議定書のキガリ改正によって総量規制が現実化された。そのような状況下で、家庭用空調機をはじめとする様々な冷凍・空調機器では、冷媒充填量削減のため、熱交換器の小型化を図り、その性能を向上させることが求められている。その一つの方策として、熱交換器用伝熱管の細径化が進められており、近年では外径 5 から 4 mm の細径伝熱管が商用化され始めている。従来の HFC 系冷媒および 6 mm 以上の管径を有する溝付管の研究は多数見られるが、実用途上にある外径 4 mm 程度の細径溝付管に関する研究は限定的である。

本研究では、外径 4 mm、等価直径 3.5 mm の細径溝付管を対象とし、溝形状の異なる 3 種類の溝付管と平滑管内の HFC 系冷媒 R32 および地球温暖化係数 (GWP) が小さな HFO 系冷媒 R1234ze(E) の凝縮実験を行った。凝縮熱伝達および圧力損失特性を明らかにするとともに、溝形状が伝熱性能に与える影響を実験的に検証し、これまでに提案されている平滑・溝付管内の凝縮熱伝達および圧力損失に関する予測式の適用性について検討した。

実験では蒸気圧縮式ヒートポンプサイクルを模した装置を用い、圧縮機、油分離器、予冷器、熱伝達・圧力損失測定実験用テストセクション、流動様相可視化セクション、過冷器、質量流量計、膨張弁、蒸発器で構成される。各熱交換器は二重管式熱交換器であり、管内を冷媒が、環状部を冷却水/加熱水が流れる。実験には、等価直径 3.5 mm 程度の平滑管および溝形状の異なる 3 種類の溝付管を用いた。試験冷媒には、HFC 系冷媒 R32 と HFO 系冷媒 R1234ze(E) を用いた。測定は、質量速度 50 から 400 kg m⁻²s⁻¹ の範囲で行い、飽和温度が 35 °C となる条件で行った。

流動様相の観察実験

冷媒 R32 および R1234ze(E) の細径平滑・溝付管内の流動様相の観察結果を述べるとともに、従来の流動様式線図と比較した。そして、細径平滑・溝付管内の流動様相を環状流、波状流、スラグ流の 3 種に分類した。また、平滑管の場合は、質量速度 200 kgm⁻²s⁻¹ 以上で環状流が観察されたが、溝付管では平滑管と異なり、質量速度 100 kgm⁻²s⁻¹ の条件でも低湿度域で環状流が観察された。そして、溝付管の環状流から波状流への遷移は、Jige らの式(2018)で予測可能であることを示した。

圧力損失の実験結果

R32 および R1234ze(E) の細径平滑・溝付管内の圧力損失の実験結果を述べるとともに、これまでの先行研究で提案された予測式と比較を行った。その結果、R32 は R1234ze(E) に比して 30% 程度小さい値を示したが、これは R1234ze(E) の蒸気密度が R32 より 40% 小さいことに加え、R1234ze(E) の液粘度が R32 に比して 1.6 倍大きいことから、R1234ze(E) は管内蒸気速度による摩擦損失が大きいためと考えられる。また、平滑管の圧力損失は地下-小山(2012)の式、溝付管の圧力損失は井上ら(2008)の式でほぼ予測可能であることを示した。

凝縮熱伝達率の実験結果

R32 および R1234ze(E) の細径平滑・溝付管内の凝縮熱伝達の実験結果を述べるとともに、溝形状の相違による熱促進効果について述べ、さらにこれまでに提案された予測式と比較を行い、その適用性について述べた。そして、凝縮熱伝達率と流動様相の遷移は密接な相関があり、環状流が観察された領域では、質量速度が増加するのに従い凝縮熱伝達率は増加し、強制対流凝縮の影響が強くみられた。一方で波状流、スラグ流域では、質量速度の違いによる凝縮熱伝達率への影響は小さく、自由対流凝

縮の影響が大きかった。平滑管の凝縮熱伝達率は、これまでの予測式を適用可能であるが、溝付管の熱伝達率を精度よく予測することは難しいことを示した。

新たな細径溝付管の圧力損失および凝縮熱伝達率の予測式

細径平滑・溝付管に対して適用できる圧力損失および凝縮熱伝達率の予測式の提案を行った。新たな圧力損失の予測式では、平滑・溝付管を一つの式で相関することができる予測式を提案し、平滑・溝付管の圧力損失をほぼ±30%で予測できることを示した。

凝縮熱伝達率の予測式は、予測精度を重視し平滑管、溝付管のそれぞれで現象モデルに基づき、流動様相と細径化による表面張力の影響を考慮した予測式を提案した。その結果、平滑管の凝縮熱伝達率の予測式は、実験値を±30%で予測できることを示した。また、溝付管の凝縮熱伝達率の予測式は、実験値を±30%で予測し、管径の異なる他の研究者の実験値と傾向は一致していることを示した。

非共沸混合冷媒 R32/R1234ze(E)の細径管内凝縮

必要な性能を確保した冷媒の低 GWP 化のための混合が必要となっている。例えば、様々な用途で使用される R134a の代替として R1234yf が登場し、低圧冷媒として使用されている R245fa の代替として R1233zd(E)や R1224yd が登場している。一方で、低温用や家庭用空調機で使用されている冷媒は R22 の代替として、R404A, R407C, R410A (用途を限り R32 に移行) が普及しているものの、これに代わる単成分の有効な候補冷媒は現状では存在していない。そのため、現状では 2 種類以上の冷媒を混合した混合冷媒が代替候補冷媒として開発されている。本研究では、家庭用空調機等で広く使用されている R32 と GWP が小さい HFO 系冷媒である R1234ze(E)の混合冷媒、非共沸混合冷媒 R32/R1234ze(E)の凝縮特性について、純冷媒 R32 および R1234ze(E)と比較し、非共沸性が凝縮熱伝達に及ぼす影響について検討した。また、混合組成の伝熱性能への影響を実験的に検証し、温度グライドの凝縮熱伝達率への影響を明らかにした。実験では、露点温度と沸点温度の平均温度が 35℃となる条件下で行った。また、実験の解析等に必要となる冷媒の循環組成は、実験装置の質量流量計直後に設けたサンプリングポートより直接ベッセルに冷媒液を少量取得し、ベッセルを加熱して冷媒蒸気をガスクロマトグラフへ送り計測した。

その結果、混合冷媒の圧力損失は、物性値の影響により R32 より増大する。また、細径平滑・溝付管の混合冷媒の凝縮熱伝達率は、質量速度の増加にともない増加し、温度グライドが大きくなると純冷媒に比して低下することを明確に示した。また、純冷媒を対象とした予測式でも、混合冷媒の平滑細径管、溝付細径管の圧力損失の実験結果をおおむね予測することは可能であるが、凝縮熱伝達率を予測することはいずれの管でも困難であることを示した。