

高等学校交流讲义



热 处 理 炉

西安交通大学金属学及热处理教研组等编

学校内部用書

本书是根据高等工业学校 金属学及热处理课程设备 专业 热处理
炉 教学大纲选编而成的
书中阐述了工业炉的基本原理 金属热处理时金属的加热 热处理燃
料炉 热处理电阻炉及热处理盐浴炉的基本原理和设计原理
本书可作为高等工业学校机械制造系交流讲义 也可供设计机关及工
厂中有关技术人员参考
全书由郑正毅 刘静华 周志渊 沈其昉等同志负责编写

热 处 理 炉

西安交通大学金属学及热处理教研组等编

中国工业出版社出版 北京佟麟阁路丙 0号

北京市书刊出版事业许可证出字第 0号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 8 092 6 印张 26 2 插页 字数 62 000

96 年 9 月北京第一版 96 年 9 月北京第一次印刷

印数 0001—2 53 定价 0—6 3 5 元

统一书号 5 65 754(一机— 6

目次

緒論	1	第七章 气体流动时的压头损失	44
第一篇 筑爐材料		§1. 概述	44
第一章 概述	4	§2. 气体的流动性質	45
第二章 耐火材料的物理性能和工作性能	5	§3. 由摩擦阻力所造成的压头损失($h_{摩}$)	48
§1. 耐火材料的物理性能	5	§4. 由局部阻力所造成的压头损失($h_{局}$)	50
§2. 耐火材料的使用性能	8	第八章 柏努利方程式的应用实例	62
第三章 耐火材料与絕热材料	11	§1. 不可压缩的气体通过小孔的流出	62
§1. 粘土磚	11	§2. 爐門溢气	64
§2. 高鋁磚	13	§3. 流量測量原理	64
§3. 剛玉磚	13	§4. 气体通过管头的流出	66
§4. 硅 磚	13	§5. 气体流动的分流定則	68
§5. 碳化硅質耐火材料	14	§6. 高压下的气体流动	69
§6. 輕質耐火材料和絕热材料	15	第九章 相似原理	74
§7. 耐火胶泥、耐火混凝土、涂和、补爐料	17	§1. 相似的概念	75
§8. 建筑用磚	19	§2. 相似原理的三个定理	77
§9. 热处理爐地基材料	19	§3. 模化法	83
第四章 金屬材料	20	§4. 类似法	88
§1. 热处理爐用金屬耐热材料	20	参考文献:	90
§2. 热处理爐用金屬骨架材料	21	第三篇 傳热原理	
参考文献:	21	第十章 概述	91
第二篇 气体力学及相似原理		第十一章 稳定态传导传热	93
第五章 气体靜力学基础	25	§1. 傅立叶定律	93
§1. 几个基本概念和定律	25	§2. 导热系数	93
§2. 气体平衡方程式 (欧拉平衡微分方程式)	27	§3. 通过平壁的导热	95
§3. 气体靜力学的基本方程式——靜止气体压力分布方程式	29	§4. 圓筒壁的导热	97
§4. 压头的概念	30	§5. 球壁的导热	99
第六章 气体动力学基础	33	§6. 不規則形状物体的导热	99
§1. 几个基本概念	33	第十二章 对流給热	100
§2. 气体运动的連續方程式	34	§1. 对流給热的本質	100
§3. 理想气体的流动方程式 (欧拉流动微分方程式)	36	§2. 热交換的水力学原理	102
§4. 粘性气体的流动方程式 (納維尔-斯托克斯方程式)	37	§3. 相似原理在对流給热上的应用	104
§5. 柏努利方程式	38	§4. 对流給热系数的經驗公式	108
§6. 欧拉冲量方程式	43	§5. 对流給热在工业爐上的应用	112
		第十三章 輻射传热	113
		§1. 基本概念	113
		§2. 輻射的基本定律	114
		§3. 灰体的輻射	117

