

黏土湿型砂 及其质量控制

The Clay-Bonded Green Sand
and Quality Control

黄天佑 熊鹰 编著

铸造用黏土湿型砂生产技术指南
提高黏土砂铸造质量的实用资料

第2版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TG221
1009-1

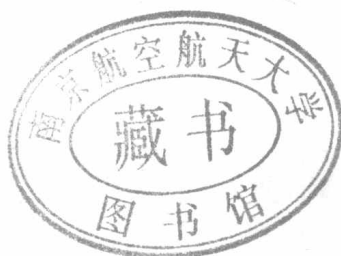


NUAA2016031360

黏土湿型砂及其质量控制

第2版

黄天佑 熊鹰 编著



机械工业出版社

2016031360

本书全面系统地介绍了铸造用黏土湿型砂及其质量控制技术。主要内容包括：湿型砂用原材料、湿型砂性能及其检测、黏土湿型砂的制备、砂处理系统与黏土砂再生、铸件常见缺陷及其防止。本书是作者在深入了解国内外黏土砂造型技术发展和现状的基础上，结合自己多年黏土砂造型的研究成果与生产经验编著而成的。本书内容深入浅出，有很强的实用性。

本书可供铸造工程技术人员和工人使用，也可供相关专业在校师生及研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

黏土湿型砂及其质量控制/黄天佑, 熊鹰编著. —2 版.
—北京: 机械工业出版社, 2016.5
ISBN 978-7-111-53473-0

I. ①黏… II. ①黄…②熊… III. ①黏土砂-湿型
铸造-质量控制 IV. ①TG221

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 070476 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 陈保华 责任编辑: 陈保华

责任印制: 常天培 责任校对: 胡艳萍

北京京丰印刷厂印刷

2016 年 4 月第 2 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·11.25 印张·217 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-53473-0

定价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

第2版前言

本书第1版于2008年由机械工业出版社正式出版,很快就销售一空。后来有一些读者告诉我,这本书对铸造企业的技术人员很有帮助、很实用,希望尽快重印或再版此书。考虑到前几年有关造型材料的许多标准正在修订之中,所以想到相关标准修订工作告一段落后再来修订这本书,因此一直拖到现在才再版。这次修订再版采用了最新颁布的相关标准,对书中的相关内容进行了更新。

我国的铸造技术近年来有了很大进步,许多铸造企业的装备水平与工业发达国家的铸造企业已经相当接近,工艺技术水平也有了长足的进步。在众多的铸造工艺中,黏土湿型砂铸造所生产的铸件产量占我国总铸件产量的50%左右,特别是在生产汽车、柴油机一类铸件的铸造企业中,仍然以采用黏土湿型砂工艺为主,这在全世界也是如此,估计再过几十年还会如此,因为它的低成本、高效率的优势是其他铸造工艺不可取代的。

当然,黏土湿型砂铸造工艺的缺点也仍然存在,例如煤粉湿型黏土砂浇注后排放物的污染问题、废旧砂的再生、粉尘的收集利用等。可喜的是近年来随着人们对环境保护、资源的可再生利用等问题的重视,许多问题正在逐渐得到解决。例如在黏土砂废旧砂(其中混有大量芯砂)的再生利用问题上,重庆长江造型材料(集团)股份有限公司近年来在吸收国内外的经验基础上开发出了新一代的焙烧-机械法再生设备系统,在全国建立了十几条再生砂生产线或再生基地,并将再生砂成功地用于各种制芯工艺,从而节约了大量新砂资源和减少了大量废旧砂的排放,保护了生态环境和资源,这个工作的意义十分重大。因此,本书修订再版时邀请了重庆长江造型材料(集团)股份有限公司的熊鹰先生参加编写工作。

希望本书的再版能为我国的湿型黏土砂铸造技术水平的提高做出贡献,也诚恳希望读者提出宝贵意见。

黄天佑
于清华大学

第1版前言

黏土湿型砂在我国和世界上许多国家被广泛用来生产中、小铸铁件和铸铝件，以及少量铸钢小件，特别是汽车、拖拉机铸件生产厂，气缸体、气缸盖、曲轴、制动鼓等关键铸件都用黏土湿型砂生产。我国的大部分中小铸造企业都采用黏土湿型砂工艺来生产从汽车铸件到地沟盖板、公园桌椅等铸件。与熔模铸造、压铸、离心铸造等铸造方法相比，黏土湿型砂工艺具有生产过程简单、设备投入少、上马快、铸件成本低等优势，所以，采用黏土湿型砂工艺的铸造厂在我国所有铸造厂中占大多数。

