

引張双晶によるマグネシウム合金板の集合組織分散と成形性の向上

前田尚希

指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

マグネシウムは実用金属材料で最も軽量であり、比強度・比剛性に優れ、資源も豊富に存在するという様々な利点を持つ。しかしながら、現在マグネシウム合金の加工はほとんどが高温下によるものである。マグネシウム合金の結晶構造は最密六方晶であり、圧延材では底面が板面に平行に配列される底面集合組織を形成する。また、冷間での非底面すべりの臨界分解せん断応力が底面すべりのそれに比べて非常に高く、塑性変形は底面すべりに大きく依存する。このことから塑性変形に必要なすべり系が足らず、冷間での成形加工を困難とする。そのため適用の拡大が妨げられ、その改善が求められている。

Wagoner¹⁾らの研究によれば、マグネシウム合金圧延板に形成された底面集合組織は、双晶変形による結晶方位回転で分散することがわかっている。それを受け須長²⁾らは、AZ61 圧延板に繰り返し曲げ加工を施すことで曲げ圧縮側に引張双晶を形成させ、底面集合組織を分散させた。これにより成形性は向上したが、曲げ引張側では引張双晶が形成されず、曲げ戻し過程を有するため双晶回復が起きる。そのため、効率よく引張双晶を形成させることができない。

そこで、本研究ではマグネシウム合金の一種 AZ31 圧延板の冷間における成形性向上を目的とする。まず、AZ31 圧延板に圧延方向および圧延直角方向に様々な量で圧縮荷重を負荷し、引張双晶を発生させる。続いて熱処理により圧縮荷重で蓄積されたひずみの除去を行い、X 線回折による集合組織の測定を行う。そして、単軸引張試験及び張出し試験を実施することで、引張双晶の発生による集合組織の変化が成形性に与える影響を明らかにする。

2. 実験方法

2.1. 圧縮試験

本研究で用いる供試材は AZ31 圧延板である。板厚は 0.8mm であり、試験片を 100×100mm に切り出す。また、長さに対して板厚が十分小さいため、圧縮時に座屈が生じてしまう。そこで座屈防止用ジグを用いて圧縮させる。圧縮条件は RD6mm, RD6mm+TD4mm, RD8mm+TD8mm 圧縮(RD は圧延方向, TD は圧延直角方向を指す)の 3 種類と定めた。RD と TD 両方向の圧縮の場合、RD を先に圧縮することとする。

2.2. 張出し試験

等二軸引張変形では試験片の寸法を 65×65mm に切り出し、試験を実施する。成形限界の調査では長手方向の長さを固定し、幅を変化させることでひずみ状態を変化させる。試験片の寸法は長手方向の長さは 65mm、幅は 65, 40, 25, 15mm とし、幅が 25, 15mm の場合はドッグボーン型とする。また、長手方向を RD に対して 0°, 45°, 90°方向に切り出し、各方向で試験を実施する。パンチは直径 25mm の球頭を使用し、パンチの上昇速度は 0.2mm/s とする。測定にはデジタル画像相関法を用い、室温で破断するまでパンチを上昇させる。

2.3. 単軸引張試験

試験片の平行部長さは 36mm、標点間距離は 25mm であり、長手方向を RD に対して 0°, 45°, 90°で切り出し、各方向で試験を実施する。測定には張出し試験と同様、デジタル画像相関法を用いて室温で破断するまで行う。チャック変位速度は 12mm/min、ひずみ速度は 4×10^{-3} /s とする。

3. 実験結果

3.1. 圧縮後の集合組織と成形性

Fig. 1 に X 線回折によって得られる圧縮後の底面の極点図を示す。Fig. 1(a)より圧縮なしの供試材は底面集合組織を形成し、その底面が ND(板厚方向)に強く集積している。マグネシウムは c 軸の法線方向に圧縮荷重を加えると $\{10\bar{1}2\}$ 変形双晶である引張双晶が形成され、結晶格子が約 86°回転する。したがって、Fig. 1(a)以外のそれぞれの条件で圧縮荷重された極点図では、圧縮荷重されることで引張双晶が形成されていることが確認できる。それぞれの圧縮条件で最後に圧縮した方向に底面が集積する傾向にあり、RD 一方向の圧縮では RD, 両方向の圧縮では TD に強く底面が集積した。また、圧縮荷重後に等二軸引張下で張出し試験を実施したところ、Fig. 2 で示される結果となり、RD8mm+TD8mm 圧縮条件で最も成形性が向上した。

