

氏 名	サイフルニザン SAIFULNIZAN BIN JAMIAN
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博第815号
学位授与の日付	平成24年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学 位 論 文 題 目	Application of Functionally Graded Materials for Severe Plastic Deformation and Smart Materials — Experimental Study and Finite Element Analysis — (巨大ひずみ加工およびスマートマテリアルへの傾斜機能材料技術の応用—有限要素法解析および実験的検証—)
論 文 審 査 委 員	主 査 教 授 渡 邊 義 見 准教授 北 村 憲 彦 准教授 佐 藤 尚

論文内容の要旨

Functionally graded materials (FGMs) refer to the composite materials where the compositions or the microstructures are locally varied so that a certain variation of the local material properties is achieved. Determination of compositional gradient and the process of making an FGM is dependent on its intended use. In this study, new possible applications of FGM and its production process were investigated. Three possible application of FGM were proposed.

First, the novel technique in producing ultra fine grain of difficult-to-work materials by equal-channel angular pressing (ECAP) process at ambient temperature was developed by using FGM. For this study, Ti as the difficult-to-work material was tightly encapsulated in a hollow host material made of Al-based FGM matrix. The Al-based FGM as a host material assists the deformation of Ti. The ECAP process was simulated by the finite element method (FEM) to determine the appropriate compositional gradient of Al-based FGM and the position to embed Ti wire. FEM was conducted with Ti embedded into a different host material type as well as a different die channel geometry. The strain distribution of the specimen after a single ECAP pass was analyzed. From the obtained results, it is found that the strain distribution in Ti is

strongly influenced by the host material and the shape of the die channel. An experimental work was carried out to confirm the ability of the proposed technique in producing ultra fine grain of Ti. The host material was prepared by embedding Al-Al₃Ti alloy into Al. Three types of the Al-Al₃Ti alloys with different Al₃Ti volume fractions were used to prepare the host materials. ECAP for specimens was carried out for up to eight passes by route A. The microstructure and hardness of ECAPed specimens were investigated. The changes in microstructure and the increase in the hardness value of Ti with increased number of ECAP passes are evidences showing that Ti is successfully deformed by this technique.

Second, new types of FGM crash boxes with stepwise strength gradient in longitudinal directions were proposed. The property of the proposed FGM crash boxes were analyzed using FEM. Crash behavior of the crash box under axial quasi-static and dynamic impact loads were studied. The obtained load-displacement curves and the crash failure patterns then were evaluated to assess the effect of the stepwise strength gradient of the crash-box. Moreover, four different shapes of cross-sectional i.e. square, circle, pentagon and hexagon were considered. The results show that the FGM crash box is superior to than the homogeneous crash box in overall crashworthiness. Although there are no trigger mechanism introduced, the FGM crash boxes experience the progressive crushing initiated at the impact side.

Third, the FGMs were applied in cylinder tube and pressure vessel field. The thick cylinder is a pressure vessel commonly used in industry. From the strength analysis, if the homogeneous materials are used, it is seen that the most dangerous point is located at the inner portion of the cylinder. However, if the FGMs are used, this situation can be changed. In this study, the analysis of thermo-visco-plasticity and creep characteristics of the FGM thick-walled cylinders and pressure vessels were carried out using FEM. The thick-walled FGM cylinder under mechanical and thermal loadings was replaced by a system of discrete rectangular cross-section ring elements interconnected along circumferential nodal circles. The material properties of FGMs were continuous functions of volume fraction of material composition. The thermo-visco-plasticity and creep behavior of the structures were obtained by the use of an incremental approach. The obtained results show that the material composition significantly affects the effective stress as a function of time at the inside and outside surface of thick-walled cylinder. The use of FGMs can adjust the stress distribution in the structure even though some portion of the structure is subjected to a lower level of stress.

Moreover, one of the promising mass manufacturing of FGMs, centrifugal casting, was investigated. As subject of study, the fabrications of Al/SiC FGM using two types of centrifugal casting method namely, centrifugal solid-particle method (CSPM) and centrifugal mixed-powder method (CMPM), were carried out. During solidification, a centrifugal force was applied to disperse SiC particles in molten Al. In this study, the formation of graded distribution of SiC particles within molten Al by centrifugal solid-particle method and centrifugal mixed-powder method under several casting conditions were examined and simulated. The cylindrical area of casting was divided into a number of cylindrical sub areas. During the solidification, the change of particle volume fraction in each sub area was calculated. The movement of SiC particles in viscous liquid under centrifugal force was explained theoretically by Stoke's law. The effect of composition gradient of particles on viscosity was taken into account. Also, the effect of temperature distribution on viscosity and density were considered. The graded distribution in Al/SiC FGM was influenced by the difference in density between SiC and molten Al, the applied centrifugal force, the particle size, the viscosity of the molten Al, the mean volume fraction of particles, the solidification time and casting atmosphere. A computer code to simulate the formation of compositional gradient in an Al/SiC FGM manufactured by centrifugal casting was developed. From the obtained results, it is found that the SiC particles can be dispersed on the surface or graded from inner to outer surface of Al/SiC FGM by CMPM or CSPM, respectively. Moreover, the graded distribution in Al/SiC FGM under huge centrifugal force is not strongly affected by the initial temperature of molten Al and casting atmosphere.

