

学校编码：10384

分类号：_____ 密级：_____

学号：20620101151490

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

加压碳化技术制备高性能二氧化硅材料

Preparation of Advanced Silica Materials by Using
Pressurized Carbonation Technology

庄艺伟

指导教师姓名：李军教授

专 业 名 称：化学工程

论文提交日期：2013 年 月

论文答辩时间：2013 年 月

学位授予日期：2013 年 月

答辩委员会主席：_____

评阅人：_____

2013 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

二氧化硅是一种化学性质稳定、无毒、无味的无定型态白色或无色材料，它具有良好的分散性、消光性、补强性、绝热性、绝缘性以及触变性等性能，被广泛应用于橡胶行业、涂料行业、石油化工行业、农药行业以及日用化学品等行业，而各行业和新应用领域的进展对二氧化硅的性能提出了更高的要求。碳化反应和超临界流体干燥技术作为绿色工艺技术，在纳米材料的制备中既能实现 CO_2 的固定，又能减少纳米颗粒团聚和保护多孔纳米材料的结构，已引起了人们的广泛关注。基于此，本文研究应用加压（含超、亚临界二氧化碳参与）碳化反应结合超临界干燥技术制备高性能二氧化硅，研究不同工艺及条件对产品性能的影响。

以硅酸钠为硅源，采用超/亚临界（指超、亚临界二氧化碳参与）碳化反应制备高孔容二氧化硅，研究硅酸钠浓度、反应时间、反应温度以及反应压力对二氧化硅孔容和比表面积的影响，用 SEM、FT-IR 和 XRD 表征制备所得二氧化硅的形貌和结构。结果表明：随着硅酸钠浓度的增加，二氧化硅的比表面积和孔容都减小，但是当硅酸钠浓度过低时，会影响凝胶反应的进行；随着反应时间的延长，二氧化硅的比表面积和孔容都增大，但时间增加到一定值后对比表面积和孔容影响不大；随着反应温度的升高，二氧化硅的比表面积和孔容先增大再减小，在 35°C 左右可以获得较大孔容的二氧化硅；当压力较低时，升高压力有利于二氧化硅孔容的增大，但是在高压时继续增加 CO_2 压力反而会导致孔容减小。该方法可以制备得到最大孔容为 $5.4\text{cm}^3/\text{g}$ ，比表面积为 $864\text{m}^2/\text{g}$ 的无定型态二氧化硅粉末。

以硅酸钠为硅源，并用乙醇作为添加剂，采用超临界碳化法制备球形纳米二氧化硅，实验主要考察了乙醇与硅酸钠溶液体积比和反应温度对制备所得二氧化硅的性能的影响。用 N_2 吸附脱附法测定二氧化硅的比表面积和孔容，用粒径分布法分析二氧化硅的分散性能，用 SEM、FT-IR 和 XRD 表征二氧化硅的形貌和结构。研究结果表明：随着乙醇用量的增加，二氧化硅的颗粒变大，并最终生成 200-400nm 的球形颗粒；随着乙醇用量的增加，二氧化硅的比表面积增大、孔体积减小，但是分散性能显著提高，当乙醇和硅酸溶液体积比为 4:30 时，通过超声破碎解聚后，约 78% 的附聚体结构解聚成纳米颗粒；随着反应温度的升高，二

氧化硅的颗粒形貌基本不变，粒径略有减小的趋势，但是二氧化硅的比表面积和孔容都减小，分散性变差。FT-IR 和 XRD 结果表明乙醇的加入并没有改变二氧化硅的成键类型和结晶类型，但是提高了二氧化硅的聚合度。

