

学位論文審査報告

白石, 仁士

<https://hdl.handle.net/2324/16586>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 22 (1), pp.43-45, 2000-06. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

学位論文審査報告

氏名(本籍) 白石仁士(愛媛県)
学位記番号 総理工博乙 第296号
学位授与の日附 平成11年12月28日
学位論文題目 中空糸膜を用いた真空脱気装置の研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 速水 洋
(副査) 〃 〃 松尾 一 泰
〃 〃 〃 今石 宣 之

論文内容の要旨

本論文は、気体透過性の高分子中空糸膜を利用して水中の溶存酸素を脱気し、各種配管などの酸化腐食対策とする目的で開発された脱気装置に関するもので12章からなる。第1～4章までは脱気技術の基礎として脱気理論および脱気装置の基本技術を述べ、第5～8章は水封式真空ポンプの高性能化として、本論文の主要テーマである脱気装置に用いる水封式真空ポンプについての各種条件の吸込特性に関する研究を述べた。また、第9～12章までは脱気装置の工業への応用として、各種の目的によって構成される脱気装置のシステムと目的に対する効果を述べた。特に第11章は主テーマである水封式真空ポンプの封水冷却による過給効果について真空ポンプの性能試験では計測が困難であった低い空気分圧、微量な質量流量のものを超脱気実験から定量的分析を行った。

第1章では、まず、脱気に必要な基本的な二つの法則すなわちダルトンの分圧の法則とヘンリーの法則をあげた後、各種の脱気方法を比較しそれぞれの特徴を述べた。

第2章では脱気膜に関して、気体透過性の高分子材料の種類とその気体透過特性に関して4-メチルペンテン-1をあげて、この材料を用いた供試中空糸脱気膜の電子顕微鏡写真で膜の構造を示し、約0.2 μm の非常に薄い緻密層とそれを支えるスポンジ状の支持層の存在を示した。

第3章では、中空糸脱気膜の内部を水が流れ、外部を真空ポンプにつないで脱気する場合について、中空糸の管内の水中を気体が拡散して膜面に到達するまでの気体透過速度と膜部分を通過する気体透過速度を理論と実験により解析した。その結果全体としての総括透過速度を支配するものは、水中を気体が拡散する透過速度であることが明らかになった。

第4章では、中空糸脱気膜に通水した時の脱気気体の物質収支から脱気処理後の溶存気体濃度を求める脱

気計算式を得た。そして、供試脱気モジュールにおける脱気計算式と実測との比較を行い計算式の妥当性を検証した。

第5章では、真空脱気装置に要求される、水および水蒸気と共存する気体の脱気に適した真空ポンプとして取り上げた水封式真空ポンプの特性の解明についての研究結果を述べた。

なお、水封式真空ポンプはほぼ放射状の羽根を持つ羽根車を円形のケーシングに偏心して取り付け回転させ、適量の水を供給してケーシング内にほぼ同心の水層を作るものである。羽根車が偏心しているために、隣接する2枚の翼と両側壁とで作られる空間内を羽根車の回転に伴って水面が上下するから、水面がピストン、羽根間の空間(羽根室と称す)をシリンダとする往復動空気圧縮機と見なすことができる。水封式真空ポンプは脱気装置に使用する場合には飽和状態に近い湿り空気を吸引するから、吸気中の空気成分についての吸込特性が水蒸気分圧によってどのように変化するかを検討することが必要とされる。従来水封式真空ポンプの性能試験方法は、吸気中の水蒸気分圧が無視されて、ポンプ内部にある封水の飽和蒸気圧の分だけポンプ内部の空気分圧は吸気圧力よりも低いとして、真空ポンプ特性曲線を封水温度毎に修正するのが普通であった。しかし、吸気中の水蒸気分圧が無視できない場合には、その分圧とポンプ封水の飽和水蒸気圧の両者を適切に考慮する事が必要である。

