セラミックス中に生ずる熱応力の最小化にむけて

山田 武海* 関口 英男* 岡本 寛己*
北村 昭** 東 祥三**

1. はじめに

金属/セラミックス接合体において、接合温度から室温までの冷却中に生ずる熱応力はセラミックスの割れや接合界面での剥離の原因となる。更に接合体中に残留した熱応力は接合体の強度を低下させる。従って、金属/セラミックス接合体に生ずるこの熱応力をどのようにして緩和するかは、その接合体を実用に供するための重要な技術課題である。この熱応力を緩和するために、低熱膨張金属や軟質金属をインサートして接合するとよいことが提案され⁽¹⁾、それを実証するための接合実験がかなり多く行われている^{(2)~(6)}。

しかし、接合体に発生する熱応力を実測することが難しいため、その熱応力の大きさや分布がどのようになっているのか、また、低熱膨張金属などをインサートしたときに熱応力の分布がどのように変化するかについて、十分に検討されているとは言えない。ここでは接合体に生ずる熱応力を有限要素法により解析した結果を基に^{(2)~(6)}、セラミックス中に発生する熱応力がインサート材の材質・形状の組み合わせにどう依存するかについて述べ、セラミックス中に発生する熱応力を最小にして健全な接合体を得る条件を模索する。

2. 単層インサートメタル法

図1は菅沼ら⁽²⁾が熱膨張係数の異なる材料(Nb, Mo, Ti, Fe-50 体積% Al_2O_3 サーメット)をインサートして接合した Al_2O_3 /ステンレス鋼接合体($\phi 5.0$, Al_2O_3 厚さ 2.5 mm, ステンレス鋼厚さ 2.5 mm)を 1273 K (1000°C) → 298 K (25°C) に冷却したときに生ずる熱応力を弾性解析し、 Al_2O_3 中に生ずる最大熱応力とインサート材厚さ

の関係をプロットしたものである。 Al_2O_3 の熱膨張係数に最も近い Nb の熱応力軽減効果が最も顕著であり、Nb 厚さの増大にともない熱応力は減少する。筆者ら⁽⁸⁾は Si_3N_4 /Nimonic 接合体 ($\phi 5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, セラミックス厚さ 1~2 mm, W 厚さ 0~5 mm, 残 Nimonic) における W インサートの効果を 1273 K → 298 K に冷却した場合について

図1 最大引張応力に対する中間層の種類と厚さの効果(菅沼ら⁽²⁾)。

て弾塑性解析により求め、Wの厚さが増すと Si_3N_4 中に生ずる最大熱応力が減少することを確認している。このように、低熱膨張金属をインサートしたときの熱応力緩和はインサート材の厚さが大きいときほど顕著である。

熱応力を緩和するために、軟質金属をインサートして、その塑性変形を利用する場合がある。山田ら⁽⁶⁾によると、Alをインサートして Al_2O_3 /S20Cを接合したとき(接合体形状外径 32 mm, 内径 14 mm, Al_2O_3 厚さ 9 mm, S20C 厚さ 9 mm) Al_2O_3 中に生ずる最大熱応力は Al 厚さが 0.8 mm のときには約 100 MPa であるが、Al 厚さを 2.5 mm にすると約 60 MPa になる。また筆者ら⁽⁸⁾は Si_3N_4 /Nimonic 接合体 ($\phi 5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$) において、 Si_3N_4 中に生ずる最大熱応力は直接接合した場合には約 560 MPa であるが、1.0 mm 厚さの Cu をインサートすると約 150 MPa になることを確認している。このような軟質金属の効果は Si_3N_4 /Nimonic 接合体に限って言えば、Ni や Ti にもある。しかし、Cu の場合も含めて、その厚さを増すとかえって熱応力を増大させる場合もあるので注意を要する。

* 日本鋼管株式会社中央研究所主任部員

** 日本鋼管株式会社中央研究所

Minimization of Thermal Stress Generated in Ceramics in Metal-Ceramic Bonding: Takemi Yamada, Hideo Sekiguchi, Hiromi Okamoto, Akira Kitamura, Shozo Azuma (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., Kawasaki)

