

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 8月29日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656468

研究課題名（和文）回転曲げ繰返し強変形を利用した金属管材の組織制御及び結晶粒微細化プロセスの開発

研究課題名（英文）Development of Novel Cyclic Rotating Bending Process for Control of Microstructure and Grain Refinement of Metal Tubes

研究代表者

真鍋 健一（MANABE KENICHI）

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：10145667

研究成果の概要（和文）：本研究では、金属管を回転しながら曲げて初期断面形状を変えることなく組織制御と微細化を行う革新的で効率的な CRB 法の開発を目指し、CRB 試験機を設計試作した。直径 12.8mm で肉厚 0.8mm のマグネシウム合金管 AZ31 での原理検証実験の結果、曲げ角度 150°、回転速度 20rpm で、150 から 350℃までの種々の温度で変形させた実験ではどの温度においても CRB 法の方が結晶粒微細化ができることを確認した。一定温度での熱処理と CRB 変形を行った微細化後のマグネシウム合金管は、200℃で CRB 変形をさせた場合、一定温度の熱処理よりも最も引張強度と延性が向上した。

研究成果の概要（英文）：

As a novel grain refinement and microstructure control method, a cyclic rotating bending processing (CRB) method for metal tubes is proposed and investigated in the present study. The principle is on the basis of the severe straining mechanism of metal tube by using a continuous scheme with the CRB method such as Ono-type rotating bending fatigue testing method. To verify the validity and confirmation of the method, a new CRB processing apparatus is developed and then experiments with magnesium alloy tube AZ31 were carried out using the developed apparatus. CRB experiments for AZ31 are conducted under constant rotation speed of 20 rpm and under different temperatures from 150 to 350 ° C. As a result, it is seen that CRB deformation at the lower processing temperature is effective to refine the grain size compared with the case of heat treated ones at any temperature. In addition, tensile properties at room temperature of the magnesium alloy tube, which is subjected to CRB deformation at 200 ° C, result in the most enhancements in the strength and ductility.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：金属管、強変形、回転曲げ、繰返し塑性変形、結晶粒微細化、組織制御、マグネシウム合金管、加工条件

1. 研究開始当初の背景

金属材料の組織制御法および結晶粒微細化技術は、基本的には材料へ何らかの各種変形モードの強変形を与えることを基本原理として行われている。そのプロセスは以下の6種類に大別される。

(1)ECAE(Equal Channel Angular Extrusion)法、(2)ARB(accumulative Roll Bonding)法、(3)多軸鍛造法(MDF:Multi Directional Forging)、(4)異周速圧延法、(5)ねじり荷利用のHTP法、(6)圧縮ねじり加工法、(7)押し・ECAE複合法(管材創製法)、(8)連続繰り返し曲げ加工(CCB)

上記の(7)を除く微細化プロセスは、バルク材や薄板材を対象に急速に進展を遂げているのも関わらず、管材に着目した組織制御法および微細化研究は皆無に等しい。

唯一の管材を対象とした例は、研究代表者らによる上記(7)の「押し」と「ECAE法」の複合プロセスであり、マグネシウム合金AZ31に適用し平均1.5 μm までの結晶粒微細化には成功している。しかし、被加工材の断面形状が変わってしまい、また工程数が多く生産性が極めて低いため、実用面で克服すべき課題が山積している。上記プロセス以外で、被加工材の断面形状を変えることなくより生産性の高い管材の微細化プロセスの開発が必要と考えられていた。

2. 研究の目的

本研究では、上記背景の下に、管材の組織制御法及び結晶粒微細化法に着目し、研究代表者らによる上記(7)では達成困難な被加工材の断面形状を変えることなく生産性の高い新たな微細化プロセスの開発を目指している。原理的にこれまで着想されていない革新性に満ちている管状素材を回転しながら曲げるプロセスにおける引張り・圧縮とねじりの付加による管材の組織制御法および結晶粒微細化法の繰り返し回転曲げ法(cyclic rotating bending process: CRB法)を考案し、その実現可能性を実験的に明らかにすることを目的とした。金属組織観察に適した直径12.8mm厚0.8mmの管寸法のマグネシウム合金管をモデル材料として用い、CRB法による組織制御と結晶粒微細化の可能性を実験的に検討し、本方式における組織制御と結晶粒微細化の効果実証と、各種因子の解明並びにその適正条件に関する指針を提示することを試みた。

