T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	純アルミニウム板ならびに純銅板の電磁成形挙動と高速変形組織
Title(English)	
著者(和文)	神戸貴史
Author(English)	Takashi Kambe
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11445号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:熊井 真次,村石 信二,中村 吉男,藤居 俊之,小林 郁夫
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11445号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	材料　　系 材料　　コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士　（　工学　） Doctor of
学生氏名： Student's Name	神戸　貴史	指導教員（主）： Academic Supervisor(main)	熊井　真次
		指導教員（副）： Academic Supervisor(sub)	村石　信二

要旨（和文 2000 字程度）
Thesis Summary（approx.2000 Japanese Characters ）

本論文は，「純アルミニウム板ならびに純銅板の電磁成形挙動と高速変形組織」と題し，以下の 6 章で構成されている．

第 1 章「緒論」では，衝撃塑性加工法とこれを用いて変形させた金属に形成される高速変形組織について紹介し，衝撃加工法の一種である電磁成形法の特徴，電磁圧接法との共通点と相違点について述べるとともに，電磁成形に関する従来の研究について概観している．電磁成形後の組織変化と電磁力によって引き起こされる金属の高速変形挙動とを直接対応させて検討した研究や，電磁成形において回避すべき金属板と金型の接合が起こる条件について検討した研究が極めて少ないこと，そしてこれは電磁成形時の変形挙動を実験的手法によって直接観察することや測定することが極めて困難であることに起因していると指摘している．このような背景の下，本研究では，新たに考案した数値解析モデルを活用し，実験と数値解析の両手法を用いて，金属板の電磁成形挙動ならびに高速変形組織と電磁成形挙動の関係について明らかにすると述べている．

第 2 章「電磁成形挙動を再現する解析モデルの構築」では，まず，本研究の目的を達成するには, 被加工材や金型として用いる金属の選定ならびに成形条件の選択が重要であると述べている．そこで，被加工材には，研究室所有の電磁パルス発生機装置の能力で電磁成形が可能な，高い変形能と導電率を持つ厚さ 1 mm 以下の純アルミニウムと純銅の薄板を，金型には工具鋼を選定した上で，金型の最適形状について実験と数値解析の両面から検討を行っている．その結果，幅 1 mm、深さ 0.5 mm の V 字型の溝を持つ金型を用いれば，実験と数値解析の両者の結果を直接比較することが可能となることを明らかにしている．数値解析に関しては，まず電磁成形過程を，(I)電磁力を受けて変形した金属板が金型に衝突する過程，(II)金型の溝に金属板が流入する挙動と，(III)それに伴う温度上昇過程，(IV)溝流入後の金属板と金型の冷却過程に分類し，(I)を ANSYS Emag-Mechanical の有限要素法モデル(Model 1)を用いて, (I)で得られた情報を初期条件として, (II)と(III)を ANSYS AUTODYN の SPH 法モデル(Model 2)を用いて，さらに(II)と(III)で得られた情報を初期条件として, (IV)を OpenFOAM の有限体積法モデル(Model 3)を用いて統合的に数値解析し，一連の電磁成形過程を再現することに成功している．

第 3 章「純アルミニウム板の電磁成形挙動と高速変形組織の比較」では，厚さ 0.8 mm の純アルミニウム板を V 字型の溝を有する鋼製金型を用い，充電エネルギー2，4，6 kJ の各条件で電磁成形し，4，6 kJ で溝が充填されること，さらに 6 kJ における充填部の先端の形状は一対の角状を呈していたと報告している．組織観察の結果，板表面の結晶粒が溝斜面に沿って大きく引き延ばされていること，板最表面には，直径数～数十 nm の大きさの超微細粒からなる領域が観察される

こと，また溝入口の角部には比較的転位密度の少ない直径数百 nm の等軸粒が観察されることを明らかにしている．

さらに数値解析により，6kJ の条件においては，純アルミニウム板表面が溝の両斜面に沿って，溝内に先行して流入することを明らかにしている．また，溝流入中の板表面のひずみ速度は 10^7 s^{-1} を超え，ひずみも 5～6 程度と非常に大きいが，板厚中央部では，ひずみ速度は 10^5 s^{-1} 程度であるものの，ひずみがほとんど上昇しないことを明らかにしている．さらに板表面ではアルミニウムの融点を超える大きな温度上昇が起き，局所融解する可能性があること，そしてその後，10^8～10^9 K/s オーダーで急速に温度低下することを見出している．実験結果と数値解析結果を対応させることにより，板表面に観察された超微細粒は，急冷凝固により形成された可能性があると結論している．また，角部表面に観察された等軸粒については、マイクロ秒のオーダーでも動的再結晶粒の形成が可能であるとする RDRX（rotational dynamic recrystallization）モデルを用いて説明できると述べている．