以硅酸钠和 CO_2 为原料，采用加压碳化反应制备高分散沉淀二氧化硅，研究反应压力、反应时间、硅酸钠浓度和反应温度对沉淀二氧化硅性能的影响，并将制备得到的二氧化硅应用于轮胎胎面橡胶中，测试其补强性能。结果表明：随着反应压力的升高，二氧化硅的比表面积增大，但吸油值减小；反应时间几乎不影响二氧化硅比表面积，但是随着反应时间的增加二氧化硅的吸油值增大；随着硅酸钠浓度的增大，二氧化硅的比表面积迅速减小，但吸油值增大；随着反应温度的升高，二氧化硅的比表面积和吸油值都减小，当温度达到 90°C 时，比表面积约为 $107\text{m}^2/\text{g}$ ，吸油值为 $2.1\text{mL}/\text{g}$ 。通过粒径分布法测定实验制备得到二氧化硅的分散性，有 80% 以上的聚集体可以被破碎解聚成纳米颗粒，特别是超临界干燥的样品解聚后所有纳米结构都小于 50nm ，与普通白炭黑相比（纳米颗粒约 20%），实验制备得到的二氧化硅分散性较好。在轮胎胎面橡胶配方中进行补强性能测试，并与普通白炭黑对比，实验制备得到的产品在轮胎橡胶中的补强效果显著，尤其是对轮胎橡胶的抗撕裂性能（ $76.8\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）和延伸率（868.8%）的提高更为明显。

关键词：超临界 CO_2 ；碳化反应；二氧化硅；高孔容；高分散；球形

Abstract

Silica is a kind of chemical stable, non-poisonous and tasteless white or transparent amorphous material. Because of some special properties such as dispersible feature, matting effect, reinforcing performance, thermal insulation, insulativity, thixotropy, etc, it has been widely used in the rubber, coating, petrochemical, pesticide, daily chemical industries. Following the development of these industries and finding in new applications, silica materials with the special properties are highly demanded. As green technologies, carbonation process and supercritical fluid drying have aroused people's wide concerns due to the capture and sequestration of CO₂ and the prevention of nanoparticles from aggregation and pores from destruction. On the basis of these, in this work, we used carbonation process combined with supercritical fluid drying to prepare advanced silica materials with focusing on high pore volume and high dispersion.

Sodium silicate as the precursor was applied to the preparation of silica powders with high pore volume by using supercritical/subcritical carbonation process (with supercritical or subcritical CO₂). The effects of concentration of sodium silicate solution, reaction time, reaction temperature and reaction pressure on the pore volume and specific surface area (SSA) of the produced silica were studied. N₂ adsorption and desorption, SEM, FT-IR and XRD were implemented to characterize the silica powder. Results show that both SSA and pore volume of the produced silica decrease with the increase of concentration; low concentration is conducive to prepare high pore volume silica, but gelation rate becomes slow when the concentration is low; both SSA and pore volume increase with the reaction time; following the increase of the reaction temperature, SSA and pore volume of the obtained silica firstly increase and then decrease; silica with high pore volume can be obtained at about 35°C; when the pressure is low, the pore volume increases with the pressure, but the pore volume decreases at higher pressure. Porous silica with SSA of 864m²/g and pore volume of 5.4cm³/g can be produced by this method, and the XRD result suggests that the

obtained powder is amorphous.

Sodium silicate as the precursor and ethanol as an additive were applied to prepare spherical nano-silica by supercritical carbonation process. The effects of ethanol and reaction temperature on the properties of obtained silica were studied. SSA and pore volume were measured by the N₂ adsorption and desorption method; the dispersibility was investigated by a laser particle size analyzer. Also, SEM, FT-IR and XRD were implemented to characterize the silica powder. Results show that the average particle size of the obtained silica increases, both SSA and pore volume decrease with the increase of ethanol, but the dispersibility significantly increases. When the volume ratio of ethanol to sodium silicate solution is 4:30, more than 78% of the aggregation can be decomposed into nanoparticles. With the increase of the reaction temperature, the average particle size tends to decrease, both SSA and pore volume decrease, and the dispersibility becomes poor. The FT-IR results suggest that ethanol can increase the degree of polymerization of silica but does not change the bond types. XRD conforms that the obtained silica is amorphous.

Sodium silicate as the precursor was employed to prepare highly dispersible silica by a pressurized carbonation process. The effects of reaction pressure, reaction time, concentration of sodium silicate solution and reaction temperature on the properties of silica were studied. In addition, the obtained products were applied to rubber to test its reinforcing ability. Results show that SSA increases and DBP absorption decreases with the increase of the reaction pressure; reaction time does not influence the SSA of silica, but the DBP absorption increases with the increase of reaction time; with the increase of the concentration of sodium silicate solution SSA decreases rapidly but the DBP absorption increases; both SSA and DBP absorption decrease with the increase of the reaction temperature. When the temperature increases to 90°C, SSA decreases to 107 m²/g and DBP absorption decrease to 2.1 mL/g. With respect to the dispersibility, above 80% of the aggregation of the as-produced silica powders can be broken into nanoparticles, while ordinary silica powders preserve only about 20% nanoparticles. The as-produced silica powders manifest obviously better reinforcing ability in rubber compared with the ordinary silica powders. The highest tear force

and elongation can be 76.8kgf/cm² and 868.8%, respectively.