3. 研究の方法

3. 1 新考案のCRB法の原理

管材に曲げ変形を与えると、中立面より外側には引張り、内側には圧縮の変形がそれぞれ生じる。この曲げ変形状態の管材に回転を与えると、その管材の各変形部は引張りと圧縮の変形を交互に繰り返し受ける。これが被加工材の断面形状を変えることなく管材に強変形(ひずみ)を付与するCRB法の基本原理である(図1)。

なお、被加工材の断面形状を変えることなくより生産性の高い管材の微細化プロセスの開発法としては、図1の基本原則を応用し、ねじり変形を付与し、かつロール式で管材を長手方向に押し込みながら供給する方式に変更して、繰り返し回転曲げを多段にすることで可能とするものである。本研究ではその基本原則検証のため、図1に示す基本原則について実験的に検証研究を行う。

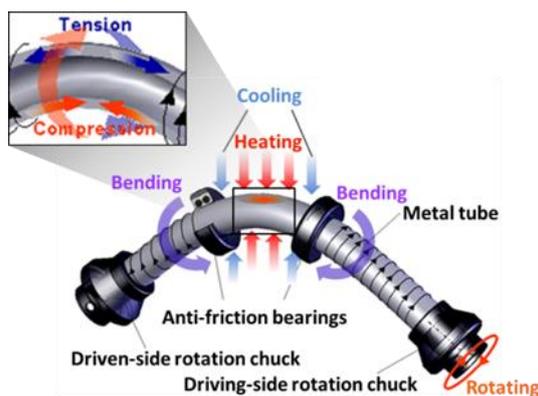
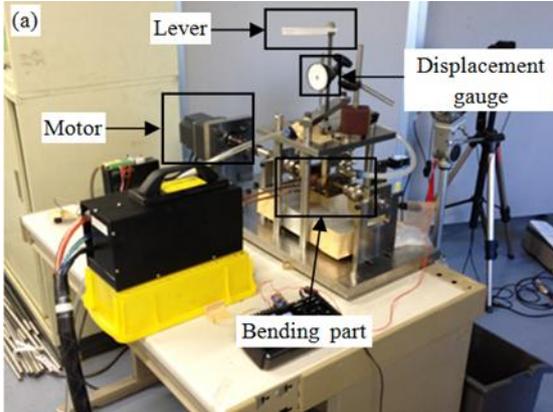


図1 新たに開発したCRB法の基本原理

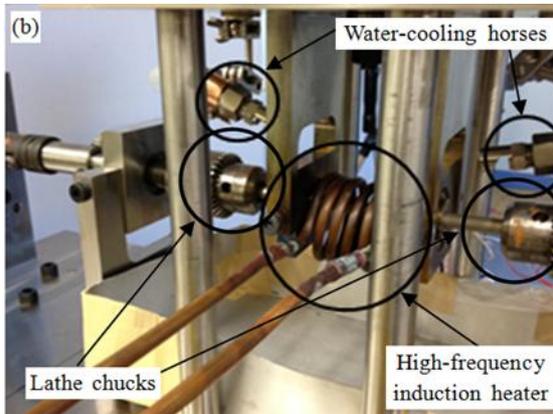
3. 2 新CRB装置の開発

本CRB法を実現するために、図2に示すCRB装置を設計開発した。開発した装置では図1の上下を逆にし中央の二つの負荷支点が同時に下方に移動する構造とした。図2(a)の上部にあるレバーを手動で回すことによって中央の二つの負荷支点が固定されているステージが移動し、管材を下方へ押し込み、それにより曲げ変形が与えられる。曲げ変形量は変位計の値と幾何学的関係から算出する。またモーターを回転させることによってチャックを介して管材に回転が与えられる。さらに、高周波誘導加熱装置による局部加熱を曲げ変形部に行うことにした。放射温度計によって管材の表面温度を測定し、その値を管材全体の温度と仮定する。結晶組織保持のため、各試料は変形後すぐに水冷を行う。曲

