

爆発圧接技術を応用した均一多数穴を内包する長尺中空材料の創製

熊本大学 パルスパワー科学研究所
教授 外本 和幸
(平成25年度一般研究開発助成 AF-2013008)

キーワード : 高エネルギー速度加工, 爆発圧接, 多孔質材料

1. 研究の目的と背景

多孔質材の中でも、一方向に引き伸ばされた空隙を多数内包する材料はロータス (Lotus) 材料と呼ばれ、中嶋らによる研究が世界的にもよく知られている¹⁾。この材料は金属液相の凝固プロセス中に材料内に一方向に揃った多孔質部を創製する方法で製作されている。

一方本研究では、細い金属管中に後で除去することが可能なロウなどを挿入し、それらを束ねて太い金属管に入れ、その周囲から爆薬による爆轟圧力を作用させて材料を一体化しようとする。2枚の金属同士が高速傾斜衝突すると、爆発圧接の機構に基づいて非常に強固な材料同士の結合が得られることが知られており、この技術は広く工業化されている²⁾。この方法によって得られる材料は、前述した Lotus 材料とは違って、穴をどの断面で見てもほぼ同じで、まっすぐな穴構造を形成している。宇都宮ら³⁾も、塑性加工法によって類似の構造を作れることを提案しているが、通常の塑性加工法では、材料が変形方向に引き伸ばされ、薄い管壁で塑性不安定現象 (ネッキング) が生じやすいと思われ⁴⁾、大変形の付与は難しく、長尺寸法の材料を得ることは困難であると推察される。一方、我々が提案する爆薬による方法は、加工の前後で板厚はあまり変化せず、長尺料が容易に得られると期待している。爆発圧接の生産現場では数 m 程度までの長さの接合体 (クラッド) の生産活動が行われており⁵⁾、この程度までの長尺化も期待してよいと考えている。

ここでは、管壁の厚さをいくつか変化した銅の一方方向多孔質材料の製造を試みた結果について、製造法や材料の組織、圧縮特性などを検討した結果について報告する^{6,7)}。

2. 実験方法

本研究で用いた実験装置の模式図と管の充填状況を Fig.1 に、実験条件の詳細を Table 1 に示す。ここで細い金属管 (いずれも 3mm 径) の肉厚は 0.2mm~0.5mm まで変化させ、外径 30mm の太い管になるべく多く細管を挿入した。細い金属管には、予め真空容器中で加熱してロウを充填してある。金属管には、市販のリン脱酸銅 (JIS-C1220) を使用した。使用した爆薬はカヤク・ジャパン(株)製の PAVEX 爆薬 (爆速約 2.4km/s, 密度約 530kg/m³) 750g を、雷管とブースター爆薬 (SEP; カヤク・ジャパン(株)製) 10g で起爆した。ここで PAVEX 爆薬は ANFO ベースの低爆速の爆薬であり、爆発圧接に多く用いられる爆薬である。本

実験における爆薬の厚さは 26.5mm とした。起爆後、爆轟波が試料外周部の爆薬中を伝播し、その時に生じる超高压の爆轟ガス圧力によって円筒 (外管) が内向きに高速で圧縮成形され、管同士が接合・回収されることになる。回収後の材料を回収後、加熱することで、ロウは容易に溶かし出すことが可能であった。

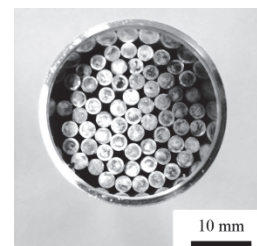
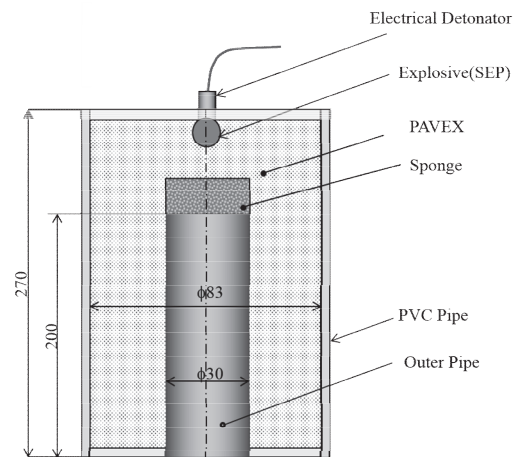


