

氏名	スン ジンチャン 孫 錦成
授与学位	博士 (環境科学)
学位記番号	環博第 179 号
学位授与年月日	令和 5 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院環境科学研究科 (博士課程) 先端環境創成学専攻
学位論文題目	Cavitation treatment of aluminum melt and its application for refinement of Al-Zr alloy solidification structure (アルミニウム溶湯のキャビテーション処理とその Al-Zr 合金の凝固組織改善への適用)
指導教員	東北大学教授 セルゲイ コマロフ
論文審査委員	主査 東北大学教授 セルゲイ コマロフ 東北大学教授 成田 史生 東北大学客員教授 森口 晃治 東北大学教授 及川 勝成 (工学研究科)

論文内容要旨

Recent trends in the aluminum industry toward increasing the recycling rate of aluminum alloys have led to difficulties in controlling the formation of intermetallic compounds (IMCs). The up-to-date investigations have revealed that ultrasonic irradiation is a promising tool to refine and modify the intermetallic compounds formed in the melt before or during casting, and the reported mechanisms include ultrasound-assisted nucleation and fragmentation of compounds. The first part of this work presents results concerning the modification effect of ultrasound on model Al₃Zr compounds with emphasis on the effect of vibration amplitudes. The results reveal that needle-like Al₃Zr compounds can be significantly modified to more rounded shape when amplitude increases from 38 μm to 48 μm, and then remains unchangeable with the further increase of amplitude. Theoretical consideration and numerical simulation show that in addition to the above-mentioned mechanisms, cavitation-induced heat generation and microjet-driven mass transfer are also of prime importance in controlling the morphology and growth of IMCs.

Although the ultrasonic treatment of molten aluminum has been studied for long period, there is still much to be revealed for this process. Many studies have focused on the investigation of acoustic cavitation and streaming under the horn tip and their effects on the treatment efficiency. However, to the best of our knowledge, no attempt has been done to explain

phenomena occurring near or on the melt free surface. Thus, the second goal of this study is to investigate phenomena occurring at the free surface during ultrasound irradiation and clarify their possible influence on the ultrasound treatment performance. The results of high temperature and water model experiments reveal that ultrasound irradiation significantly promotes the formation of alumina particles on the melt free surface around sonotrode, and part of these particles can be entrained into aluminum melts. Furthermore, TEM observation results suggested that the entrained alumina inclusions can serve as nucleation sites for the primary Al₃Zr compounds. Most importantly, the oxidation and entrainment of particles from free surface are likely to be controllable by the immersion depth of sonotrode into molten aluminum.

In addition, when applying acoustic cavitation treatment into industrial scale, there are some limitations including 1) limited size of cavitation zone and 2) sonotrode erosion. At the same time, to the best of our knowledge, methods other than ultrasound to generate cavitation in Al melt have not been considered yet. Thus, fluid flow cavitation has been newly proposed in the present research as an alternative way aiming at scaling-up the treatment equipment as well as reducing the treatment cost. At the initial stage, the effects of rotation speed were investigated and the results indicated that fluid flow cavitation treatment has obvious fragmentation effects for primary Al₃Zr compounds especially at a higher rotation speed of 2500 rpm. Furthermore, the treatment effectiveness of acoustic and fluid flow cavitation was compared. Although acoustic treatment is more effective than fluid flow cavitation treatment, the effects of the latter can be potentially increased by increasing the diameter of rotating disk.

論文審査結果の要旨及びその担当者

論文提出者氏名	Sun Jincheng (孫 錦誠)
論文題目	Cavitation treatment of aluminum melt and its application for refinement of Al-Zr alloy solidification structure (アルミニウム溶湯のキャビテーション処理とその Al-Zr 合金の凝固組織改善への適用)
論文審査担当者	主査 教授 <u>コマロフ・セルゲイ</u> 教授 <u>成田 史生</u> 客員教授 森口 晃治 教授 <u>及川 勝成</u> (工学研究科)

論文審査結果の要旨

本審査会は、2月1日(水)午後3時から、マテリアル・開発系教育研究棟セミナー室1(307号室)において、上記の担当教員の出席のもとで公開で行われた。50分間の口頭発表と、それに引き続く約30分間にわたる質疑応答がなされた。その後、許一帆氏退席の後に、約15分間の審議が行われた。

審査会での口頭発表のタイトルは、上記のとおりであり、主な内容は以下のとおりである。

国内外のアルミ業界では、アルミニウム展伸用合金のリサイクル率を向上させる傾向にあり、緊急に対応する必要がある。しかし、アルミニウムスクラップには特に遷移金属の不純物が混入して、 casting時に粗大な金属間化合物が生成する恐れがあるため、添加元素量の多い合金として再生するカスケード利用を行うのが現状である。しかし、スクラップ回収量を増加すれば遷移金属の不純物量が増加することで、カスケード利用には限界を生じ、金属間化合物を除去・無害化する技術が必要となる。

本博士論文では、音響キャビテーションを利用した凝固組織改善技術に着目し、Al-Zr系における金属間化合物を対象として、これまでより高い超音波振動振幅での casting実験を行うことにより、 Al_3Zr 化合物の微細化・形状変更に影響する主要な要因を明らかにするとともに、そのメカニズムについて熱・物質移動の観点から初めて解明した。また、アルミニウム溶湯の自由表面における現象を対象とした水モデル・高温実験を行い、これまで着目されてこなかった、音響キャビテーションによるアルミナ微粒子の巻き込み現象を発見し、それを考慮した Al_3Zr の核生成機構を解明した。さらに、キャビテーション処理プロセスの大型化を目指して、流体力学的キャビテーション処理法を提案し、それを初めてアルミニウム溶湯処理に適用した。結果によると両方の処理法において、キャビテーション処理温度が液相線温度より低い条件では Al_3Zr 粒子の核生成促進、分断、球状化などといった現象が同時に進行することでキャビテーションによる効果は最も大きいということを実証した。

昨年12月に実施された予備審査会において審査担当教員によりいくつかの質問やコメントがあったが、本審査会では孫錦誠氏はそれらに対して合理的な説明を準備しており、ほぼ回答ができたと思われる。また、孫錦誠氏が作成した学位論文においてもそれらを反映させた適切な訂正、追加記載ができていたと思われる。

本審査会で行われた質疑応答の内容を踏まえ、副査である成田史生教授、森口晃治教授および及川勝成教授の意見を総合的に判断し、孫錦誠氏の博士学位請求論文は、研究テーマの新規性、得られた結果の独創性などにおいて優れた成果と認められた。また研究結果に対して適切な考察を加えることのできる資質を有すると考えられる。以上のような理由で、本審査会において学位授与にふさわしいと判断された。

よって、本論文は博士(環境科学)の学位論文として合格と認める。