Keywords: thermal stress, ceramics-metal bonding, elastic-plastic analysis, finite element method, silicon nitride, insert metal, Nimonic 80A

1986年2月17日受理

以上のように低熱膨張金属や軟質金属をインサート材に使えばセラミックス/金属接合体のセラミックス中に生ずる熱応力を軽減できることが分かった。しかし、Cuをインサートしたときの Si_3N_4 /Nimonic 接合体のように 1273 K 程度の温度では接合できない場合もある⁽³⁾⁽⁴⁾。このような場合には接合のためのインサート材と熱応力緩和のためのインサート材を複合して接合する必要がある。

3. 複層インサートメタル法

例えば、 Si_3N_4 /Nimonic を接合する場合、Mo や W の低熱膨張金属をインサートしても、1273 K 程度の温度では接合しない。 Si_3N_4 と Nimonic は Ni をインサートすると比較的容易に接合できる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。そこで接合のためのインサート材として Ni (0.2 mm) を、熱応力緩和のためのインサート材として W または Cu を使って接合した Si_3N_4 /Nimonic 接合体 ($\phi 5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, Si_3N_4 厚さ 1 mm) を 1273 K→298 K に冷却したときの熱応力を弾塑性解析した。図 2 は Si_3N_4 中に生ずる最大主応力と W および Cu 厚さの関係を示す。Cu を使った場合には、0.1~0.2 mm 厚さのときに最小熱応力を示すが、それ以上では厚

図 2 セラミックス中の最大主応力とインサート材厚さの関係。

図 3 セラミックス中の最大主応力と W/Cu 比率の関係。

さが増すと熱応力は増大する。また、W の場合には 0.5 mm のときに比較的高い熱応力を示すが、少なくとも 1.0 mm 以上では厚さの増大にともない熱応力は減少する。従って、W をインサートする場合はその厚さをなるべく厚くすることが、Cu をインサートするときにはその厚さを 0.1~0.2 mm にすることが望ましい。

しかし、セラミックス/金属接合体を実際に使用しようとするとき、インサート材の厚さをなるべく薄くしたい場合がある。例えば W は高温での変形能が小さいので、複雑な形状の接合面を持つ接合体を作るためにはなるべく薄くしなければならない。そこで、Ni, W, Cu を三層にインサートして接合した Si_3N_4 と Nimonic の接合体 ($\phi 5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, Si_3N_4 厚さ 1 mm) を 1273 K→298 K に冷却したときの熱応力を、Ni 厚さ 0.2 mm, (W+Cu) 厚さ 1.0 mm として弾塑性解析した。 Si_3N_4 中に生ずる最大熱応力と Cu および W の厚さとの関係を図 3 に示す。図は 0.8 mm W-0.2 mm Cu を熱応力緩和用インサート材としたとき、最小熱応力となることを示している。従って、W と Cu を複合したインサート材を使うことが Si_3N_4 中に生ずる熱応力の緩和に有効であり、かつ最適な厚さの組み合わせが存在することが分かった。

以上の結果を基に 0.2 mm Ni-0.8 mm コパール-0.2 mm Cu をインサートして Si_3N_4 と Nimonic 80A を 1223 K (950°C) で接合したところ、接合部付近に全くき裂のない健全な接合体を得ることができ、その室温における引張強さは約 99.0 MPa であった。W の替りにコパールを使用したのは Cu/W 間での接合強度が低いためである。

4. おわりに

セラミックス/金属接合体のセラミックス中に生ずる熱応力を最小化するために、どのようなインサート材をどのように組み合わせたらよいかを、有限要素法を使った熱応力解析結果を基に述べた。しかし、このような研究はその緒についたばかりであり、そのほとんどが試験片を対象としたものであり、残留応力が接合体の機械的性質に及ぼす定量的影響などについてもほとんど分かっていない。また、セラミックス/金属接合体を実際の機械部品に応用するためには、それぞれの部品を対象にしたこのような解析がその品質を保証するために不可欠であると考えられる。従って、今後ますます有限要素法を用いたセラミックス/金属接合体の熱応力解析が様々な角度から行なわれることと思われる。本稿がこのようなセラミックス/金属接合体にかかわる技術開発の新しい展開への引き金になれば光栄である。

