

金属粉末光造形複合加工技術による金型の製作 —金属粉末の熱伝導率の測定—

Additive Manufacturing Method of Metal Powder Combining Laser Fusing and Milling Technique — Thermal Conductivity of Metal Powder —

上田 隆司
Takashi UEDA

名古屋大学 特任教授
Designated Professor, Nagoya University

Abstract

The thermal conductivity of metal powder which is used for additive manufacturing is investigated theoretically and experimentally. The theory of instantaneous point source of heat is used to derive the equation to calculate the thermal conductivity of metal powder. Using this equation, the thermal conductivity of chromium molybdenum steel, copper, and nickel powders are obtained experimentally.

1. はじめに

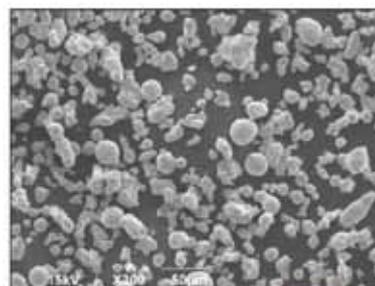
金属粉末光造形では、 $50\mu\text{m}$ 程度の薄い層状に供給した金属粉末にレーザー光を照射して選択的に結合させながら積層することにより、三次元物体を造形することができる。ところが、レーザー光を照射する造形では、ビーム走査精度や粉体の粒径などの影響から形状・寸法精度を $100\mu\text{m}$ 以下にするのは難しい。そこで、同じ工作機械内でエンドミル加工を併用する複合加工を行うことにより $10\mu\text{m}$ オーダーの精度にまで改善することが出来る。このとき、エンドミルには直径 0.5mm 程度の極めて小径のボールエンドミルを用いている。したがって、金属粉末光造形複合加工技術は、レーザー照射によって金属粉末を熔融して結合することにより必要な強度を持たせ、エンドミル加工によって必要な精度を作り出すことができる造形法と言える。

2. 金属粉末

金属粉末光造形では金属粉末の選択が最も重要であ

表1 金属光造形用粉末材料

番号	材質	平均粒径 μm	粒子形状	密度 g/cm^3	比表面積 m^2/g
単体粉末					
①	クロムモリブデン鋼(鉄)	30	球形		
②	クロムモリブデン鋼(鉄)	10	球形		
③	クロムモリブデン鋼(鉄)	20	ややいびつ	3.99	0.42
④	クロムモリブデン鋼(鉄)	10	ややいびつ	4.09	0.66
⑤	ニッケル	30	球形		
⑥	ニッケル	10	球形		
⑦	銅合金	30	球形		
⑧	銅合金	10	球形		
混合粉末					
⑨	混合粉末-1	30			
⑩	混合粉末-2	30			
⑪	混合粉末-3	30			
⑫	混合粉末-4	10			



100 μm

図1 金属粉末のSEM画像

る。表1に用いた粉末の一例を示す。粒径が10 μ mから30 μ mの鉄(クロムモリブデン鋼), 銅, ニッケルを用いており, 焼結用の材料としてはこれらの粉末を重量比で鉄70%, 銅20%, ニッケル10%を混合(SCM混合材)して用いている。図1に用いた混合粉末のSEM写真を示す。

金属粉末の薄い層にレーザー光を照射して造形することから, 照射条件を検討する際には, 粉体の物性を知っておくことが重要である。

2.1 熱伝導率と吸収率の理論的検討*

2.1.1 基礎式

図2に示すように, 半無限体の物体表面上に(a)点熱源, 及び(b)半径 a の円板熱源が存在し, ある有限時間 Δt の間加熱している状態を考えよう。すなわち, 実験状態を表す(b)円板熱源を理想的な状態である(a)点熱源と見なすことができる条件について検討している。

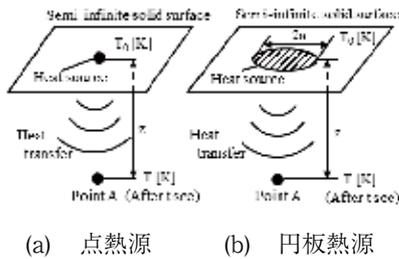


図2 熱源モデル

「Conduction of Heat in Solid」¹⁾によれば,

(i) 瞬間点熱源による加熱によって, 加熱開始からの時刻 t における深さ z での温度上昇は

$$(T - T_0) = \frac{Q}{4(\pi\kappa t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right) \quad (1)$$

