

超高速衝突によるマグネシウムの変形応答に対する添加元素の影響

藤田直輝（神戸大），中辻竜也，池尾直子，向井敏司
長谷川直（JAXA），佐藤英一

1. 研究目的

近年，輸送機器の軽量化によるエネルギーの高効率利用が進められている．マグネシウムはその高い比強度および豊富な資源量から，各種輸送機器への応用に向けて広く研究されている金属である．マグネシウムは結晶構造が六方晶であることに起因して，強度及び変形応答に強い異方性が発現する．また，マグネシウムを低温で変形させた場合の変形応答は，常温で変形させた場合と比較して大きな差異を生じる．これは，変形メカニズムが熱活性化過程で一義的に表現できないことを意味している．数十 km/s 程度での衝突が生じる可能性がある運用に対して，超高速衝撃荷重が作用した場合の変形応答を理解することは，軽量構造材料であるマグネシウムの適応範囲を拡大する上で実用的および学問的にも重要となる．本研究では，音速を超える速度で変形された場合のマグネシウムの応答を明らかにすることを目的として，マグネシウムに対してアルミナ球を超高速度で衝突させる試験およびSPH (smoothed particle hydrodynamics) 法による計算を実施し，内部で生じる組織変化および破壊現象について考察した．

2. 実験方法

先行研究により，マグネシウムに対してイットリウムを添加することによって機械的性質の改善が報告されている²⁾．そこで，供試材として純マグネシウム連続鋳造材 (pMg-C)，純マグネシウム押出材 (pMg-E)，Mg-0.3at.%Y(MgY)を用いた．

本研究の超高速衝突試験は，宇宙航空研究開発機構(JAXA)に設置されている二段式軽ガス銃¹⁾を用いて実施した．本実験では一つの飛翔体を加速させ，被衝突材に衝突させることができる single particle method を用いた．被衝突材には第2章で示した供試材の板状試験片を用い，衝突させる飛翔体には直径 1.00 mm のアルミナ球を用いた．試験片は衝突面の反対面が自由端面となるように設置して試験を行った．試験は室温と低温の二つの条件でそれぞれ実施し，目標衝突速度を 7 km/s とした．低温条件試験では，液体窒素により試験片を冷却して，約 173 K で試験を実施した．温度は3もしくは4本のK型シース熱電対により計測した．試験時は高速度カメラによる撮影，速度計測および熱電対による温度計測を同時に実施した．衝突時の材料温度は，全ての熱電対により計測される値の平均とした．

3 SPH計算

3. 1 計算条件

シミュレーションでは，本実験で実施した超高速衝突試験と同様スケールモデルについて計算を行った．計算コードにはANSYS-AUTODYNを使用した．被衝突材に厚さ 10 mm，

直径10 mmのマグネシウム円柱，飛翔体には直径1.0 mmのアルミナ球を設定し，衝突速度は7 km/sとした．被衝突材と飛翔体にSPH法を適用し，粒子直径を0.05 mmとして計算を行った．今回のシミュレーションで使用したパラメータをTable 1に示す．被衝突材，飛翔体の両方に衝撃線形状状態式を用いた．被衝突材にはSteinberg-Guinan強度³⁾，飛翔体には二直線等方硬化則をそれぞれ適用した．

Table 1 Calculation conditions of the hyper velocity impact simulation for pure magnesium.

Part		Target	Projectile
Material		MAGNESIUM	AL 203 CERA
Initial yield stress (Y)	[Pa]	1.00E+08	-
Maximum yield stress(Y_{max})	[Pa]	6.00E+08	-
Yield strength	[Pa]	-	8.00E+09
Hardening constant (B)	-	1100	-
Hardening index (n)	-	0.12	-
Melting temperature (T_m)	[K]	923	-
Density	[kg/m ³]	1738	3900
Specific heat capacity	[J/kg °C]	1025	-
Elastic shear modulus	[Pa]	1.63E+10	1.00E+11

3. 2 計算結果

計算結果より，クレータの発展に温度分布およびひずみ分布が追従し，クレータ発展途中ではクレータ壁周辺に分布を示すことが確認された．温度分布より，衝突時にはクレータ周辺で断熱変形による温度上昇が発現することが分かった．クレータ壁面から約0.2 mm以内の領域では650 K以上，約0.4 mm以内の領域では195 K以上の温度上昇が確認された．このことから，クレータ壁面から約0.2 mm以内の領域ではマグネシウムの融点($T_M = 973$ K)より高く，約0.4 mm以内の領域では $1/2T_M$ 以上の温度となっていることが示唆された．加えて，ひずみ分布よりクレータ周辺では衝撃変形によるひずみの蓄積が確認された．クレータ壁から1.3 mm以内の領域ではひずみ量が0.2以上になることが確認できた．

これらの計算結果から，クレータ周辺には多量のひずみと熱が発生することが示された．金属材料では，多量のひずみが蓄積された材料に熱を加えると，蓄積された転位のひずみエネルギーを駆動力とした組織の回復や再結晶が発現することが知られている．以上より，クレータ周辺では衝突時に発生する熱により，蓄積されたひずみを駆動力とした組織の回復および再結晶が発現する可能性があることを確認した．

4 実験結果

4. 1 超高速衝突試験

計測結果をTable 2に記す。すべての材料において、室温条件および低温条件のそれぞれが約7 km/sの速度で実施されたことが確認できる。高速度カメラで撮影した映像より、すべての試験で衝突時には多数のフラグメントを含んだ噴出物が衝突点からスプレー状に飛散している様子が確認された。