§ 4. 克希荷夫定律	118
§ 5. 两个物体間的輻射热交換	119
§ 6. 为理想圍壁連在一起的两个表面之 間的輻射热交換	125
第十四章 綜合热交換	127
§ 1. 对流和輻射同时存在时的綜合热交 換	127
§ 2. 通过平壁从一气体到另一气体的傳 热	128
§ 3. 通过圓形壁从一气体到另一气体的 傳热	129
第十五章 不稳定态傳导傳热	130
§ 1. 概述	130
§ 2. 单值条件	131
§ 3. 第一类边界条件下不稳定态傳导傳 热的分析解法	132
§ 4. 第二类边界条件下不稳定态傳导傳 热的分析解法	138
§ 5. 第三类边界条件下不稳定态傳导傳 热的分析解法	140
§ 6. 有限差量法 (E·斯密德图解計算 法)	146
§ 7. 导热性为无限大的物体的加热計算 法	149
参考文献:	150

第四篇 金屬加热

第十六章 概述	151
第十七章 加热時間的計算	151
§ 1. 薄件加热時間的計算	151
§ 2. 厚件加热時間的計算	152
§ 3. 加热速度	155
§ 4. 鋼材在保护气体中的加热	164
参考文献:	168

第五篇 热处理燃料爐

第十八章 燃料炉概述	170
第十九章 燃料及其主要性質	177
§ 1. 燃料的化学組成	178
§ 2. 燃料分析及其成分的換算	181
§ 3. 燃料的发热量	185
第二十章 燃燒計算	188
§ 1. 概述	188
§ 2. 燃料燃燒的分析計算法	190

§ 3. 燃料燃燒的图解計算法	200
第二十一章 燃料各論	209
§ 1. 天然固体燃料	209
§ 2. 天然液体燃料——石油	212
§ 3. 气体燃料	214
§ 4. 气体燃料的分述	215
第二十二章 燃料管理	221
§ 1. 煤的儲存	221
§ 2. 液体燃料的儲存和輸送	221
§ 3. 煤气設備和管理	222
第二十三章 炉內的气体运动	223
§ 1. 自由流股和半限制流股	223
§ 2. 爐內(限制空間內)气体的运动	227
§ 3. 爐內压力的分布	229
§ 4. 气流的混合	230
第二十四章 使气体流动的装置	232
§ 1. 烟囱	232
§ 2. 鼓风机	240
§ 3. 噴射管	241
第二十五章 炉子的热工作	244
§ 1. 气体与固体之間的輻射热交換	244
§ 2. 火焰爐爐膛內的热交換	251
§ 3. 热交換量 Q_{rx} 中各量的确定	255
§ 4. 爐膛热交換中爐牆的作用	257
§ 5. 火焰爐的生产率和燃料消耗量	260
第二十六章 炉子的热平衡和燃料消 耗量的計算	265
第二十七章 炉子的設計和計算	273
第二十八章 燃燒装置	278
§ 1. 概述	278
§ 2. 固体燃料的燃燒装置	278
§ 3. 液体燃料的燃燒装置	281
§ 4. 气体燃料的燃燒装置	285
§ 5. 輻射管	291
第二十九章 废热利用設備	291
§ 1. 換热器	293
§ 2. 蓄热室	297
第三十章 燃料炉的組成部份	299
§ 1. 爐膛	299
§ 2. 爐門及提升装置	301
§ 3. 爐子的金屬构架	302
§ 1. 烟道、閘門和烟囱	304