ただし, T_0 : 室温, $\kappa = K/\rho C$: 温度伝導度 (m^2/s),
 K : 熱伝導率 (W/mK), ρ : 密度 (kg/m^3),
 C : 比熱 (J/kgK), $Q\rho C$: 発熱量 (J)

で与えられる。

(ii) 瞬間円板熱源による加熱によって, 時刻 t における深さ z での温度上昇は

$$(T - T_0) = \frac{q}{(\pi\kappa t)^{1/2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{a^2}{4\kappa t}\right) \right] \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right) \quad (2)$$

ただし, a : 円板の半径 (m), $\pi a^2 q = Q$,

$$\pi a^2 q \rho C: \text{発熱量 (J)}$$

で与えられる。

(iii) 連続点熱源による有限時間 Δt の間の加熱によって, 時刻 t における深さ z での温度上昇は

$$(T - T_0) = \frac{q}{2\pi\kappa z} \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4\kappa t}} \quad (3)$$

ただし, $q\rho C\Delta t = Q\rho C$: 全熱量 (J),

$$q\rho C: \text{単位時間当たりの発熱量 (J/s)}$$

で与えられる。

なお, 式(1)~(3)において, Q や q が意味するところに注意してほしい。

2.1.2 有限の大きさを持つ円板熱源を点熱源と見なす条件

式(1)より

$$\left[\frac{d(T - T_0)}{dt} \right]_{z=\text{const.}} = -\frac{3}{2} \frac{Q}{4(\pi\kappa t)^{3/2}} \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right)}{t} + \frac{Q}{4(\pi\kappa t)^{3/2}} \frac{z^2 \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right)}{4\kappa t^2} \quad (4)$$

$d(T - T_0)/dt = 0$ のとき $(T - T_0)$ は最大となることから, 式(4)を用いると, 最大温度差が生じる時刻 t_m は,

$$t_m = z^2 / 6\kappa \quad (5)$$

そのとき, $(T - T_0)$ の最大値は次式であえられる。

$$(T - T_0)_{\max} = \frac{Q}{4\left(\frac{\pi z^2}{6}\right)^{3/2}} \exp(-1.5) \cong 0.147 \frac{Q}{z^3} \quad (6)$$

次に, 熱源の大きさ a に対して, 温度を計測する深さ z をどのように設定すべきか, すなわち, (z/a) の満足すべき条件について検討してみる。式(2)より,

$$\begin{aligned} \left[\frac{d(T - T_0)}{dt} \right]_{z=\text{const.}} &= -\frac{q}{(\pi\kappa t)^{1/2}} \frac{1}{2t} \left[1 - \exp\left(-\frac{a^2}{4\kappa t}\right) \right] \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right) \\ &+ \frac{q}{(\pi\kappa t)^{1/2}} \left[\frac{-a^2}{4\kappa t^2} \exp\left(-\frac{a^2}{4\kappa t}\right) \right] \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right) \\ &+ \frac{q}{(\pi\kappa t)^{1/2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{a^2}{4\kappa t}\right) \right] \left(-\frac{z^2}{4\kappa t^2} \right) \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

$(T - T_0)$ が最大となる時刻 t_m は, 式(7)=0とおく

ことにより得られる。すなわち、

$$\frac{z^2}{4\kappa t} = \frac{1}{2} + \frac{a^2}{4\kappa t} \frac{\exp\left(\frac{-a^2}{4\kappa t}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-a^2}{4\kappa t}\right)} \quad (8)$$

ここで、式(8)の右辺において

$$\frac{a^2}{4\kappa t} \frac{\exp\left(\frac{-a^2}{4\kappa t}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-a^2}{4\kappa t}\right)} = f\left(\frac{a^2}{4\kappa t}\right)$$