3.2. 熱処理後の成形性

圧縮荷重後、最も成形性が向上した RD8mm+TD8mm 圧縮条件に対して熱処理を行い、等二軸引張下で張出し試験を実施した。熱処理はひずみ除去を目的とし、その設定温度はマグネシウム合金の再結晶温度 200°C~250°C 付近である 160, 180, 200, 220, 240°C で行った。保持時間は 30 分である。Fig. 3 に熱処理後の張出し試験結果を示す。温度が 160°C の場合を除いて、温度の上昇と共に成形性が向上している。そして、結晶組織の観察から再結晶の開始が 180°C~200°C で確認された。よってこれに起因し、圧縮荷重によって蓄積されたひずみが除去されたと考えられる。そして、最も成形性が良くなったのは熱処理温度が 220°C のときであった。この温度での成形性は圧縮なしの供試材と比べ、TD のひずみは 3.6 倍、RD のひずみは 2.3 倍、張出し高さは 2.6 倍にもなる。

また、他の圧縮条件においても同様に成形性を調査した。一般に塑性変形量が多いと再結晶温度が低下することから、RD8mm+TD8mm 圧縮条件における結果より、温度 240°C で熱処理を行った。圧縮なしの供試材は熱処理を行っても成形性は向上せず、RD6mm, RD6mm+TD4mm の圧縮条件においては、RD8mm+TD8mm 圧縮条件と同様に熱処理によるひずみ除去によって成形性が向上した。

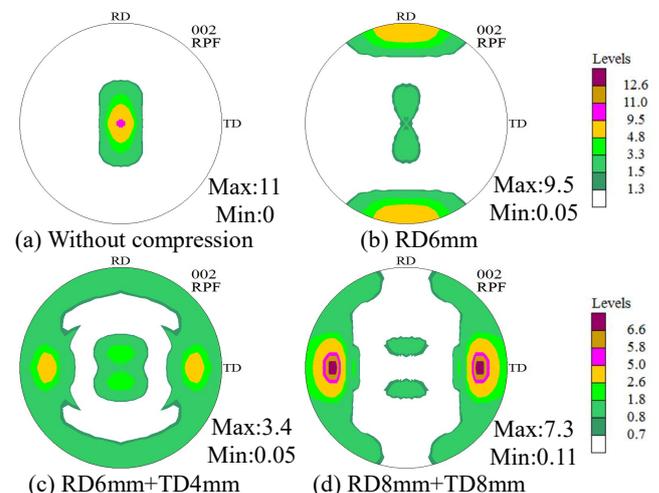


Fig. 1 Pole figures after compression

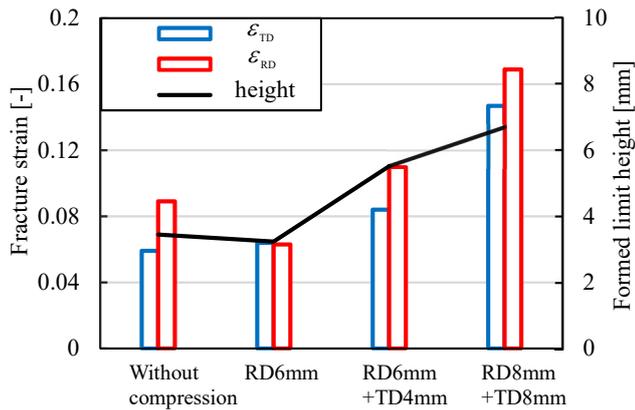


Fig. 2 Effect of compression on formability

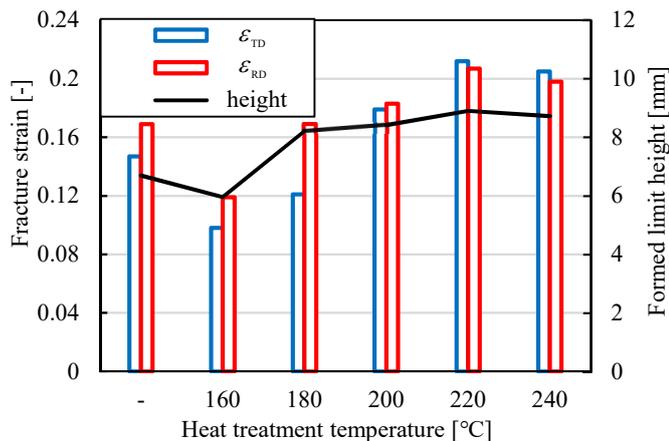


Fig. 3 Effect of heat treatment on formability after RD8mm+TD8mm compression

3.3. 極点図の強度と成形性

熱処理後も X 線回折を行い、これまでの結果を基に極点図の強度と成形性の関係性を調査した。Fig. 4 に極点図の強度と成形性の関係性を示す。横軸は極点図の最小強度であり、等二軸引張における破断ひずみ及び張出し高さをプロットしたものである。そのプロット点は白抜きが前述 3.1 節の結果の熱処理なし、塗りつぶしが前述 3.2 節の結果の熱処理ありを示す。Fig. 4 より最小強度が上昇することによって成形性が向上する傾向にあることがわかる。ここで、相関性を調べるために相関係数を求めてみると、TD 及び RD の破断ひずみではそれぞれ 0.72, 0.82, 張出し高さでは 0.76 となった。一方、横軸を極点図の最大強度とした場合においても同様に求めてみると、それぞれ順に -0.22, -0.42, -0.41 であり、明らかに最小強度の値の方が成形性についての相関性が高いことを示した。