也正是因为以上这些原因，许多人以为只要随便拉来一些砂子，再有一个化铁炉，就可以造型、浇注、生产铸件了。结果是铸件上出现各种缺陷，甚至废品一大堆，生产的只能是一些低档次铸件，既浪费了材料和能源，又使生产成本居高不下，企业效益低下，处于恶性循环之中。

铸件品质可以分为铸件内部品质和表面品质。铸件内部品质主要由金属熔体品质来保证；而铸件表面品质则主要由铸型品质来保证。在黏土湿型砂铸造中，铸型的品质靠型砂的性能和造型设备来保证。影响湿型铸件表面品质的各生产工序中以型砂制备最为关键。我国不少铸造工厂对型砂品质的检验不够重视。很多铸造厂的型砂实验室只偶尔检测型砂性能，或者仅测定型砂的三四种性能，因而不不足以判断型砂的品质如何，也无法确定铸件缺陷是由哪个型砂性能数据引起的。为了保证湿型铸件具有良好的表面品质，必须对所使用型砂的性能有全面了解。铸造工厂对湿型砂性能的具体要求随造型方法和砂处理设备不同而有所区别。高密度造型方法（包括多触头高压、气冲、射压、静压等造型方法）的生产效率高、铸件品质较好，对型砂性能的要求甚为严格。但是，机器造型和手工造型也不可忽视型砂性能检测，否则必然会出现大量铸件缺陷或废品。

本书将简要介绍常用的湿型砂性能与铸件品质的关系，以及检验方法的原理。本书读者对象主要是铸造企业的技术人员、工人。因此，本书主要针对黏土湿型砂铸造生产实际中提出的许多问题，讲述要达到湿型砂铸件的品质要求“应该做什么？”和“应该怎么做”，对于“为什么要这样做？”只做适量的说明，避免过多“理论”的描述。由于篇幅所限，书中提到的一些实验方法的具

体试验步骤可参考其他资料。在本书所举的实例中提到了一些国内外铸造工厂的型砂性能和工艺数据，这些数据仅反映当时的实际，而且各厂情况也不尽相同，所以只能作为参考。

在本书的编写过程中，参考了于震宗教授编写的许多相关论著，他还亲自审阅了本书的全部内容，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

作者

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 绪论	1
1.1 砂型铸造与面临的课题	1
1.2 黏土湿型砂的特点	2
第2章 湿型砂用原材料	4
2.1 硅砂（原砂）	4
2.1.1 硅砂的种类及其 SiO_2 含量	4
2.1.2 石英的结构转变特性	6
2.1.3 矿物组成和杂质成分的影响	7
2.1.4 硅砂的含泥量	9
2.1.5 硅砂的粒度和表示方法	10
2.1.6 硅砂的表面状态和颗粒形状	11
2.1.7 硅砂的加工	14
2.1.8 标准砂	15
2.2 膨润土	16
2.2.1 概述	16
2.2.2 铸造用膨润土的开采加工与钠化处理	19
2.2.3 铸造用膨润土品质的评定	24
2.2.4 膨润土的选用	27
2.3 煤粉	29
2.3.1 概述	29
2.3.2 湿型用煤粉的品质评定	31
2.3.3 煤粉的代用品	35
2.3.4 复合添加剂	40
2.3.5 煤粉及复合添加剂的选购	42
2.3.6 混配土	42
2.4 淀粉	43
2.4.1 预糊化淀粉（ α -淀粉）	44
2.4.2 糊精	46
第3章 湿型砂性能及其检测	48
3.1 湿型砂性能对造型及铸件品质的影响	48

3.1.1	紧实率(可紧实性)	49
3.1.2	含水量	50
3.1.3	透气性	51
3.1.4	型砂的湿态强度	52
3.1.5	型砂含泥量	58
3.1.6	型砂粒度	59
3.1.7	活性膨润土量	60
3.1.8	型砂的有效煤粉含量	61
3.1.9	热湿拉强度	62
3.1.10	热压应力	63
3.1.11	韧性、破碎指数和起模性	64
3.1.12	型砂流动性	67
3.1.13	砂型硬度及强度	69
3.2	型砂性能检测频率和检测结果整理分析	70
3.2.1	型砂性能检测频率	71
3.2.2	检测结果的整理	71
3.3	对各种湿型砂性能的基本要求	72
第4章	黏土湿型砂的制备	75
4.1	混砂设备	75
4.1.1	碾轮式混砂机	75
4.1.2	摆轮式混砂机	76
4.1.3	转子式混砂机	77
4.1.4	混砂效率	81
4.1.5	混砂机的保养和维修	83
4.2	湿型砂的配比	84
4.3	回用旧砂的准备	85
4.4	混砂工艺	85
4.4.1	定量加料	86
4.4.2	新砂的加入	87
4.4.3	芯砂的混入问题	88
4.4.4	水分的加入	90
4.4.5	加料顺序	93
4.4.6	混碾时间	95
4.5	松砂	95
4.6	型砂性能的在线检测与控制	98
第5章	砂处理系统与黏土砂再生	102
5.1	湿型砂循环使用中的问题	102
5.1.1	热砂问题	102

