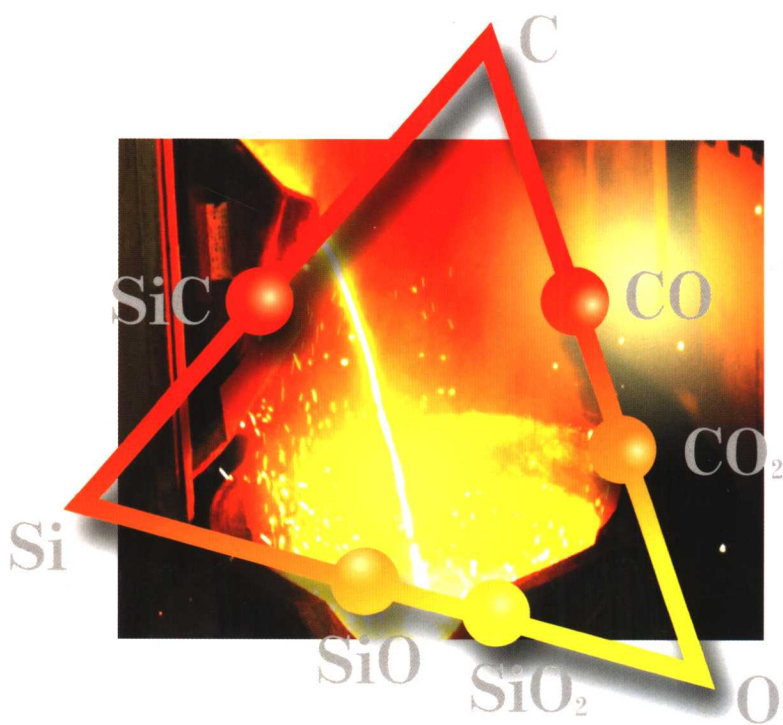


《实用工业硅技术》编写组 编

# 实用工业硅技术



Chemical Industry Press



化学工业出版社  
化学与应用化学出版中心

# 实用工业硅技术

《实用工业硅技术》编写组 编



化学工业出版社

化学与应用化学出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

实用工业硅技术/《实用工业硅技术》编写组编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 4  
ISBN 7-5025-6873-5

I. 实… II. 实… III. 硅-生产 IV. TQ127. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 027669 号

---

**实用工业硅技术**

《实用工业硅技术》编写组 编

责任编辑: 路金辉

文字编辑: 杨欣欣

责任校对: 边涛

封面设计: 于兵

\*

化学工业出版社 出版发行

化学与应用化学出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 13 $\frac{1}{4}$  字数 228 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6873-5/TQ·2190

定 价: 32.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

工业硅是氧化硅经碳质还原剂高温熔炼生产的一种基础材料，有“魔术金属”之美称，被广泛应用于化工、冶金、电子信息、机械制造、航空航天、船舶制造、能源开发等各工业领域，是现代工业尤其是高科技产业必不可少的材料。

工业硅是生产硅铝合金、硅镁合金、硅青铜等许多中间合金的重要原料；高纯硅用于生产集成电路半导体、制造太阳能电池等材料；化学级工业硅是生产有机硅，加工硅树脂、硅橡胶等的原料。

工业硅-有机硅产业链是发展最快、应用最广阔的一个领域，可合成产品种类达 5000 多种。有机硅素有“工业味精”之称。

应用于电子行业的工业硅（高纯硅）具有明显的半导体性质，是一种优良的半导体材料，是国家鼓励发展的集成电路、电子元件必不可少的原材料。日本把钢铁、铝和半导体硅统称为三大金属材料。当今世界进入信息时代，电子信息技术已成为经济增长的强大动力，信息化程度的高低已成为衡量一个国家现代化水平的标志。

工业硅中的冶金用硅，用于配制硅铝合金和硅镁合金等。这类合金的耐热、耐磨和铸造性能好、热膨胀系数小，广泛用于汽车、拖拉机制造业、船舶制造、航空航天工业、电气工业等领域。为了使汽车减轻重量、提高速度、节约能源、利于环保，汽车整车和零部件的铝合金化程度与日俱增。

从世界范围看，工业硅的消费量仍在持续增长。汽车等交通工具的不断轻量化，使冶金用硅不断增长；而化学用硅由于有机硅的快速发展正以 8%~10% 的年平均增长率消费。化学用硅消费量最大的国家是美国、德国、日本、法国和英国，原来主要由美国、挪威和巴西供应，现在我国已加入到供应国的行列，尤其是对日本的供应。