Key words: Supercritical CO₂; carbonation; silica; high pore volume; highly dispersible; spherical

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 文献综述	1
1.1 二氧化硅概述	1
1.2 二氧化硅的应用	2
1.2.1 涂料工业.....	2
1.2.2 橡胶工业.....	3
1.2.3 超级绝热材料.....	4
1.2.4 催化剂载体.....	4
1.2.5 其他应用.....	5
1.3 二氧化硅的生产状况	6
1.3.1 沉淀二氧化硅生产状况.....	6
1.3.2 气相二氧化硅生产状况.....	6
1.4 二氧化硅的制备方法	7
1.4.1 气相法.....	7
1.4.2 沉淀法.....	8
1.4.3 溶胶-凝胶法.....	10
1.4.4 微乳液法.....	11
1.4.5 新型沉淀法.....	11
1.5 二氧化硅的干燥方法	12
1.5.1 厢式干燥和滚筒干燥.....	12
1.5.2 闪蒸干燥.....	12
1.5.3 喷雾干燥.....	13
1.5.4 恒沸蒸馏干燥.....	13
1.5.5 其他干燥方法.....	14
1.6 超临界流体	15
1.6.1 超临界流体简介.....	15
1.6.2 超临界流体反应.....	16
1.6.3 超临界干燥技术.....	16
1.7 本文立意及研究内容	18
第二章 超/亚临界碳化法制备高孔容二氧化硅	20
2.1 前言	20
2.2 实验部分	21
2.2.1 实验药品.....	21
2.2.2 实验仪器.....	21
2.2.3 实验装置图与流程.....	22
2.2.4 二氧化硅的制备.....	23
2.2.5 分析方法.....	24
2.3 实验结果与讨论	24
2.3.1 硅酸钠浓度的影响.....	25
2.3.2 反应时间的影响.....	26
2.3.3 反应温度的影响.....	29

2.3.4 反应压力的影响.....	30
2.3.5 扫描电镜分析.....	32
2.3.6 FT-IR 和 XRD 分析.....	32
2.4 本章小结	34
第三章 超临界碳化法制备球形纳米二氧化硅	35
3.1 前言	35
3.2 实验部分	36
3.2.1 实验药品.....	36
3.2.2 实验仪器.....	36
3.2.3 实验装置图与流程.....	36
3.2.4 二氧化硅的制备.....	37
3.2.5 分析方法.....	37
3.3 实验结果与讨论	37
3.3.1 乙醇与硅酸钠溶液体积比的影响.....	38
3.3.2 反应温度的影响.....	41
3.3.3 FT-IR 和 XRD 分析.....	43
3.4 本章小结	45
第四章 加压碳化法制备高分散二氧化硅	46
4.1 前言	46
4.2 实验部分	47
4.2.1 实验药品.....	47
4.2.2 实验仪器.....	47
4.2.3 实验装置图.....	47
4.2.4 二氧化硅的制备.....	48
4.2.5 分析方法.....	48
4.3 实验结果与讨论	49
4.3.1 反应压力的影响.....	49
4.3.2 反应时间的影响.....	50
4.3.3 硅酸钠浓度的影响.....	52
4.3.4 反应温度的影响.....	54
4.3.5 FT-IR 和 XRD 分析.....	55
4.3.6 分散性分析.....	56
4.3.7 高分散二氧化硅的补强性能测试.....	59
4.4 本章小结	60
第五章 结论与建议	61
参考文献	64
致 谢	69

