

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟ



นางสาว เมตยา กิติวรรณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-2120-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF Al_2O_3 -TiC COMPOSITES USING MICROWAVE ENERGY



Miss Mettaya Kitiwan

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

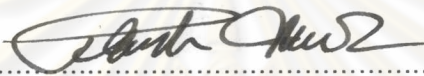
Chulalongkorn University

Academic Year 2004

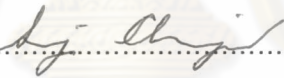
ISBN: 974-53-2120-6

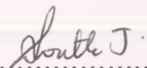
Thesis Title Preparation of Al₂O₃-TiC composites using microwave energy
By Miss Mettaya Kitiwan
Field of study Ceramic Technology
Thesis Advisor Sirithan Jiemsirilers, Ph.D.
Thesis Co-advisor Duangduen Atong, Ph.D.


Accepted by the Faculty of Science, Chulalongkorn University in Partial
Fulfillment of the Requirements for the Master 's Degree



..... Dean of Faculty of Science
(Professor Piamsak Menasveta, Ph.D.)

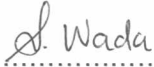
THESIS COMMITTEE


..... Chairman
(Associate Professor Saowaroj Chuayjuljit)


..... Thesis Advisor
(Sirithan Jiemsirilers, Ph.D.)


..... Thesis Co-advisor
(Duangduen Atong, Ph.D)


..... Member
(Associate Professor Supatra Jinawath, Ph. D.)


..... Member
(Professor Shigetaka Wada, Ph. D.)

เมตยา กิติวรรณ : การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟ. (PREPARATION OF Al_2O_3 -TiC COMPOSITES USING MICROWAVE ENERGY)
 อ. ที่ปรึกษา : ดร.ศิริชนวี เจียมศิริเลิศ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ดวงเดือน อางองค์, 116 หน้า. ISBN 974-53-2120-6.

วัสดุเชิงประกอบอะลูมินาและไททาเนียมคาร์ไบด์ได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นในเตาไมโครเวฟโดยใช้พลังงาน 2.4 กิโลวัตต์ และความถี่คลื่น 2.45 จิกะเฮิร์ต ได้มีการศึกษาชนิดของสารตั้งต้นที่มีผลต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้ โดยไททาเนียที่ใช้มี 2 เฟส คือ รูไทล์และอะนาเทส ส่วนคาร์บอนที่ใช้ได้แก่ คาร์บอนแบล็กกราฟไฟต์และถ่านกัมมันต์ กระบวนการสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นในเตาไมโครเวฟใช้เวลาต่ำกว่า 3 นาที ซึ่งเร็วกว่าการสังเคราะห์ในเตาธรรมดาถึงประมาณ 60 เท่า สารตั้งต้นที่ประกอบด้วย รูไทล์-คาร์บอนแบล็ก-อะลูมิเนียมจะเกิดกระบวนการเผาไหม้ได้เร็วที่สุด ในขณะที่สูตรที่ใช้ อนาเทส-ถ่านกัมมันต์-อะลูมิเนียม ให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุด จากการวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค XRD พบว่า สูตรที่ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นสารตั้งต้น จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

สารที่ได้จากการสังเคราะห์ได้ถูกนำไปขึ้นรูปและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1800 องศาเซลเซียส และเติมแมกนีเซียและอิทเทรียเพื่อช่วยในการเผาผนึกลงไปด้วย พบว่าสารที่สังเคราะห์จากเตาไมโครเวฟสูตร M-TC1 สามารถเผาผนึกได้ความหนาแน่นสูงสุดคือ 95.9 เปอร์เซ็นต์ของค่าทางทฤษฎี ส่วนสมบัติทางกลที่วัดได้คือความแข็ง ความเหนียว และความทนแรงคดโค้ง มีค่า 14.2 จิกะปาสคาล 5.19 เมกะปาสคาล/เมตร^{1/2} และ 321 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ทั้งสมบัติทางกายภาพและทางกลเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกับผลงานที่ได้เคยมีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้ สารที่สังเคราะห์จากเตาธรรมดาสามารถนำไปเผาผนึกได้ชิ้นงานที่มีสมบัติดีกว่าสารที่สังเคราะห์จากเตาไมโครเวฟทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่สารที่สังเคราะห์จากเตาธรรมดาแช่อยู่ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ทำให้สารที่สังเคราะห์ได้มีความหนาแน่นและความเสถียรมากกว่า