げ変形部の押込み工具間の距離は 80mm、最大押込み変位は 50mm、またモーターの最大トルクは 1.3N・m、高周波誘導加熱装置の最大出力は 10kW である。



(a) 装置全体

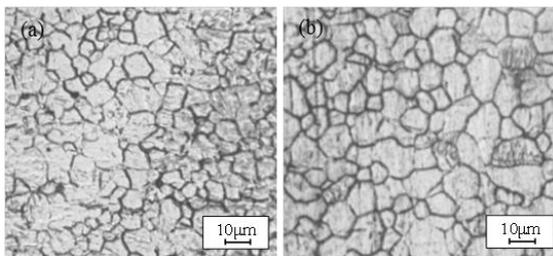


(b) 回転曲げ部の拡大写真

図 2 開発試作した CRB 装置の外観

3. 3 供試材および実験方法

供試材は、軽量材料の外径 12.8mm、肉厚 0.8mm の AZ31 マグネシウム合金押出管を用い、それを長さ 200mm に切り出したものを試験片として用いた。図 3 に納入材の金属組織写真を示す。その結晶粒径は長手方向に約 6 μ m 及び横断面方向に約 7 μ m である。



(a) 長手方向 (b) 横断面方向

図 3 AZ31 マグネシウム合金管の金属組織

回転曲げにおける曲げ角度は約 150° とした。金属組織へ影響する加工因子として加熱温度は 150、200、250、300 及び 350℃ の 5 条件とし、回転速度は 20rpm で 10 分間とした。同様に熱処理の影響を調べるため同じ 5 条件で水冷をしたあと金属組織観察も行った。また、結晶組織観察および引張試験に用いる試験片は、図 2(a)のテーブル移動用のレバーを初期位置に戻すことによって CRB を行った試験片を直管へ戻したものと比較のため熱処理のみを行ったものおよび納入材を用いた。結晶組織は回転曲げ変形部中心の長手方向から採取し、および納入材と熱処理のみを行ったもので対応する同じ長手方向から採取し腐食し観察した。腐食液にはピクリン酸溶液を用い、切断法により平均結晶粒径を算出した。また引張試験は標点間距離 50mm の試験片で SHIMADZU AG-50kN の引張試験機を用いて引張速度 2.5mm/min で室温にて行った。

4. 研究成果

4. 1 CRB 変形温度の金属組織への影響

図 4 に各種温度における CRB 変形後の金属組織を示す。なお、図(a)と(e)は 150℃、図(b)と(f)は 200℃、図(c)と(g)は 250℃、図(d)と(h)は 350℃ である。また、図(a)、(b)、(c)、(d)は CRB 変形なしの条件であり、図(e)、(f)、(g)、(h)は CRB 変形後である。CRB により新しい結晶粒が形成され結晶粒が増加していることがわかる。このことは 150℃ の比較的低い変形温度でさえ、再結晶が生じて結晶粒の微細化が大きく寄与していることを意味している。結晶粒界では粗大化し、そこでの結晶粒の形状は図(g)と(f)のように変形温度が 250℃ から 350℃ に高くなると円形に近い形状から角が表れ四角形状へと変化している。