5.1.2 型砂的觇化和粉尘的积累	106
5.1.3 废砂的排放问题	109
5.2 砂处理系统的任务与组成	111
5.3 黏土旧砂的再生	114
5.3.1 旧砂再生后用于湿型砂	114
5.3.2 旧砂再生后用于混制砂芯	116
5.3.3 再生砂的质量标准	124
5.4 废砂和粉尘的其他再利用	124
第6章 铸件常见缺陷及其防止	127
6.1 粘砂	128
6.1.1 机械粘砂和化学粘砂	128
6.1.2 各种因素对机械粘砂的影响	130
6.1.3 爆炸粘砂	133
6.1.4 热粘砂	133
6.2 砂眼、渣孔缺陷	134
6.2.1 砂眼	135
6.2.2 渣孔	137
6.3 夹砂缺陷	139
6.3.1 夹砂缺陷的形成原因	139
6.3.2 湿型夹砂缺陷防止措施	141
6.3.3 涂层开裂结疤缺陷	142
6.4 砂型胀砂与金属液收缩缺陷	143
6.4.1 湿砂型的胀砂	143
6.4.2 金属液的收缩缺陷	145
6.5 铸件气孔缺陷	148
6.5.1 裹入气孔	148
6.5.2 侵入气孔	149
6.5.3 反应气孔	153
6.5.4 氨氮气孔(析出气孔)	161
附录	164
附录A 铸铁件湿型砂的配比及性能	164
附录B 铸钢件湿型砂的配比及性能	167
附录C 非铁合金铸件湿型砂的配比及性能	168
参考文献	169

第 1 章 绪 论

1.1 砂型铸造与面临的课题

从广义上讲,凡是用来制造铸型(包括芯子)的材料都属于造型材料。铸造生产中使用的铸型有砂型、金属型、陶瓷型、石膏型、石墨型等,需要各种各样大量的造型材料。在以上各种铸型中,最普遍和大量使用的是砂型。在我国或世界范围内,用砂型生产的铸件占铸件生产总量的 80% 以上,因此在铸造行业里,一般说到造型材料,通常指的是砂型铸造用的造型材料,包括所用的各种原材料、混合料及涂料等。

砂型铸造是指造型材料以原砂为主要骨料的铸造工艺型砂,按所用黏结剂可分为黏土型砂、无机黏结剂型(芯)砂和有机黏结剂型(芯)砂等。在这些型(芯)砂中,最为常用的是黏土湿型砂(也称潮模砂),即不经过烘干的黏土砂。用这种造型材料生产的铸件大约占有用砂型生产铸件产量的 70% ~ 80%,适用于铸铁、非铁合金中小铸件和小型铸钢件的生产。黏土湿型砂采用天然矿物膨润土作为黏结剂,其来源广泛、价格低廉,浇注后的型砂可以经处理后反复使用,可缩短生产周期。因此,黏土湿砂型铸造不但为汽车、拖拉机制造等行业中大批量铸件生产时所采用,也为众多的单件小批铸件生产企业所采用。

在无机化学黏结剂型砂中,目前主要应用的是水玻璃砂,包括同时应用传统的吹 CO_2 气体硬化的工艺,以及先抽真空再吹 CO_2 气体硬化的 VRH 工艺。近 30 年逐渐推广使用的有机酯自硬水玻璃砂使水玻璃砂溃散性差的问题较好地得到解决,再生困难的问题也有所缓解,所以在一些生产铸钢件的工厂得到越来越多的应用。

有机黏结剂型(芯)砂的品种繁多,从早年就开始应用的桐油砂、亚麻油砂,到今天广泛采用的合成树脂黏结砂应有尽有。人们可以根据制造砂型或砂芯的需要,以及来源、价格、设备条件等方面来综合考虑采用哪种黏结剂。

