急冷凝固 Al-Si 合金粉末の爆発圧縮成形

三浦 秀士, 本田 忠敏

熊本大学工学部材料開発工学科, 〒860 熊本市黒髪2-39-1.

Explosive Compaction of Rapidly Solidified Al-Si Alloy Powders

Hideshi Miura and Tadatoshi Honda

Dept. Materials Sci. & Resource Eng., Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860.

Received June 2, 1994

Explosive compaction is one of the efficient compacting method in forming the hard material powders. In this study, cylindrically axi-symmetric direct explosive method has been applied to the rapidly solidified Al-Si alloy powders for forming the light weight, heat- and wear-resistant materials. The effects of the mass of explosive and the sintering on the structures and properties of compacts have been investigated by means of microscopy and mechanical tests.

When the powders were compacted at the ratio of explosive mass to powder mass (E/M ratio) lower than 12, the compacts showed low density and hardness. On the other hand, radial cracks and mach stem were formed in the compacts at the E/M ratio more than 12. To form the sound and densified compacts, it was found that all of the powders should be compacted at the E/M ratio of 12, resulting in high density (97~98%) and high hardness (97HRB) which is higher than that of the heat-extruded materials. However, the compacts were brittle even after the sintering. This seemed to be caused by some cracks and defects introduced by machining the tensile specimen.

1 緒 言

衝撃エネルギーによって生成される極短時間の超高压を利用して、粉末を瞬時に固化する爆発（衝撃）圧縮成形法¹⁾は、通常の粉末冶金的手法では成形や焼結が困難な硬質粉末や、熱的に不安定なアモルファス粉末および急冷凝固粉末などの緻密化に有効であると期待されている^{2,3)}。すなわち、粉末粒子の強変形と粒子表面の溶融凝固により粒子間の強結合を得るもので、基本的には冷間接合であるため、従来の粉末冶金法と比較して、焼結時の高温下での拡散反応等による影響を無視できたり、再

結晶に伴う粒成長が抑制される（成形前の粒径よりも微細化）などの利点が挙げられている⁴⁾。ただ爆発圧縮成形においては、圧縮時に衝撃波の反射や希薄波（膨張波）との干渉によるクラックの発生、あるいは Mach stem（超高压状態）による衝撃波の収束軸に沿った溶融孔の発生などが生じることから、対象粉末に適した成形条件を見出し、健全な成形体を得ることが重要となる。

本研究では、前報^{5,7)}でも述べた円筒圧搾法（粉末を金属管に収め、その廻りを爆薬で囲んで爆発エネルギーを直接、粉体に作用させて成形を行う直接加圧法）を用い

て、軽量、耐摩耗性、高温強度などに優れ、自動車や航空宇宙産業用材料として期待されるAl-Si-Cu-Mg系の急凝固粉末の爆発圧縮成形を試み、これらの組織や機械的諸特性について検討した。なお、一部の試料には焼結を施し、従来の押し出し材との比較も行った。

2 実験方法

原料粉には、平均粒度が40~50 μ mのTable 1に示す組成のAl-Si-Cu-Mg系急凝固粉末(昭和電工製)を用いた。また爆薬には、爆速2100~2400m/s、比重0.63Mg/m³の硝酸エステルを主成分とするPAVEX(旭化成製)を使用した。

成形に際しては、簡単で少量の爆薬で均一な高圧力を得ることができる円筒圧搾法を採用したが、とくに管内部の超高圧状態の保持が良好な二重管法⁵⁾で行った。本研究で用いた成形装置の概略をFig.2に示す。まず成形容器となる内管には、内径10.5mm、外径12.5mm、高さ120mmのCu管を用い、この中に粉末をタップ充填したのち上下端を厚紙で封管し、その外側に同心円上に内径17.3mm、外径21.7mm、高さ120mmのFeの外管を配置した。また上端には、爆発による衝撃波の伝達を管上部より分散させるために石膏製のキャップを設けた。爆薬の充填に際しては、外管の周囲にさらに外筒(ケント紙)を設け、その間にキャップ先端より30mmの高さまで爆薬を詰め、上端には電気雷管を配置した。このようにして成形容器ごと爆発圧縮成形を行ったわけであるが、本研究では通常、爆発圧縮成形の成形圧力のパラメーターとしてよく知られている、E/M比(E:爆薬の重量、M:粉末の重量)を変化させて、その成形性に及ぼす影響を調べた。

3 実験結果および考察

まず本系合金粉末に対するE/M比の影響を調べるため、ASCM10(10%Si)および20(20%Si)を用いてE/M比を9, 12, 15と変化させ、得られた試料の上端より10mm毎の硬度測定を行った結果をFig.2に示す。明らかにE/M=9で成形したASCM10の試料では、E/M=12, 15のものに比べ著しく硬度(60HV)が低く、また上端から下端までの

Table 1 Chemical compositions of Al-Si-Cu-Mg alloy.