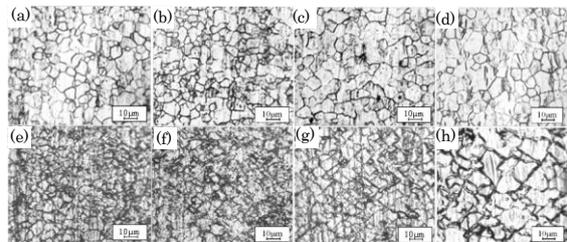
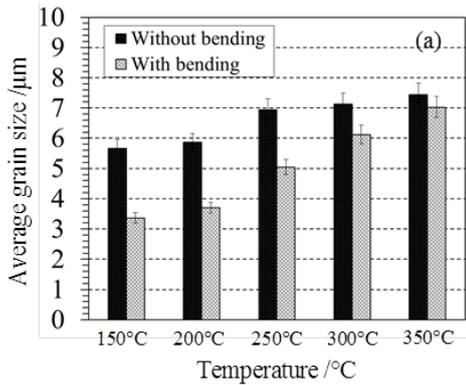


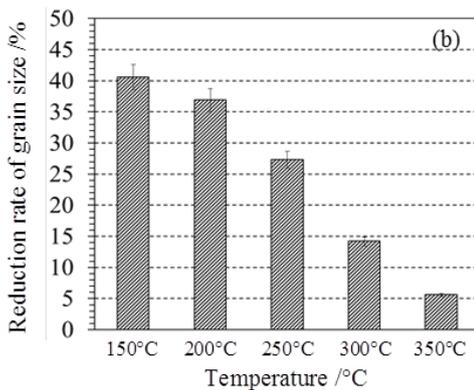
図 4 各種温度での CRB 変形後の長手方向の金属組織

4. 2 CRB 変形温度の結晶粒径への影響

図4の金属組織写真をもとに実際に長手方向の結晶粒径を測定した結果を図5に示す。平均結晶粒径はCRB変形によってどの温度においても小さくなり微細化されていることがわかる。その微細化率は低温ほど大きく、150°Cでは40%にも達している。このことは結晶粒微細化の効果は本材料のマグネシウム合金AZ31の場合は変形温度が低いほど大きいことを示している。



(a) 平均結晶粒径



(b) 結晶粒径の減少率

図5 CRB 変形による長手方向の結晶粒微細化効果

4. 4 室温の引張特性に及ぼすCRB変形温度の影響

図6に、種々の温度でCRB変形した後に室温での引張試験で得られた真応力-真ひずみ曲線に及ぼす影響を示す。室温ではCRB変形したものは強度向上が見られる。しかし、伸びは納入材と比べても低下している。150°Cでは強度が減少するが、伸び、つまり延性はCRB変形後には増加している。しかし、CRB変形の有無に係わらず、その延性は納入材より低下している。CRB変形温度を200°Cまで上げると、延性も強度もともに増

加する。CRB変形によって、CRB変形しないものと比べて優れた力学特性が得られることがわかる。

しかし、250°Cまで温度を上げると、その力学特性は逆に納入材よりも低下するようになり、むしろCRB変形は逆効果になることがわかる。

CRB変形が200°Cより低い場合には、結晶粒の成長速度は遅く、さらに強変形は組織の再結晶を促進させることができる。そのため、結晶粒は著しく微細化が進行する。結晶粒が微細化されれば、強変形の効果は結晶粒界だけでなく粒形状にもほとんど影響を及ぼさなくなる。したがって、材料の延性はCRB変形によって微細結晶粒によって増加する。

しかし、変形温度は250°C以上では粒成長速度が速くなり、変形過程と再結晶プロセスが同時に引き起こされるので、結晶粒径は同様に図4に示すように納入材と比較して著しく増加する。