从造型材料的分类中我们还可以看出,铸造技术人员,特别是专门负责造型材料的技术人员,需要尽量多地了解一些矿物学、化学(有机化学和无机化学)方面的知识,这样可以减少一些工作中的盲目性,对于提高铸件品质和增加企业的经济效益,以及保护人们的健康和环境也都具有重要意义。

湿型砂在铸造生产中占有重要的地位,其品质好坏直接影响铸件的品质、生

产率和成本。据统计,铸造生产中由于造型材料品质欠佳或使用不当而造成铸件的废品约占总废品数的50%以上。造型、制芯费用一般情况下约占铸件生产总成本的1/2,金属熔炼占成本的1/4,其余1/4的成本要花费在铸件清理及其后处理工序上。清理工序成本中的70%也与造型材料有着密切的关系。由此可见,铸件生产总成本中的70%左右和品质问题的一半以上都与造型材料有关。

显然,研究开发造型材料的新品种,生产供应符合铸造生产需要的造型材料,以及合理选用各种造型材料,对于提高铸件品质、降低成本、提高劳动生产率和改变铸造生产环境有着现实和深远的意义。毛坯精化及近净形铸造、洁净及高效生产一直是世界各国铸造工作者追求的共同目标。随着我国制造业的发展,以及越来越多的外国企业将原来在其他国家生产的铸件转移到中国来生产,使铸件的需求量不断增加,对铸件品质(包括内在品质和表面品质)的要求也越来越高,这必将对造型材料提出更高的要求,并且将进一步显示出造型材料在铸造生产中的重要地位。

“节约能源”和“环境保护”是我国在发展中面临的重要课题,实现可持续发展是我们的基本国策,造型方法和材料的选择对铸造厂的节能和环保起着关键性的作用,这不但关系到周围的环境,同时也关系到铸造企业本身的发展。据统计,每吨铸件需消耗1t左右新砂(不锈钢铸件消耗1.5t新砂),全国每年消耗新砂千万吨以上,同时,将废弃大量的旧砂。如不能对废旧砂进行处理回用,必定给周围的环境带来严重污染。此外,砂处理工序产生的灰尘,造型、制芯、浇注过程中树脂等有机物的分解,溶剂挥发放出的有害废气,酸碱物质溶解在水中等都是污染的源头。采用少污染和无污染的先进造型材料和工艺,达到国家工业卫生排放标准,意义重大,有时甚至会成为铸造厂能否生存的关键。因此,近年来国内外的许多铸造工作者正在不断研究和开发一些低能源消耗和少污染(无污染)、高效的造型材料,以造福于人类。

1.2 黏土湿型砂的特点

黏土湿型砂主要由原砂、黏土(膨润土)、附加物(煤粉、淀粉等)和水组成。

造型过程中,型砂在外力作用下成形并达到一定的紧实度而成为砂型。图1-1所示为紧实后的黏土型砂结构示意图,它是由原砂和黏土(必要时还加入一些附加物)组成的一种具有一定强度的微孔-多孔隙体系,或者叫毛细管多孔隙体系。湿型中原砂是骨干材料,约占型砂总量的85%~90%;黏土起黏结砂粒的作用,以黏结膜形式包覆砂粒,使型砂具有必要的强度和韧性;附加物是为了改善型砂所需要的性能而加入的物质。

通常使用的原砂为硅砂，用硅砂作为型（芯）砂的主要骨干材料，不只是因为其来源广，供应有保障，更重要的是它能满足优质铸件生产的最基本的要求。一方面，它为砂型（芯）提供了必要的耐高温金属液顺利充型，在铸型中冷却、凝固并得到所要求的形状和性能的条件。另一方面，原砂砂粒能为砂型（芯）提供众多孔隙，保证型、芯具有一定透气性，在浇注过程中，使型腔内受热急剧膨胀的气体和铸型本身产生的大量气体能顺利逸出。但孔隙大小要适当，孔隙过大将恶化铸件的表面品质，不仅增大表面粗糙度值、降低铸件尺寸精度，甚至引起铸件严重粘砂。