第 4 章「純銅板の電磁成形挙動と高速変形組織の比較」では，厚さ 0.75 mm の純銅板を 4，6，8 kJ の充電エネルギーの条件で V 字型の溝を有する鋼製金型を用いて電磁成形し，8 kJ で溝は充填され，頭頂部の形状が峰状を呈していたと報告している．組織観察の結果，板表面の結晶粒が溝斜面に沿って大きく引き延ばされていること，斜面部表面には直径が数百 nm の伸長した等軸粒，転位セル組織およびサブグレインの他，変形双晶も観察されたと述べている．

数値解析により，8 kJ の条件においては，純銅板表面が溝の両斜面に沿って溝内に先行して流入することを明らかにしている．また，溝流入中の板表面のひずみ速度は 10^7 s^{-1} を超え，ひずみも 6 程度と非常に大きいが，板厚中央部のひずみ速度は 10^5 s^{-1} 程度であるものの，ひずみはほとんど上昇しないことを明らかにしている．さらに板表面の温度は 1200 K まで上昇し，その後，10^8～10^9 K/s オーダーの冷却速度で急冷されていることを明らかにしている．実験結果と数値解析結果を対応させることにより，純銅板表面の伸長した等軸粒の形成についても RDRX モデルを用いて説明できると述べている．

第 5 章「純アルミニウム板ならびに純銅板の電磁成形時に金型との接合が発生する条件とその原因」では，電磁成形において防止すべき被加工材と金型との接合が起こる衝突条件ならびにその原因について検討している．衝突速度が 300 m/s を超えるような条件で電磁成形すると，両金属板の頭頂部と金型の溝最深部において接合が起こり，接合界面に中間層が観察されることを見出している．数値解析により，衝突速度が増加すると流入速度が大幅に増加し，溝の両斜面に沿う領域で金属板が大きく突出して溝内に流入するようになり，溝最深部で衝突・合体し，被加工金属と金型の SPH 粒子が混合することを再現している．また，このような領域は 2000 K を超え，局所融解し，10^8～10^9 K/s の高い冷却速度で急冷凝固され，中間層を形成する可能性があることを明らかにしている．解析結果から予測される中間層の位置や大きさならびに組成は，実験によって得られた中間層のそれらとほぼ一致することを見出し，被加工材と金型との接合が起こる衝突条件ならびにその原因について明らかにすることに成功している．

第 6 章「結論」では，各章で得られた成果を統括し，結論を述べている．

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	材料 系 材料 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of （ 工学 ）
学生氏名： Student's Name	神戸 貴史	指導教員（主）： Academic Supervisor(main)	熊井 真次
		指導教員（副）： Academic Supervisor(sub)	村石 信二

要旨（英文 300 語程度）
Thesis Summary（approx.300 English Words ）

An A1050 aluminum sheet and a C1020 copper sheet were collided against a steel mold with a small V-shaped through-thickness groove by using magnetic pulse forming (MPF) at various impact velocity conditions. The MPF behavior of the metal sheets and the relationship between the MPF behavior and the high-speed deformation structure were investigated by using both experimental and analytical methods.

The groove was filled at the high impact velocity condition. In this case, a pair of metal fronts along the groove surface flew into the groove faster than the metal front of the middle area. Almost no change in the grain morphology was observed at the mid-thickness area of the sheet, but extremely large deformation occurred at the sheet surface along the slope of the mold. The strain rate on the sheet surface exceeded 10^7 s^{-1} during the flowing into the groove, and the strain was very large. On the other hand, the strain rate and strain at the mid-thickness area of the sheet were very small compared to those of the sheet surface. A large temperature increase exceeding 1000 K and rapid cooling of 10^8~10^9 K/s order occurred on the sheet surface. The equiaxed grains of several hundred nm were observed on the sheet surface. It is considered that these equiaxed grains were formed by dynamic recrystallization before the temperature decreased. The ultrafine grains of several to several tens of nanometers were observed on the slope surface of the aluminum sheet. Since the temperature of the aluminum sheet surface exceeded the melting point in the analysis result, it is considered that these ultrafine grains were formed by rapid solidification.

The metal sheet and the mold were welded under the high impact velocity condition. The inlet velocity of the metal fronts flowing along the groove increased with increasing the impact velocity, and the protrusion of the slopes became large. The protrusion flowing from both sides combined near the top area. The merged protrusion collided with the deepest part of the groove, the mixing occurred between the metal front and the mold. Local melting and rapid cooling occurred and, the metal sheet and the mold were joined. Therefore, it is important to control the impact velocity to avoid the joining the metal sheet and the mold.

備考 ： 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).