

難燃性マグネシウム合金の加工性評価

森 久史* 辻村 太郎* 石塚 弘道**

Evaluation of Workability on Flame Resisting Magnesium Alloy

Hisashi MORI Taro TSUJIMURA Hiromichi ISHIDUKA

Workability of flame resisting Magnesium alloy was evaluated by a tensile test at high temperature and an extrusion examination. In addition, we also tried to manufacture a hollow extruded structure, using flame resisting Magnesium alloys. Although, it was difficult to machine the structure at room temperature, the workability was increased with increasing work temperature and lowering processing speed. Under those conditions, it was found that the manufacture of flame resisting Magnesium alloys to the hollow extruded structures was possible without generation of any processing defects.

キーワード：難燃性マグネシウム合金，加工性，押出加工，変形抵抗，中空形材

1. はじめに

鉄道車両用の金属部材の材料置換による軽量化としてはアルミニウム合金が使われてきたが、今後、鉄道車両用の金属部材をさらに軽量化するには、アルミニウム合金よりも比重の小さな金属材料の適用が考えられる。マグネシウム合金（密度：1.7gcm⁻³）はアルミニウム合金（2.7gcm⁻³）よりも密度が小さく、実用合金の中では最も軽く、比強度（密度に対する強度）に優れている。一方で活性金属であるために、その発火点が低いことが欠点であった。近年、マグネシウム合金にカルシウムを添加することで、アルミニウム合金と同様に発火しにくい特徴のある「難燃性マグネシウム合金」が開発された¹⁾。

難燃性マグネシウム合金は一般的なマグネシウム合金よりも強度は向上するものの、弾性率は一般的なマグネシウム合金と同様、アルミニウム合金よりも小さい。難燃性マグネシウム合金の鉄道車両用部材への適用を考えると、剛性低下が問題になるため、ダブルスキン形材（中空形材）のような複雑断面形状の形材を用いて剛性を確保する必要がある。マグネシウム合金の加工は室温では難しいため、熱間条件で加工される。これは難燃性マグネシウム合金についても同様であるが、難燃性マグネシウム合金について加工性を調査した例は今までにはない。

そこで本研究では、まず難燃性マグネシウム合金の変形挙動を調べるために高温変形試験を行い、続いて押出加工の基礎検討の一環として板材の押出性を調べた。そ

の後に、押出加工により中空形材を試作して外観及びその金属組織の特徴について調査した。

2. 難燃性マグネシウム合金の高温における変形抵抗

2.1 目的

塑性加工は、適切な条件下で荷重を加え、素材自体に変形を与えて目的形状を得る手法である。したがって、加工性はその変形に対する抵抗（変形抵抗）で決まる。金属材料の変形抵抗は(1)式のように示される²⁾。

$$K_f = K_0 \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m e^{\frac{Q}{T}} \quad (1)$$

ここで、 K_f は変形抵抗、 K_0 、 a は定数、 ε は歪、 n は加工硬化指数、 $\dot{\varepsilon}$ は歪速度、 m はくびれ抵抗係数であり、 T は絶対温度である。変形抵抗は温度及び歪速度の影響を受けることから、難燃性マグネシウム合金の変形抵抗に及ぼすこれらの影響を知るために高温引張試験を行った。

2.2 試験方法

本試験では難燃性マグネシウム合金の中でも中強度のレベルにある、Mg - 0.1mass%Mn - 2mass%Ca合金（AMX602）を用いた。高温引張試験に使用した試験片の形状はJIS14号試験片（比例試験片）であり、50×30×3mmの板材から機械加工によって作製した。高温引張試験は50トンのサーボ油圧制御型の引張・圧縮万能試験機を用い、大気中で行った。試験は変形応力に対する温度と歪速度の影響を調べるために温度を523K、573K、623Kとし、それぞれの温度において初期歪速度を3.0×10⁻⁴s⁻¹～3.0×10⁻¹s⁻¹として行った。