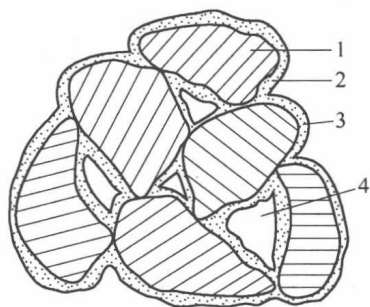


图 1-1 黏土湿型砂结构示意图

1—原砂砂粒 2、3—水、黏土及其他附加物 4—微孔（孔隙）

黏土砂型根据在合箱和浇注时的状态，可分为湿砂型（湿型）、干砂型（干型）和表面烘干砂型（表干型）三种。三者之间的主要差别在于：湿砂型是造好的砂型不经烘干，直接浇入高温金属液体；干砂型是在合箱和浇注前将整个砂型送入窑中烘干；表面烘干砂型只在浇注前对型腔表层用适当方法烘干一定深度（一般 5~10mm，大件 20mm 以上）。

湿型砂按造型时的情况可分为面砂、背砂和单一砂。面砂是指特殊配制的在造型时铺覆在模样表面上构成型腔表面层的型砂。背砂是在模样上覆盖面砂后，填充砂箱用的型砂。在砂型浇注时，面砂直接与高温金属液接触，它对铸件品质有重要影响。一般中小件造型时，往往不分面砂与背砂而只用一种型砂，称为单一砂。使用单一砂能够简化型砂的管理和造型的操作过程，提高造型生产率。但是，如对铸件品质要求较高，单一砂的性能不能满足要求时，可以使用面砂。

目前，湿型砂造型是使用最广泛的、最方便的造型方法，大约占有砂型使用量的 60%~70%，但是这种方法还不适合轮廓尺寸很大或壁很厚的铸件。表面烘干型与干型比，可节省烘炉，节约燃料和电力，缩短生产周期，所以曾在中型和较大型铸铁件的生产中推广过。

干型主要用于重型铸铁件和某些铸钢件，为了防止烘干时铸型开裂，黏结剂一般以普通黏土为主，有需要时加入少量膨润土。干型主要靠涂料保证铸件表面品质。其型砂和砂型的品质比较容易控制，但是砂型生产周期长，需要专门的烘干设备，铸件尺寸精度较差。因此，近年来干型（包括表面烘干的黏土砂型）已大部分被化学黏结的自硬砂型所取代。

第 2 章 湿型砂用原材料

黏土湿型砂造型使用的原材料通常包括原砂、膨润土、煤粉及其他一些辅助材料，例如糊精、淀粉、重油等，下面分别加以详细介绍。

2.1 硅砂（原砂）

黏土湿型砂使用的原砂一般是硅砂，它是黏土型砂的主要成分，所以，硅砂品质的好坏与砂型的品质，以及铸件的品质关系密切。中小铸铁件、非铁合金铸件及小型铸钢件都采用硅砂作为砂型的原砂。芯砂的原砂也是硅砂，只在特殊需要时可能采用锆砂、铬铁矿砂、橄榄石砂、刚玉砂等特种砂。特种砂可用于制造小型铸铁件中受铁液长时间热作用的砂芯，用于防止某些缺陷（例如脉纹等）。细粒度的特种砂粉料还可以作为涂料中的耐火材料。

2.1.1 硅砂的种类及其 SiO_2 含量

硅砂主要的化学成分是 SiO_2 ，欧美等地的湿型铸钢工厂所用原砂大多为 SiO_2 的质量分数高达 99% 以上的天然硅砂。我国湿型铸钢用天然硅砂产地主要集中于海南（文昌、东方、儋州）、福建（东山、晋江、平潭、长乐）、湖南（长沙、望城、岳阳、湘潭、永顺）、广东（新会、台山）和内蒙古（东胜）等地，其 SiO_2 的质量分数大约为 95% ~ 98%。湿型铸钢件只是生产一些质量和壁厚不太大的铸件，这样的 SiO_2 含量已经足够了。华北和东北地区所产的湿型铸钢砂大多为砂岩破碎而成，或者是用 SiO_2 含量较低的铸铁用硅砂浮选提纯（精选）而成。

湿型铸铁件的浇注温度较低，对硅砂的 SiO_2 含量要求比铸钢低。由于硅砂矿源的原因，美国中西部汽车工业集中区所用的密歇根湖的湖砂， SiO_2 的质量分数为 94% ~ 95%；德国的铸铁工厂则常与铸钢同样用 SiO_2 的质量分数在 99% 以上的 Haltern 砂和 Frechen 砂。我国大都采用 SiO_2 的质量分数为 90% 左右的硅砂，有的铸造工厂甚至使用 SiO_2 的质量分数为 80% ~ 82% 的黄河砂。