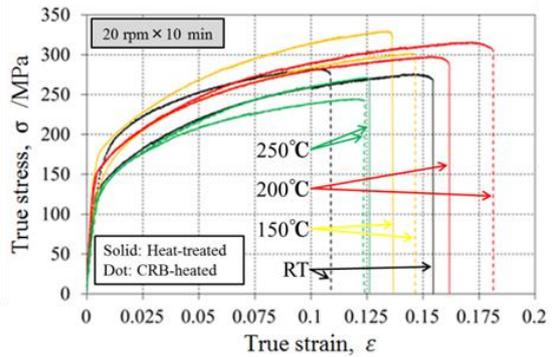


図6 種々の温度でCRB変形した後に室温での引張試験で得られた真応力-真ひずみ曲線

4. 5 室温の力学特性に及ぼすCRB変形時間の影響

図6においてもっとも優れた機械的性質が得られた200°CのCRB変形条件下において室温における引張試験特性に及ぼす変形時間の影響を調べた結果を図7に示す。本実験結果から、すべての変形時間において、CRBと加熱を行った試料の強度と延性が熱処理のみを行ったものと比較して向上したことがわかる。本条件下では最も長い10minが強度と延性がともに向上する適正な条件であるといえる。

以上から、CRBが金属管材の結晶粒微細化のための有効な強変形プロセスであることが確認された。

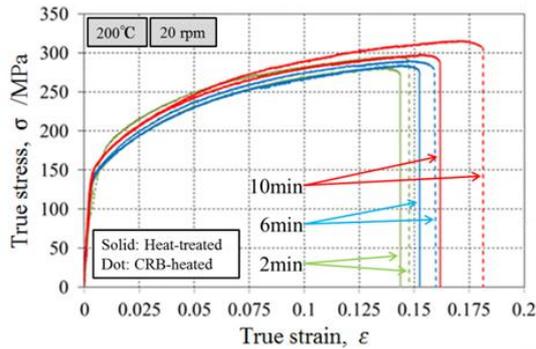


図7 種々の変形時間でCRB変形させた後の室温における引張試験で得られた真応力-真ひずみ曲線

以上の成果は以下のとおりにまとめられる。

1、管状素材を回転させながら曲げ変形を付与するプロセスにおいて、繰返し引張り・圧縮変形とねじりの付加による革新性に満ちた管材の組織制御法および結晶粒微細化法の繰返し回転曲げ法(cyclic rotating bending process: CRB 法)の有効性を実証するため、四点曲げの小野式疲労試験をベースにして高周波誘導加熱方式を用いたCRB装置を開発試作した。

2、マグネシウム合金管AZ31を用いて結晶粒微細化と組織制御の可能性を検証した結果、150～350℃のどの温度においても熱処理材より、CRB変形のほうが微細化され、また変形温度の低い方がより微細化されることがわかった。CRB変形時間を10分まで変えて影響を調べた結果、変形時間が長いほど強度と延性の向上が大きいことを確認した。

3、CRB法による結晶粒微細化後の強度特性評価を行った結果、200℃の条件下でCRB変形をした場合に最も強度と延性が向上することを明らかにした。

以上の結果から、CRB法は金属管材の結晶粒微細化のための強ひずみ加工法として有効である可能性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

(1) Z. C. Zhang, K. Manabe, T. Furushima and K. Tada: Development of Cyclic Rotating Bending Process for Microstructure

Control of AZ31 Magnesium Alloy Tube, *Advanced Materials Research*, 652-654(2013), pp. 1956-1960.
doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.652-654.1956

〔学会発表〕(計2件)

(1) Z. C. Zhang, K. Manabe, T. Furushima and K. Tada: Development of Cyclic Rotating Bending Process for Microstructure Control of AZ31 Magnesium Alloy Tube, The 3rd International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes (ICAMMP2012), 2012年12月22日～2012年12月23日, Beihai, China.

(2) Z. Zhang, K. Manabe, K. Takahashi, T. Furushima and K. Tada: Development of Cyclic Rotating Bending Apparatus for Microstructure Control of Metal Tubes, 第63回塑性加工連合講演会, 2012年11月04日～2012年11月06日, 北九州国際会議場.

〔その他〕

ホームページ等なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

真鍋 健一 (MANABE KENICHI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 10145667

(2) 研究分担者

古島 剛 (FURUSHIMA TSUYOSHI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 30444938