九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

超音波による金属間の接触熱コンダクタンスの評価

富村, 寿夫 九州大学機能物質科学研究所

黒住, 敏弘 三菱自動車工業株式会社

張, 興 九州大学機能物質科学研究所

藤井, <u></u> **杰夫** 九州大学機能物質科学研究所

https://doi.org/10.15017/6691

出版情報:九州大学機能物質科学研究所報告.10(1), pp.41-44, 1996-11-12.九州大学機能物質科学研 究所 バージョン: 権利関係: 機能物質科学研究所 報告 第10巻 第1号 pp.41~44 (1996)

超音波による金属間の接触熱コンダクタンスの評価

富村寿夫・黒住敏弘*張興・藤井丕夫

Estimation of Thermal Contact Conductance of Metals by Ultrasonic Waves

Toshio TOMIMURA, Toshihiro KUROZUMI, Xing ZHANG and Motoo FUJII

Experiments are carried out for heat transfer through a contact interface of two metallic solids to clarify the effects of roughness and waviness of a contact surface on mean thermal contact conductance h_m . The characteristics of an ultrasonic transmission are also investigated to obtain a relation between the mean conductance and a sound energy transmitted for flat rough surfaces. Using a proposed empirical correlation expression between h_m and a ratio of transmitted to radiated sound energy E_r , h_m can be estimated within an error of about $\pm 50\%$ for nominal contact pressure up to 1.67 MPa.

1. 緒 言

固体面間の接触熱抵抗は、原子炉における金属燃料 とその被覆金属間の接触伝熱をはじめ宇宙機器、電子 機器などからの放熱問題とも深く関連した問題であ り、従来から数多くの理論的、実験的研究がなされて いる(1)。しかし、実際の接触面にはマクロなうねりや ミクロな粗さが混在するなど様々な因子が存在する ため、測定結果は研究者により大きく異なっている。 そこで、著者らは、前報⁽²⁾で粗さとうねりを有する固 体面間の局所および平均接触熱コンダクタンスにつ いて基礎的に検討し、接触熱抵抗の測定方法と温度測 定点に関して、いくつかの問題点を明らかにした。

本研究では、前報に引き続き、平均接触熱コンダク タンスの評価方法の一つとして、接触面に入射する超 音波の透過特性を利用する方法について実験的に検 討した結果を報告する。

受理日 1996年7月25日 本論文を名誉教授 竹下 齊 先生に献呈する。 * 三菱自工

記号

| Eo | : | 接触面が音響的に透明な場合の受 | 信側振動 |
|------------------|----|--------------------------|----------------------|
| | | 子への超音波の到達エネルギ | [J] |
| Er | : | 超音波の透過エネルギ割合 | [•] |
| E_t | : | 受信側振動子への超音波の到達エ | ネルギ[J] |
| f | : | 荷重 | [N] |
| Hms | : | 真実接触部の無次元平均接触熱コ | ンダクタ |
| | | ンス | [-] |
| h_m | : | 平均接触熱コンダクタンス | [W/m ² K] |
| p_{m} | : | 平均接触圧力 | [Pa] |
| \boldsymbol{Q} | : | ヒータ出力 | [W] |
| Ra | : | 中心線平均粗さ | [m] |
| ro | : | 試験片の外径 | [m] |
| V_o | : | <i>E</i> 。に対応する音圧振幅 (電圧) | [V] |
| V_t | : | Et に対応する音圧振幅 (電圧) | [V] |
| Δ | : | うねりの長さ | [m] |
| ΔT_{r} | n: | 上部および下部試験片の接触面に | おける平 |
| | | 均温度の差 | [K] |
| δ | : | 空隙間距離 | [m] |
| δ。 | : | 付加相当長さ | [m] |

| λr | : | 空気の熱伝導率 | [W/mK] |
|----|---|---------|--------|
| λs | : | 黄銅の熱伝導率 | [W/mK] |