* 材料技術研究部

** 車両構造技術研究部

特集：材料技術

2.3 試験結果及び考察

高温引張試験で得られた応力-歪線図の例を図1に示す。図1 (a) は初期歪速度一定 ($3 \times 10^{-1} s^{-1}$) として強度と伸びに対する温度の影響を示す。初期歪速度を一定とした時の最大応力 (以下、変形抵抗応力とする) は温度の増加とともに減少したが伸びは温度とともに増加した。特に 623K 下における引張試験では変形抵抗応力が著しく低下して伸びが生じることがわかった。

図1 (b) は 623K 下において変形抵抗応力と伸びに対する初期歪速度の影響を調べた結果を示す。変形抵抗応力は初期歪速度の低下とともに低下するが、伸びが増加した。特に初期歪速度が $3 \times 10^{-4} s^{-1}$ では、応力が約 18MPa の強度が一定となって、著しい伸びを示す定常変形挙動が見られた。このような強度及び伸びに対する温度及び初期歪速度の影響は AZ31 のような一般的なマグネシウム合金でも認められている。このことから難燃性マグネシウム合金の変形抵抗は一般的なマグネシウム合金と同様の傾向を示すことが分かった³⁾。

図2に最大応力を剛性率で規格化して初期歪速度に対して示した。規格化した理由は、強度に対する剛性率の温度依存性を考慮したためである。同図には、応力-歪線から求めた加工硬化指数 (n 値) とくびれ抵抗 (m 値) も示した。この関係より低歪速度、高温度では加工硬化指数が減じてくびれ抵抗が増加する傾向にあることがわかる。

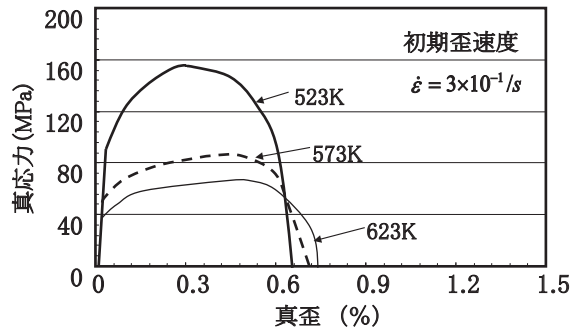
強度の低下は、変形によって生じた加工組織が回復するためであると考えられる。また伸びの増加は、くびれに対する抵抗が増し、均一に変形するようになったためと考えられる。

金属材料を加工する場合、加工硬化が減じる条件のみまたはくびれ抵抗が増加する条件のみでは、加工中に延性破壊が生じやすくなる。そのため加工を行う際には加工硬化とくびれ抵抗との釣り合いが生じる条件が必要になる²⁾。本試験においては、623Kにおける低歪速度側では定常変形が認められている。この定常変形は加工硬化とくびれ抵抗のバランスが定常的に生じて発現する。このことから、難燃性マグネシウム合金は温度が 623K 以上で低速度の条件で加工が可能になると考えられる。

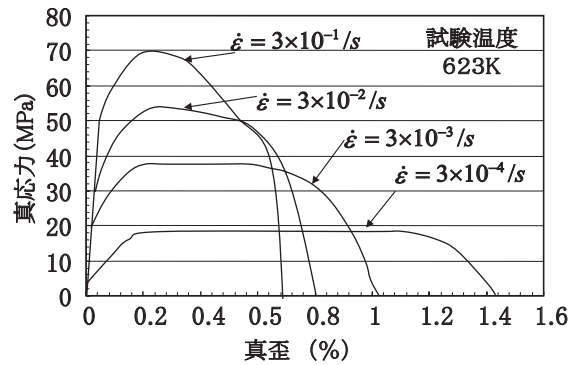
3. 難燃性マグネシウム合金の押出加工性の基礎試験

3.1 目的

車両用部材への加工では、圧延、鍛造、押出技術が適用される。とくに構体素材として適用するためには、押出加工が重要となる。そこで難燃性マグネシウム合金の押出加工性 (押出性) を調べるため、鋳造ビレットから板材に押し出す加工試験を行なった。