จากการศึกษาการเผาผนึกด้วยเตาไมโครเวฟในเบื้องต้น ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่น 82 เปอร์เซ็นต์ของค่าทางทฤษฎี ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส โดยใช้พลังงาน 2.4 กิโลวัตต์ ชิ้นงานที่เผาจากเตาไมโครเวฟมีแนวโน้มที่จะเผาให้ค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เผาจากเตาธรรมดา อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะให้การเผาด้วยเตาไมโครเวฟได้อุณหภูมิที่สูงมากขึ้นและได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จำเป็นต้องศึกษาถึงความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่เผา การแยกรับคลื่นระหว่างชิ้นงานและตัวช่วยรับคลื่นไมโครเวฟ รวมไปถึงการปริมาณและรูปร่างของตัวช่วยรับคลื่นที่ใช้

ภาควิชาวัสดุศาสตร์
 สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก
 ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต.....*Mt*
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*South J.*
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....*Duangd.*

4572632023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEY WORD: Al_2O_3 -TiC / MICROWAVE / SHS / COMBUSTION SYNTHESIS

METTAYA KITIWAN: PREPARATION OF Al_2O_3 -TiC COMPOSITES USING MICROWAVE ENERGY. THESIS ADVISOR: SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : DUANGDUEN ATONG, Ph.D., 116 pp. ISBN 974-53-2120-6.

The combustion synthesis of Al_2O_3 -47wt%TiC powder was performed in a 2.4 kW, 2.45 GHz microwave furnace. The combustion system of TiO_2 -Al-C was investigated using various types of precursor, i.e. TiO_2 (rutile and anatase) and C (carbon black, graphite and activated carbon). Combustion under microwave energy could be achieved in less than 3 min which was 60 times faster than conventional combustion. The composition of rutile-carbon black-aluminum gave the shortest ignition time, whereas anatase-activated carbon-aluminum had the highest combustion temperature. The XRD pattern showed incomplete combustion of product that used activated carbon as the carbon source.

The pressureless sintering of synthesized powder was progressed at 1800°C with MgO and Y_2O_3 additive. The synthesized powder M-TC1 could be sintered to nearly theoretical density (95.9%TD). The corresponding hardness, fracture toughness and flexural strength were 14.2 GPa, $5.19 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ and 321 MPa respectively and these were approached to the literature report. The physical and mechanical properties of sintered microwave-combusted powders were inferior to the conventional ones. It was though that a longer time in conventional synthesis led to more densified reactive Al_2O_3 -47wt%TiC powders.

From the preliminary microwave sintering result, the highest density sintered sample achieved was 82%TD at 1500°C under 2.4kW. The microwave sintered sample had a tendency to obtain a nearly full densification at lower temperature compared to conventional process. However the obstacle to reach a higher sintering temperature is focussed on the relationship among sample loading, competition in microwave energy between sample and susceptor, and also the amount and configuration of susceptor used. This understanding will assist densification efforts.

Department Materials Science
Field of study Ceramic Technology
Academic year 2004

Student's signature.....
Advisor's signature.....
Co-advisor's signature.....

Acknowledgements

I would like to express my sincere gratitude to my advisor, Dr. Duangduen Atong, for her suggestion, guidance and for all that I have learnt from her throughout the work until accomplished this research. Her experience and previous work played a very important role in my thesis. I would like to extend my gratitude to my advisor, Dr. Sirithan Jiemsirilers, who kindly give me a good advice and all the knowledge that bring the research to the success.