図1 実験装置⁶⁾

表1 実験条件⁶⁾

材料	内管			外管	
	外径 /mm	内径 /mm	本数	外径 /mm	内径 /mm
低気孔率	3.0	2.0	63	30.0	27.0
中気孔率		2.4	63		
高気孔率		2.6	63		

3. 実験結果

3.1 回収材料の組織観察結果

Fig.2 に、得られた材料の外観写真と断面写真を示す。回収された材料は、上下端の部分以外は概ね均一に成形されており、断面組織も管同士が良好に接合されている状況であった。

Fig.3 に、それぞれの空隙率の材料に対する横断面の光学顕微鏡組織写真を示す。光学顕微鏡組織は、エッチングによって接合境界が強調されている。Fig.3 のいずれの組織に対しても、3つの細管が最後に衝突・接合する部分において、金属ジェットが衝突して溶融部を生じていると思われる組織が観察された。この金属ジェットは、金属が高速で傾斜衝突するとき生じ、清浄な金属表面の露出と激しい流動によって両材料を強固に接合する。これは爆発圧接の基本的な接合メカニズムとなる現象であり⁵⁾、管同士の接合は強固であると考えてよい。

この部分周辺の硬度測定を行った結果を Fig.4 に示す。

Fig.4 によると、溶融部はビッカース硬度値(HV)で44~61程度の値を示しており、銅焼鈍材の硬度(HV60程度)並みか、それより低い値を示した。特に硬度の低い部分は、溶融部に微細な収縮孔などの欠陥がわずかに生じていると推察された。これに対して溶融部以外は十分に加工硬化しており、購入材の硬度値がHV120程度であるのに対して、HV130~150の値を示した。特に金属ジェットがトラップされた溶融部の周囲で高い硬度値を示しており、このことはこの領域において激しい高速変形が生じ、下部組織が微細化していることを示す結果であると思われる。

ここで、回収された材料の横断面から計算した空隙率を、長手方向に変形は生じないと仮定して計算した理論空隙率と比較すると、実測値が理論値より多少低目の値を示した。ここで細管の内部には上下端までロウが充填されているものの、細管の上下端から多少のロウが、材料の外側に押し出された可能性があり、このことによって実際の空隙率がやや低下したと思われる。

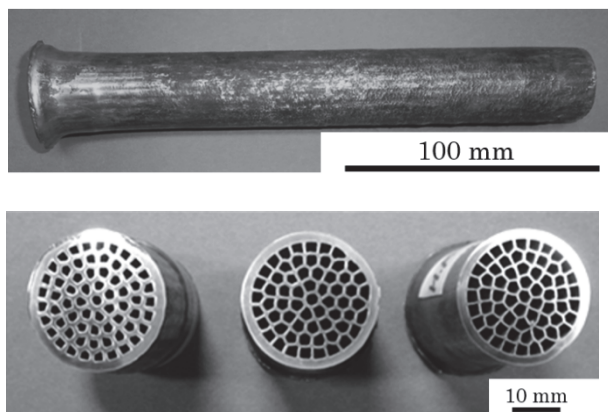
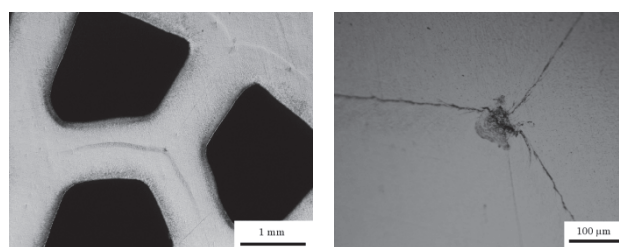
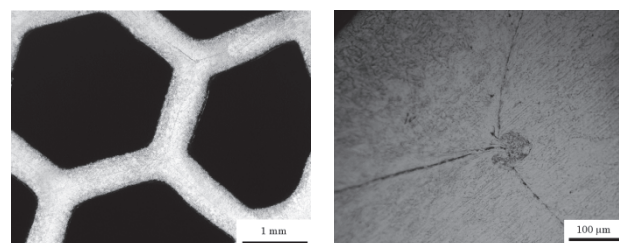