我国是工业硅的生产大国，工业硅产品虽然在产品质量和品种方面已有相当大的进步，但化学级工业硅产量仍然较少，能以化学用硅出口的厂家也很少，生产的化学用硅，Fe、Al、Ca 常规杂质含量满足了要求，但从产品外观、结晶状态等方面与巴西、挪威等国的化学用硅相比还有很大差距；对个别用户

要求的其他元素含量的控制更无法达到。

我国工业硅生产的突出特点是电炉容量小、厂家多、化学级工业硅产量低；10000kV·A 以上的工业硅炉不到 10 台，工业硅生产各企业技术和经验参差不齐，迫切需要提高生产技术和管理水平。今后继续提高产品质量，大幅度增加化学用硅的产量和出口量仍是当务之急。

近年国内引进了自动化水平很高的国际先进水平的工业硅电炉，填补了我国工业硅电炉大型化、自动化的空白，需要广泛交流，认真总结经验，不断提高生产技能，攻克国外公司的技术壁垒。强化“原料是基础、设备是条件、操作是关键”的意识，逐步建立和健全各种操作规程，科学组织，严格按生产工艺要求运行。

目前国内全面介绍工业硅生产应用技术理论与实践的书籍很少，为了给相关部门的技术人员提供一本具有实用价值的参考资料，作者编写了此书。

本书由蓝星硅材料有限公司、四川金洋康宁硅业有限责任公司、牡丹江鑫达硅业有限公司等组成的《实用工业硅技术》编写组组织编写，孙得胜、康维统稿。第一章由韩福龙、李成相、李宝顺、刘晓敏、康维编写；第二章由康维、王雄、任智令编写；第三章由邸俊明、张旭东、康维、华永才编写；第四章由康维、张美明、孙时晓编写；第五章由刘欣峰、路研发、陈卫东编写；第六章由张旭东、王力平、王松海编写。

我们总结了多次与工业硅生产企业挪威埃肯公司、法国普基公司，及与工业硅的用户道康宁公司、GE 公司进行探讨、交流的意见。并在编写过程中引用了其他单位的部分数据，在此一并致谢。

我们深感能力不足，水平有限，错漏在所难免，恳请读者指正，不胜感激。

**《实用工业硅技术》编写组**

**2005 年 3 月**

## 内 容 提 要

工业硅的用途十分广泛，可应用于电子、化工、冶金、光学、机械、汽车制造、医药、国防等领域，有“魔术金属”之称。本书就工业硅的生产技术做了全面的介绍。

全书共分六章。分别介绍了工业硅的发展史和国内外工业硅生产现状，阐述了工业硅广泛的用途和工业硅工厂的建设规划程序；工业硅的生产和捣炉加料设备，工业硅炉的筑炉技术；生产原理、工艺流程、开炉生产、事故处理及工业硅精炼技术；工业硅生产原料硅石、碳质还原剂、电极的精选和称量，是工业硅生产的关键环节；工业硅生产中应用的除尘设施，微硅粉的回收及其在各行业的利用；工业硅生产操作规程、安全管理以及原料、产品检验。

本书内容丰富，理论与实践相结合，对于工业硅企业和相关科研、设计部门的管理、技术及生产人员来说，是一部极有参考价值的图书。也适于相关专业大专院校师生作参考。

# 目 录

<b>第一章 概述</b> .....	1
<b>第一节 发展状况</b> .....	1
<b>第二节 工业硅应用</b> .....	11
一、在化学工业的应用 .....	11
二、在电子行业的应用 .....	14
三、在冶金行业的应用 .....	16
四、其他行业 .....	17
<b>第三节 工厂规划</b> .....	19
一、规划要求 .....	19
二、工厂设计建设程序 .....	21
<b>第二章 生产设备</b> .....	29
<b>第一节 电气设备</b> .....	29
一、工业硅冶炼电炉参数的计算和选择 .....	31
二、电炉配电 .....	34
三、工业硅炉电气设备 .....	36
四、工业硅电炉节能技术 .....	44
<b>第二节 机械设备</b> .....	50
一、工业硅炉类型 .....	50
二、机械设备 .....	52
<b>第三节 电炉炉衬</b> .....	58
<b>第四节 捣炉加料机</b> .....	63
<b>第三章 电炉熔炼</b> .....	67
<b>第一节 反应机理</b> .....	68
一、硅系合金生产的基本原理 .....	68
二、工业硅生产原理 .....	71
三、工业硅生产调控因素 .....	75
四、反应区的参数 .....	78
五、工业硅熔池主要参数 .....	80
六、工业硅生产工艺 .....	84