I am grateful to National Metal and Materials Technology Center (MTEC) due to this research take a part of project which is supported under Grant No. MT-B-46-CER-07-137-I. I am also greatly appreciated to the Thailand Graduate Institute of Science and technology (TGIST) for financially supporting.

I would like to offer special thanks to all of MTEC technical staff for their help to my research investigation. Without them, who took time to teach me the equipment instruction, this research would not have been possible.

The episode of my acknowledgement would not be complete without mention to my entire friend at Chula and Mtec. Their encouragement and assistance that were given to me to carry out my research is also remembered. I would like to provide a special thanks to badminton club members for giving me the healthiness and powerful to proceed my work.

At last, thank you my parents for giving me the strength and conviction to fight problem. Because of their spiritual support, I have been able to progress in my graduation.

ศูนย์วิจัยสหภาพ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTENTS

	Page
Abstract (Thai).....	iv
Abstract (English)	v
Acknowledgements.....	vi
Contents.....	vii
List of Tables.....	xi
List of Figures.	xiii
Chapter 1 Introduction.....	1
Chapter 2 Literature reviews.....	3
2.1 Ceramic cutting tools.....	3
2.2 Al ₂ O ₃ -TiC composite	5
2.3 Strengthening mechanisms of Al ₂ O ₃ -TiC composite	7
2.4 Fabrication of Al ₂ O ₃ -TiC composite	9
2.4.1 Pressureless sintering.....	10
2.4.2 Hot-pressing.....	11
2.4.3 Hot-isostatic pressing.....	12
2.4.4 Others fabrication.....	13
2.5 Self-propagating high temperature synthesis.....	14
2.5.1 Advantages of SHS process.....	14
2.5.2 Theory of SHS process.....	15
2.5.3 Experiment parameters affecting SHS process.....	16
2.5.4 The formation of Al ₂ O ₃ -TiC by SHS Process	16
2.5.5 Processing parameter affect to SHS characteristic of Al ₂ O ₃ -TiC.....	19
2.5.6 Effect of precursors on the combustion synthesis of Al ₂ O ₃ -TiC	20
2.5.7 Al ₂ O ₃ -TiC powder prepared by SHS process and sintering behavior.....	23

	Page
2.6 Microwave processing of ceramics.....	27
2.6.1 Microwave and materials interaction.....	27
2.6.2 Microwave heating mechanism.....	28
2.6.3 Dielectric loss mechanism.....	30
2.6.4 Energy conversion.....	35
2.6.5 Temperature effect.....	38
2.6.6 Synthesis and sintering Al ₂ O ₃ -TiC by microwave energy.....	39
Chapter 3 Experimental Procedures.....	42
3.1 Raw materials.....	42
3.2 Experimental instruments.....	43
3.3 Preparation of Al ₂ O ₃ -TiC composites.....	44
3.3.1 Experimental Part 1: Combustion synthesis process.....	45
3.3.1.1 Conventional combustion system.....	46
3.3.1.2 Microwave combustion system.....	46
3.3.2 Experimental Part 2: Conventional sintering.....	47
3.3.2.1 Conventional sintering without additive.....	47
3.3.2.2 Conventional sintering with additive.....	47
3.3.3 Experimental par 3: Microwave sintering	48
3.4 Powder characterization.....	49
3.4.1 Powder density by Ultrapynometer.....	49
3.4.2 Particle size distribution analysis by Mastersizer-S.....	49
3.4.3 Specific surface area by Brunauer, Emmett and Teller (BET) method.....	50
3.5 Physical properties measurement.....	50
3.5.1 Phase identification.....	50
3.5.2 Microstructure characterization.....	51
3.5.2 Density measurement.....	51