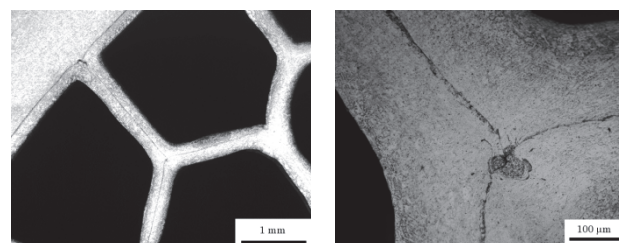
図2 回収材料の外観⁶⁾



(a) 低空隙率



(b) 中空隙率



(c) 高空隙率

図3 断面の光学顕微鏡組織、低空隙率(a)、中空隙率(b)、高空隙率(c)⁶⁾

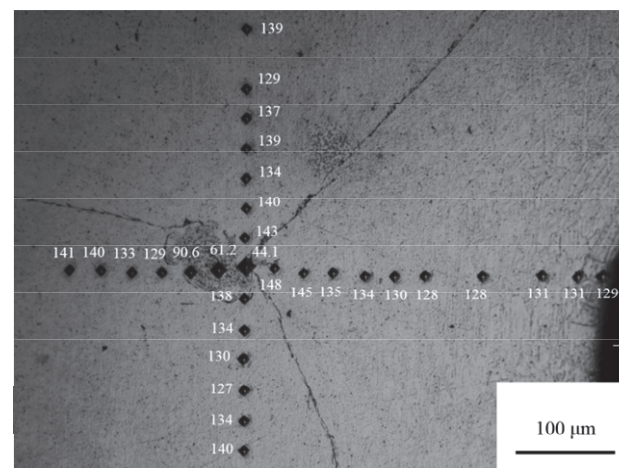


図4 高空隙率材の顕微鏡組織写真（ビッカース圧痕）⁶⁾

3.2 材料同士の接合状況に関する検討

Fig.5 は回収材料に対する縦断面の組織観察結果であるが、細管の肉厚が薄い場合（高空隙率）には明瞭な波状界面が観察され、爆発圧接の機構に基づいて良好に接合されていることが確認された。これは被衝突金属が薄いために、高い衝突速度が得やすかったことによると思われる。一方、細管の肉厚が厚い材料では、相対的に速い速度が得にくいことから、平滑な界面が観察されることが多かった。衝突速度が十分でないと衝突時の傾斜角が十分に確保されず

に波の形成条件を満たさないことがあるもの⁵⁾、この場合でも金属ジェットが形成されたことは前述の組織写真からも確認されており、材料同士の結合は十分に良好であると推察された。

Fig.6 は、細管の肉厚が薄い場合（高空隙率）の縦断面の光学顕微鏡写真である。この断面写真には、わずかにくびれが生じたと思われる部分が生じていた。実際、試料は数%程度引き伸ばされていることから、局部的にくびれが生じる可能性があることは否めない。しかしながら、管壁に破断が生じるような現象は一切、観察されなかった。ちなみに、この材料に対して観察されたくびれ部はこの1箇所のみであり、一定の限界はあるものの、さらに薄い管の接合も可能であるように思われた。この方法で作られた材料は、個別の細管で区切られ、それぞれの空隙が完全に閉じられていることも、特徴のひとつであると考えている。

ここで金属の変形挙動については、数値シミュレーションを実施しつつある状況であるが、ここで衝突速度に関して簡単な見積り算を実施してみる。爆薬のエネルギーから推定される最大（飽和）速度は、よく知られている Gurney の式⁸⁾で与えられ、最終速度は 1220m/s 程度と見込まれた。この値は外管内に抵抗となる物がない場合の最大速度の推定値である。