とおくと、次のような計算結果が得られる。

$\frac{a^2}{4\kappa t}$	f
1	0.58
0.5	0.77
0.2	0.90
0.1	0.95

この結果より、もし、 $(a^2/(4\kappa t)) < 0.1$ なら、その時 $f = 0.95 \cong 1$ とおくことができ、 $(T-T_0)_{max}$ を与える時間 t_m は式(8)より、

$$\frac{z^2}{4\kappa t} = \frac{1}{2} + 1$$

となり、次式が得られる。

$$t_m \cong \frac{z^2}{6\kappa} \quad (9)$$

式(9)は式(5)と同じになることから、 $(a^2/(4\kappa t)) < 0.1$ が満足すべき条件であり、 $t = t_m = z^2/6\kappa$ を代入して整理すると、

$$\frac{z}{a} > 3.87 \quad (10)$$

が得られる。

2.1.3 有限の加熱時間を瞬間熱源として扱えるための条件

最高の温度上昇に到達するまでの時間 t_m に対して、どのような条件を満たすとき有限の加熱時間 Δt を瞬間とみなすことができるであろうか？

図3に示す熱源に対して式(3)を適用すれば、温度上昇は次式で与えられる。

$$(T-T_0) = \frac{q}{2\pi\kappa z} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{\sqrt{4\kappa t}}\right) - \frac{q}{2\pi\kappa z} \operatorname{erfc}\frac{z}{\sqrt{4\kappa(t-\Delta t)}} \quad (11)$$

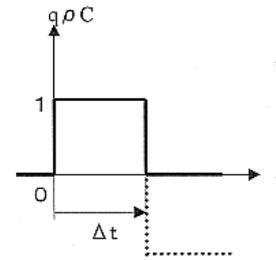


図3 加熱モデル

そこで、有限の加熱時間 $\Delta t = \beta t_m$ とおき、かつ最大の温度上昇となる時刻 $t = t_m = z^2/6\kappa$ を代入すると、式(11)は次のようになる。

$$\begin{aligned} (T-T_0)_{max} &= \frac{q}{2\pi\kappa z} [\operatorname{erfc}(\sqrt{1.5}) - \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{1.5}}{\sqrt{1-\beta}}\right)] \\ &= \frac{3}{\pi} \frac{Q}{\beta z^3} [\operatorname{erfc}(1.225) - \operatorname{erfc}\left(\frac{1.225}{\sqrt{1-\beta}}\right)] \quad (12) \end{aligned}$$

$\beta \leq 0.1$ のとき、すなわち、加熱時間 Δt が最高温度到達時間 t_m に比べて十分小さいとき、

$$\begin{aligned} (T-T_0)_{max} &\cong \frac{3}{\pi} \frac{Q}{\beta z^3} [\operatorname{erfc}(1.225) - \operatorname{erfc}(1.225 + 0.612\beta)] \\ &\cong \frac{3}{\pi} \frac{Q}{\beta z^3} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} (\exp(-1.225^2) \times 0.612\beta) \right] \\ &= \frac{3}{\pi} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-1.225^2) \times 0.612 \frac{Q}{z^3} \\ &= 0.147 \frac{Q}{z^3} \quad (13) \end{aligned}$$

この結果は式(6)と同じ結果となっている。したがって、 $\beta \leq 0.1$ を満たすとき有限の加熱時間 Δt を瞬間とみなすことができる。

2.1.4 計算結果のまとめ

以上の計算結果より、

$$\beta \leq 0.1, \quad a^2/4\kappa t < 0.1, \quad z/a > 4 \quad (14)$$

これらの3つの条件を満足すれば、円板熱源を瞬間点熱源と見なすことができ、 $(T-T_0)_{max}$ に到達する時刻 t_m を測定することにより、熱伝導率 K は式(5)から

$$K = \frac{z^2}{6t_m} \rho C \quad (15)$$

で求めることが出来る。

また、粉体が吸収する熱量は式(12)によって求めることができ、照射エネルギーを前もって測定しておくことにより、吸収率を計算できる。

2.2 熱伝導率と吸収率の実験的検討

2.2.1 熱伝導率

図4に実験装置の外観、図5に主要部を示す。直径60mmの容器に金属粉末を満し、粉末表面にレーザー光を数秒間照射して加熱している。容器中心部の粉体表面から深さ z の位置には熱電対が埋め込まれており、粉体の温度上昇を測定することが出来る。図6に熱電対からの出力波形を示す。図では、4秒間レーザー照射を行っているが、およそ10秒後から温度が上昇し始め、 $t_m=65$ 秒程度で最高温度に到達し、以後ゆっくり低下している。 t_m の値を式(15)に代入することにより、粉体の熱伝導率を求めることが出来る。