	Page
3.6 Mechanical properties measurement.....	52
3.6.1 Young's modulus.....	53
3.6.2 Flexural strength.....	54
3.6.3 Vickers hardness.....	54
3.6.4 Fracture toughness.....	55
Chapter 4 Results and Discustions.....	56
4.1 Raw materials and mixed reactant characterization.....	56
4.2 Part 1: Combustion process synthesis of Al_2O_3 -TiC powders	59
4.2.1 Characteristics and microstructure of as-combusted powders products.....	59
4.2.2 Combustion behavior.....	64
4.2.2.1 Conventional combustion behavior.....	65
4.2.2.2 Microwave combustion behavior.....	67
4.2.3 Physical characteristics of combusted powder.....	70
4.2.3.1 Phase analysis of combustion products.....	71
4.2.3.2 Phase conversion determination.....	71
4.2.3.3 Microstructure and powder characteristic.....	72
4.3 Part 2: Conventional sintering.....	75
4.3.1 Conventional sintering without additive.....	75
4.3.2 Conventional sintering with additive.....	80
4.3.2.1 Determination of sintering temperature.....	80
4.3.2.2 Physical properties and microstructures.....	81
4.3.2.3 Mechanical properties investigation.....	85
4.3.2.4 Comparative mechanical properties with literature	87
4.4 Part 3: Microwave sintering.....	89
4.4.1 Microwave heating profile.....	89

	Page
4.4.2 Physical properties of microwave sintered products.....	91
4.4.3 Microstructure of microwave sintered products.....	92
Chapter 5 Conclusion.....	95
Chapter 6 Future works.....	97
References.....	98
Appendices.....	102
Appendix A Thermochemical calculation.....	103
Appendix B Particle size distribution of raw materials	105
Appendix C XRD pattern of raw materials.....	106
Appendix D Phase conversion determination.....	107
Appendix E SEM micrograph of milled as-combusted powder.....	109
Appendix F Particle size distribution of milled as-combusted powder.....	113
Appendix G Physical and mechanical properties of sintered products at 1900°C	115
Biography.....	116



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIST OF TABLES

	Page
Table 2.1 Wide range of compositions for cutting tools.....	4
Table 2.2 Physical and mechanical properties of Al_2O_3 and Al_2O_3 -TiC	6
Table 2.3 Mechanical properties of hot pressing and HIP Al_2O_3 -TiC tool.....	13
Table 2.4 Properties of hot-pressed Al_2O_3 -TiC composites.....	23
Table 2.5 Properties of pressureless sintered Al_2O_3 -30wt.%TiC composites.....	24
Table 2.6 Measured combustion temperatures of the reactants under various preheating temperature and carbon source.....	26
Table 2.7 Properties comparisons of the pressureless sintered Al_2O_3 -46.8wt.%TiC composites with various carbon sources (Temperature: 1890°C, time 20 min)	26
Table 2.8 Properties of Al_2O_3 -46.8wt.%TiC composites prepared by SHS and mixed commercial powder	26
Table 2.9 Heating mechanism comparison between conventional and microwave process.....	29
Table 2.10 Bulk density and mechanical properties of sintered and HIP Al_2O_3 -30%TiC ceramic parts.....	41
Table 3.1 Source and characteristics of raw materials.....	42
Table 3.2 Experimental Instruments.....	43
Table 3.3 Six compositions with various TiO_2 and C used in TiO_2 -Al-C combustion system.....	45
Table 3.3 Condition of X-ray diffraction analysis.....	50
Table 4.1 Raw materials characterization.....	56
Table 4.2 Comparison of ignition time, ignition temperature and combustion temperature between conventional and microwave.....	64
Table 4.3 Characteristics of conventional (C-TC) and microwave (M-TC) combustion synthesized Al_2O_3 -TiC powders.....	73