文 献

- (1) 公開特許会報, 昭 59-232693 セラミックスと金属等との接合用クラッドろう材及びこれを用いたセラミックと金属等との複合体 日本特殊陶業株式会社.
- (2) 菅沼克昭, 岡本 平, 小泉光恵: 窯業協会年会講演予稿集, C-7 (1984), p. 47.
- (3) 山田武海, 岡本寛己, 関口英男, 北村 昭: 日本金属学会講演概要, (1985・10月), p. 174.
- (4) 山田武海, 関口英男, 岡本寛己, 北村 昭, 東祥三: 学振 123 委研究報告, 26 (1985), 291.
- (5) 山田俊宏, 河野顯臣: エンジニアのための材料技術, 日本金属学会関東支部, (1985).
- (6) 白兼 誠, 竹田博光, 中橋昌子: 日本金属学会講演概要, (1985・10月), p. 200.
- (7) 山田武海, 関口英男, 岡本寛己, 北村 昭, 東祥三: 学振 123 委研究報告, 26 (1985), 567.
- (8) 山田武海, 関口英男, 岡本寛己, 北村 昭, 東祥三: 日本金属学会講演概要, (1986・4月), p. 125.

<新 刊 案 内>

ニューセラミックスの活躍
その科学と技術

作花 済夫 編

近年, 新素材のひとつとしてニューセラミックスについての関心が高まりつつある. この状況下で, 本書はニューセラミックスの各分野の現状を把握し, 将来展望を示すことを意図して編纂されたものである. 本書は全 7 章から構成されており, 各章がそれぞれの分野の専門家によって分担執筆されている.

第 1 章は「セラミックスを割れなくする」という表題で, セラミックスの強度と靱性に関する基礎的事項が要領よくまとめられている.

第 2 章は「セラミックエンジン」に関する章であり, エンジン用セラミックスの製造と機械的性質, 焼結製品の欠陥の発生とその検出法, セラミックエンジンの開発と商品化について記述されている.

第 3 章は「優れた機能性を発揮するニューセラミックス」と題して, 誘電体, 半導体, 磁性体, 絶縁体およびオプトセラミックスに関して実用材料の見地からまとめられている.

第 4 章は「電気機器や電子装置を働かせるニューセラミックス」という表題で, この範ちゅうに属するセラミックスを単結晶指向型セラミックス, 粒界物性を利用したセラミックス, 表面物性を利用したセラミックス, 薄膜, 超微粒子に分類して解説されている点に特色がある. 内容的には第 3 章と重複するところがありみられる.

第 5 章は「ニューセラミックスの一翼をになうアモルファス」であり, アモルファス固体の説明, アモルファスの有する特性の紹介がなされている. また, 光ファイバー, アモルファスシリコン, アモルファス金属, バイオリアクターなどアモルファス利用の現況について解説されている.

第 6 章は「液体から作られるニューセラミックス」と題して, 液体からの高純度微粉末の製造, 金属アルコキシドの利用, ゼルゲル法といった製造法について記述されている.

第 7 章は「人工骨となるニューセラミックス」であり, 生体材料に要求される条件, 生体用セラミックスの種類, 歯冠用セラミックス, インプラント用セラミックスが紹介されている.

以上, 各章の表題からも理解されるように, 本書はニューセラミックスに関する専門書として書かれたものではなく, むしろニューセラミックスの研究と開発の現状を平易に解説することを意図してまとめられたものである. 分担執筆によっているため, 内容の重点の置き方に章ごとに違いがあり, また内容の重複もみられるが, 各章とも分りやすくしかもかなりいいねいに記述されており, セラミックスに関心のある人々に参考となる書物である.

(T.S.)

(B 6 判 232 頁 1985 年 1,800 円 (株) アグネ)