一方、外圧を受けて加速される管の加速過程を考慮することも重要である。爆薬（PAVEX）の爆轟ガス圧 $P (=0.25\rho Vc^2; \rho$ は爆薬の密度, Vc は爆轟速度) を 0.763GPa^9 とし、加速当初はこの圧力がしばらくの間維持され、外管のみが加速されると仮定すると、運動方程式から、1.0mm の位置で 337m/s、1.5mm（細管の半径に相当）で 412m/s まで加速されると推定された。銅の場合では、爆発圧接に要する最低速度は 200m/s^9 程度と見込まれており、短い加速距離の間でも、十分に衝突領域が流動して接合可能な速度条件に達していると推察された。その後繰り返される細管同士の衝突過程では、円筒中心部に向かって圧力が高まり、マッハ軸を形成して中心部が吹き飛ばすようなケースが予想され、実際、円筒法を用いた粉末の爆発成形の場合にこの現象が多く報告されている¹⁰⁾。逆に衝突に伴う抵抗が大きい場合には、中心部に向かって圧力が減衰し、中心部が十分に成形されない場合も生じ得る⁹⁾。本研究で得られた材料組織は、円筒周辺部から中心部にわたって均一な状態で接合されていることから、圧力の作用が断面全体でうまくバランスした状況であったと推察された。特に本研究で用いた PAVEX 爆薬は、比較的低爆速であり中心部での圧力の上昇効果は押さえることが可能であったと推察された。また、爆薬を厚く配置することで爆轟圧力の作用時間を比較的長くすることができ、中心付近での圧力減衰効果は小さかったと推察された。

3.3 材料の圧縮変形挙動

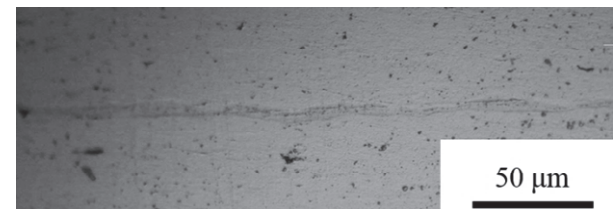
得られた材料の基本的な力学特性を評価するために、回収材料を厚さ 27mm で切り出し、圧縮試験を実施した結果を **Fig.7** に示す。実験は 3 種類の空隙率の材料に対して円筒軸方向に垂直に圧縮する実験と、円筒軸方向に圧縮する実験を行った。併せて、購入ままの管（外径 30mm、肉厚 1.5mm）に対しても、圧縮実験を実施した。ここで圧縮試験には INSTRON 8801 試験装置を用い、0.1mm/s のクロス

ヘッド移動速度で実施した。

Fig.7 から明らかなように、得られた材料を円筒軸方向に垂直に圧縮した場合には、多孔質材料に特有のプラトー（荷重の平坦部）が観察され、空隙率が低いほどその荷重値は高くなる一方、平坦部の変位幅は小さくなることが知られた。また、円筒軸方向に圧縮した場合には、弾性変形によって受け持ちうる荷重はかなり高く、負荷方向に対する異方性が著しいことも知られた。



(a)



(b)

図5 高空隙率材に観察された波状境界(a)、低空隙率材に観察された平滑な境界(b)⁷⁾

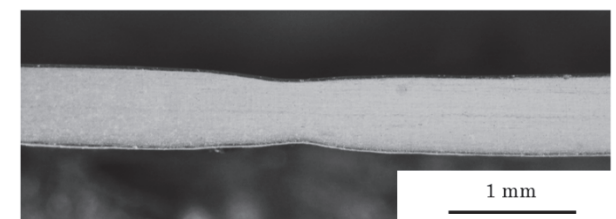


図6 高空隙率材に観察された長手方向へのネッキング⁷⁾

4. 結言

本研究では、一方向に均一な断面で多数の穴構造を内包する多孔質材の創製に関して、爆発圧接法の応用技術を利用した新しい作製手法について提案を行い、その方法の有効性について確認した。結果についてまとめると、以下のとおりである。

- (1) 比較的低爆速の PAVEX 爆薬を利用することで、細管同士は高速傾斜衝突して金属ジェットを伴いながら、爆発圧接と類似の機構で強固に接合されることが知られた。管同士が最後に衝突する部分は、金属ジェットが衝突するために熔融層部分がわずかに生じることが確認された。この部分に多少の硬度低下がみられたものの、それ以外の部分は激しい変形によって加工硬化し、一部では著しい硬化を示す部分も確認された。
- (2) 一部の試料では爆発圧接で典型的にみられる波状界

面の形成が認められた他、細管の肉厚はほぼ均一であり、わずかにネッキングが観察されたものの、管壁の破断は一切見られず、それぞれの細管は個別に隔離された状態を保っていることが確認された。また、衝突速度についても簡単な見積り計算から、爆発圧接と同程度の速度が得られていると推察された。

(3) 得られた試料に対して圧縮試験を実施し、多孔質材料で多く観察されるプラトーが確認されるとともに、その挙動も空隙率に応じた挙動を示すことや、異方性が大きいことなどが確認された。