Table 4.4 Apparent porosity and water absorption of the Al_2O_3 -47wt%TiC sintered products.....	76
Table 4.5 Physical and mechanical properties comparison of Al_2O_3 -TiC composite (C-TC1) at various sintering temperature.....	80
Table 4.6 Apparent porosity and water absorption of the Al_2O_3 -TiC sintered products...	82
Table 4.7 Mechanical properties of the pressureless sintered products of Y_2O_3 and MgO – doped Al_2O_3 -47wt%TiC powders prepared by combustion synthesis.....	85
Table 4.8 Percent shrinkage at various sintering temperatures of microwave and conventional sintering.....	92



ศูนย์วิทยพัชกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIST OF FIGURES

	Page
Fig. 2.1 Improvements in cutting speeds for various cutting tools over time.....	4
Fig. 2.2 (a) Hot strength and (b) hot hardness of cutting tool materials.....	5
Fig. 2.3 A wide variety of standard insert configurations made from Al_2O_3 -TiC composite.....	6
Fig. 2.4 Schematic of toughening mechanisms (a) crack deflection (b) crack bridging.....	7
Fig. 2.5 Fracture toughness and Vickers hardness as function of the volume fraction of TiC.....	8
Fig. 2.6 Typical SEM micrograph of crack path of 16 vol%TiC sample induced by Vickers indentation	8
Fig. 2.7 Load-independent hardness number of Al_2O_3 -30 wt%TiC composites as a function of average size of TiC particles in the test sample.....	9
Fig. 2.8 The relative density of the Al_2O_3 -30wt%TiC specimens as a function of the amount of Y_2O_3	10
Fig.2.9 Tool life of Al_2O_3 -TiC cutting tool turning A2 tool steel.....	13
Fig. 2.10 DTA curves of compacted samples with a heating rate of $40^\circ\text{C}/\text{min}$ under argon atmosphere.....	17
Fig. 2.11 SEM micrographs of polished surface of products combustion synthesized with the addition of (a) 0, (b) 12, (c) 18, (d) 24 wt% Al_2O_3 in $3\text{TiO}_2+4\text{Al}+3\text{C}$ sample.....	18
Fig. 2.12 SEM micrograph of as-combusted (a) Al_2O_3 -TiC and (b) Al_2O_3 -TiC-15wt% ZrO_2 nanocomposite	19
Fig. 2.13 Fracture toughness as a function of TiC content	20
Fig. 2.14 Calculated adiabatic temperature as a function of (a) the amount of Al_2O_3 diluent and (b) the initial temperature of sample diluted with 36wt% Al_2O_3	21
Fig. 2.15 Heating profiles as a function of time in reaction zones during the combustion reaction of $3\text{TiO}_2 + 4\text{Al} + 3\text{C}$ sample	21

Fig. 2.16 Combustion wave structures in the sample (a) anatase-graphite (b) rutile-graphite (c) anatase-carbon black and (d) rutile-carbon black	22
Fig. 2.17 The effect of preheating temperature on (a) combustion temperature and (b) combustion velocity with varying carbon source.....	22
Fig. 2.18 SEM micrographs of SHS products varying with preheating temperature and carbon source:(a) activated carbon (b) carbon black and (c) graphite....	25
Fig. 2.19 Electromagnetic spectrum.....	27
Fig. 2.21 Interaction of microwaves with materials.....	28
Fig. 2.20 Heating patterns in conventional and microwave furnaces.....	29
Fig. 2.22 Dipole reorientation with alternating electric field.....	31
Fig. 2.23 Schematic represents the different mechanisms of polarizations	31
Fig. 2.24 Illustration of an electric dipole moment	33
Fig. 2.25 Vectorial representation of applied voltage, loss current and total current dielectric.....	34
Fig. 2.26 Relative dielectric constant (8 to 10 GHz) versus temperature	39
Fig. 2.27 Loss tangent (8 to 10 GHz) versus temperature	39
Fig. 2.28 Temperature dependence of density for microwave sintered and conventionally fast sintered Al_2O_3 -30%TiC	40
Fig. 3.1 (a) Experimental procedure for combustion synthesis process (Part 1).....	44
Fig. 3.1 (b) Experimental procedure for conventional sintering (Part 2) and microwave sintering (Part 3).....	45
Fig. 3.2 Conventional combustion furnace and temperature measurement set up.....	46
Fig. 3.3 Schematic illustration of microwave combustion system.....	47
Fig. 3.4 Temperature profile of conventional sintering without additive.....	47
Fig. 3.5 Microwave furnace for synthesis and sintering Al_2O_3 -TiC composite.....	48
Fig. 3.6 Schematic illustration of small volume unit and laser unit of Mastersizer-S for particle size distribution analysis.....	49