第二节	开炉及事故处理 .....	93
一、	开炉操作 .....	93
二、	异常炉况和事故的处理 .....	101
第三节	工艺操作 .....	108
一、	配料 .....	108
二、	加料捣炉 .....	110
第四节	工业硅精炼 .....	114
一、	杂质的来源 .....	114
二、	精炼处理 .....	116
<b>第四章</b>	<b>生产原料</b> .....	<b>122</b>
第一节	硅石 .....	125
第二节	还原剂 .....	127
第三节	电极 .....	132
一、	电极的性能 .....	133
二、	电极的操作 .....	136
<b>第五章</b>	<b>烟气净化利用</b> .....	<b>138</b>
第一节	除尘设施 .....	138
一、	惯性除尘 .....	139
二、	电除尘 .....	140
三、	湿式除尘 .....	141
四、	袋式除尘 .....	141
第二节	微硅粉回收 .....	146
第三节	微硅粉利用 .....	149
一、	微硅粉研究 .....	149
二、	微硅粉的物理性质和化学成分 .....	150
三、	微硅粉利用 .....	151
四、	工业硅炉烟气净化设计方案示例 .....	157
<b>第六章</b>	<b>生产管理</b> .....	<b>162</b>
第一节	操作职责及安全管理 .....	163
一、	操作职责 .....	163
二、	安全管理 .....	169
第二节	质量管理 .....	172
一、	生产原料的分析 .....	172
二、	工业硅化学分析方法 .....	191
三、	工业硅国家标准 .....	200
<b>主要参考文献</b>	.....	<b>203</b>



# 第一章

## 概述

### 第一节 发展状况

硅是自然界分布最广的元素之一，是介于金属和非金属之间的半金属。在自然界中，硅主要是以氧化硅和硅酸盐的形态存在。

最早获得纯硅是在 1811 年由哥依鲁茨克和西纳勒德通过加热硅的氧化物而获得的。硅的性质在 1823 年由波茨利乌斯描述，定名为元素硅 (Si)。

在 1855 年由德威利获得灰黑色金属光泽的晶体硅。

高纯硅由贝克特威通过  $\text{SiCl}_4 + 2\text{Zn} \longrightarrow 2\text{ZnCl}_2 + \text{Si}$  方法获得。

1869 年门捷列夫提出元素周期律，硅原子序数 14，属于第 IV A 族。

现代工业规模生产硅的碳热还原法是 20 世纪初发明的，至今不到 100 年。以硅石和碳质还原剂等为原料经碳热还原法生产的含硅 97% 以上的产品，在我国通称为工业硅。经碳热还原法生产的含硅 99% 以上的产品，称为 99 硅，在英文中称为金属硅，俄文中称为结晶硅。

99 硅其产品主要分类型号为五种：553、441、3303、2202、1101，均属高纯度的工业硅，是有机硅生产的重要原料，属国家重点鼓励发展的产业项目。高纯度的工业硅经过一系列的工艺处理以后可生成单晶硅（产品含硅纯度可达 99.99%），供电子工业使用，是半导体特别是电子元件芯片的关键性材料。正是由于高纯度的 99 硅具有极其广泛的用途，国内外市场对 99 硅产品的需求量逐渐增大。随着高新技术的进步、世界经济的发展，硅的使用范围将越来越广泛，需求量也将越来越大。

在 20 世纪 60 年代以前，法国、美国、日本、意大利和前苏联相继建设了数千千伏安的单相和三相电炉，采用碳热还原法在电炉内熔炼工业硅。

随着成本的降低和应用领域的扩大，20 世纪 60 年代末已有 10 多个国家生产工业硅，年产量达到约 20 万吨/年。

20 世纪 70 年代初，世界工业硅需求量的年增长率 8%~10%，特别是用于有机硅方面的消费量增长更快，欧洲市场曾达到 40%~45%。汽车等交通工具向轻型化的发展，提高了硅铝合金的用量，相应地增大了工业硅的需求。70 年代末世界工业硅消费量达到 40 万吨/年，几乎翻了一番，产能约 44 万吨/年。