図7に銅粉体の熱伝導率を示す。粉体の嵩比重が大きくなるに従い熱伝導率は大きくなるが、それでも高々0.6W/mKとバルク材の銅の390W/mKに比べて非常に小さい。粉体間の空気の影響が非常に大きいと考えることが出来る。

2.2.2 吸収率

吸収率は積分球を用いて測定している。積分球を図8に示す。積分球の底部に置かれた粉体試料に、上部からレーザー光を照射する。レーザー光の内、材料に吸収されず粉体表面で反射したレーザー光は球面内部で反射を繰り返し、最終的に積分球の横にある孔から取り出され、光電変換素子によってそのエネルギー量が測定される。供給したレーザーエネルギーから反射されたエネルギーを差し引くことで、粉体に吸収されたエネルギーを求めることが出来る。

その結果を図9に示す。波長 $1.06\mu\text{m}$ のNd:YAGレーザーを用いているが、吸収率は20~30%程度あることがわかる。球形に近い形状(略球形)の粉末で20%程度であるのに対し、形状がいびつな粉末では30%程度であり、粉末形状がレーザーの吸収率に影響することがわかる。

参考に、 CO_2 レーザーをステンレス粉末に照射した場合の吸収率を、先の式(12)を適用して求めてみたところ、20%程度の吸収率が得られ、粉体に対しては大きな吸収率を示すことがわかる。

