ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติการไหลผ่านของอากาศและมิติเศษส่วนของวัสดุเซรามิกรูพรุน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นางศิริกัลยา สุวจิตตานนท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2537

ISBN 974-584-015-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17196058X

RELATIONSHIP BETWEEN AIR FLOW THROUGH AND FRACTAL CHARACTERISTIC OF POROUS CERAMIC MATERIALS

Mrs. Sirikalaya Suvachittanont

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Engineering
Department of Chemical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1994

ISBN 974-584-015-7

Thesis Title	Relationship between Air Flow Through and Fractal Characteristic of Porous Ceramic Materials
By	Mrs. Sirikalaya Suvachittanont
Department	Chemical Engineering
Thesis Advisor	Prof. Dr. Wiwut Tanthapanichakoon
Thesis Co-advisor	Prof. Dr. Chikao Kanaoka

Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Doctoral Degree

Thavorn Vajrabhaya Dean of Graduate School
(Professor Thavorn Vajrabhaya, Ph.D.)

Thesis Committee

..... Chairman
(Prof. Piyasan Praserthdam, Dr.Ing.)

Wiwut Tanthapanichakoon Thesis Advisor
(Prof. Wiwut Tanthapanichakoon, Ph.D.)

Chikao Kanaoka Thesis Co-advisor
(Prof. Chikao Kanaoka, Ph.D.)

Terdthai Vatanatham Member
(Terdthai Vatanatham, Ph.D.)

Vichitra Chongvisal Member
(Asst. Prof. Vichitra Chongvisal, Ph.D.)

M. Wongsri Member
(Montree Wongsri, D.Sc.)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ : ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติการไหลผ่านของอากาศและมิติเศษส่วนของวัสดุเซรามิกรูพรุน (RELATIONSHIP BETWEEN AIR FLOW THROUGH AND FRACTAL CHARACTERISTIC OF POROUS CERAMIC MATERIALS) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร. วิวัฒน์ ตัณฑพานิชกุล อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ.ดร. ชิคาโอะ คานาโอกะ, 150 หน้า. ISBN 974-584-015-7

ได้ทำการศึกษาการไหลของอากาศผ่านวัสดุรูพรุนเซรามิกรูปร่างไม่แน่นอน โดยให้อยู่ในช่วงความเร็วเฉลี่ยอิสระที่ความดันต่ำมาก ได้ทำการทดลองวัดความดันลดที่ไหลผ่านวัสดุรูพรุน เพื่อให้ทราบถึงโครงสร้างภายในของวัสดุในลักษณะสามมิติ วิธีนี้เป็นวิธีใหม่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุรูพรุน ประกอบด้วยการวัดความดันลดและใช้วิธีของมิติเศษส่วนด้วย เพื่อคำนวณหาพื้นผิวจำเพาะของวัสดุที่อัตราการไหลของมวลอากาศเดียวกัน แต่ที่ความดันสมบูรณ์ของอากาศต่างกัน ผลที่คำนวณได้นำมาวิเคราะห์หาโครงสร้างของรูพรุนโดยใช้หลักการของมิติเศษส่วน ผลของมิติเศษส่วนที่ได้จากการวัดความดันลดในรูปของสามมิติ นำมาเปรียบเทียบกับมิติเศษส่วนที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของสองมิติด้วยการนับจำนวนรูพรุนจากภาพขยาย ผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสามมิตินี้ จะให้ผลของโครงสร้างที่สลับซับซ้อนซัดเจนยิ่งขึ้นโดยอาศัยหลักการของมิติเศษส่วน ค่าความแตกต่างระหว่าง 2 วิธีเป็นผลอันเนื่องมาจากอากาศนิ่งที่อยู่ตามปลายช่องว่าง การทดลองนี้สามารถนำไปใช้วัดโครงสร้างรูพรุนของวัสดุรูพรุนใดๆได้