	Si%	Cu%	Mg%	Fe%	Al%
ASCM 5	5.0	2.4	0.8	0.3	Bal.
ASCM10	10.5	2.6	0.3	0.2	Bal.
ASCM14	12.8	2.5	0.8	0.2	Bal.
ASCM16	15.5	3.1	1.4	---	Bal.
ASCM20	20.0	3.8	1.2	---	Bal.

Fig. 1 Experimental assembly for explosive compaction by direct method.

硬度のばらつきも大きいことがわかる。これはやはり爆薬量が少ない(衝撃エネルギーが小さい)ため、成形がUnder-Compactionの状態となり、外周部は緻密化されても中心部の緻密化には不十分な状態となったため、硬度にばらつきが生じたものと思われる。E/M=12および15で成形した試料の硬度変化は、上端より下端までほぼ同様な挙動を示しており、また上端より20~80mmの領域においてはばらつきも小さく、同程度の値(160HV)を示している。これより、硬度からみれば均一な緻密化が行われているものと予想される。

Photo.1に、これら試料断面のマクロ組織を示す。E/M=9の試料ではマクロ的には均質な組織を呈している

Fig. 2 Relation between hardness and distance from the top of explosively compacted ASCM10 and 20 powders.

Photo. 1 Cross-sectional structures of explosively compacted ASCM 10 powders : (a)E/M=9, (b)E/M=12, (c)E/M=15.

が、ミクロ的には空隙が多量に残存しており、粉末粒子の結合状態は極めて不良であった。一方、E/M=15のものでは、試料上端部は均一に緻密化していたが、中央部および下端部においてはマッハ軸や溶融したと思われる部分、および円周状の割れの発生が観察された。⁶⁾この溶融部分は、爆発による圧力が高すぎた場合、衝撃波が中心部に収束する際に極めて高圧力となり、それに伴って粉末粒子同士の衝突および摩擦が激しくなり、金属の溶融温度以上の高温になるため生じることが知られている。なおマッハ軸とは、衝撃波が強すぎると中心部分での収束後の反射も激しくなり、溶融部分が瞬時に外側に押し出されて形成されるものである。円周状の割れは外部表面で反射波が急激に広がり、その結果として生じた張力によって形成される、いわゆる剥離割れと称されるものである。いずれにしても、E/M=12の試料ではマクロ的にもミクロ的にも均一に固化しているようで、ASCM10合金粉末の爆発圧縮成形におけるE/M比は、12が最も適していることがわかった。このことは、いずれの試料においても同様で、Siの含有量に関係なく、E/M比が12の場合に最も健全な成形体が得られ、成形密度として理論密度の97~8%に達するものも得られた。なお、E/M=12で成形したASCM20の試料の硬度は、同組成の押し出し材⁶⁾(85HRB)と比較すると、爆発圧縮成形により97HRBと高い値を示すこともわかった。ただ、爆発圧縮成形したままでは極めて脆いことから、その改善策

として次に焼結を試みた。

焼結は、水素雰囲気中で400℃、450℃、500℃、550℃の各温度で3.6ks保持した。代表的な焼結前後の試料の光学顕微鏡組織として、ASCM20試料の結果をPhoto.2に示す。550℃焼結材においては、シルミン系の共晶温度が577℃であるにもかかわらず、明らかに溶融現象が生じており、粗大なSi晶が晶出していることがわかる。このような溶融が生じた理由としては、本系合金粉末にはCuやMgなどの第3元素が添加されているため、その分共晶温度が低下したことがまず第一に考えられるが、爆発圧縮成形による何らかの影響で共晶温度が低くなったとも予想され、この点に関しては今後の検討を要するところである。ところで、400℃の焼結温度における試料では、焼結前と同様な旧粉末粒子の形態が依然として残されており、温度の上昇とともにそのような面影も薄れ、また共晶Siが球状化してく様子がうかがわれる。これは母層中の過剰のSiの析出によると思われるが、このような現象は過共晶Al-Si合金の利点である耐摩耗特性を損なうことから、本系合金の焼結温度としては全般的に球状化が小さな450℃が最も適していると考えられた。

Fig.3に、各焼結温度で得られた試料の硬度測定結果を示す。爆発圧縮成形を行ったままの試料にくらべ、明らかに硬度が低下していることがわかる。これは爆発圧縮成形によって導入された歪が、焼結を施すことにより緩和したためと考えられる。またそのことに加えて、焼結

Photo. 2 Effect of sintering temperature on the microstructures of explosively compacted ASCM20 powders.

