

国土舘大学審査学位論文

「博士学位請求論文の内容の要旨及び審査結果の要旨」

「大型常圧焼結炭化ケイ素材料の

熱的用途への適用に関する研究」

酒井 幸文

氏名 酒井 幸文
学位の種類 博士(工学)
報告番号 乙 第39号
学位授与年月日 平成27年9月20日
学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当
学位論文題目 大型常圧焼結炭化けい素材料の熱的用途への適用に関する研究
論文審査委員 (主査) 教授 本田 康裕
(副査) 教授 大高 敏男
(副査) 教授 岸本 健

学位論文要旨

酒井 幸文

1. 題目

大型常圧焼結炭化けい素材料の熱的用途への適用に関する研究

2. 要旨

産業が高度化するにつれて高価な生産装置を厳しい条件下で稼働させるために、高機能かつ耐久性を有する構造部材の材料が要求される。機械的、熱的および化学的性質に優れるファインセラミックス材料はそのひとつであるが、小型・高機能指向で開発されているものの大型構造部材としての使用に関しては未解決の問題が多く実用化が遅れているのが現状である。

このような背景から本研究は、独自開発の少量のほう素、炭素を焼結助材に用いた常圧焼結炭化けい素材料により、独創的な技術である一端封じで他方端にフランジを有する約 $\phi 200 \times 2000 \text{mm}$ の薄肉、大型構造部材を開発し、実機試験などで得られたデータを元に数値計算により実用化の上での問題を明らかにし、材料強度の高性能化を図り、高温もしくは酸腐食性という劣悪な環境下で安全に使用方法の開発を目的とした。研究は、開発される常圧焼結炭化けい素大型構造部材を実用化に耐える水準にするために下記の三点に着目し問題解決を図った。

- (1) 製造技術
- (2) 評価技術
- (3) 応用技術

製造技術では、流動性の良い球状の成形用造粒粉を調整することにより、薄肉、大型構造部材を製造した。その焼結体は異常粒成長の少ないち密で均一な微細組織を有することが確認できた。

評価技術では、測定された材料の基本的性質や実機試験データを用いた数値計算により、応力や温度分布の適切な評価ができるようになった。

応用技術として、高温ラジアントチューブでは耐熱鋳鋼などの従来技術による材料その問題である熱変形や短寿命、それに他のセラミックス材料では開発が進まなかったことに対して、常圧焼結炭化けい素大型ラジアントチューブは片持ち水平支持で長期間安定に稼働できることを明らかにした。

第1章「緒論」では、工業的に使用されている4種類の炭化ケイ素材料を挙げ、それぞれの材料の製造方法および用途を述べ、常圧焼結炭化ケイ素材料との違いを明らかにした。炭化ケイ素材料は熱的性質、化学的性質および電気的性質が高温工業用の設備部材に適する場合が多く、目的に応じて使用されてきた。その中でほう素と炭素を焼結助材として用いた常圧焼結炭化ケイ素材料は、ち密、高強度であり、化学的に安定であることなどから多くの研究

がなされ、特許が出願された。著者らはホウ素を用いない焼結体としてアルミナ系焼結助材による密焼結体を開発し特許化した。本研究では肉厚大型製品の製造において生産歩留まりの良いホウ素系焼結材料を用いた。なお、本研究で用いた常圧焼結炭化けい素材料は、約 990ppm のホウ素と、炭素を焼結助材とした独自開発の材料である。

第 2 章「大型常圧焼結炭化けい素ラジアントチューブの開発と適用」では、これまで主に小型で機能材として開発されてきた常圧焼結炭化けい素材料を使用した大型シングルエンド型ラジアントチューブ製品の製造技術を確立させ、これを片持ち水平支持させることによる高温生産炉への適用を検討した。

常圧焼結炭化けい素材料の JIS に準拠した水中急冷による ΔT_c は 400~450K であったが、実機寸法でのバーナ燃焼による熱衝撃試験ではストレスなどによる問題発生はなかった。酸化劣化に関しては、製鉄所のスラブ加熱炉部材やラジアントチューブの使用後品解析から、高温構造材として長期間使用に耐える耐酸化性を持つことを確認した。