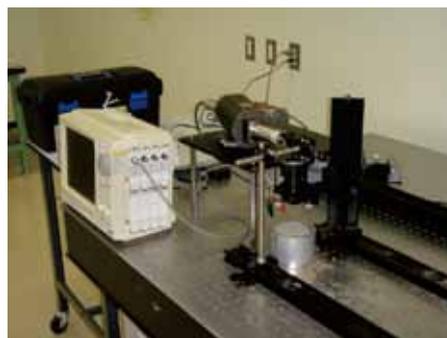


図4 実験装置外観

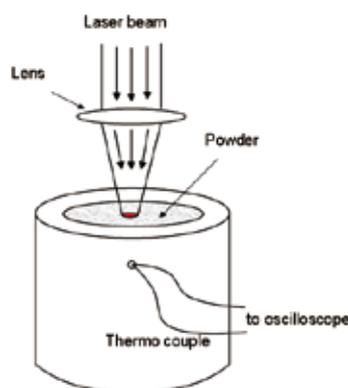


図5 実験装置主要部

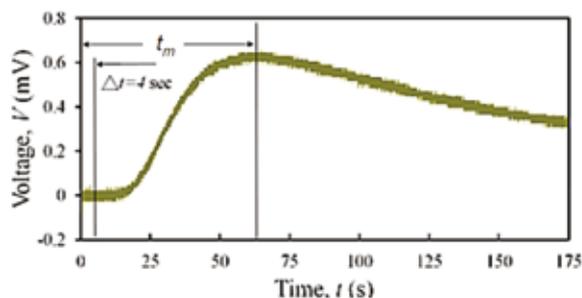


図6 測定波形

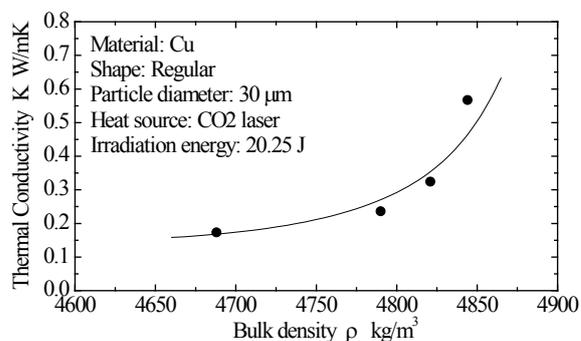


図7 粉体の嵩比重が熱伝導率に及ぼす影響

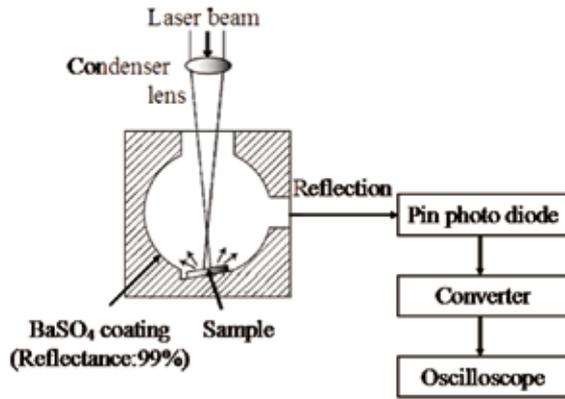


図8 積分球

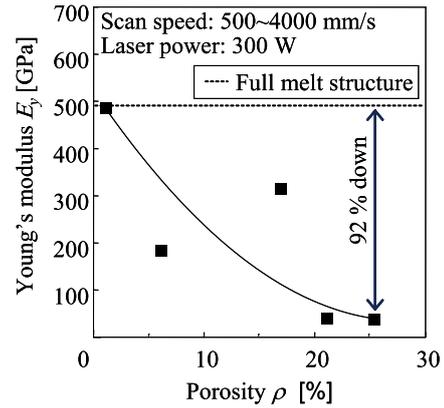


図10 造形体のヤング率

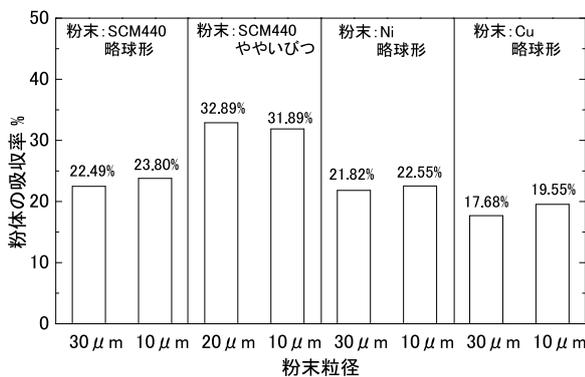


図9 金属粉末（単体）の吸収率（Nd:YAG レーザ）

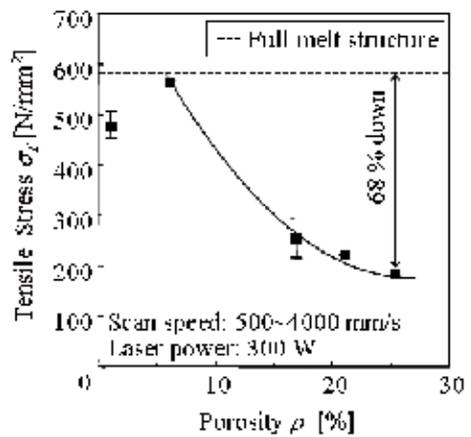


図11 造形体の引っ張り強度

3. 造形体の特性値

3.1 ヤング率と引っ張り強度

金属粉末をレーザー光によって結合する本手法では、その強度が重要である。そこで、粉体を結合したSCM混合材のヤング率、及び引っ張り強度を測定した結果を図10、図11に示す。

レーザー光の走査速度を調整して粉体の結合状態を調節している。速度を遅くすることにより粉体は溶融してしっかりと結合し、材料の気孔率はほぼゼロになる。気孔率が小さくなるに従いヤング率は大きくなり、最大で500GPa程度となっている。

また、引っ張り強度も同様の傾向を示しており、気孔率がほぼゼロの状態では600N/mm²となっており、十分な引っ張り強度を持っていることがわかる。

3.2 熱伝導率

図12にSCM混合材の造形物の熱伝導率を示す。気孔率がほぼゼロで10W/mKの熱伝導率を持っている。粉体状態における熱伝導率と比べれば、20倍程度の大きな値であるが、SCM、ニッケル、銅のバルク材の