นอกจากนี้ยังได้ศึกษารูปร่างของรูพรุนและคุณสมบัติของวัสดุ $MgO \cdot Al_2O_3$ โดยใช้ TiO_2 และ Al_2O_3 เป็นส่วนประกอบและมีส่วนผสม TiO_2 / Al_2O_3 ในอัตรา 1.0 ที่ส่วนประกอบต่างๆ กัน ผลการทดลองสามารถตรวจพบ $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ ในทุกตัวอย่างที่ส่วนประกอบน้อยกว่า 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก สารละลายแข็งจำพวก $MgO \cdot Al_2O_3$ - $2MgO \cdot TiO_2$ และ $Al_2O_3 \cdot TiO_3$-$MgO \cdot 2TiO_2$ เกิดขึ้นในทุกตัวอย่าง ปริมาณสารละลายแข็ง $MgO \cdot Al_2O_3$ - 2 $MgO \cdot TiO_2$ ลดลง และปริมาณสารละลายแข็ง $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ - $MgO \cdot 2TiO_2$ เพิ่มขึ้นเมื่อส่วนประกอบเพิ่มขึ้น รอยแตกรอบๆเกิดขึ้นที่เม็ดวัสดุมีเพิ่มขึ้นเมื่อส่วนประกอบเพิ่มขึ้น และมีสารละลายแข็งสองชนิดปรากฏขึ้นที่รอยแตกรอบๆ Aggregates ค่าความหนาแน่นกลุ่มจะลดลงแต่ค่าความพรุนปรากฏจะเพิ่มขึ้นเมื่อส่วนประกอบเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันกดจะมีค่ามากที่สุดที่ส่วนประกอบ 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และจะมีค่าน้อยลงเมื่อส่วนประกอบมีปริมาณมากกว่า 10 เปอร์เซนต์ ค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยและค่าความซึมผ่านมีค่าสูงสุดที่ส่วนประกอบ 10-15 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และค่าทั้งสองจะลดลงเมื่อส่วนประกอบเพิ่มขึ้น

รูปร่างของรูพรุนแสดงธรรมชาติของมิติเศษส่วน และค่ามิติเศษส่วนของรูพรุนจะลดลงเมื่อส่วนประกอบเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าค่าความซึมผ่านมีค่าสูงสุดที่ค่ามิติเศษส่วนเท่ากับ 1.56 และค่านี้ใกล้เคียงกับวัสดุรูพรุนที่ทำด้วยสารแมกนีเซีย นอกจากนี้ ค่ามิติเศษส่วนเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณสารละลายแข็ง $MgO \cdot Al_2O_3$-$2MgO \cdot TiO_2$

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิวัฒน์ ตัณฑพานิชกุล

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม Chikao Kanaoka

C316693 MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: FRACTAL DIMENSION/POROUS CERAMIC/MOLECULAR FLOW/SPINEL REFRACTORY

SIRIKALAYA SUVACHITTANONT : RELATIONSHIP BETWEEN AIR FLOW THROUGH AND FRACTAL DIMENSION CHARACTERISTIC OF POROUS CERAMIC MATERIALS. 150 pp.,
THESIS ADVISOR : Prof. WIWUT TANTHAPANICHAKOON,Ph.D.,
THESIS CO-ADVISOR : Prof. CHIKAO KANAOKA,Ph.D.,
ISBN 974-584-015-7

Air flow through irregular porous ceramic materials was experimentally studied in the long mean free path region at low absolute pressure and resulting pressure drop across the porous medium was measured to visualize a three dimensional information of the internal pore structure. A novel method to characterize the structure characteristic of the porous medium has been proposed based on the pressure drop measurement and fractal geometry. It consists of the measurement of pressure drops at the same mass flow rate but at different absolute gas pressure to determine the effective specific surface area of the pores and to evaluate the pore structure via fractal analysis. Then the obtained results were compared with the fractal dimensions obtained from microphotographs and image analysis. The results showed that complex irregular pore structure could be characterized by the fractal dimension and the presence of stagnant air pockets and dead end caves contributed to the discrepancy in fractal dimensions obtained experimentally via pressure drop measurement and visually via microphotos and image analysis. This approach is applicable to characterize any pore structures.