Contents

Chapter 1 Literature Review	1
1.1 Introduction of Silica	1
1.2 Application of Silica	2
1.2.1 Coating industry	2
1.2.2 Rubber industry	3
1.2.3 Super thermal insulation material	4
1.2.4 Catalysts support	4
1.2.5 Other application	5
1.3 Production of Silica	6
1.3.1 Production of precipitation silica	6
1.3.2 Production of fumed silica	6
1.4 Preparation of Silica	7
1.4.1 Chemical vapor deposition	7
1.4.2 Precipitation process	8
1.4.3 So-gel process	10
1.4.4 Micro-emulsion method	11
1.4.5 New types of precipitation	11
1.5 Drying of Silica	12
1.5.1 Van drying and drying at rotating column	12
1.5.2 Flash drying	12
1.5.3 Spray drying	13
1.5.4 Azeotropic distillation drying	13
1.5.5 Other drying methods	14
1.6 Supercritical Fluid	15
1.6.1 Introduction of supercritical fluid	15
1.6.2 Supercritical fluid reaction	16
1.6.3 Supercritical fluid drying	16
1.7 Purposes and Research Contents of This Work	18
Chapter 2 Preparation of High Pore Volume Silica	20
2.1 Prologue	20
2.2 Experimental	21
2.2.1 Experimental materials	21
2.2.2 Experimental apparatus	21
2.2.3 Schematic diagram and procedure	22
2.2.4 Preparation of silica	23
2.2.5 Analysis methods	24
2.3 Results and Discussion	24
2.3.1 Influence of concentration of sodium silicate	25
2.3.2 Influence of reaction time	26
2.3.3 Influence of reaction temperature	29

2.3.4 Influence of reaction pressure	30
2.3.5 SEM analysis.....	32
2.3.6 FT-IR and XRD analysis	32
2.4 Conclusions	34
Chapter 3 Preparation of Spherical Nano-silica.....	35
3.1 Prologue	35
3.2 Experimental	36
3.2.1 Experimental materials.....	36
3.2.2 Experimental apparatus.....	36
3.2.3 Schematic diagram and procedure	36
3.2.4 Preparation of silica	37
3.2.5 Analysis methods	37
3.3 Results and Discussion	37
3.3.1 Influence of ethanol	38
3.3.2 Influence of reaction temperature	41
3.3.3 FT-IR and XRD analysis	43
3.4 Conclusions	45
Chapter 4 Preparation of High Dispersible Silica	46
4.1 Prologue	46
4.2 Experimental	47
4.2.1 Experimental materials.....	47
4.2.2 Experimental apparatus.....	47
4.2.3 Schematic diagram of experimental apparatus.....	47
4.2.4 Preparation of silica	48
4.2.5 Analysis methods	48
4.3 Results and Discussion	49
4.3.1 Influence of reaction pressure	49
4.3.2 Influence of reaction time	50
4.3.3 Influence of concentration of sodium silicate	52
4.3.4 Influence of reaction temperature	54
4.3.5 FT-IR and XRD analysis	55
4.3.6 Dispersibility analysis	56
4.3.7 Reinforcing ability testing.....	59
4.4 Conclusions	60
Chapter 5 Conclusions and Suggestions	61
References.....	64
Acknowledgement.....	69

第一章 文献综述

本章概述了二氧化硅的主要特性、应用以及二氧化硅的制备方法，简要分析了国内外二氧化硅的市场概况。同时还概述了几种二氧化硅的常用干燥方法，并介绍了超临界干燥技术。最后对文献进行总结分析，提出本论文的立意以及研究内容。

1.1 二氧化硅概述

二氧化硅又称硅石，在自然界中以无定型二氧化硅和结晶二氧化硅的形式存在，如水晶为结晶二氧化硅，而硅藻土则为无定型二氧化硅。工业上生产的二氧化硅通常指白炭黑，由于其在微观结构和聚集型态上与炭黑相似，且在橡胶中也有相似的补强性能，所以又被称作为白炭黑^[1]。在本文中所介绍的二氧化硅均指无定形态的二氧化硅。

二氧化硅是一种化学性质稳定、无毒、无味的白色或无色粉末非金属材料，呈粉末或颗粒状，不溶于水，溶于氢氟酸和苛性钠，分子式为 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。它的原生粒径较小，在几纳米到十几纳米之间，这些纳米粒子通过一些化学或物理的方式结合在一起，形成二氧化硅的二次聚集体，这种二次结构在受到外力的作用被破坏后可以重新聚集，粒径一般在几微米到几十微米之间。二氧化硅的聚集体是一种不连续的结构或具有三维的网络空间结构，使其具有巨大的比表面积、丰富的孔道以及较低的密度等特点。由于二氧化硅这种特殊的结构和特点，使其具有良好的分散性、消光性、补强性、绝热性、绝缘性、增稠性以及触变性等其它性能。另外，二氧化硅表面富有自由羟基使其显示出亲水性，所以二氧化硅能够很好地分散在水性体系中。同时这些羟基又是表面改性的活性位点，通过这些位点嫁接有机基团，又可以使其显示出疏水性，从而使其能够很好的分散到有机体系中。由于二氧化硅具有这些独特的物理性质和化学性能，使其被广泛应用于橡胶行业、涂料行业、石油化工行业、塑料制品行业、电子行业、农药行业以及日用化学品行业等。