本方法は、長尺で一方向に細く均一な空隙を設けることができる点の特徴であると考えている。また工法を工夫することによって、多様な空隙を内包する多孔質材料を比較的簡単に作る事が可能であると考えている。プラトーがあることを利用した衝撃吸収部材としての応用だけでなく、熱交換材料へ利用することも可能ではないかと考えており、これらにとどまらず、今後も多様な用途開発を模索していきたい。

本報告で述べた方法以外に、細管の代わりにロール状に巻いた銅薄板にプラスチック製のスペーサーを多数挿入して一方向多孔質材を得る方法¹¹⁾などにも、成果を挙げつつある状況である。

謝 辞

本研究を支援していただいた公益財団法人 天田財団に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Nakajima, H.: Progress in Materials Science, **52**-7(2007), 1091-1173.
- 2) 外本和幸・氏本泰弘：塑性と加工, **43**-496(2002), 370-374.
- 3) 宇都宮裕・鶴田裕之：素形材, **53**-2(2012), 14-19.
- 4) 外本和幸・小野寺竜太・清水峯男：塑性と加工, **29**-332(1988), 965-970.
- 5) Crossland, B.: Explosive Welding of Metals and its Application, (1982), 84-129, Clarendon Press.
- 6) Hokamoto, K., Vesenjaj, M. & Ren, Z.: Materials Letters, **137**(2014), 323-327.
- 7) Vesenjaj, M., Hokamoto, K., Sakamoto, M., Nishi, T., Krstulovic-Opare, L. & Ren, Z.: Materials and Design, **90**(2016), 867-880.
- 8) Meyers, M.A. & Wang, S.L.: Acta Metall., **36**-4(1988), 925-936.
- 9) 藤田昌大・千葉昂・福田泉・荻阪浩男・馬場文章・真鍋敏之：工業火薬, **48**-3(1987),176-182.
- 10) Pruemmr, R.A., Balakrishana Bahat, T., Siva Kumar, K. & Hokamoto, K., Explosive Compaction of Powders & Composites, (2006), 1-41, Scientific Publisher.
- 11) Vesenjaj, M., Hokamoto, K., Matsumoto, S., Marumo, Y. & Ren Z.: Materials Letters, **170**(2016)39-43.

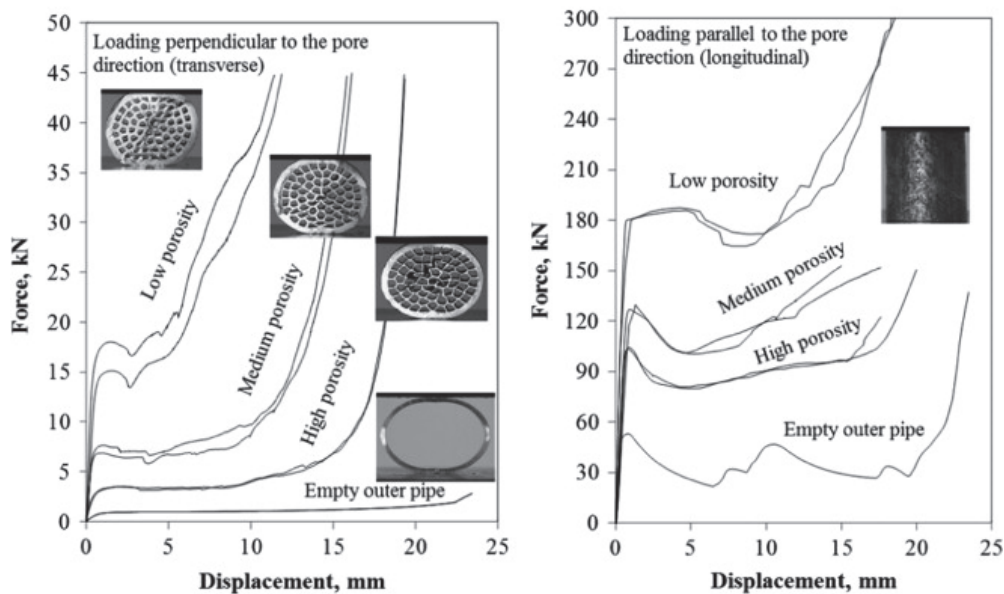


図7 各種試料の圧縮試験結果⁶⁾