Pore shape and properties of porous $MgO.Al_2O_3$ refractories containing TiO_2 and Al_2O_3 as matrix with TiO_2/Al_2O_3 molar ratio of 1.0 were studied at different matrix contents. $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ was detected in the specimens for the matrix contents less than 30% by weight. Both $MgO \cdot Al_2O_3$-$2MgO \cdot TiO_2$ and $Al_2O_3 \cdot TiO_3$ - $MgO \cdot 2TiO_2$ solid solutions were shown in all specimens. The amount of $MgO \cdot Al_2O_3$-$2MgO \cdot TiO_2$ solid solution decreased and $Al_2O_3 \cdot TiO_2$-$MgO \cdot 2TiO_2$ solid solution increased as the matrix contents increased. Boundary cracks in the aggregates increased as the matrix content increased, and both of the above solid solutions were observed in the boundary cracks. Bulk density decreased and apparent porosity increased as the matrix contents increased. Compressive strength showed a maximum at a matrix content of 10 wt. % and then became lower at matrix contents above 10 wt. %. Both mean pore size and permeability showed a peak at about 10-15 wt. % matrix contents.

The shape of the pores was shown to have fractal nature and the fractal dimensions of the pores decreased as the matrix contents increased. It was found that the permeability showed a maximum at a fractal dimension of 1.56 and the value agreed well with that of a magnesia refractory. Furthermore, the fractal dimension increased in proportion to the amount of $MgO \cdot Al_2O_3$ - $2MgO \cdot TiO_2$ solid solution.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต ศิริกัลยา สุวัชชิตานนท์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิวัฒน์ ตันทพนิชกุล

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม Chikao Kanaoka

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ACKNOWLEDGMENT

The author wishes to convey her heartfelt appreciation and gratitude to her advisor Prof. Dr. Wiwut Tanthapanichakoon and her co-advisor Prof. Dr. Chikao Kanaoka for the invaluable advice, guidance and constant encouragement they have rendered in the course of this study.

She expresses her most sincere thanks to Dr. Akihiro Tsuchinari, manager of Harima Ceramic Company for preparing and testing the ceramic specimens. Thanks are also extended to Dr. Masami Furuuchi for his kind assistance in the construction of the experimental apparatus and for his suggestion on how to operate image analyzer.

Special thanks are to Prof. Dr. Piyasan Praserthdam, Dr. Terdthai Vatanatham, Asst. Prof. Dr. Vichitra Chongvisal and Dr. Montree Wongsri who serve as committee members.

The author also thanks Faculty of Engineering, Kasetsart University for providing financial support on her first trip to conduct the research work at Kanazawa University.

Special thanks are due to Mrs. Ampar Doungsong for her manuscript typing and Mr. Somjate Sutthawireesan for his kind advice on microsoft-word program.

Lastly, grateful thanks are due to Mr. Suvich Suvachittanont, her husband, for being a constant companion in need and arousing enthusiasm during the research work and for being her big sponsor on her second trip to summarize her research work in Japan.