3.4. 成形限界線図(FLD)

Fig. 5 に圧縮なしの供試材と RD8mm+TD8mm 圧縮後 220°C で熱処理した材料における各方向での FLD を示す。長手方向のひずみを ϵ_1 、幅方向を ϵ_2 としている。

圧縮なしの供試材は平面ひずみ引張から等二軸引張領域において著しく成形性が低下する。一方、RD8mm+TD8mm 圧縮後 220°C で熱処理した材料では、圧縮なしの供試材と比べ、単軸引張変形下では成形性は向上しないが、両方向による圧縮によって平面ひずみ引張から等二軸引張領域での成形性が向上した。また、単軸引張試験において、ひずみ 10% 時での各方向を平均した r 値は 3.4 から 1.3 へと圧縮負荷により大きく低下した。

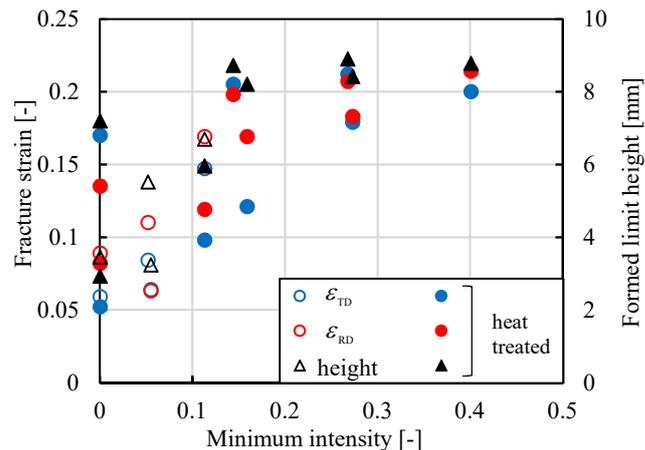


Fig. 4 Relationship between minimum intensity of pole figure and formability

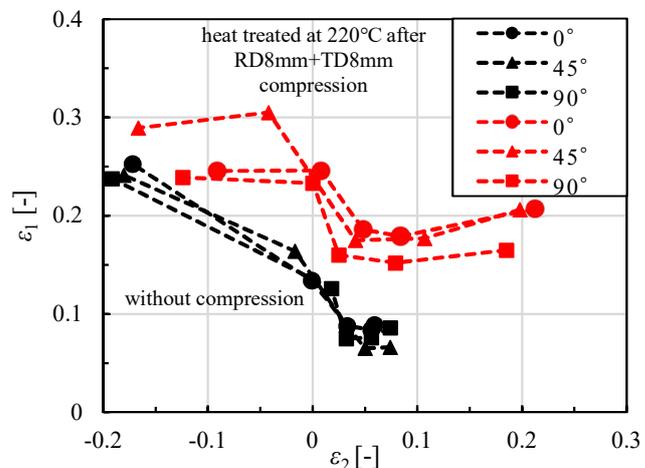


Fig. 5 Forming Limit Diagram

4. 考察

底面集合組織を分散させる過去の研究^{2),3)}では最大強度がどれほど減少したかにしか着目されておらず、最小強度の値には着目されていない。しかし、Fig. 4 の結果から最小強度の値は非常に重要である。特に冷間における成形性の向上には、最小強度の値をいかに上昇させるのかに重点をおく必要があり、等二軸引張においては活動するすべり系が底面に強く依存しているのではないかと考えられる。そして、平面ひずみ引張から等二軸引張領域における RD8mm+TD8mm 圧縮後 220°C で熱処理した材料の成形性向上は、底面の最小強度が上昇したことによる底面すべりの活発化や r 値の低下によって板厚方向のひずみを促進したためだと考えられる。

5. 結言

本研究により以下の知見を得た。

- ・引張双晶により最後に圧縮した方向に底面が強く集積する。
- ・底面の極点図における最小強度の値と成形性の間には高い相関があり、最小強度の値が高いほど成形性は向上する。
- ・RD8mm+TD8mm 圧縮後 220°C で熱処理した材料は平面ひずみ引張から等二軸引張領域で成形性が大きく向上する。

参考文献

- 1) R. H. Wagoner, X. Y. Lou : Journal of Materials Processing Technology, 177-1(2006), 483-485
- 2) 須長好古, 田中良典 : 軽金属, 59-12(2009), 655-658
- 3) 千野靖正, 馬渕守 : 塑性と加工, 50-585(2009-10), 897-901