2. 試験片、測定装置および方法

試験片は前報⁽²⁾と同様、直径 40mm、長さ 45mmの 黄銅製円柱プロックである。Table 1 に試験片の接触 面の仕上げ方法、中心線平均粗さ Ra およびうねり を示す。ここで、研削およびフライス仕上げ面の Ra については、削痕に対して垂直方向(上段)および平行 方向(下段)の値を示した。試験片 G1~G3 の接触面は うねりが無く平坦である。G4、G5の接触面には小さ

Table 1 Surface roughness and waviness of test specimen

| and the second s | | | | | | | | | |
|--|--------------|-----|----------|--------|---------|-----------------|----|-----|--|
| | G1 | | G2 | G | 3 | G4 | Ļ | G5 | |
| Finishing | g ri ndi ng | | | | | | | | |
| Palum | 0.37 | | 0.63 0.9 | | 90 2.2 | | | 3.8 | |
| <i>Να</i> [μm] | 0.33 | | 0.30 | 0. | 39 | 1.1 | | 0.9 | |
| ⊿ [μm] | 0 | | 0 | |) | slightly uneven | | | |
| | | | | | | | | | |
| | M1 | | M2 | | T1 | | T2 | | |
| Finishing | g milling | | | | turning | | | | |
| <i>Ra</i> [µm] | 0.42 0.38 | 0.7 | | 2 9 | 1.49 | | | 2.6 | |
| Δ [µm] slightly concave | | | | ve | | 3 | | 3 | |



Fig.1 System for measuring transmitted ultrasonic waves

な凹凸が一様に分布しているが、平均的には平坦であ る。試験片 M1、M2 の接触面は若干凹状である。ま た、試験片 T1、T2の接触面は凸状で、中心部は周辺 部より約 3 μ m 高い。

本実験では、平均接触熱コンダクタンスと超音波の 透過波の測定を別々に行った。平均接触熱コンダクタ ンスの測定装置および方法については前報四と同じで あるので省略する。Fig.1 に超音波の透過波測定系を 示す。共振周波数 5MHz、公称エレメント直径 1/4 あ るいは 1/2inの振動子が、カプラント液を介して、一 組の試験片の上部と下部に一定のバネカで押しつけ られている。一方の振動子にはパルサーレシーバーか ら340Vのマイナスパルスが印加され、そこから接触 面に向かって超音波が照射される。接触面を透過した 超音波は対向するもう一方の振動子で受信され、電圧 信号に変換される。この信号波形はパルサーレシーバ ーで増幅されたのちディジタルオシロスコープで測 定され、パーソナルコンピューターで記録、解析され る。超音波の透過波の測定は平均接触圧力が 0.01~ 1.67MPaの範囲で行った。

3. 結果および考察

Fig.2 に、次式で定義される、平均接触熱コンダク タンス hmと平均接触圧力 pmの関係を示す。

 $h_m = \frac{Q/\pi r_o^2}{\Lambda T_m} \tag{1}$

$$p_m = \frac{f}{\pi r_o^2} \tag{2}$$



Fig.2 Relation between h_m and p_m

ここで、Qはヒータ出力、 r_{0} は試験片半径、 ΔT_{m} は 上部および下部試験片の接触面平均温度の差、fは荷 重である。なお、Δ Tmは、前報(2)と同様、深さ10mm、 接触面からの距離15.20.25.30.35mmの5点で測定し た温度を直線で最小二乗近似する方法で評価した。白 抜き記号が加荷重時、黒塗り記号が減荷重時の結果で ある。ヒステリシスが見られるが、その差は小さい。 研削仕上げ面 G1、G2、G3、G5の結果から、 粗さ Ra が大きくなるとともに hmが小さくなるのがわかる。 本例は接触面の削痕が平行になるように試験片を重 ねた場合の結果であるが、削痕が直交するように重ね た場合もこれとほぼ同じ結果が得られた。なお、図に は示していないが、G4の hmは G5とほとんど同じ結 果が得られた。これは、接触面に一様に分布する小さ な凹凸が熱抵抗を律速しているためと考えられる。フ ライス仕上げ面 M1の粗さを見ると、削痕に対して垂 直方向ではG1と水平方向ではG3とほぼ同じである。 しかし、M1の接触面には浅いくぼみがあるため、hm の測定結果はG3より小さくなっている。旋削仕上げ 面 T2 の接触面には大きな粗さと凸状のうねりがある ため、最も粗い研削仕上げ面 G5 と同程度の hmが得 られている。