CONTENTS

	Page
ABSTRACT IN THAI	iv
ABSTRACT IN ENGLISH	v
ACKNOWLEDGMENT	vi
LIST OF TABLES	xi
LIST OF FIGURES	xiii
CHAPTER	
1. INTRODUCTION	1
GENERAL	1
PURPOSES OF RESEARCH STUDY	2
MATERIALS STUDIED	3
2. LITERATURE REVIEW	4
AIR FLOW THROUGH POROUS MEDIA	4
1. Flow of Gas at Low Density Through a Packed Bed	4
2. Analysis of Flow of Rarefied Gases Through Packed Beds by Monte Carlo Method	4
3. Flow of a Rarefied Gas With Thermal Creep in a Circular Tube	5
CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF POROUS CERAMIC REFRACTORY	5
1. Effects of Al_2O_3-TiO_2 Contents on the Structure and Permeability of Porous Magnesia Ceramic	5
2. Influence of Grain Size and Firing Temperature on the Structure of Porous Magnesia Ceramic	6
3. Effect of Addition of Titania and Alumina Powders into Permeable Magnesia Ceramic	7
4. Effect of MgO Addition on the Properties of Porous Al_2O_3 Refractory Containing TiO_2 And Al_2O_3 in the Matrix	8

Page

5. Solid Solution in the MgO Excess Region of the System Mgo·TiO_2·Al_2O_3 8
6. Permeable Ceramics Utilizing Spherical Particles..... 10
7. Corrosion Resistance of Permeable Refractory 10
8. Porous Plug Made of Spherical Particles for Bubbling from the Bottom of the Ladle 10
9. Application Results of Al_2O_3 Porous Plug Containing TiO_2·Al_2O_3 and MgO as Matrix in Actual Operation 11

3. **THEORY** 12

STEEL MAKING PROCESS 12
APPLICATION OF POROUS CERAMIC REFRACTORY 14
KOZENY-CARMAN THEORY 16
KNUDSEN NUMBER 23
SPECIFIC SURFACE AREA OF PARTICLES 24
CALCULATED PRESSURE DROP PER UNIT LENGTH 25
MEAN FREE PATH 29
PORE DIAMETER AND PERMEABILITY 31
FRACTAL GEOMETRY 31
1. General Background 31
2. Fractal Analysis of Pore Shape 35
IMAGE ANALYSIS 37
1. Overview and History 37
2. Basic Concepts of Image Analysis Processing 37
3. Color Images 38
4. Benefit of Image Analysis 39
5. Advantages of Image Analysis 40
6. Field Specific of Measurements 41
SOLID SOLUTION 41

Page

4. EXPERIMENTAL PROCEDURE 44

EXPERIMENTAL APPARATUS FOR MEASURING PORE STRUCTURE THROUGH PRESSURE MEASUREMENT 44
1. Three-Dimensional Approach 44
2. Two-Dimensional Approach 45
ANALYTICAL INSTRUMENTS USED TO STUDY THE EFFECT OF MATRIX CONTENTS ON THE PHYSICAL PROPERTIES AND PORE STRUCTURE OF SPINEL REFRACTORIES 51
SPECIMEN PREPARATION 52
1. Specimen Preparation for Pore Structure Measurement 52
2. Specimen Preparation for Studying the Effect of Matrix Contents on the Physical Properties and Pore Structure of Spinel Refractories 56

5. RESULTS AND DISCUSSION 60

EFFECT OF PORE STRUCTURE ON FLOW CHARACTERISTICS THROUGH PRESSURE MEASUREMENT 60
1. Relationship Between Pressure Drop per Unit Length, Air Flow Rate, Mean Free Path and Absolute Pressure 60
2. Relationship Between Specific Surface Area of Particles, Air Flow Rate and Mean Free Path 75
3. Relationship of Physical Properties and Fractal Dimension 88
4. Comparison of Two- and Three-Dimensional Fractal Dimensions 89
5. Comparison of Two-Dimensional Pore Area by Image Analysis and Three-Dimensional Pore Area by Pressure Drop 90
EFFECT OF MATRIX CONTENT ON THE PHYSICAL PROPERTIES AND PORE STRUCTURE OF POROUS SPINEL REFRACTORIES 91
1. Micro-Structure Observation of Sintered Body 91