20 世纪 80 年代初西方国家出现经济衰退，美国、挪威、日本等国相继转产或关停了一些工厂。日本 20 世纪 70 年代有五家工业硅企业，拥有产能 6 万吨/年，由于受能源价格上涨的影响，到 1983 年已全部关停。随着经济的复苏，到 20 世纪 80 年代末已有 20 多个国家生产工业硅，并且实现了小炉型向大炉型、开放式向半密闭式、手工操作向机械化操作发展的转变，建造了 30000kV·A 以上全自动、旋转电炉；巴西、冰岛、澳大利亚等水利资源和能源丰富的国家都有新工厂投产。世界产能达到 70 万吨/年以上。

进入 20 世纪 90 年代，由于能源的紧缺，发达国家限制高能耗、污染环境的行业发展，美国、法国、意大利、挪威等国关停了许多企业。相反中国、南非、俄罗斯、蒙古等国家有大量的新工厂投产，南非建成了当时最大的 48000kV·A 工业硅电炉；尤其是中国 6300kV·A 以下电炉大面积在云南、贵州、四川等小水电供应区域内建成投产，弥补了发达国家关停造成的产能下降量，并使得世界产能达到 120 万吨/年以上，近年来发达国家工业硅的需求几乎依赖于发展中国家。

2000 年以来，工业硅消费量一直在快速增长着，目前世界工业硅的年消费量达到 110 万吨以上。据统计，2003 年西方国家工业硅需求总量接近 110 万吨，高于 2002 年的 101.6 万吨。亚洲地区工业硅消费增长尤为显著：2003 年前 11 个月，日本工业硅净进口同比增长约 2.55 万吨；韩国工业硅净进口同比增长约 5570t（增幅超过 21%）。泰国、中国台湾省、马来西亚工业硅进口增长也较快。另外，欧洲、美国以外的美洲其他地区及中东部分地区工业硅消费均有不同程度的增长。据统计，2003 年 12 月美国进口工业硅 8567t，高于 11 月份的 4576t。2003 年全年美国总计进口硅 126350t，虽然低于 2002 年的 146245t（历史最高记录），但仍然是该国有史以来的年进口量第三的年份。

中国、俄罗斯、挪威、巴西、美国、南非、法国、意大利、澳大利亚、瑞典、冰岛、阿根廷等近 20 个国家生产工业硅；西方工业硅生产企业受电力、

环保因素影响，已无法正常生产和经营。发达国家的工业硅行业具有下列特点。

(1) 生产高度集中

目前国外有工业硅生产厂家 30 多个，主要集中在美国、巴西和挪威三国，占世界生产能力的 65%，最大生产厂家主要有挪威的埃肯 (Elekem)、巴西的莱阿沙 (Ligas)、美国的全球冶金 (Globe Metallurgical) 等。表 1-1 列出 1999 年和 2000 年部分国家主要工业硅企业的生产量。

表 1-1 部分国家主要工业硅企业的生产量 / (万吨/年)

国 家	公 司	1999 年	2000 年
加拿大	拜克诺硅公司(Becaneur Silicon)	3.5	5.0
美国	美国合金公司(American Alloys, WV)	0.7	0
	威纳奇公司(AST, Wenatchee, WA)	1.6	0
	埃尔肯姆合金公司(Elken Alloy, WV)	7.5	7.5
	全球冶金公司(Globe Metallurgical, AL)	2.9	2.9
	全球冶金公司(Globe Metallurgical, OH)	3.2	2.4
	全球冶金公司(Globe Metallurgical, NY)	2.9	2.9
	全球冶金公司(Globe Metallurgical, OR)	1.5	1.5
	西姆卡公司(Simcala, AL)	4.0	4.0
阿根廷	安迪纳奇公司(Andina, Chimbass)	0	8
巴西	卡马格可利亚公司(Camargo Correa Metais)	3.6	3.6
	CBCC 公司	2.5	5.3
	伊莱克斯莱公司(Eletrosliex, MG)	2.3	2.3
	莱阿沙公司(Ligas de Aluminio, MG)	4.9	4.4
	米斯莱格公司(Minasligas)	1.8	1.8
	利玛公司(RIMA)	2.4	2.5
	西伯玛公司(SIBRA)	2.0	2.0
法国	伊万斯安哥拉公司(Invensil, Anglefort)	3.2	3.2
	伊万斯莱斯拉沃(Invensil, les Clavaux)	3.2	3.2
	伊万斯蒙特公司(Invensil, Montricher)	3.3	3.3
德国	格拉菲克拉默公司(Graphit Kropfmuhl)	2.3	2.8
意大利	依德公司(Indel)	2.7	2.7
挪威	埃尔肯姆(Bremanger)公司	2.3	2.3
	埃尔肯姆(Fiskaa)公司	4.0	4.0
	埃尔肯姆(Salten)公司	1.5	1.5
	埃尔肯姆(Thamshavn)公司	1.2	1.3
	埃尔肯姆(Meraker)公司	2.7	2.7
	凡西(Fesil Holla)金属公司	2.6	4.7
	凡西(Fesil Lilleby)金属公司	0.9	0.9