据生产方法的不同，一般可以将二氧化硅分为气相二氧化硅、沉淀水合二

氧化硅和凝胶二氧化硅，沉淀二氧化硅在二次聚集形态上呈不连续的结构，而凝胶二氧化硅则呈现独特的三维空间结构。由于生产工艺的差别，使二氧化硅在聚集形态、比表面积、孔结构、表面官能团或表面有机基团等方面存在较大的差异，从而也决定了二氧化硅的应用领域和应用价值。

1.2 二氧化硅的应用

二氧化硅具有粒径小、比表面积大、孔容大、密度低以及易改性等特点，表现出优异的分散性、补强性、消光性、绝缘性等特性，被广泛应用于诸多工业领域^[2]。

1.2.1 涂料工业

二氧化硅的折射系数与涂料树脂相近并且在涂料中有较好的分散性，是一种常用的涂料助剂，它能改变涂料涂膜表面的光学性能，起到消光的效果，满足各种低光泽度的需求。通过在涂料中添加二氧化硅，能够在涂膜的表面形成所需的微小粗糙度，从而使涂膜的光泽度降低。

光线照射到物体表面时，一部分被吸收，一部分发生折射，还有一部分发生反射和散射，如果物体表面越粗糙，反射光线就越少^[3]。故消光原理可以归结为两种：（1）增加涂膜表面粗糙度；（2）减小底材的反光强度。在涂膜表面的微粗糙面能够改变光线的反射方向，使入射光沿各个方向反射而得到无光或低光的涂膜，表面粗糙度越大，光泽度就会越低^[4]。如图 1-1 所示：

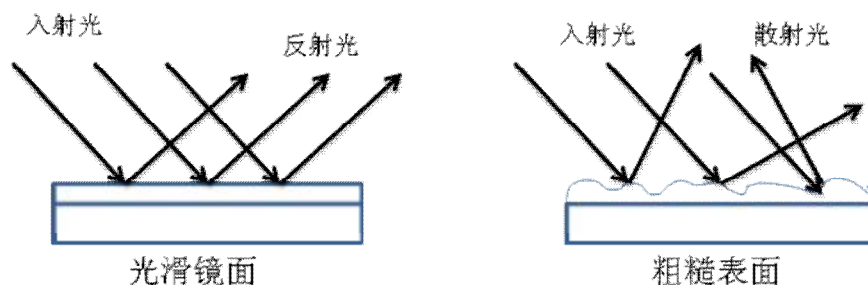


图 1-1：表面粗糙度对光线反射的影响

Figure 1-1. Influence of surface roughness on the catoptric light

一般地，影响二氧化硅消光性能的主要参数为平均粒径和粒径分布、孔隙

率和表面处理等^[5]。二氧化硅的粒径要与涂膜的厚度相符合，如果粒径太小则起不到消光的效果，粒径太大会导致涂膜表面产生颗粒感，而在平均粒径一样的情况下，粒径分布过宽也会导致涂膜表面不光滑，粒径分布窄的二氧化硅所起到的消光效果最佳。二氧化硅在微观结构上是三维的多空结构，高孔隙率的二氧化硅单位质量所含有的颗粒数目比低孔隙率的多，所以对于粒径大小及分布一样的二氧化硅，孔隙率大的产品消光效果更好。对二氧化硅进行有机物包裹处理可以提高二氧化硅在涂料中的分散性，防止在储存过程中聚集沉淀，另外，添加有机处理过的二氧化硅消光剂的涂料漆膜还具有抗划伤和防尘等特点。