(a)初期歪速度($3 \times 10^{-1} s^{-1}$)一定の時の応力・歪曲線



(b)試験温度(623K)一定の時の応力・歪曲線

図1 高温引張試験で得られた代表的な応力-歪線図

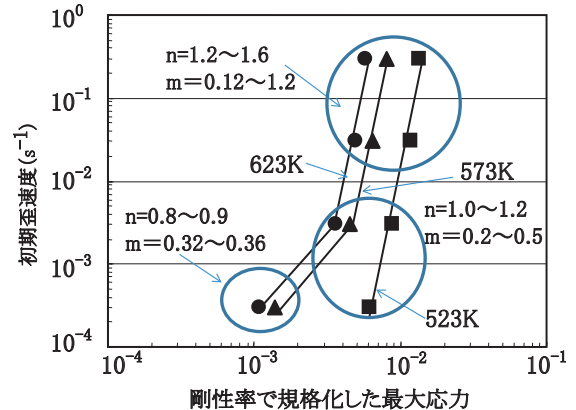


図2 剛性率で規格化した最大応力と初期歪速度及び加工硬化指数 (n) とくびれ抵抗 (m) との関係

3.2 試験方法

試験には、変形抵抗を調べた合金と同様の難燃性マグネシウム合金、Mg - 0.1mass%Mn - 2mass%Ca 合金 (AMX602) を用いた。用いた鋳造ビレットは、 $\phi 50mm \times 1m$ の円筒状であり、精密鋳造によって試作した。ビレットの金属組織を図3に示す。ビレットの金属組織には鋳造組織が認められ、巣等の欠陥はない。また、マグネシウムの生地にアルミニウムとカルシウムの化合物 (白い析出相) が確認される。このようなビレットを組織均質化するために、523K で 6 時間の均質化処理を施した。そのビレットを 1000 トンの油圧型押出装置に装着し、 $30 \times 30 \times 3mm$ の板材に押出加工した。押出加工はビレット温度を 623K に一定加熱し、押出速度を 70, 7,

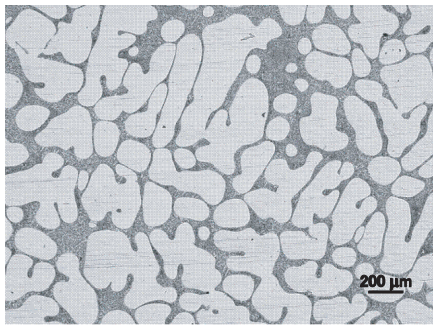


図3 押出試験に用いた難燃性マグネシウム合金の鋳造ビレットの金属組織

0.7m/minとして行った。試験後には押出板材のマクロ観察及び金属組織観察を行った。また、電子線後方散乱解析（EBSD）を用いて押出材の結晶の状態を調べた。

3.3 試験結果及び考察

図4に押出圧と押出速度との関係を示す。押出速度が増加するに伴って、必要な押出圧は増加する。これは押出速度が高いと変形抵抗が増加するためであると考えられる。押出した板の外観観察によれば、表面欠陥は認められず、板材に波打ち、反り、曲がりとは認められなかった。そこで、内部の金属組織の状態、内部欠陥の有無、集合組織の生成について調べるために金属組織観察と結晶方位解析を行った。押出した板材の断面金属組織を図5に示す。図5(a)が0.7m/min、(b)が70m/minの速度で押出した板の金属組織である。

押出後の金属組織は、結晶粒化が進んでおり、図3に見られたような鋳造組織は認められなかった。これは押出加工時に高温変形と再結晶化が生じていることを示している。結晶粒度は低い押出速度ではほぼ均一であるが、押出速度が大きい70m/minでは、粗大あるいは微細な結晶粒が混在してばらつきが認められるようになり、さらに金属組織内には空隙が認められた。

次に集合組織の生成について調べた結果を図6に示す。マグネシウム合金を加工すると、マグネシウム合金の結晶の特質が起因となって集合組織と呼ばれる、加工方向に結晶粒が揃った組織状態が認められる^{1), 4)}。このような組織状態は強度などの異方性を与えるために部材にとって好ましくない。EBSDによる解析では、図6の様に結晶粒の方位によって色が異なって表示される。今回の押出板材について方位解析を行った結果、方位が揃って揃うような集合組織の形成は認められなかった。