第 3 章「大型常圧焼結炭化けい素材料の熔融金属浸漬管への適用」では、長さ約 2m、あるいは直径が $\phi 310\text{mm}$ の常圧焼結炭化けい素管を熔融亜鉛めっき炉のガス焼き加熱による投げ込み型浸漬管として検討した。実用化する上で最も大きな問題点は、浸漬管のそれぞれの部位の異なる熱伝達率による温度差により発生する応力である。この応力は、発生位置と大きさを浸漬管内の測温と有限要素法で検討され、浸漬管内に断熱筒を設けることにより緩和された。断熱筒を設置すると、浸漬管に発生する温度差は断熱筒が無い場合に比べ 100K 小さくなり、発生する応力は 51.5MPa から 22.5MPa に半減した。また、発生する熱応力に対して断熱筒材質の熱伝導率が与える影響は小さく、断熱筒材は耐火性があれば材質にこだわらないことがわかった。

リジェネレイティブバーナーを装着した浸漬管の直径は $\phi 310\text{mm}$ と大きい。熔融亜鉛めっき炉の実機評価では 4 年間稼働した後でも、組織内への亜鉛の浸透や、熱伝導率の低下はなかった。

第 4 章「大型常圧焼結炭化けい素材料の焼却炉熱交換器への応用」では、低温域での熱交換試験に飽和水蒸気を用いたが、総括伝熱係数は $6.1\sim 4.5\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であった。水蒸気は廃棄物発電をする場合などに使用されるが、炭化けい素材料は酸露点域での腐食の懸念がほとんどないことから低温排ガスにより水蒸気を再加熱するなどの未利用エネルギー回収用の伝熱管として効果的である。

高温域での熱交換試験は、寸法 $\phi 90\times\phi 76\times 1600\text{mm}$ の小型伝熱管により熱分解ガス化熔融炉の実機排ガスを用いて実施された。試験は 2 台の熱交換器が直列に配管され、導入された $290\text{K}\cdot 79.2\text{m}^3[\text{normal}]/\text{h}$ の空気は約 1200K の排ガスとの熱交換により、820K で回収された。1 台目の熱交換器出口温度は 620K であったが、必要とする温度と空気量によって台数と段数を定めることにより最適な排熱回収が可能である。 $\phi 200\times\phi 179\times 2300\text{mm}$ (炉内有効長 1800mm) の大型伝熱管による熱交換器の数値解析では、18 台の熱交換器を並列に配管することにより室温 $2500\text{m}^3/\text{h}$ の空気が約 620K になった。並列配管では比較的低温の空気を多量に回収できることを確認した。

第 5 章は総括を述べ、第 4 章までの研究成果をまとめるとともに結論へ結んでいる。

第 6 章は、結論を記述している。

以上から、本研究では、常圧焼結炭化けい素大型構造部材は高温工業部材として、現状の問題を解決しただけでなく高性能化して安全に実用化できることを証明した。これにより、従来の金属材料では使用困難な劣悪環境下でも、常圧焼結炭化けい素大型構造部材は長期間使用が可能であり、省エネルギー、長寿命化、トータルコスト低減が可能であることを明らかにした。

なお、下記に特許等に関して付記しておく。

本研究に関連する特許に関しては、87 件が公開公報になり、この中で 42 件が特許登録された。常圧焼結大型炭化けい素材料の CIP 成形による一端封じ、他方端がフランジ形状である成形技術は製鋼用連続铸造浸漬ノズルの成形技術が参考にされたが、浸漬ノズルの製造方法については 13 件の特許が成立した。ラジアントチューブでは表面温度の均一化を目的とした内管の吹き出し穴に関連する特許など 9 件が登録された。浸漬管の断熱筒に関する出願では、1 件が登録になり他に 1 件の公開公報がある。熱交換器では 3 件が登録され、5 件の公開公報がある。炭化けい素材料に関するものとしては 9 件の特許がある。

氏名 酒井 幸文
学位の種類 博士(工学)
報告番号 乙 第39号
学位授与年月日 平成27年9月20日
学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当
学位論文題目 大型常圧焼結炭化けい素材料の熱的用途への適用に関する研究
論文審査委員 (主査) 教授 本田 康裕
(副査) 教授 大高 敏男
(副査) 教授 岸本 健

別紙様式 16-1 号
No.