参考文献:306

附录:307

第六篇 热处理电阻炉

第三十一章 概述318

第三十二章 热处理电阻炉的分类和
国产热处理电阻炉的构造319

§1. 热处理电阻炉的分类319

§2. 国产热处理电阻炉的构造321

第三十三章 热处理电阻炉设计步骤
概要336

第三十四章 热处理电阻炉型式及容量
的选择337

§1. 型式的选择337

§2. 确定电炉的生产率及其数量338

第三十五章 热处理电阻炉设计要
点340

§1. 电炉的内部尺寸340

§2. 电炉的炉衬340

§3. 炉架341

§4. 耐热件341

§5. 电炉的电热体341

第三十六章 热处理电阻炉的结构342

§1. 电阻炉炉衬材料的选择和厚度的确
定342

§2. 炉顶的结构346

§3. 炉门347

§4. 地基351

第三十七章 热处理电阻炉功率的确
定351

§1. 周期作业热处理电阻炉功率的确
定351

§2. 连续作业热处理电阻炉功率的确
定355

第三十八章 电热体材料概述358

§1. 选择电热体材料时应首先考虑的条

件和性质358

§2. 各种电热材料的特性359

第三十九章 电阻炉的供电电路及功率
的调节366

§1. 供电电路与调节方法366

§2. 电压和每组电热体功率的选择369

§3. 炉内功率的分布369

第四十章 电热体的寿命及单位表面
功率370

§1. 影响电热体寿命的一些因素370

§2. 电热体的单位表面功率371

第四十一章 电热体尺寸的确定376

§1. 电热体的计算公式376

§2. 电热体计算公式的分析讨论 (以线
状电热体为例)378

§3. 碳化硅棒电热体的计算382

第四十二章 电热体的形状及布置385

第四十三章 热处理电阻炉的使用和
维修389

§1. 电阻炉的安装389

§2. 电阻炉的使用方法390

§3. 保护气体的采用390

§4. 电阻炉的维护与修理391

§5. 安全技术须知394

参考文献:395

附录:396

第七篇 热处理浴炉

第四十四章 热处理浴炉397

§1. 浴炉用液体介质的种类及性能397

§2. 浴炉加热的特点400

§3. 外热式浴炉401

§4. 内热式浴炉405

§5. 浴炉的计算411

§6. 安全技术须知417

参考文献:417

緒 論

金屬熱處理的作用在於改變金屬材料的組織和性能，使它具有人們所要求的力學性能、物理性質及化學性質。要使金屬制品具有所要求的組織及性能的指標，必須選定適當的熱處理工藝過程，並使用合乎要求的設備來進行金屬制品的熱處理。金屬熱處理的工藝過程很多，有正火、退火、淬火、回火及各種化學熱處理等等。但是任何一個熱處理工藝過程都是由加熱、保溫和冷卻三個工序所組成。在某些情況下，加熱工序可能與保溫工序結合在一起。

要保證實現所選定的熱處理工藝過程，實質上可以說就是要保證加熱工序及冷卻工序正確地進行。其它工序，例如，清洗、矯正等則都是輔助性質的工序。所以要使金屬工件具有所要求的組織與性能，重要的關鍵是在於正確地進行加熱工序及冷卻工序。因此，人們都把加熱工序及冷卻工序稱為主要工序。這些在熱處理原理或金屬學中均已詳細地加以說明。而正確地進行金屬工件的加熱工序又是實現任何熱處理工藝過程，使金屬工件具有所要求的組織的首要條件。若金屬工件的加熱情況不符合要求，則會出現各種缺陷，例如，金屬工件的脫碳、氧化、過熱、過燒等。

另一方面，從熱處理過程的時間來看，金屬加熱工序所占的時間，據估計，約為整個熱處理生產週期的40~80%^①。

從以上所述可以看到，不論是從熱處理生產過程中加熱工序所起的作用來看，或者是從加熱工序所占的總時間來看，加熱工序在熱處理生產中的技術及經濟方面都占有重要的地位。

加熱工序在整個熱處理生產過程中是如此重要。但是，要正確地進行這一工序就必須要有符合要求的加熱設備。否則不能保證熱處理工藝過程的實現，不能保證產品質量。目前，進行金屬加熱以及進行化學熱處理所使用的設備，主要是熱處理爐和金屬加熱裝置。

熱處理爐的好壞，除了影響熱處理工藝的實現、產品質量之外，還影響金屬熱處理（加熱）的生產成本，熱處理爐的使用性能（例如，升溫、降溫的快慢，保持所要求溫度的能力）和使用壽命、工人的勞動條件等。熱處理爐設計是否合理，還影響到築爐的投資費用、維護修理費以及熱處理爐所占用的生產面積大小等。這就足以說明，熱處理爐是熱處理車間的主要設備。熱處理爐的工作情況，對熱處理車間（工部或工段）的技術經濟活動起着重大的影響。

因此，對熱處理爐本身提出下列要求：1) 保證熱處理工藝的實現及金屬工件的加熱質量；2) 熱處理爐的使用性能良好，經久耐用；3) 熱處理爐本身結構完善且緊湊，占有尽可能小的生產面積；4) 使用熱處理爐的勞動條件好，便於實現生產過程的機械化和自動化；5) 便於維護及修理；6) 建築熱處理爐的費用低，不需要使用大量的特殊築爐材料。