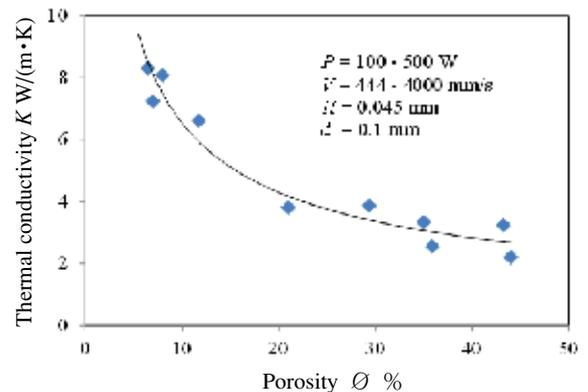


図12 レーザフラッシュ法による造形体の熱伝導率

熱伝導率が、それぞれ40W/mK、90W/mK、390W/mKであることを考えれば、はるかに小さな値であることがわかる。このことから、粉体の結合状態の改善により熱伝導率をバルク材の値に近づけることができれば、材料強度を向上できる可能性があることを示唆している。

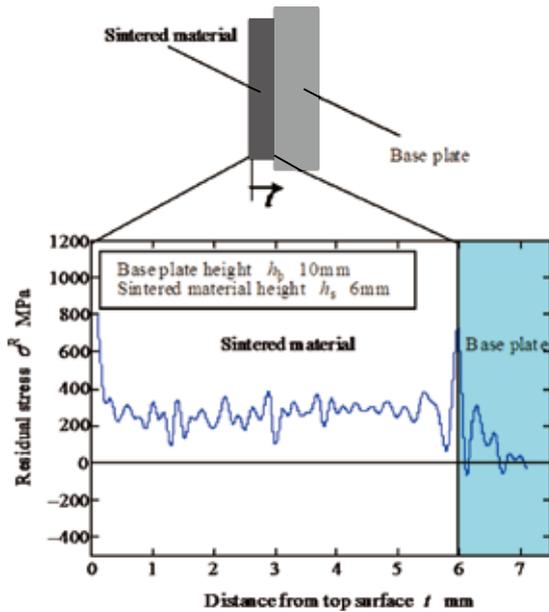


図13 造形体内部の残留応力

3.3 寸法精度

一層の厚み $50\mu\text{m}$ の粉末層にレーザー照射して結合し、10回積層を行った後小径ボールエンドミルで切削加工を行っている。すなわち、 $500\mu\text{m}$ の積層ごとに一回の切削を行い、この操作を繰り返して造形物を製作しており、寸法精度は十分に確保されている。しかし、粉体を高温に加熱しながら積層していくことから、造形物には引っ張りの残留応力が生じることになり、熱ひずみの原因となっている。図13は、高さ6mmの直方体造形物を厚さ10mmのベースプレート上に積層したときに生じる残留応力を測定した結果である。造形物内部には引っ張りの残留応力が生じており、特に表面層とベースプレート境界部に大きな応力が生じている。ベースプレートに厚みのある板材を使う方法、レーザー光を照射する位置をランダムに支えることによって熱を拡散する方法、収縮の小さい材料の開発などによってその影響を抑える工夫がなされている。

4. おわりに

金属粉末光造形複合加工技術によって作られた金型は、すでに生産現場で射出成形の量産金型として使われており、プラスチック製品の精度を十分確保できるレベルにまで到達している。レーザー加工と切削加工を組み合わせた本加工技術には、複雑な金型を一体で製作できること、金型の内部に冷却用の水管を自由に設置できること、粉体の結合状態を調節することによりポーラスな材質を作り出しベント機能を持たせられることなどの特長があり、今後、新たな粉体材料の開発が進めばさらにその応用範囲が広がるものと考えている。

参考文献

- 1) H. S. Carslaw, J. C. Jaeger : Conduction of Heat in Solids, Oxford at the Clarendon Press, 1959, 255.

Captions

- Fig. 1 SEM image of metal powder
- Fig. 2 Model of heat source
- Fig. 3 Model of Heating
- Fig. 4 Experimental set-up
- Fig. 5 Main part of experimental set-up
- Fig. 6 Output wave
- Fig. 7 Influence of Bulk density on thermal conductivity
- Fig. 8 Integrating sphere
- Fig. 9 Absorption of metal powder
- Fig. 10 Influence of porosity of consolidated material on Young's modulus
- Fig. 11 Influence of porosity of consolidated material on Tensile strength
- Fig. 12 Influence of porosity of consolidated material on thermal conductivity
- Fig. 13 Residual stress in consolidated material
- Table 1 Metal powder used