学位論文審査結果の要旨

工学研究科博士課程

専攻名	応用システム工学専攻	氏名	酒井 幸文
-----	------------	----	-------

1. 題目

大型常圧焼結炭化けい素材料の熱的用途への適用に関する研究

2. 要旨

産業が高度化するにつれて高価な生産装置を厳しい条件下で稼働させることが求められ、生産装置の構造部材には高機能性や耐久性を有する材料が要求される。しかしながら、機械的、熱的および化学的性質に優れるファインセラミックス材料は、小型・高機能指向で開発され、大型構造部材に関しては供給側、ならびに使用する側で未解決の問題が多く、実用化が遅れているのが現状である。このような背景から本研究は、独自開発の少量のほう素、炭素を焼結助材に用いた常圧焼結炭化けい素材料により、独創的な技術である一端封じで他方端にフランジを有する約 $\phi 200\text{mm} \times 2000\text{mm}$ の薄肉、大型構造部材を開発し、実機試験などで得られたデータを元に数値計算により実用化の上での問題を明らかにし、材料の高性能化を図り、高温もしくは腐食性ガス雰囲気下という劣悪な環境下で安全に使用方法の開発を目的とした。

劣悪な環境下で稼働する高温工業部材として放射加熱用ラジアントチューブ、周期的加熱を受ける溶融亜鉛めっき用浸漬管および強腐食性ガス雰囲気となる廃棄物焼却炉での熱交換器伝熱管への実用化を図った。第一にこれらの用途で材料には片持ち水平支持で使用が要求される場合があり、脆性材料である常圧焼結炭化けい素材料が大型構造

部材として高温工業設備への適用が可能な材料強度を有することを明らかにすることである。第二に火炎や高温ガスに対して耐酸化性や耐腐食性があることが求められる。第三に熔融亜鉛めっき用浸漬管では、熱伝達率が大きいため急激な温度変化を生じやすい熔融金属による熱衝撃に耐えることである。第四には熔融金属などにより浸食されないことである。

研究は、開発される常圧焼結炭化けい素大型構造部材を実用化に耐える水準にするために下記の三点に着目し問題解決を図った。

- (1) 製造技術
- (2) 評価技術
- (3) 応用技術

はじめに製造技術では、流動性の良い球状の成形用造粒粉を調整することにより、薄肉、大型構造部材を製造した。その焼結体は異常粒成長の少ない緻密で均一な微細組織を有することが確認できた。評価技術では、測定された材料の基本的性質や実機試験データを用いた数値計算により、応力や温度分布の適切な評価ができるようになった。次に応用技術として、高温ラジアントチューブでは耐熱鋳鋼などの従来技術による材料の問題である熱変形や短寿命、それに他のセラミックス材料では開発が進まなかったことに対して、常圧焼結炭化けい素大型ラジアントチューブは片持ち水平支持で長期間安定に稼働できることを明らかにし、この結果として寸法がφ90mm×1250mmなどの小型品を含め、内管、外管を合わせて約2000本が稼働している。

浸漬管では、従来技術による材料である炭化けい素一炭素質耐火物浸漬管の酸化劣化による短寿命、低強度であるため大型化が困難である問題に対して、常圧焼結炭化けい素大型浸漬管では内壁面への燃焼ガスからの熱放射を抑制する断熱筒を設置することにより、発生応力が半減して実用化できた。現在、浸漬管は長尺品や大口径品などを合わせて約200本が稼働している。

次に廃棄物焼却炉排ガスからの熱回収において、従来、高温排ガスからの高温熱回収で水冷された金属管の使用では、高温腐食防止のための耐火物被覆により伝熱性能が妨げられる。一方、金属管では低温排ガスによる酸露点腐食される問題があった。これに対して、常圧焼結炭化けい素大型伝熱管は高温でも高い耐腐食性を有するため、被覆せず使用することが可能であることを明らかにした。常圧焼結炭化けい素材料の高硬度性から伝熱効率を低下させる付着灰の除去ではサンドブラストを稼働中に行い得るなど効果的利用法があることを示した。また、常圧焼結炭化けい素材料が低温排ガスによる酸露点腐食を受けないことから、未回収エネルギーとして低温熱回収が可能であることを示した。

研究の結果、常圧焼結炭化けい素大型構造部材は高温工業部材として、現状の問題を解決しただけでなく高性能化して安全に実用化された。産業上のメリットでは、従来技術である金属や耐火物材料では使用困難な劣悪環境下でも長期間使用が可能であり、省

エネルギー，長寿命化，トータルコスト低減が可能であることを明らかにした。

以上から，常圧焼結炭化けい素を開発し大型構造部材の熱的用途へ適用した本研究は，これまでに使用していた材料と比べて，装置の信頼性，耐久性さらには性能を大きく向上させることを示している．このことから工学的に非常に価値があると判断する．さらには，費用，環境や省資源にも貢献する可能性を示唆しており，工業的にも大きな貢献ができると判断する．

よって，本論文で得た成果は工学的および工業的な発展に寄与することが期待でき、博士（工学）の学位に値するものと認められる．