



Title	Processing and Strengthening Mechanisms of Aluminum Metal Matrix Composites Reinforced with Carbon Nanotubes
Author(s)	陳, 彪
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/55957">https://doi.org/10.18910/55957</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## Abstract of Thesis

Name ( 陳 彪 (CHEN BIAO) )	
Title	Processing and Strengthening Mechanisms of Aluminum Metal Matrix Composites Reinforced with Carbon Nanotubes (カーボンナノチューブ分散アルミニウム基複合材料の創製と強化機構の解明)
<p><b>Abstract of Thesis</b></p> <p>Carbon nanotubes (CNTs) having super-high strength, super-high modulus, excellent conductive properties, large aspect ratios and light weight are ideal reinforcements for composites materials. In the past decade, aluminum metal matrix composites (AMMCs) reinforced with CNTs have been intensively studied for using as the next-generation strong and light structural materials in aerospace and automotive industries. To realize the strengthening potential of CNTs in AMMCs, there are three main challenges, i) homogeneous CNT dispersion, ii) suitable CNT-Al interface, and iii) clarification of strengthening mechanisms in CNT/Al composites. In this study the attempts are made to deal with these three challenges by (i) developing a novel approach to uniformly disperse CNTs, (ii) investigating the relation between interfacial structures and consolidating conditions, and (iii) illuminating the reinforcing mechanisms in CNT/Al composites. This study may shed some light on understanding and designing high-strength CNT-reinforced AMMCs.</p> <p>A novel solution ball milling (SBM) process is developed to overcome the problems of CNT dispersion in Al matrix. It is found that the combining use of the solution coating and high energy ball milling in the SBM process provided a simple and effective approach to obtain un-bundled CNTs on the Al powders. Simultaneously, there are small structure damages or length reduction of CNTs dispersed by the SBM process. However, conventional methods either fail to achieve good CNT dispersion or bring structural damages to CNTs. A small amount of homogeneous CNTs (0.88 vol.%) leads to noticeable strength improvement over 20% in Al matrix. The results suggest that the SBM process is promising for producing high-performance AMMCs reinforced with CNTs.</p> <p>To improve the composite strength, temperature-dependent interfacial microstructures are investigated in the processes of sintering and post heat treatment. From the in-situ observation of post heat treatment, it is discovered that micro-cracks form during the heating-up stage. The release of residual stress in severe plastically deformed materials is thus thought responsible for the cracking phenomenon. During sintering, physical and chemical bonding conditions between CNTs and Al matrix generally keep increasing with the increase of sintering temperature from 427°C to 627°C. The ductility of as-extruded composites increases with increasing temperature. Within 427-527°C, CNTs are found stable in AMMCs with trace content of interfacial <math>Al_4C_3</math> phase. The dominant failure modes are debonding of matrix grains and debonding of CNT-Al interface. At temperature of 527-627°C, the size and amount of interfacial <math>Al_4C_3</math> phase keep increasing. CNT pull-out becomes the dominant failure mode. At 602°C, particulate <math>Al_4C_3</math> phases form between Al matrix and the partially remained CNTs, leading to the highest tensile strength. At sintering temperature 627°C, mono-crystal <math>Al_4C_3</math> nano-rods form in Al matrix. The tensile strength and load transfer effect decreased comparing with the composite sintered at 602°C. It is deduced that CNTs with suitable interfacial <math>Al_4C_3</math> phases is an optimal structure for highest strengthening efficiency.</p> <p>To further clarify the dominant strengthening mechanism in CNT/Al composites, in-situ observation of tensile tests are performed. A multiple peeling phenomenon is commonly observed during the tensile test. The bridging walls originated from raw CNTs are helpful to improve the inter-wall bonding conditions, leading to the effective load transfer between walls. The observed CNT fracture mode suggests the effective load transfer between multi-walled CNTs (MWCNT) and the matrix, and between MWCNT walls in CNT/Al composites during tensile failure. The relationship between strengthening efficiency and interfacial strength is established under different failure modes using the shear-lag theory. It is found that CNT fracture results in a high strengthening efficiency in AMMCs, which agreed well with the experimental value.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 （ 陳 彪 （CHEN BIAO） ）			
論文審査担当者	(職) 氏 名		
	主 査	教授	近藤 勝義
	副 査	教授	箕島 弘二
	副 査	教授	渋谷 陽二
	副 査	教授	片山 聖二
<p>論文審査の結果の要旨</p> <p>本論文は、カーボンナノチューブ（CNT）とアルミニウム（Al）粉末を用いたナノバルク体創製と表面ナノ構造化プロセスの構築を実現すべく、乾式法および湿式法による CNT の単分散化と CNT-Al 界面での炭化物合成による応力伝達に着目したナノスケールでのアルミニウム基複合材料の強化機構を明らかにしている。主な成果は下記の通りである。</p> <p>1）両性イオン界面活性剤を用いた溶液中での多層 CNT の単分散化法により Al 粉末表面に CNT 皮膜を形成するとともに、独自で開発した高エネルギー混合製法を用いて CNT 分散溶液中に存在する Al 粉末に対して、3 次元等方的な歪み付与を行うことで CNT の凝集体を緩和・解消した CNT の完全単分散化と同時に、Al 粉末の表面および素地内部に CNT を均質に分散・分布できる被覆・複合化プロセスの構築に成功している。また、このようにして得られた CNT 分散 Al 基複合材料は、340～380MPa の引張強さを有しており、CNT を含まない Al 粉末焼結材の特性（100～120MPa）に対して著しい高強度化を達成できることを明らかにしている。</p> <p>2）CNT ナノ分散による強化機構に関して、CNT-Al 素地の界面での応力伝達に着目し、従来から提唱されている Kelly-Tyson model を発展させて CNT の破壊モード（完全分断・剥離 Peeling・Pull-out）を考慮した新たな複合強化モデルを提案し、アルミニウム基複合材料における強度予測が可能であることを実証している。また、Pull-out モードにおいて CNT の長さ と直径を考慮した耐力値の予測モデルを提案し、実験値との良い一致を確認することで本モデルの有効性を定量的に検証している。さらに、高分解能 TEM 観察を通じて、多層 CNT における Peeling 現象が CNT を構成するグラフェン層間に生じた Bridge walls 部に集中する応力に起因し、グラフェンシートが層状剥離することを明らかにしている。</p> <p>3）CNT のナノ構造に起因する層間欠陥による剥離現象を抑制すべく、固相焼結過程での素地 Al と CNT の完全反応による炭化アルミニウム（Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>）ナノロッドのその場合成を試みたところ、CNT の配向性と同様に c 軸方向に伸長した中実構造を有する単結晶ナノロッドの合成に成功している。本ナノロッドの長さおよび直径は、テンプレートとして用いた CNT の寸法とほぼ同等であり、完全な中実構造を形成することで CNT にて見られた剥離現象を完全に解消でき、その結果、SEM 内引張試験において応力伝達率が 90%以上（従来の CNT 分散 Al 基複合材料の伝達率；40～45%）に到達することを明らかにしている。</p> <p>以上のように、本論文では、高強度・高剛性を有する炭素系ナノ材料の代表ともいえる多層カーボンナノチューブを均一単分散したアルミニウム基複合材料を粉末冶金プロセスで作製し、CNT の分散性および CNT-Al 界面整合性の観点から本複合材料の強化機構を解明することで、ナノ・マイクロ領域を対象とする階層的マルチスケールでの新規な材料設計原理を確立するために必要な新規かつ有用な知見を明らかにしている。</p> <p>よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。</p>			