续表

国家	公司	1999年	2000年
西班牙	亚特兰大铁合金公司(Ferroatlantica)	3.6	3.6
马其顿	南赫罗姆公司(Yugohrom)	1.0	0.5
沙特阿拉伯	海湾铁合金公司(Gulf Ferro-Alloys)	2.0	0
南非	伊万斯公司(Invensil)	4.4	4.1
澳大利亚	西马克克曼公司(SIMACOA, Kemenon)	3.3	3.3
合计		91.0	93.0

### (2) 采用大容量电弧炉

三相电弧炉是工业硅熔炼的主体设备，国外大都采用 10000kV·A 以上容量的大电炉进行生产，1974 年德国 DEMAG 公司为美国联合碳化物公司制造了容量为 45000kV·A 的电炉，1975 年南非建成了 48000kV·A 工业硅电炉；采用大容量电炉可提高劳动生产率、降低单位产品投资，同时大电炉操作热稳定性好、效率高、产品质量稳定，有利于机械化、自动化、控制环境污染等。表 1-2 为部分国家工业硅生产单耗水平。

表 1-2 国内外不同电炉容量工业硅生产的单耗对比

项目	俄罗斯	美国	美国	德国	瑞士	中国	中国
电炉容量/kV·A	6400	29000	12000	9000	9000	5000	63000
硅石/kg	2700	2900	2590~2900	2960	2500	2930	2800
木炭/kg	1300				700	1307	
石油焦/kg	200	750	259~293	757	600	401	860
低灰分煤/kg		600	870~1035		200	188	860
木块/kg		1600	1550~1880	1620			250(甘蔗渣)
电极/kg	87	150	90~100	80~95	110	130~160	120~140
电耗/kW·h	13000	13750	11083~12754	12000~14000	12200	13000~15000	12000~13800

### (3) 电炉向旋转、密闭化发展

国外工业硅生产从 20 世纪 50 年代开始采用旋转炉体；60 年代以后，旋转炉体在工业硅生产中已普遍采用；70 年代后期，采用两段组合式炉体，整个炉体分为上下两部分，并以不同速度向不同方向旋转。

采用旋转炉具有一系列优点。

旋转炉体可提高生产率，据报道可提高产量 3%~7%，节省电能 4%~5%。

旋转炉体扩大熔化区域，起搅拌作用，减少捣炉操作，避免和减少 SiC 的生成，延长炭砖使用寿命。

旋转炉体有利于松动炉料，有利于电极深埋，使生产保持平衡。

密闭旋转炉可减少炉气量和净化烟气的投资及经营费用，劳动条件好，减少热辐射。

#### (4) 采用计算机控制及机械化操作

国外在实现工业硅炉大型化的同时，采用先进技术，提高工业硅炉装备技术水平。电炉配备开口机、堵眼机、捣炉机等。

原料破碎、筛分、配料、加料、捣炉等均实现机械化，并实行计算机控制。电炉加料、电极升降、电极压放等自动化控制，使电炉在最佳电气参数及工艺参数下运行。

中国生产工业硅的企业主要分布在贵州、云南、广西和四川，西北和东北地区有少数企业。至 2004 年已建成的工业硅炉生产能力为 40 万吨/年；约占世界工业硅总产量 1/3，年出口量超过了 30 万吨，已出口到 50 多个国家和地区。