Page

2. EPMA and X-ray Diffraction 93
3. Bulk Density and Apparent Porosity 94
4. Compressive Strength of Specimens 94
5. Pore Size Distribution and Permeability 96
6. Fractal Analysis of Pore 99
7. Comparison of Physical Properties of $MgO{\cdot}Al_2O_3$ Refractory with MgO Refractory 102

6. CONCLUSIONS AND FURTHER STUDY 106

PORE STRUCTURE AND AIR FLOW CHARACTERISTICS 106
EFFECT OF MATRIX CONTENT ON THE PHYSICAL PROPERTIES AND PORE STRUCTURE OF SPINEL REFRACTORIES 107
FUTURE STUDY 108

NOMENCLATURE 109
APPENDIX 1 111
APPENDIX 2 132
REFERENCES 145
VITA 148

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIST OF TABLES

		Page
Table 3.1	The Process of Steel Making	12
Table 3.2	A Wide Range of Shapes of Cast Steel	14
Table 3.3	Scaling Law for Fractional Dimension	34
Table 3.4	Basic Image Processing and Analysis	39
Table 4.1	Number of Segments N(r) to Required Cover the Pores and the Fractal Dimension of Each Specimen	50
Table 4.2	Two-Dimensional Porosity Obtained from Image Analysis	51
Table 4.3	Chemical Composition of the Aggregate and Matrix Used for Pore Structure Measurements	53
Table 4.4	Manufacturing Process for Porous Ceramics Refractories	54
Table 4.5	Physical Properties of Each Specimen Used for Pore Structure Measurement	55
Table 4.6	Chemical Composition of Aggregate and Matrix Used for Studing the Effect of Matrix Contents	57
Table 4.7	Weight Fraction of Aggregate and Matrix	58
Table 4.8	Manufacturing Process for Porous Spinel Refractories	58
Table 4.9	Physical Properties of Aggregate and Matrix Used for Studying the Effect of Matrix Contents	59
Table 5.1	Pressure Drop per Unit Length vs. Absolute Pressure for Specimens A, B and C	66
Table 5.2	Pressure Drop per Unit Length vs. Absolute Pressure for Specimens D and E	67
Table 5.3	Pressure Drop per Unit Length vs. Absolute Pressure for Specimens F and G	68
Table 5.4	Pressure Drop per Unit Length vs. Mass Flow Rate for Specimens A, B, C and D	73

		Page
Table 5.5	Pressure Drop per Unit Length vs. Mass Flow Rate for Specimens E, F and G	74
Table 5.6	Specific Surface Area of Particles vs. Mean Free Path for Specimens A, B, C and D	84
Table 5.7	Specific Surface Area of Particles vs. Mean Free Path for Specimens E, F and G	85
Table 5.8	Calculated Value of Knudsen Number for Each Specimen	87
Table 5.9	Relationship of Physical Properties and Fractal Dimensions Obtained from Counting and Measurement	88
Table 5.10	Comparison of Image Pore Area and Experimental Pore Area	91
Table 5.11	Results of the X-ray Diffraction Analysis	94
Table A1-1	Viscosity of Air	122
Table A2-1	Sample of Calculation of Calculated Pressure Drop per Unit Length for Specimen A	133
Table A2-2	Sample of Calculation of Specific Surface Area of Particles for Specimen A	140
Table A2-3	Sample of Calculation of Mean Free Path of Specimen A	144