清华大学曾就硅砂 SiO_2 含量对型砂性能和铸铁件品质的影响进行了试验研究工作。

试验结果表明：

1) 低 SiO_2 含量砂在混碾过程中和在较高的压实比压下较易破碎，但在通常

的高压造型比压下不致引起明显的颗粒破碎。高 SiO_2 含量的硅砂则在激热和激冷作用下较易破碎。

2) 低 SiO_2 含量砂受热膨胀变形少, 变形速度较缓和, 高温蠕变能力强, 热强度高, 因而型砂具有较好的抗夹砂能力。而 SiO_2 含量较高的砂在 $550 \sim 600^\circ\text{C}$ 内由于石英相变使型砂急剧膨胀, 配制成的型砂在此温度下的热强度又处于最低点, 较易产生夹砂缺陷。

3) 硅砂的 SiO_2 含量较低时, 靠近铸件表面的型砂易烧结熔融, 有利于防止铸铁件的化学粘砂和“原生的机械粘砂”。

4) 硅砂中 SiO_2 的质量分数每降低 5%, 其烧结点约下降 50°C , 对于生产浇注温度不过高, 壁厚不太大的铸铁件, 使用 SiO_2 的质量分数为 80% 左右的硅砂的型砂结壳现象可能不明显。但是, 如果浇注温度相当高或铸件相当厚, 型砂烧结形成的砂壳混入回用砂中逐渐积累, 有可能引起型砂性能恶化和在铸件表面形成“次生的机械粘砂”。

由此可以得知, SiO_2 的质量分数为 80% 左右的硅砂的复用性和废砂的再生性能差。湿型铸铁件使用 SiO_2 的质量分数为 90% 左右的硅砂, 则不应存在任何不利之处, 而且还具有各种优点。

自然界中, 硅的氧化物多为结晶形, 也有的以无定形体存在。其中石英是最重要的晶体形硅的氧化物。铸造生产所用的硅砂主要是由粒径为 $0.053 \sim 3.35\text{mm}$ 的小石英颗粒所组成。纯净的硅砂多为白色, 被铁的氧化物污染时常呈淡黄色或浅红色。

石英的密度为 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$, 莫氏硬度为 7 级, 熔点为 $1760 \sim 1780^\circ\text{C}$, 是一种透明、浅色或无色的晶体, 其结构为硅氧四面体, 其化学成分为 SiO_2 。由于硅砂主要是由石英矿物所组成, 因此地质探矿方面常称其为石英砂, 并根据其成分和用途分为玻璃砂、铸造砂及过滤砂。

我国铸造生产中所用硅砂, 根据其来源和加工方式不同, 可以分为天然硅砂和人工硅砂两大类。

天然硅砂是由火成岩经过风化或变质作用, 逐渐剥裂、细化, 坚硬的石英颗粒与其他矿物颗粒部分分离, 然后再经水流或风力搬运沉积形成砂矿。这些砂矿按其成矿条件和特点, 可以分为河砂、湖砂、海砂、风积砂等几种。海砂和湖砂又可以再细分为海(湖)滩砂、沉积砂、堆积砂等。

我国内蒙古通辽的西辽河上游一带的风积砂, 黄河故道及其他河流的河砂, 鄱阳湖、洞庭湖等湖泊周围的湖砂中 SiO_2 的质量分数都在 85% ~ 93%, 这些地方是我国主要的铸铁用砂产地。福建闽江口以南和海南文昌、东部沿海, 以及广东珠江三角洲新会等地有大量天然硅砂, SiO_2 的质量分数在 97% 以上, 可用于铸钢件的生产, 具有良好的开发前景。为了提高硅砂品质, 很多砂厂都对原砂进

行水洗、擦洗加工，以降低原砂含泥量。通辽、兰州、都昌、平潭等地已建立硅砂选矿厂，对原砂进行精选，以提高原砂的 SiO_2 含量。

我国江苏省南京市六合区瓜埠镇出产一种用于非铁合金铸件和手工造型小铸铁件的红砂（六合红砂），其含泥量在 4% ~ 5%（质量分数）， SiO_2 的质量分数在 75% 左右，粒度为 100/200 筛号到 10/270 筛号之间。表 2-1 和表 2-2 是另一种六合红砂的化学组成和粒度组成。

表 2-1 一种六合红砂的化学组成

名 称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	K_2O	Na_2O	灼烧减量
质量分数(%)	75.25	8.70	1.28	4.12	0.36	0.14	3.36	1.70	3.90