Fig. 3.7 Schematics of two semi-articulating four-point fixtures suitable for flat and parallel specimens	54
Fig. 3.8 The Vickers indenter and surface diagonal project	55
Fig. 4.1 SEM micrograph of reactant materials.....	57
Fig. 4.2 Particle size distribution of mixtures with various TiO ₂ and C sources.....	58
Fig. 4.3 As-combusted products by conventional and microwave furnace.....	60
Fig. 4.4 (a) SEM micrograph of as-combusted agglomerate powders with rutile as titania source.....	62
Fig. 4.4 (b) SEM micrograph of as-combusted agglomerate powders with anatase as titania source.....	63
Fig. 4.5 The microwave and conventional combustion behavior of TC6 powder.....	64
Fig. 4.6 Temperature profiles during the conventional combustion reaction of (a) rutile precursor mixture and (b) anatase precursor mixture.....	65
Fig. 4.7 Schematic showing particle packing in mixed reactant.....	66
Fig. 4.8 Temperature profiles of the microwave combustion reaction	68
Fig. 4.9 Temperature profile of the reactants heated by microwave energy.....	69
Fig. 4.10 XRD pattern of synthesized powders compared with mixed commercial powder (a)conventional synthesized powder and (b) microwave synthesized powder	71
Fig. 4.11 Percent TiC in conventional and microwave combusted products calculated from the peak height of XRD results.....	72
Fig. 4.12 The relative density and hardness of (a) conventional synthesize powders and (b) conventional sintered of microwave synthesized Al ₂ O ₃ -47wt%TiC powders	75
Fig. 4.13 (a) SEM micrograph of conventional sintered products prepared form synthesized powders used rutile as titania precursor.....	78
Fig. 4.13 (b) SEM micrograph of conventional sintered products prepared form synthesized powders used anatase as titania precursor.....	79

Fig. 4.14 SEM micrograph of C-TC1 sintered products with varying sintering temperatures (a) 1700 °C (b) 1800 °C and (c) 1900 °C (undoped).....	81
Fig. 4.15 Relative density of C-TC and M-TC products with sintering temperature of 1900 °C (undoped) and 1800 °C (Y ₂ O ₃ and MgO doped).....	82
Fig. 4.16 (a) SEM micrographs of conventional sintered products at 1800 °C prepared from synthesized powders used rutile as titania precursor with MgO and Y ₂ O ₃ doping.....	83
Fig. 4.16 (b) SEM micrographs of conventional sintered products at 1800 °C prepared from synthesized powders used anatase as titania precursor with MgO and Y ₂ O ₃ doping.....	84
Fig. 4.17 The relative density and Vickers hardness of the Y ₂ O ₃ and MgO – doped Al ₂ O ₃ -47wt%TiC composites prepared by combustion synthesis pressureless sintered at 1800 °C.....	86
Fig. 4.18 Crack propagation characteristics in Al ₂ O ₃ -TiC composite (C-TC2).....	86
Fig. 4.19 Microwave temperature-time profiles obtained from S1- and S2- susceptor setups.....	90
Fig. 4.20 Density versus temperature of microwave and conventional firing.....	91
Fig. 4.21 SEM of product surface: (a) microwave sintering at 1200 °C (b) conventional sintering at 1200 °C (c) microwave sintering at 1500 °C and (d) conventional sintering at 1500 °C.....	93