Table 2 Conditions of hyper velocity impact experiments for several materials.

target material	pMg-C_RT	pMg-C_LT	pMg-E_RT	pMg-E_LT	MgY_RT	MgY_LT
projectile velocity (km/s)	7.15	7.01	7.09	6.91	7.01	7.07
temperature (K)	301	162	302	154	299	173

4. 2 内部組織変化

SEM/EBSD 観察によりクレータ周辺の内部組織観察を行った。SEM/EBSD によりクレータ直下の組織を観察すると、室温条件で試験を実施したpMg-CおよびpMg-Eにおいて平均結晶粒径がそれぞれ4.5 μm および4.9 μm の微細結晶粒組織が確認された。MgYでは平均結晶粒径が2.1 μm の微細結晶粒組織が観察された。これはMgYのクレータ近傍に形成される微細組織は、純マグネシウムで形成されるものと比較して約半分程度の結晶粒径となることがわかった。この要因として、イットリウム添加による積層欠陥エネルギーの低下が考えられる。第一原理計算の結果から、マグネシウムに対してイットリウムを添加すると積層欠陥エネルギーが低下することが知られている。積層欠陥エネルギーが低下することは積層欠陥の幅が広くなることを意味し、転位の運動の障害となる。すなわち、回復および再結晶における転位の移動の障害ともなり、回復・再結晶の速度が低下すると考えられる。このため、マグネシウムに対する超高速衝突変形において、イットリウムの添加により、純マグネシウムと比較して微細な組織が形成されることが示唆された。

ひずみ分布を示すKernel average misorientation (KAM) map からクレータ直下の組織はひずみが少ないことが分かった。また、クレータから約1.6 mm以上離れた領域ではひずみが残存していることが確認された。このことからSPH計算の結果を考慮すると、クレータ周辺では衝突時に発生した高い熱とひずみにより、動的再結晶が発現しひずみの少ない微細結晶粒組織が形成されたことが示唆された。

4. 3 亀裂進展

マイクロX線CTによる非破壊検査で衝突後のクレータ形状、破壊形態を観察した。観察結果から、低温条件の試験片は室温条件と比べ亀裂が多いことが分かった。また、pMg-Cでは亀裂が鋳造方向に進展しているのに対し、pMg-Eでは亀裂がクレータから放射状に進展していた。このことから内部組織によって亀裂の進展経路が異なることが分かった。

次に、SEM/EBSDを用いて亀裂周辺の組織を観察した。例として、Fig. 1にpMg-EおよびMgYの亀裂周辺のInverse Pole Figure (IPF) mapを示す。IPF mapより、pMg-CおよびpMg-Eでは、亀裂は粒界を進展していることが確認された。このことから、初期結晶組織が異なるため、pMg-CとpMg-Eの亀裂進展の違いが発生したと考えられる。また、MgYでは亀裂を隔

てて同じ結晶方位を示している領域が確認されたことから、亀裂は結晶粒内を進展していることが確認された。第一原理計算によれば、マグネシウムにイットリウムを添加すると粒界が強化されることが示されている。本研究における超高速衝突試験では、イットリウムの添加により亀裂の進展が粒界破壊から粒内破壊に変化することが明らかになり、イットリウムによる粒界強化効果は超高速変形に対しても有効であることがわかった。

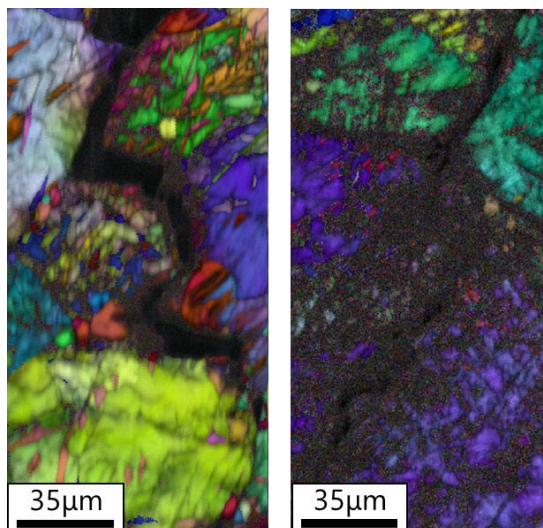


Fig. 1 Superimposed images of IPF map and IQ map around a crack in extruded pure magnesium after the impact at 154K and extruded Mg-0.3at.%Y after the impact at 173K.

まとめ

1. SPH法によるシミュレーションから、超高速衝突試験ではクレータ周辺にひずみが蓄積され、衝突時に融点を超える温度上昇が生じることがわかった。その後の冷却過程でクレータ近傍には再結晶や回復が発現することが予測された。
2. マグネシウムでは、クレータ近傍で再結晶による微細組織形成が確認された。クレータからの距離が遠くなると再結晶、および回復の程度が低減することがわかった。
3. イットリウムを添加したマグネシウムにおいて、クレータ近傍では純マグネシウムと比較してより微細な組織を形成することがわかった。
4. イットリウムを添加することにより、粒内破壊および亀裂の数密度の低減が確認された。粒界を強化する元素の添加によって、超高速衝突における破壊の抑制が可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) N. Kawai, K. Tsurui, S. Hasegawa and E. Sato: Rev. Sci. Instrum., 81 (2010), 115105.
- 2) H. Somekawa, Y. Osawa, A. Singh, K. Washio, A. Kato and T. Mukai: Mater. Trans., 55, No. 1 (2014), 182-187.
- 3) D.J. Steinberg, S.G. Corchran, and M.W. Guinan: J. Appl. Phys. 51(3) (1980).