目前，市场上二氧化硅消光剂的品种较多，根据孔体积的大小，分为普通消光剂（1.0-1.5mL/g）、中档消光剂（1.5-1.8mL/g）和高档消光剂（>1.8mL/g）。国产产品孔容一般在 1.0-1.8mL/g，同时还存在孔道分布分散、粒径分布较宽、有机处理工艺精细化程度不够等问题，高档产品主要依靠进口^[6]。

1.2.2 橡胶工业

二氧化硅表面和内部分别带有吸附水和结合水，使其表面产生三种羟基官能团：双羟基、相邻羟基和隔离羟基。相邻羟基又以氢键相连，从而使其具有极性和非极性部分^[7]。因此，二氧化硅对极性和非极性橡胶均有补强作用，被广泛应用于轮胎橡胶、硅橡胶、鞋胶、乳胶制品、胶管、电线电缆以及各种生活用品^[8]。

沉淀二氧化硅粒径小、白度高，不但能够提高胶料的综合性能，还可以使硫化胶料保持较高的透明性，因此，被广泛用作鞋胶补强剂。制鞋工业是普通沉淀二氧化硅的主要应用领域。

在轮胎行业中，二氧化硅主要部分替代炭黑用作轮胎侧面胎胶料和各种轮胎配件补强剂。1992年，米其林公司开发了全用二氧化硅的“绿色轮胎”，将二氧化硅应用于轮胎胎面胶，可以在保持较好抗滑性能的同时显著降低轮胎的滚动阻力，节能减排效果显著^[1]。由于二氧化硅与轮胎橡胶的相容性问题，会导致轮胎胶料加工性能降低，为了适应绿色轮胎发展的需求，很多厂家生产并研发出了高分散性二氧化硅，如罗地亚的 Z1165MP 产品等。高分散性二氧化硅能够较好地分散到轮胎胶料中，使轮胎获得较高的拉伸强度、撕裂强度、耐磨性和伸长率等。而对于高分散性二氧化硅的开发，目前处于研发阶段的是第三代具

有特殊结构的高分散性二氧化硅。

硅橡胶是一种直链高分子有机硅氧烷，由于其硫化胶强度低，需要补强后才具有使用价值^[9]。采用超细二氧化硅作为硅橡胶的补强剂，可以使其拉伸强度从 0.3MPa 提升到 14MPa，还可以使其富有弹性好、耐高低温、耐氧化和抗老化等特点。

另外，二氧化硅还应用于乳胶制品，可以提高乳胶制品的外观美感、透明性、机械强度弹性和耐老化等性能。将大量二氧化硅添加到胶管和胶带中，可以提高其耐磨性，且有利于胶料的扩散和渗透。将二氧化硅应用于电线电缆中，可以提高其延伸性、抗氧化性、抗老化性等^[8]。

1.2.3 超级绝热材料

超级绝热材料是指在预定的使用条件下，其导热系数低于“无对流空气”导热系数的绝热材料^[10]。

二氧化硅气凝胶由于其特殊的结构，具有以下特征：孔隙率高（80-99.8%）、比表面积大（100-1600m²/g）、堆密度低（0.003-0.500g/cm³）、平均孔径小（20-150nm）、导热系数小（0.017-0.021W/m·K）^[11]。首先，由于二氧化硅气凝胶孔的特征，可以通过控制其孔径小于气体分子的自由程，限制气体分子在孔道内部的对流，从而消除对流传热；其次，二氧化硅气凝胶体积密度低、孔隙率高，有良好的填充加工性能，能有效降低气体屏障薄壁的厚度；最后，二氧化硅气凝胶的导热系数比“无对流空气”导热系数（25°C, 0.028 W/m·K）更低，并且具有耐高温的性能^[12]。因此，二氧化硅气凝胶是一种良好的超级绝热材料，在航天、军工、国防、建筑等领域就有良好的应用前景。

1.2.4 催化剂载体

在石油化工领域，硅胶由于具有较大的比表面积、孔体积、丰富的微中孔结构、易改性、耐酸碱性、有一定的机械强度和耐磨性等特点，常被用作催化剂载体。目前，已经应用于铬系催化剂、齐格勒纳塔催化剂和茂金属催化剂等^[13]。硅胶在载体中起到许多重要的作用，可以固定和分散活性组分，可以控制聚合物的结构性能，控制颗粒形态以及粒径分布，可以控制催化剂的流动性能等^[14]。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库