マグネシウム合金は加工中に様々な冶金学的な挙動を示すため、集合組織の形成が認められなかった原因や加工中の再結晶のメカニズムを現在解析しているところである^{5) 6)}。押出加工中の組織解析については、今後の解析結果を待つ必要があるが、今回の押出加工の試験で

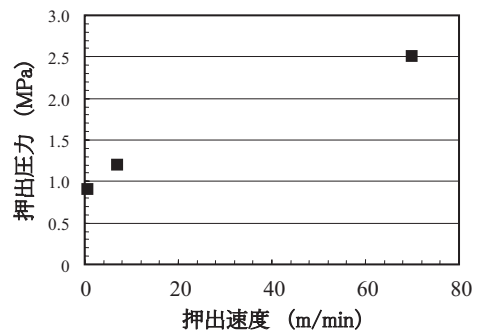


図4 押出圧と押出速度との関係

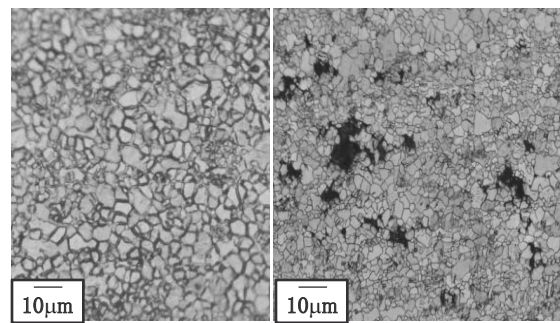


図5 押出板材の断面金属組織観察結果

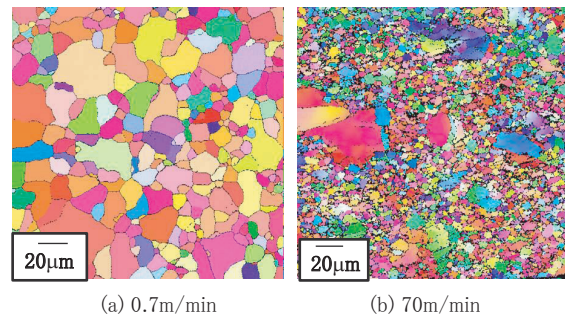


図6 押出板材のEBSDによる方位解析結果

は、変形抵抗の調査で見られた結果と同様、押出速度を極力低下させることが押出圧や加工組織に対して望ましいことがわかった。

4. 難燃性マグネシウム合金製の中空型材のモデル型材の試作

4.1 目的

難燃性マグネシウム合金は弾性率がアルミニウム合金よりも低いため、剛性を確保するには断面構造を工夫する必要がある。本研究では、難燃性マグネシウム合金を用いて中空型材のモデルを試作して、外観観察及び金属組織の状態について観察及び解析を行った。

4.2 試験方法

試験に用いた材料はMg - 0.1mass%Mn - 2mass%Ca合

特集：材料技術

金（AMX602）であり、変形抵抗及び押出試験で用いた合金と同種である。試作目的としたモデル形材は図7に示すような中空形材であり、ダブルスキン材と同様の断面トラス形状を有する形材とした。その寸法は、幅が300mm、長さが500mm、高さが21mmであり、トラス数として9節点とし、表裏面板を2mm、リブ厚を1mmとした。モデル形材の試作は、φ55mm×1mの鋳造ビレットを523Kで5時間の均質化処理を行った後に、5000トンの油圧型押出装置を用い、ビレット温度を623K、押出速度を0.7m/minの条件で押出加工した。試作した中空形材について外観観察、曲がり、反りを調べ、さらに断面金属組織観察及びEBSDによる方位解析を行った。