① 這里是指一般的熱處理工藝過程，並不包括快速表面加熱。

对金属热处理爐提出的要求，比对鍛造或軋制时用的加热爐所提出的要求更为严格，这是因为：1) 热处理时，在金属工件横截面上所允許的溫度差比較小，要求加热均匀（在工件的横截面上以及长度上都有均匀的溫度分布）或溫度分布符合要求；2) 进行金属热处理时，要保証金属有最少的脫炭、氧化。在某些情况下，特别是在化学热处理时，要使用一定成分的介質，例如，保护气以及某种活性介質，这就要求热处理爐有一定的密气性。此外，还要采取一定的措施，以防止活性介質与爐內热处理零件起化学作用。有时，还需要在爐內装置有某些部件，使爐內介質流动合乎要求；4) 热处理时，要尽量避免金属工件的变形。因此热处理爐的結構形状要考虑到金属工件的結構特点。在鍛造及軋制生产时，允許金属工件中有較大的溫度差。由于鍛造及軋制，一般是在空气下进行，因此对金属工件的氧化及脫碳的要求不象热处理时那样严格。鍛造及軋制的工件大多数都是毛坯，因此对变形量的限制比較寬。

[illegible]

2

图2中载有箱式电阻爐的结构图。1是爐壳；2是爐衬的耐火层；3是爐頂；4是絕热填料；5是爐衬中的絕热层；6是电热体；7是爐底板；8是插热电偶孔；9是爐門上的观察孔；10是脚踏板。热处理电阻爐通常是具有下列主要部分：1) 爐腔；2) 电热体元件；3) 爐衬；4) 爐門或爐盖；5) 爐壳及爐架。

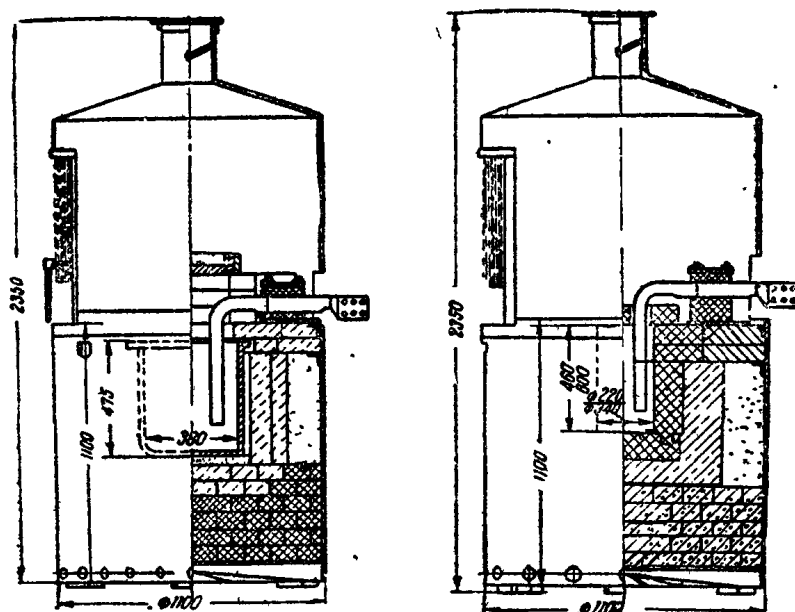


图2 中温箱式电阻爐 (仿苏H型爐)