我国 1957 年在抚顺铝厂建成第一座工业硅电炉。20 世纪 60 年代在辽宁、上海和江苏等地有几家企业开始生产工业硅，70 年代在西南、华北、西北等地又有一些企业投产，生产产品全部用于国内消费。80 年代以来我国的工业硅生产发展与西方国家截然不同，据统计到 1990 年生产企业由 20 多家增加到 300 家左右，拥有电炉 400 多台，这些企业遍布全国各地，产能已超过产能最大的美国，但 80% 以上企业生产冶金级工业硅。

20 世纪 90 年代中期，由于国际工业硅供求关系的变化，国内外工业硅价格曾一度上涨，这使我国工业硅又大步发展，新增工业硅企业具有硅铁、电石转产改造生产工业硅，利用分散或边远地区的剩余电力或季节性水电建厂等特色。但也造成建厂论证不充分、环保设施不全、能源资源浪费严重、建成后开工率低等弊端。

我国工业硅生产的突出特点是电炉容量小，厂家多，化学级工业硅产量低，目前仍以 5000kV·A 或 6300kV·A 的电炉为主要炉型；2004 年国内已建成的 10000kV·A 工业硅电炉只有 8 座，25500kV·A 工业硅电炉只有 2 座。在贵州有企业拥有近 40 台 6300kV·A 的小电炉，并且没有环保设施，能耗大、环境污染严重。在内蒙古同样有企业大量建设 6300kV·A 以下小电炉，由于没有环保设施，到处浓烟滚滚、烟尘飞扬，造成环境污染。

我国工业硅行业的发展受到产业结构不合理、技术落后、电价高、自动化控制技术不成熟、低灰分煤等还原剂开发应用落后等因素的限制，其中电价的居高不下严重影响了我国产品与俄罗斯、挪威、巴西、冰岛等国产品的竞争力。

我国的工业硅行业应总结经验与教训，提高产品质量指标；合理利用现有电炉装置并向自动化程度高的 10000kV·A 以上电炉发展；引进吸收国外先进冶炼和精炼技术；开发应用优质低灰分煤代替木炭等传统还原剂；提高扩大碳素电极生产应用；完善治理烟气和微硅粉利用技术。生产装置必须经过由小炉型向大炉型转变、由手工操作向自动化操作的转变，才能与国际接轨，才能适应市场的发展。

工业硅是氧化硅（SiO<sub>2</sub>）经碳还原剂高温（1800℃左右）矿热炉熔炼生产的一种基础材料，有“魔术金属”之称，被广泛应用于冶金、化工、电子信息、机械制造、航空航天、船舶制造、能源开发等各工业领域，是现代工业尤其是高科技产业必不可少的材料。

工业硅呈固体，暗灰色，有金属光泽，熔点高，耐热性好，电阻率高，高温熔体状态为良导体，质坚性脆，可加工成各种粒度规格。按照国家现行标准（GB 2881—91）分为化学级工业硅和冶金级工业硅，国外有电子级工业硅的精细分级。表 1-3 中为中国工业硅标准要求。国内外工业硅标准中硅含量均要求大于 97%，其他杂质含量越低越好。从国家标准看我国对工业硅的要求指标低于国外指标，分级过于简单，需要进一步提高要求。

表 1-3 中国工业硅标准

级别、牌号		化学成分/% ≤				应用范围
		Si	Fe	Al	Ca	
A 级硅	Si-A	99.3	0.4	0.2	0.1	化学级硅
B 级硅	Si-B	99.0	0.5	0.3	0.2	
一级硅	Si-1	98.5	0.6	—	0.3	冶金级硅
二级硅	Si-2	98.0	0.7	—	0.5	
三级硅	Si-3	97.0	1.0	—	1.0	

冶炼工业硅的原料主要有硅石、碳质还原剂、电极等。

电极是电炉导电系统的重要组成部分，也是工业硅生产中主要消耗材料之一。工业硅生产对电极的主要要求是电阻要小、允许电流密度要大、灰分含量要低、机械强度要好。我国工业硅企业 8000kV·A 以下小炉型用石墨电极，8000kV·A 以上用碳素电极。

目前各生产企业采用的硅石化学成分要求基本是 SiO<sub>2</sub> ≥ 98.8%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 0.15%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 0.2%、CaO ≤ 0.21%、其他杂质小于 0.2%。