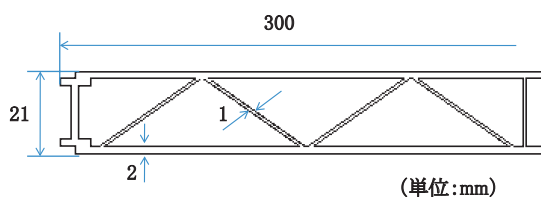


図7 試作検討した中空形材の断面図

4.3 試験結果及び考察

図8にモデル形材の断面の外観を示す。試作した形材には大きな反りや曲がり、リブの座屈などは認められなかった。また表面には、一般的な押出材の表面欠陥などは認められなかった⁶⁾。また、寸法精度は表面板厚が2±0.5mm、リブ厚が1±0.3mmであった。この精度はマグネシウム合金押出材のJIS規格範囲内にあった。モデル形材の表面板部分について金属組織及び方位解析を行った。図9(a)に金属組織観察の結果、図9(b)に方位解析の結果を示す。金属組織は結晶粒が認められ、押出加工時に適切な金属組織の変化が生じていることがわかった。また断面金属組織には巣などの内部欠陥は認められなかった。さらに結晶方位について解析した結果、集合組織が生成していないことを確認した。難燃性マグネシウム合金は高温下、低速度の条件で押出加工を行うことにより、寸法精度にばらつきが認められず、さらに加工欠陥も生じない中空形材を試作できることが確かめられた。現在、このモデル形材に対して強度、剛性の確認や溶接性についての調査を進めている。

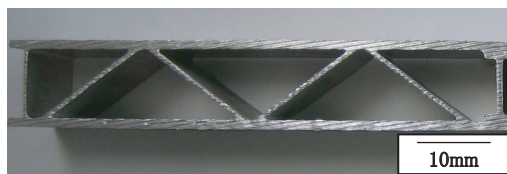
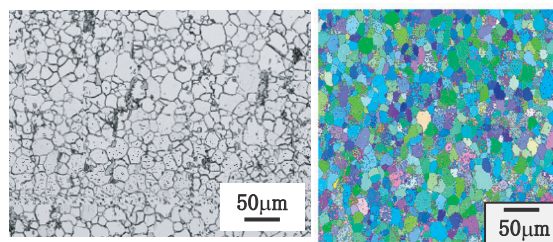


図8 試作したモデル形材の断面外観

5. まとめ

難燃性マグネシウム合金の高温変形試験を行って変形



(a) 金属組織 (b) 方位解析結果

図9 モデル形材の表面板部の金属組織観察及び方位解析結果

抵抗挙動を調査し、続いて押出加工の基礎検討の一環として板材の押出性について調べて加工性を評価した。その後、押出加工により中空形材を試作して外観及びその組織的な特徴について調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 難燃性マグネシウム合金の変形抵抗に温度と歪速度の依存性が認められ、変形抵抗を下げるためには温度と歪速度の調整が必要になる。
- (2) 難燃性マグネシウム合金の押出は、623K以上の高温下において低速度で加工するのが望ましい。早い加工速度では、内部欠陥が発生する。

今後はモデル材の機械的性質、溶接性等の調査を進めると同時に長尺形材の試作等について検討する予定である。

謝辞

本研究にご助力いただいた東日本旅客鉄道(株)、東海旅客鉄道(株)、西日本旅客鉄道(株)、九州旅客鉄道(株)、(社)日本マグネシウム協会、(独)産業総合技術研究所中部センター、(株)和伸工業に感謝の意を表す。

文献

- 1) 秋山茂, 上野英俊, 坂本満, 平井寿敏, 北原晃: 難燃性マグネシウム合金の開発, までりあ, Vol.39, No.1, pp.72-74, 2000
- 2) 馬場義雄: アルミニウムの熱間加工に関する諸問題, 軽金属, Vol.27, No.12, pp.616-630, 1977
- 3) 村上陽太郎, 圓城敏男, 久保宏: マグネシウム合金の高温変形にともなう組織の変化について, 軽金属, Vol.11, No.5, pp.342-354, 1961
- 4) 金子純一, 菅又信, 沼政弘, 西川泰久, 高田秀男: マグネシウム合金展伸材の機械的性質と成形性に及ぼす集合組織の影響, 日本金属学会誌, Vol.64, No.2, pp.141-147, 2000
- 5) 千野靖正, 馬淵守: マグネシウム合金の塑性加工プロセス, 軽金属, Vol.51, No.10, pp.498-502, 2001
- 6) 村井 勉: マグネシウム合金の押出加工: 軽金属, Vol.54, No.11, pp.472-477, 2004