表 2-2 一种六合红砂的粒度组成

筛 号	6	12	20	30	40	50	70	100	140	200	270	底盘	含泥量	总量
质量分数(%)	—	—	—	—	0.32	2.00	6.40	11.78	36.28	24.06	4.82	4.42	9.94	99.92

人工硅砂是将硅石岩或硅砂岩经过采矿、清洗、粗碎、细碎、筛选等加工而成。硅石岩（又名石英岩）的二氧化硅含量很高，但岩石坚硬，破碎后所得砂粒为尖角形。硅砂岩由砂粒天然胶结成团块状，结构较松散，比较容易破碎，黏结的砂粒经加工后仍然保持原来的形状，因此粒形大多呈钝角形。我国早期铸钢砂型曾采用硅石加工制成的人造硅砂，现已逐渐被天然硅砂所代替。

2.1.2 石英的结构转变特性

石英的晶体结构为 Si—O 四面体，自然界的石英多为 β 石英。硅氧四面体与 β 石英四面体的连接如图 2-1 所示。随着加热温度的变化和冷却速度的不同，石英可以多种同质异晶的形态存在，并相应产生体积、密度的变化。石英各种变体的转变关系如图 2-2 所示。各种变体的性质特点见表 2-3。

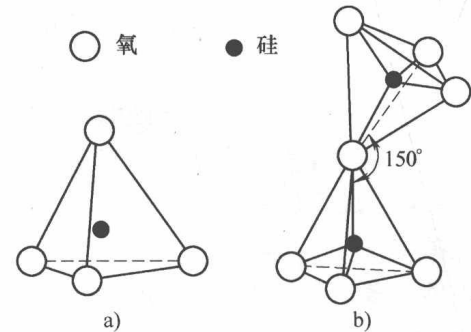


图 2-1 硅氧四面体与 β 石英四面体的连接

a) 硅氧四面体 b) β 石英四面体的连接

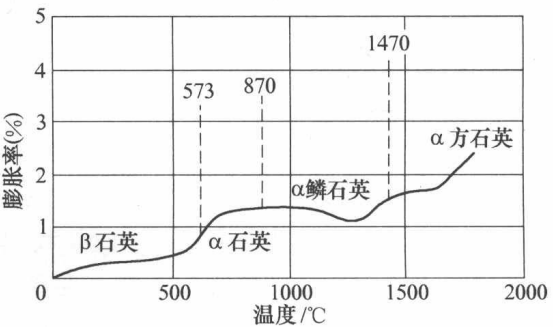


图 2-2 硅砂加热时石英各种变体的转变关系

表 2-3 石英各种变体的性质特点

变体名称	密度 $\rho/(g/cm^3)$	结 晶 变 化	相变温度 / $^{\circ}C$	线膨胀率 (%)	体积膨胀率 (%)
β 石英	2.65	β 石英 $\rightleftharpoons\alpha$ 石英	573	0.45	0.82
α 石英	2.52				
γ 鳞石英	2.31	γ 鳞石英 $\rightleftharpoons\beta$ 鳞石英	117	0.27	0.20
β 鳞石英	2.29	β 鳞石英 $\rightleftharpoons\alpha$ 鳞石英	163	0.06	0.20
		α 石英 $\rightleftharpoons\alpha$ 鳞石英	870	5.10	16.10
α 鳞石英	2.25	β 石英 $\rightleftharpoons\alpha$ 鳞石英	870	5.55	16.82
β 方石英	2.27	β 方石英 $\rightleftharpoons\alpha$ 方石英	230	1.05	2.80
		α 鳞石英 $\rightarrow\alpha$ 方石英	1470	1.05	4.70
α 方石英	2.22	β 石英 $\rightarrow\alpha$ 方石英	1470	6.60	21.52
石英玻璃	2.20	α 方石英 $\rightarrow$ 石英玻璃	1713	0	-0.9

SiO₂ 各种变体之间的转变可分为两类：一类是 α 石英、鳞石英和方石英之间的转变（见图 2-2），转变时要产生新的结构，属重建型转变，这种转变非常缓慢，所以高温型 SiO₂ 变体也常以介稳定状态存在于常温下；另一类是同系列中的 α 、 β （见图 2-3）及 γ 石英形态之间的转变，各变体在结构上差别不大，转变时不打开结合键，只是原子发生位移和 Si—O—Si 键角稍有变化，这种转变迅速，而且是可逆的。