まず、基本的な条件として乾燥空気を吸引して、異なる封水温度での水封式真空ポンプ内の水蒸気や吸引された非凝縮性気体の状態変化について考察してポンプの吸込特性を明らかにした。吸込圧力から第1ケーシング内の封水温度における飽和水蒸気圧の β 倍を差し引いた圧力をポンプ内部の空気分圧として、その分圧の空気について非凝縮性気体の圧縮が行なわれると仮定すれば、本試験では $\beta=0.92$ とすることによって封水温度10～40 $^{\circ}\text{C}$ の全実験範囲について共通の吸込特性曲線が得られることを示した。これは、吸込管内の乾燥空気の羽根室内への流入がポンプ内部の封水の水蒸気によって妨害されて吸込性能が低下し、一方でポンプ内部の水蒸気については飽和蒸気圧に達する前に吸気行程が終了して蒸発が未完で終わるものと理解される。

第6章では、実際の使用条件を想定して封水温度と等しい温度の湿り飽和空気を吸引する場合についてポンプ特性を調べた。羽根室内に存在した水蒸気の影響により湿り空気の流入が妨げられる結果、羽根室内の空気分圧は吸込管内の空気分圧よりもやや低く、飽和湿り空気を吸引した本試験では封水温度に関係なく吸込管内空気分圧の $\gamma(=0.9)$ 倍であることを示した。

第7章においては、水封式真空ポンプが飽和湿り空気を吸引する場合に、吸引空気の温度よりも封水の温度を低くした時の見かけ上のポンプ吸気性能の向上について検討を加えた。

加湿器内または吸込管内とポンプ羽根室内との蒸気圧力差によって、混合気はポンプに向かって流動し、吸込管内の空気はより高い空気分圧に抗してポンプ羽根室に流入するので、空気はポンプに過給される。その圧力増加量は流入通路が極めて広くて、圧力損失がなく、ポンプ羽根室内では封水により直ちに冷却されてその水温の飽和蒸気圧までなるような理想的な場合には空気分圧の上昇は水蒸気分圧の降下量に等しくて大きくなるが、実際には増加する流量に伴って管路抵抗が増加し、かつまた凝結蒸気量の増加の対応も困難であるので、空気の流入流量が制限される結果、圧力比は理想的な圧力比より小さいことを示した。また、吸込空気分圧が封水の蒸気圧と同程度の場合に対し、羽根室内の空気分圧を表す実験式を導き封水冷却時のポンプ性能の予測を可能とした。

第8章は、第5～7章で述べた水封式真空ポンプの吸引特性において、吸込管から羽根室内までの蒸気分圧と空気分圧の変化を線図で表すことで、現象を理解しやすい形で視点を変えて説明した。

第9章は溶存酸素濃度 0.5ppm の低濃度脱気では単段のモジュールと1台の水封式真空ポンプの組み合わせで十分目的が達成されることを理論的に示した。ついで、小型ボイラにおける腐食機構と各種の防食法などを比較した後、本脱気法を適用した場合のシステムの問題点を述べた。

第10章はビル配管が錆びて赤水が出る場合の対策として、水温と水中の酸素濃度と腐食速度の関係を示して脱気による防食がはなはだ有効であることと、また適度の酸素濃度を保つために合理的な省エネルギー運転法を実施して成果が得られたことを示した。

第11章は到達空気分圧が 2.6kPa 程度の水封式真空ポンプを多段に適用し封水冷却による空気の過給効果を利用する真空ポンプシステムとプレ脱気モジュールと超脱気モジュールの2段階脱気システムからなる超脱気装置の脱気試験により、超脱気モジュール部の空気分圧が 0.7Pa、処理水の溶存酸素濃度 $0.25\mu\text{g}/\text{l}$ の超脱気を実現できることを示した。多段に配列したときの各真空ポンプの吸込性能を空気分圧—空気量線図上に表し、試験条件における各真空ポンプの運転点と、脱気試験から得た各脱気モジュール部の空気分圧を同線図上で求めて、第7章では計測できなかった極めて低い空気分圧における封水冷却による過給効果を定量的に示した。

第12章では、その他の応用例として液体中に存在す

る気泡による障害について述べその対策としても本装置による脱気が適切に対応できることを示した。

論文調査の要旨

水中の溶存酸素は、水道管、ビル配管やボイラ内の錆発生、腐食のみならず、現像行程や超音波洗浄などに大きく影響を与える。さらに、オゾン層破壊防止などの地球規模環境問題の観点から、半導体製造における洗浄液をフロンから超純水へ移行することが不可欠であるが、溶存酸素による酸化膜生成の抑制が重要な課題のひとつである。従来はそれぞれの場合に応じて、熱的脱気、不活性ガスへの置換、化学処理などの対策が講じられてきた。このような背景の中、高性能の超脱気装置の開発が強く望まれている。