硅石要有一定的抗爆性和热稳定性，其中抗爆性对大电炉很重要，对容量小的炉子要求可略为降低。有的硅石很致密，热稳定性好，但难还原，造成冶

炼状况不好、经济指标差，很少采用。有的硅石纯度很高，但抗爆性差，也不宜大量使用。

硅石粒度视炉子容量大小不同而异，一般 6300kV·A 以上的炉子硅石粒度为 50~100mm；6300kV·A 以下的炉子硅石粒度为 25~80mm，且 40~60mm 的粒度要占 50% 以上。

硅石要清洁无杂质，破碎筛分后，要用水冲洗，除掉碎石和泥土。

对新采用的硅石在化学成分、破碎性能合格以后，还要在生产中试用，经济指标较好，才能长期使用。

冶炼工业硅所用的碳质还原剂有石油焦，沥青焦，木炭，木块（甘蔗渣、玉米芯、椰壳等），半焦和低灰分烟煤等。优选各种不同碳质还原剂，要求固定碳高、灰分低、化学活泼性要好，采用多种还原剂搭配使用，以达到最佳冶炼效果。

石油焦的特点是固定碳高、灰分低，并且能使料面烧结性好；但高温比电阻低，影响电极下插，反应能力差。粉料多、烧损大，炉底部易缺碳，透气性不好，大粒度数量多比电阻小，电极易上抬。

木炭比电阻大，气孔率高，化学活泼性好；但固定碳低，相对灰分偏高，机械强度差，料面烧结性差，而且烧损率高、利用率低。

木块（或甘蔗渣、玉米芯、椰壳、松塔等）的性质接近木炭，在炉内干馏后，在料下层形成比木炭孔隙度、化学活泼性更好的炭。所使用的木块（或甘蔗渣、玉米芯、椰壳、松塔等）要清洁无杂物，不许代入泥土等杂质。

低灰分烟煤有比电阻高、挥发分高、孔隙度大、化学活泼性好、料面烧结性强、价格低廉的特点。挥发分在料层中挥发利于料面烧结和焖烧，而且可形成疏松的比表面积大、比电阻极大的焦炭，对冶炼很有利。要求灰分小于 3%，否则不能使用。低灰分褐煤性质接近木炭，可作木炭的代用品。

碳质还原剂种类不同，即使同种类，若产地不同，性质也不相同。可以多种搭配使用，保证更好的冶炼工艺。

冶炼工业硅与炼铁相比，需要更高的炉温，生产含硅量 95% 以上的工业硅液相线温度在 1410℃ 以上，需要在 1800℃ 以上高温进行冶炼。此外，由于炉料不配加钢屑，所以  $\text{SiO}_2$  还原反应的热力学条件恶化，破坏  $\text{SiC}$  的条件也变得更加不利。由此产生三个结果：其一是炉料更易烧结；其二是上层炉料中生成的片状  $\text{SiC}$  积存后容易促使炉底上涨；其三是  $\text{Si}$  和  $\text{SiO}$  高温挥发的现象更加显著。为此，在冶炼过程中必须做到以下几点。

① 控制炉膛温度，减少热损失。

② 控制 Si 和 SiO 挥发。

③ 使 SiC 的形成和破坏保持相对平衡。

为了控制炉温，减少 Si、SiO 的挥发损失，基本上保持 SiC 在炉内的平衡，在具体操作中必须千方百计地减少热损失，扩大“坩埚”。

工业硅生产要坚持“三精原则”——精心选料、精心维护、精心操作。强化“原料是基础、设备是条件、操作是关键”的意识，逐步建立和健全各种操作规程，科学组织，严格按生产工艺要求运行。

工业硅生产中原料的精选和称量是最关键的工艺环节和控制要素。

正确的配料、加料是保证炉况稳定的先决条件。对于小电炉生产工业硅来说，更应强调这一点。正确配比应根据炉料化学成分、粒度、含水量及炉况等因素确定，其中应该特别注意还原剂的使用比例和使用数量，正确的配比应使料面既松软又不塌料，透气性良好，能保证规定的焖烧时间。炉料配比确定后，炉料应进行准确的称量，误差应不超过 3%，均匀混合后入炉。炉料配比不准或炉料混合不匀都会在炉内造成还原剂过多或缺少现象，影响电极下插，缩小“坩埚”，破坏正常的冶炼反应进行。