当石英被加热到 573℃ 时，开始出现从 β 石英到 α 石英的转变（见图 2-2），Si—O 四面体原子之间的网状连接伸直（见图 2-3b），产生体积膨胀，密度也从 2.65g/cm³ 减小到 2.60g/cm³。虽然这时的膨胀量不大，但转变的速度快，所以容易引起铸件夹砂、结疤和脉纹等缺陷。870℃ 是石英结构的一个重要转变点，超过这一温度，石英转变为鳞石英（见图 2-2），再冷却则易变为鳞石英的其他变体，体积变化较小。因此，一般认为经过多次浇注使用后的旧砂，其高温热膨胀量比新砂小。

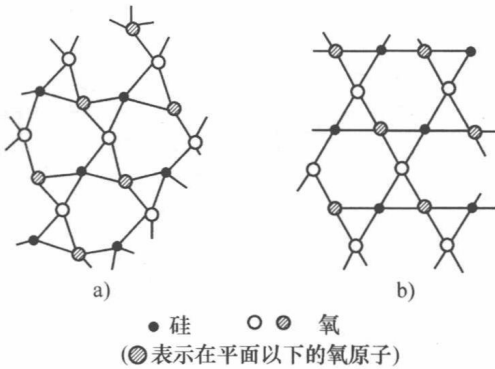


图 2-3 β 石英与 α 石英原子排列位置的区别
a) β 石英 b) α 石英

2.1.3 矿物组成和杂质成分的影响

硅砂中除石英外，还含有长石、云母、铁的氧化物、碳酸盐以及黏土等矿

物。这些矿物的存在降低了硅砂的耐火度，因此皆称为杂质矿物。长石和云母类矿物的化学组成和一些性能见表 2-4。

表 2-4 长石和云母类矿物的化学组成和性能

矿物名称	化 学 式	密度/(g/cm ³)	莫氏硬度/级	熔点/℃
钾长石	K ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂	2.53 ~ 2.56	6.0 ~ 6.5	1170 ~ 1200
钠长石	Na ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂	2.61	6.0 ~ 6.5	1100
钙长石	CaO · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	2.76	6.0 ~ 6.5	1160 ~ 1250
白云母	K ₂ O · 3Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ · 2H ₂ O	2.76 ~ 3.0	2.5 ~ 3.0	1270 ~ 1275
黑云母	K ₂ O · 6(Mg · Fe)O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ · 2H ₂ O	—	2.5 ~ 3.0	1145 ~ 1150

工业上对硅砂的杂质一般只按其化学成分进行控制，但化学成分与矿物组成是不同的。砂中杂质的含量及杂质的存在形式和分布状况对硅砂的耐火度、酸耗值及加工方法都有直接的影响。如果砂中的杂质矿物大部分存在于砂粒表面、细粉和泥类中，可以通过水洗、擦洗、水力分级等简易的选矿方法加以清除，降低砂的含泥量，提高硅砂的品质。GB/T 9442—2010《铸造用砂》中将硅砂的 SiO₂ 含量分成 5 级（见表 2-5）。

表 2-5 铸造用硅砂按二氧化硅含量分级和各级的化学成分（GB/T 9442—2010）

分级代号	SiO ₂ (质量分数, %)	杂质化学成分(质量分数, %)			
		Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO + MgO	K ₂ O + Na ₂ O
98	≥98	<1.0	<0.3	<0.2	<0.5
96	≥96	<2.5	<0.5	<0.3	<1.5
93	≥93	<4.0	<0.5	<0.5	<2.5
90	≥90	<6.0	<0.5	<0.6	<4.0
85	≥85	<8.5	<0.7	<1.0	<4.5
80	≥80	<10.0	<1.5	<2.0	<6.0

目前对铸造用硅砂的化学成分主要是控制 SiO₂ 含量，对杂质的含量不再做具体规定。

铝的氧化物是硅砂中主要的杂质成分，它主要存在于长石和云母之中，从 SiO₂ 和 Al₂O₃ 的二元相图中可以看出，硅砂中含有质量分数为 5% 左右的氧化铝，其熔点由 1710℃ 下降至 1550℃，超过这一含量后熔点又逐渐上升。通常铸造用硅砂中氧化铝的含量正好处在这个对硅砂熔点影响最显著的区间，因此影响尤为突出。

硅砂中根据所含长石等杂质矿物种类的不同，一般还含有 Na₂O、K₂O、CaO、MgO 等碱金属或碱土金属的氧化物。这些氧化物在不同砂中的含量不同，且其总量一般低于硅砂中氧化铝的含量，当其单独少量存在时，对硅砂耐