本論文は、最近長足の進歩を遂げている高分子気体透過性中空糸膜に着目し、脱気装置の性能向上に関して、この中空糸膜と水封式真空ポンプを組み合わせた真空脱気装置を開発し、半導体プロセス用超脱気装置適用例をまとめたもので、本研究で示された特色ある結果ならびに知見は以下の通りである。

(1) 中空糸膜の外部を真空ポンプにつないで脱気する場合について、中空糸管内の水中を気体分子が拡散して膜面に到達するまでの気体透過速度と膜部分を通過する気体透過速度を理論と実験により解析している。その結果、全体の気体透過速度は前者の拡散透過速度に支配されることを明らかにしている。さらに、中空糸脱気膜に通水した時の脱気気体の物質収支から脱気処理後の溶存気体濃度を求める脱気計算式を示し、計算式の妥当性を供試脱気モジュールにおける実測結果と比較検証している。

(2) 水封式真空ポンプを脱気装置に使用する場合には飽和状態に近い湿り空気を吸引することから、吸気中の水蒸気分圧を無視した従来の水封式真空ポンプの性能試験方法は不十分であることを示し、その分圧とポンプ封水の飽和水蒸気圧の両者を適切に考慮することの必要性を示している。すなわち、乾燥空気を吸引する場合には、封水温度 $10\sim 40^{\circ}\text{C}$ の全実験範囲において羽根室内の水蒸気分圧は封水温度の飽和蒸気圧の0.92倍であり、これはポンプ内の水蒸気が飽和蒸気圧に達する前に排気行程が終了して蒸発が未完で終わるため、これにより吸込管内乾燥空気の羽根室内への流入が妨害されて吸込性能が低下すると、説明している。

(3) 次に、実際の使用条件を想定して、封水と等しい温度の湿り飽和空気を吸引する場合についてのポンプ特性を調べている。その結果、羽根室内の水蒸気の影響により湿り空気の流入が妨げられ、羽根室内の空気分圧は封水温度に関係なく吸込管内の空気分圧の

0.9倍であることを明らかにしている。

(4) 封水温度を吸引飽和湿り空気の温度よりも低くすることにより吸引気体の水蒸気が真空ポンプ内で凝縮するが、このことによってポンプ吸気性能が改善される過給効果が得られることを明らかにしている。ただし、過給圧比に比例して移動蒸気量も増加するので、管路抵抗や凝結限界により圧力比は理想的な圧力比より小さいが、封水冷却は湿り空気を吸引して高真空を実現する上での不可欠な要素であることを明らかにしている。

(5) 到達真空度が 2.6kPa の水封式真空ポンプを直列 3 段に配置し、封水冷却による空気の過給効果を利用した直列 2 段脱気モジュール部を用いて溶存酸素濃度 $0.25\mu\text{g}/\ell$ の超脱気の実用化に成功している。また、このときの各真空ポンプの運転点と実験値から求めた脱気モジュール部の空気分圧を線図上で表して過給効果を定量的に検証している。

以上要するに本論文は、真空脱気装置に高分子中空糸膜と水封式真空ポンプを採用することにより高効率化ならびに超脱気化に成功するとともに、その効果を流体力学的に明らかにし、かつ実用化例を示したもので、環境エネルギー工学および真空ポンプ工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の

学位論文に値するものと認める。

試験の結果の要旨

本論文に関して調査委員から、水封式ポンプを利用するメリット、ポンプ内部の空気分圧の推定法の一般性、回転数の影響、ポンプペーンと容器間の間隙の影響、モジュールからの蒸発量、拡散方程式などについて質問がなされたが、いずれも著者からの確かな回答があった。

また、公聴会においては、学内外から多数の出席者があり様々な質問がなされたが、いずれも著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上の結果から、著者は試験に合格したものと認めた。

学力確認の結果の要旨

口頭により試験を行った。流体工学、気体力学、化学工学などに関して試問を行った結果、十分な学力があり、かつ研究者として自立して研究活動を行うのに必要な能力を有するものと認めた。

外国語の学力に関しては、本人が発表した英文論文からみて十分な学力を有するものと判定した。