在工业硅生产中采用烧结性良好的石油焦，因而炉料更易烧结。但炉料难以自动下沉，一般需要强制沉料。当炉内炉料焖烧到规定时间时，料面料壳下面的炉料基本熔净烧空，料面也开始发白发亮，火焰短而黄，局部地区出现刺火塌料，此时应该立刻进行强制沉料操作。沉料时，先用捣炉机从锥体外缘开始将料壳向下压，使料层下塌。后用捣炉机捣松锥体下脚，捣松的热料就地推在下塌的料壳上，捣出的大块黏料和死料推向炉心，同时铲净电极上的黏料。沉料时高温区外露，热损失很大，因而，沉料捣炉操作必须快速进行。沉料捣炉操作完毕后，应将混匀炉料迅速集中于电极周围及炉心三角区，使炉料在炉内形成一个平顶锥体，并保持一定的料面高度。不允许偏加料，一次加入新料的数量相当于 0.5h 左右的用料量。新料加完后，进行焖烧，焖烧时间控制在 0.5h 左右。焖烧和定期沉料的操作方法，有利于减少热损失，有利于提高炉温和扩大“坩埚”。

集中加料时，大量生料加入炉内，可能使反应区温度略有下降。因而，在加料前期，炉温较低，反应进行得缓慢，气体生成量不会太多。在焖烧一段时间后，炉温迅速上升，反应趋于激烈，气体生成量也将急剧增加，此时为了帮助炉气均匀外逸，有必要在锥体下脚“扎眼透气”，扩大“坩埚”。

电炉生产工业硅，炉况容易波动，较难控制，因此必须正确判断炉况并及时处理。影响炉况的因素是很多的，但是在实际生产中，影响炉况最主要的因



素还是还原剂的用量，还原剂用量不当会使炉况发生急剧变化。一般来说，炉况变化通常反映在电极插入深度、电流稳定程度、炉子表面刺火情况、出硅情况及产品质量波动情况等。

炉况正常的标志是电极深而稳地插入炉料，电流电压稳定，炉内电弧声稳而低，料面冒火区域广而均匀，炉料透气性好，料面松软而且有稳定的烧结性，各处炉料烧结程度相差不大，焖烧时间稳定，基本上无“刺火”、大塌料现象，出硅时炉眼好开，流头开始时较大，而后均匀地变小，产品产量、质量稳定。

原料含水量波动、还原剂质量变化、称量准确程度较差、操作不当等各种因素，均会影响实际用炭量，使炉子出现还原剂过剩或不足现象。

还原剂过剩的症状是料层松散，火焰变长，火头大多集中于电极周围，电极周围下料快，炉料不烧结，“刺火”、塌料严重，电极消耗慢，炉内显著生成SiC，锥体边缘发硬，电流上涨，电极上抬。当还原剂过剩严重时，仅在电极周围窄小区域内频繁“刺火”、塌料，其他地区的料层发硬不吃料，“坍塌”急剧缩小，热量高度集中于电极周围，电极高抬，热损失严重，电弧声很响，炉底温度下降严重，假炉底很快上涨，硅水温度低，炉眼缩小，有时甚至烧不开炉眼，被迫停炉。

为消除还原剂过剩现象和及时扭转炉况，在还原剂过剩不严重时，可在料批中减少一部分还原剂，同时配以积极的炉况维护，即可使电炉恢复正常；在还原剂过剩严重时，应估计炉内还原剂过剩程度，而后采取集中添加硅石或在炉料中添加硅石的方法处理。作为临时措施，硅石添加量必须严格把握，以防形成大量炉渣。集中添加硅石，可在较短时间内破坏SiC和增大炉料电阻，促使电极稳定下插，逐渐扩大“坍塌”，逐步扭转炉况。

还原剂不足的症状是料面烧结严重，透气性差，吃料慢，火焰短小而无力的“刺火”严重。缺碳前期，电极插入深度有所增加，炉内温度有所提高，硅水量反而增多，打开炉眼时，炉眼冒白火，硅水有过热现象。缺碳严重时，料面发红变黏变硬，电流波动，电极难下插，“刺火”成亮白色火舌，“呼呼”有声，难以消除，电极消耗显著增加，炉眼发黏难开，硅水流量显著下降。

为消除还原剂不足现象，一般应追加还原剂。还原剂不足不严重时，为迅速改善料层透气性，可在料批中添加一部分木炭。还原剂不足严重时，除在料批中添加木炭外，在沉料或捣炉时应添加适量不易烧损的电极碎块，以有效地消除还原剂不足现象。此外，为保持炉况稳定，减少热停炉是很重要的。