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIST OF FIGURES

		Page
Figure 3.1	Cross Section of the Refractory Part of Tundish	15
Figure 3.2	Ladle Assembly with Porous Plug	15
Figure 3.3	Models of Porous Medium	17
Figure 3.4	Relation between Equivalent Channel Length and Bed Thickness	19
Figure 3.5	Flow Characteristics	26
Figure 3.6	Pressure Drop in Free Molecular Flow	26
Figure 3.7	Topological, Fractal, and Euclidean Dimensions of Rugged Lines	33
Figure 3.8	Measurement of Fractal Dimension	36
Figure 3.9	Sample of Fractal Dimension Plotting	36
Figure 3.10	Field Specific Measurement	41
Figure 3.11	System MgO-Al_2O_3-TiO_2 ; Primary Phases (Cross Hatched Lines are Solid Solution)	43
Figure 4.1	Diagram of Experimental Apparatus	45
Figure 4.2	Photomicrographs of Specimens A and B	46
Figure 4.3	Photomicrographs of Specimens C and D	47
Figure 4.4	Photomicrographs of Specimens E, F and G	48
Figure 4.5	Number of Segments N (r) Required to Cover the Pores vs. Similarity Ratio r	49
Figure 5.1	Pressure Drop per Unit Length vs. Absolute Pressure for Specimens A and B	62
Figure 5.2	Pressure Drop per Unit Length vs. Absolute Pressure for Specimens C and D	63
Figure 5.3	Pressure Drop per Unit Length vs. Absolute Pressure Specimens E and F	64
Figure 5.4	Pressure Drop per Unit Length vs. Absolute Pressure Specimen G	65
Figure 5.5	Pressure Drop per Unit Length vs. Mass Flow Rate for Specimens A and B	69
Figure 5.6	Pressure Drop per Unit Length vs. Mass Flow Rate for Specimens C and D	70

Page

Figure 5.7 Pressure Drop per Unit Length vs. Mass Flow Rate for Specimens E and F 71
Figure 5.8 Pressure Drop per Unit Length vs. Mass Flow Rate for Specimen G 72
Figure 5.9 Specific Surface Area of Particles vs. Mass Flow Rate for Specimens A and B 76
Figure 5.10 Specific Surface Area of Particles vs. Mass Flow Rate for Specimens C and D 77
Figure 5.11 Specific Surface Area of Particles vs. Mass Flow Rate for Specimens E and F 78
Figure 5.12 Specific Surface Area of Particles vs. Mass Flow Rate for Specimen G 79
Figure 5.13 Specific Surface Area of Particles vs. Mean Free Path for Specimens A and B 80
Figure 5.14 Specific Surface Area of Particles vs. Mean Free Path for Specimens C and D 81
Figure 5.15 Specific Surface Area of Particles vs. Mean Free Path for Specimens E and F 82
Figure 5.16 Specific Surface Area of Particles vs. Mean Free Path for Specimen G 83
Figure 5.17 Effective Flow Area 87
Figure 5.18 Permeability vs. Fractal Dimension 89
Figure 5.19 Photomicrographs of Some Typical Specimens 92
Figure 5.20 EPMA Analysis of Specimens 95
Figure 5.21 Change of Bulk Density and Apparent Porosity against Matrix Content 97
Figure 5.22 Relation between Compressive Strength and Matrix Content 97
Figure 5.23 Influence of Matrix Content on Mean Pore Size and Permeability 98
Figure 5.24 Influence of Apparent Porosity (P_O) and Mean Pore Size (d) on Permeability (K) 100
Figure 5.25 Number of Segments N(r) to Cover the Shape of Pores 101
Figure 5.26 Relation between Fractal Dimension and Matrix Content 103

Page

Figure 5.27 Influence of Fractal Dimension on Permeability 104
Figure 5.28 Relation between Fractal Dimension and Count per Second of X-ray Intensity for $MgO{\cdot}Al_2O_3$-$2MgO{\cdot}TiO_2$ s.s 105
Figure A1-1 Example of Test Piece Holder 117
Figure A1-2 Example of Arrangement of Gas Permeability Rate Measuring Devices (Extrusion Type) 119
Figure A1-3 Example of Arrangement of Gas Permeability Rate Measuring Devices (Suction Type) 119
Figure A1-4 Dimensions of Crucible and Cutting Method of Sample after Testing 125
Figure A1-5 Example of Marking of Result after Testing 125
Figure A1-6 Pore Sizer 9320 System 128
Figure A1-7 Cumulative Pore Volumes vs. Calculated Pore Diameters 130

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย