

超高速衝突によるマグネシウムの変形応答

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

1. 研究目的

実用金属中で最軽量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、強度およ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・低速で変形させた場合の変形応答は、常温・高速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。本研究課題では、マグネシウムに超高速で変形を付与し、形成される組織の観察を通じて、六方晶金属であるマグネシウムの高速変形メカニズムを明らかにすることを目的とした。また、強度-延性バランス改善に有効であることが知られている亜鉛を添加した **Mg-Zn** 合金についても同様の試験を行い、溶質原子が双晶界面や結晶粒界に及ぼす物理的効果を検証することを第二の目的とした。

2. 実験方法

本研究では、超高速衝突試験を行うために、宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いた。ここでは、一段目の圧縮ガスとして水素を、飛翔体として直径 1 mm のアルミナ球を用いた。飛翔体の衝突速度は 3 km/s と 7 km/s の 2 条件とした。ターゲット材料として、厚さ 10 mm, 15mm の純マグネシウム casting material (以降では **pure-Mg**) および厚さ 10 mm の **Mg-0.3Zn** 合金(以降では **Mg-Zn**)を用いた。衝突試験の様子は高速度ビデオカメラで撮影し、試験後の材料の観察にはマイクロ X 線 CT および SEM/EBSD を用いた。

3. 実験結果

(1) アルミナ球の超高速衝突に対する純マグネシウムの変形応答

pure-Mg の試験中に撮影された高速度ビデオカメラの映像から、アルミナ球の衝突時に数 mm 程度のフレーク状フラグメントが飛散していることを確認した。これは、平成 27 年度に実施した試験の結果と同様である。試験後の材料について、マイクロ X 線 CT により材料内部の観察を行った結果、多数の亀裂が形成していることを確認した。

速度 7.0 km/s にてアルミナ球を衝突させた場合に、マグネシウムの材料内部で発現する変形メカニズムを調査するため、試験片のクレーター近傍領域について SEM/EBSD を用いて観察した。観察の結果得られた IPF(inverse pole figure)マップと IQ(image quality)マップを Fig.1 に示す。IPF の結果から、クレーター近傍では微細な等軸結晶粒が形成されていることがわかった。変形前の結晶粒は 1 mm 程度の粗大粒であり、平均結晶粒径 $6.8 \mu\text{m}$ まで微細化されるためには、準静的変形であれば、温度 423K にて相当塑性ひずみ 3.2 程度を

付与しなければならぬため、きわめて短時間に大きなエネルギーが作用したことがわかる。また、KAMの結果から、微細な再結晶粒が形成された領域では、蓄積ひずみが比較的低いことがわかる。以上のことから、衝撃波により生じる蓄積ひずみは動的再結晶により緩和されることが示唆された。

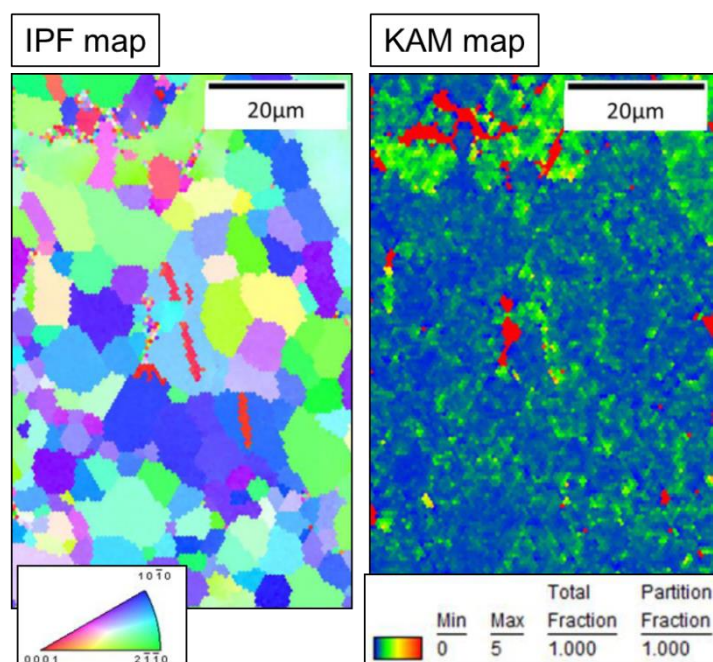


Fig. 1 IPF and KAM images of deformed portion in Pure-Mg plate after hypervelocity impact.

(2) 亜鉛の添加による変形応答の変化

マグネシウムに亜鉛を固溶させた合金を準備した。組織観察の結果から、変形前の Mg-Zn 合金は平均粒径約 $100\ \mu\text{m}$ の結晶粒からなることを確認した。準備した Mg-Zn 合金プレートに対して、アルミナ球を衝突させた。衝突後のクレーター近傍部について、前出の純マグネシウムと同様に観察を行った結果の一例を Fig. 2 に示す。ここでは、衝突速度 $6.8\ \text{km/s}$ の結果を示した。前出の純マグネシウムの場合とは大きく異なり、動的再結晶による結晶粒組織の微細化が一部の結晶粒内のみで起きていることを確認した。KAMにより粒内ひずみを確認したところ、pure-Mgと比較して高いことを確認した。また、亀裂近傍の組織を確認したところ、純マグネシウムの亀裂は結晶粒界に沿って進展しやすい傾向があったが、亜鉛添加合金では亀裂は結晶粒内を進展することを確認した。以上の観察結果から、亜鉛はマグネシウムの動的回復を遅延させる効果があること、および、結晶粒界強度を上昇させる効果があることがわかった。

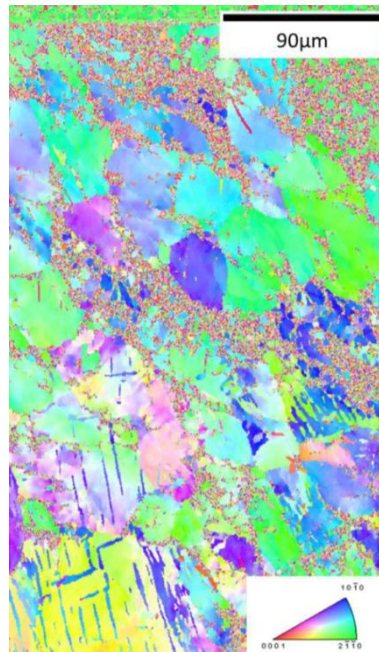


Fig. 2 IPF image of deformed portion in Mg-Zn alloy plate after hypervelocity impact.

3. まとめ

純マグネシウムおよび Mg-Zn 合金に対する超高速衝突試験の結果、以下の知見を得た。

- ・超高速衝撃荷重の作用により、純マグネシウムは脆性的に破壊し、フレーク状破片の飛散と材料内部にき裂を形成する。
- ・変形組織観察の結果、き裂は結晶粒界に沿って進展し、き裂経路の近傍には変形双晶や動的再結晶による結晶粒微細化が発現することがわかった。
- ・結晶粒界を強化する溶質元素として、亜鉛を添加した合金では、き裂は結晶粒内を進展することを確認した。また、亜鉛の添加は衝撃波の伝播に伴うひずみの蓄積を増大させるが、動的回復を遅らせる効果があることを示唆する結果を得た。