論文審査結果の要旨

FGM (傾斜機能材料) とは材料の組成または微細構造を傾斜させることにより物性の傾斜をも得ることができる複合材料である。組成の傾斜度と FGM の作製方法は利用目的により異なる。本研究では、FGM 技術の新しい将来的に有望な応用法とその作製方法について研究し、以下の 3 種類の応用についての提案を行った。

初めに、室温での繰返し押出し加工(Equal-Channel Angular Pressing (ECAP)) による難加工材の加工技術を FGM 技術を利用して開発した。本研究では、難加工剤の Ti を変形させるため Al 基 FGM 母材で覆った。ECAP 過程を有限要素法 (FEM) によってシミュレーション解析し、Al 基 FGM の適正な組成傾斜と Ti ワイヤの埋め込む位置を決定した。FEM では異なったタイプの母材物質中に Ti を埋め込み、異なる金型のチャンネル形状を再現した。一回目の ECAP パス後の試料の応力分布の解析から、Ti における応力分布は母材物質と金型のチャンネルの形状に強く依存することがわかった。Al₃Ti の体積分率を変えた 3 種類のタイプの Al-Al₃Ti 合金を母材物質として用いた。ECAP は試料に対して、ルート A で 8 パスまで行った。ECAP パス回数の増加により微細構造の変化と Ti の硬度の増加が得られ、この方法での Ti の巨大ひずみ変形に成功した。

次に、長さ方向に段階的に強度勾配のある新しいタイプの FGM クラッシュボックスを提案し、FEM を用いて解析した。軸方向の準静的および動的衝撃荷重の下でのクラッシュボックスの破壊の様子を調べた。得られた荷重・変位曲線と破壊パターンを算出し、段階的に強度勾配のあるクラッシュボックスの効果を評価した。さらに、4 種類の異なった形状の横断面、即ち四角形、円形、五角形、六角形についても考慮した。結果からあらゆる耐衝撃破壊性に対して FGM クラッシュボックスは均一材と比較してはるかに優れていることがわかった。

工業的に用いられている圧力容器である円筒形の厚いシリンダにも FGM を適用した。強度解析から均一材料を用いた場合、シリンダの内部に最も危険部位が存在することがわかる。しかし FGM の場合この状況は一変する。本研究では、FGM でできた厚壁シリンダと圧力容器の熱粘塑性特性とクリープ特性を FEM を用いて解析した。機械的、熱的負荷のもとにある厚壁 FGM シリンダを横断面が長方形となるリングに分割し、各々のリングを円周に沿ってさらに細かい各要素に分割して計算を行った。FGM の材料特性は組成の体積分率の連続関数としてあらわされる。構造の熱粘塑性特性とクリープ特性を得るために逐次法を用いた。得られた結果から、組成は厚壁のシリンダの内部と外部の表面で時間の関数として有効応力の影響を著しく受ける。FGM を用いることで応力分布の制御が可能になる。

FGM を大規模製造が可能な遠心铸造法について調査した。本研究の目的は、遠心力固相法 (CSPM) と遠心力混合粉末法 (CMPM) を用い様々な铸造条件で作製した Al/SiC FGM について、熔融 Al 内での SiC 粒子の傾斜分布を調べ、シミュレーションを行った。铸造した試料の円柱部分を半径方向に円筒状の領域に分割し、凝固中の粒子の体積分率の変化を計算した。粘性流体中でのストークスの定理を用い遠心力を受けた SiC 粒子の動きを解析することにより、粘度による粒子の傾斜分布への影響を調査した。粘度と密度に及ぼす温度分布の影響もまた考慮した。Al/SiC における傾斜分布は SiC と熔融 Al 間の密度差、遠心力、粒子サイズ、熔融 Al の粘度、粒子の平均体積分率、凝固時間、铸造雰囲気に影響される。同法を用いた Al/SiC の組成傾斜形成過程をシミュレーションするためのコンピュータコードを開発した。得られた結果から、CMPM または CSPM により作製した試料はそれぞれ SiC 粒子が円筒外周表面上に分散するか、または Al/SiC の内部から外側の表面に向かい傾斜分布した。さらに巨大な遠心力の下で作製された Al/SiC FGM における傾斜分布は熔融 Al の初期の温度や铸造雰囲気には強く影響されないことがわかった。