Fig.3 に、次式で定義される超音波の透過エネルギ 割合 E.の測定結果を示す。

$$E_{r} = \frac{E_{t}}{E_{o}} = \frac{V_{t}^{2}}{V_{o}^{2}}$$
(3)

ここで、E_oと E_tは、それぞれ、接触面が音響的に透 過な場合とそうでない場合の受信側振動子への超音



Fig.3 Relation between E_r and p_m

波の到達エネルギを表し、V₆と V₄は E₆と E₆に対応 する音圧振幅(電圧)を表す。研削仕上げ面 G1、G2、 G5 については、削痕の方向を水平、垂直方向に変え て得られた各 2回の全ての測定値の平均値を示した。 フライス仕上げ面 M1 および旋削仕上げ面 T2 は 2 回 の測定結果(ただし、M1 については削痕が垂直方向の 場合のみ)の平均値である。いずれの場合も pmの増大 とともに E₆が増加する。研削仕上げ面の場合、低荷 重の結果を除けば、粗さ Raが小さくなるとともに E₆が増加している。これに対し、フライス仕上げ面 M1 の E₆が極端に低いのは、接触面が若千凹状なので超 音波が透過し難くなっているためである。逆に、旋削 仕上げ面 T2 の Er は極端に高くなっているが、これ は接触面が凸状なので真実接触部には平均接触圧力 より高い圧力がかかっているためである。

Fig.4に、研削仕上げ面 G1~G5 について、真実接 触部の無次元平均接触熱コンダクタンス

$$H_{ms} = \frac{h_m - \lambda_f / \delta}{\lambda_s / (\delta + \delta_o)} \tag{4}$$

と E_r の関係を整理した結果を示す。ここで、 λ_f 、 λ_s は空気、黄銅の熱伝導率、 δ_o は付加相当長さ(=46 μ m⁽³⁾)、 δ は空隙間距離であり、本整理では δ =4Ra(削 痕に垂直方向の粗さ)とした。記号に付した実線は測 定値のパラツキの範囲を示す。図中の実線は、次式で 与えられる H_{ms} と E_r の相関式をプロットしたもので ある。

 $H_{ms} = 0.082 E_r^{0.037} \tag{5}$

このように、うねりが無い平坦面の場合、低荷重の結 果を除けば、式(5)により平均接触熱コンダクタンス hmがほぼ±50%以内の誤差で評価できる。



Fig.4 Relation between H_{ms} and E_r

4. 結 言

超音波の固体境界面における透過特性を利用した 金属面間の平均接触熱コンダクタンス hmの測定法に ついて実験的に検討した。その結果、接触面にうねり が無い場合、超音波の透過エネルギ割合を測定するこ とにより hmがほぼ±50%以内の誤差で評価できるこ とを示した。

本研究に際して、研究室職員 濱野 光司 技官およ び大学院生 和田 信志 君に装置の製作と実験に協力 して頂いた。ここに記して謝意を表します。

文 献

- (1) Madhusudana, C. V., Thermal Contact Conductance, (1996), Springer-Verlag, 1.
- (2) 富村寿夫、藤井丕夫、河村泰則、佐久川純、
 黒住敏弘、九州大学機能物質科学研究所報告、
 9-1 (1995)、69.

(3) 佐野川 好母、日本機会学会論文集、33-251、

(1967), 1131.