Photo. 3 SEM images of fracture surfaces of ASCM10 compacts. (a) As explosively compacted (E/M=12), (b) As sintered at 450°C for 3.6ks in H_2 .

Fig. 3 Relation between hardness and sintering temperature for explosively compacted ASCM20 powders.

前の組織では共晶Siはラメラ状に、かつ微細に晶出していたが、加熱によってそれらの球状化および粗大化が生じたことも原因の1つと考えられる。なお550°C焼結試料の硬度の上昇は、前述したように試料全般にわたって焼結時に溶融が生じ、その後の冷却で粗大Si晶が組織の大部分を占めたためである。次に焼結後の各試料の引張試験も行ったが、得られた強度は低く、ASCM20焼結試料で165MPa程度であり、これは同組成の押し出し材の400MPaに比べ、著しく劣っていることがわかった。参考までに、photo.3に焼結前後の破断面のSEMによる組織観察結果を示す。焼結前では、明らかに旧粉末粒子境界での剥離が生じており、粒子同士の結合が極めて不十分であることがわかる。一方、焼結を施すことにより粒子結合が強化され、粒内破壊が生じるようになるが、依然として旧粉末粒子境界からの剥離も見受けられた。いずれにしても、焼結体の強度が向上しなかった理由としては、引張試験の際、成形体からの試験片作製中に導入されたと思われる割れから破断する場合が多く、焼結によってもその割れが十分に結合していなかったことが挙げられる。つまり、爆発圧縮成形体から割れのない部分(60mm)を取り出すことは困難であり、また再現性も難しいものであった。したがって、そのような欠陥を避けることができれば、本試験で得られた結果よりもさらに良好な機械的性質を示すものと思われる。この他、焼結方法にも工夫を要するところで、例えばプラズマ焼結

などの瞬時の焼結により、爆発成形時の微細緻密組織を維持できれば大幅な機械的性質の向上も期待される。

4 結 言

Siを過飽和に固溶させたAl-Si-Cu-Mg系急凝固粉末を用いて、直接加圧の円筒圧搾法による爆発圧縮成形を行い、その成形性に及ぼすE/M比の影響および焼結の効果について組織観察ならびに各種機械的性質を検討した結果、以下のようなことがわかった。

- 1) 本系合金粉末の爆発圧縮成形において、健全な成形体を得るための最適E/M比は12であり、相対密度として理論密度の97~98%のものが得られた。E/M比が12以下ではunder-compactionの状態であり、密度、硬度ともに低く、また12以上では成形体中心部に溶融孔や円周方向の割れが発生した。
- 2) 爆発圧縮成形後の組織は急凝固粉末特有の微細組織を維持しており、高い硬度を示した。ちなみにASCM20の圧縮成形体の硬度は97HRBで、これは同組成の押し出し材の硬度(85HRB)に比べかなり高い値を示した。
- 3) 全般的に爆発圧縮成形体は脆いことから、種々の温度で焼結を施したが、強度的には押し出し材(400MPa)の半分程度の値しか得られなかった。これは焼結温度の上昇とともに微細層状の共晶Siの球状化や粗大化が促進するとともに、成形後の試験片作製時に導入された割れの存在が大きな要因と考えられた。

参考文献

- 1) R. Prummer : Explosive Welding, Forming and Compaction, T. Z. Blazinski, Ed. Applied Science Publishers, London and New York (1983) 369.
- 2) 高島, 頓田, 上野, 虎石, 宮野 : 鉄と鋼, 73(1987) 2219.
- 3) 佐藤, 谷口, 近藤, 澤岡 : 粉体および粉末冶金, 35(1988) 96.
- 4) P. Kasiraj, T. Vreeland, Jr., R. B. Schwarz and T. J. Ahrens : Acta Metall., 32(1984) 1235.
- 5) 千葉 : 高温学会誌, 19(1993) 5.
- 6) 三浦, 本田, 村場 : 粉体および粉末冶金, 35(1988) 655.
- 7) 三浦, 吉原, 本田 : 粉体および粉末冶金, 39(1992) 266.