1—金屬壳；2—爐腔；3—耐火磚；4—絕热填料；5—絕热磚；6—电阻加热体；
7—爐底金屬板；8—热偶孔；9—窥視孔；10—爐門开閉的脚踏板。

进行金屬工件的热处理时，所使用的介質有气态的、液态的以及固态的。所使用的液态的介質有熔化的盐或金屬（例如，鉛）。图3载有外热式盐浴电阻爐的结构图。

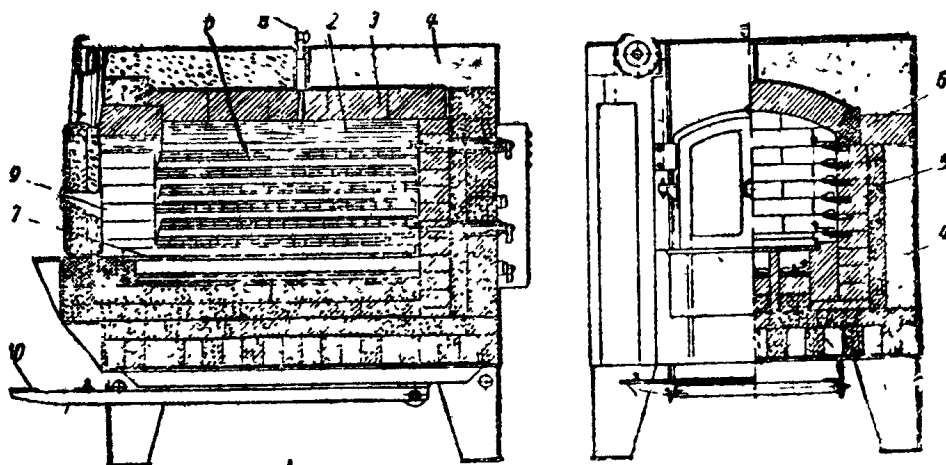


图3 外热式盐浴电阻爐

自建国以来，由于党的正确领导和全国人民的努力，我国的工业生产获得了飞跃发展。在一些新建及扩建的机器制造厂的热处理車間或工部中，有些已用现代化的热处理爐等设备装备起来。近年来，我国有不少电爐厂已生产出各种热处理电阻爐，供应全国各地工厂的需要。

第一篇 筑爐材料

第一章 概 述

热处理爐是热处理生产的重要設備。用来建筑爐子的材料統称为筑爐材料，它包括：耐火材料、絕热材料、建筑磚、地基材料和金属材料等。

凡具有能抵抗高溫以及在高溫下所产生的物理和物理化学作用的材料統称为耐火材料。

在解放前的半封建半殖民地的旧中国，由于沒有自己的独立的工业，尤其是冶金工业，因而尽管我国劳动人民早就掌握了耐火材料的生产技术，但我国的耐火材料工业并没有什么发展，很多品种的耐火制品都需靠国外輸入，而所遺留下来的工厂則規模狹小，設備也极为破旧。

解放后，随着鋼铁工业的飞跃发展，我国耐火材料工业水平有了巨大的提高。由于認真学习并推了苏联的先进經驗，解放以来先后試制成功并掌握了很多新产品，如高爐磚、高鋁磚、鎂磚、鉻鎂磚、高硅磚、鎂橄欖石磚、輕質硅磚、石墨粘土磚以及碳磚等。

在第一个五年計劃期間，新建和改建了許多耐火材料厂，鞍山等地的耐火材料厂都采用了机械化和自动化的生产設備。簡易的土洋結合的小型耐火材料厂也在全国遍地开花，成为高速度发展我国耐火材料工业和支援鋼铁大跃进的有力保証。

随着生产的发展，对耐火材料的科学研究工作也大大加强了。如对高鋁原料及高鋁制品的生产过程、鋁鎂磚及焦油白云石磚的生产和使用等，都做了大量的研究，从事耐火材料工作的技术队伍也壮大起来了。

§1. 耐火材料的分类

耐火材料可按其多种特性加以分类，其中最主要的是按它的化学-矿物組成来分类，因为它决定了耐火材料最主要的性能。

根据化学矿物組成，耐火材料可以分为几类（表 1-1）。

除此以外，还可以按以下特征再行分类：

按耐火度高低分为：

普通耐火材料	耐火度 1580~1770°C
高級耐火材料	1770~2000°C
特种耐火材料	2000°C 以上

按制品形状和尺寸可分为：标准型制品、普通型制品、异型制品和特异型制品。

按制造方法分为：可塑法成型的、半干法成型的、搗固成型的、泥浆法燒鑄的、熔融法鑄造的及天然矿物鋸成的制品等。

按热加工情况可分为不燒的、燒成的、和熔融澆鑄的制品。

§2. 热处理爐对耐火材料性能的要求

热处理爐对耐火材料性能有着多方面的要求:

- 1) 在高溫下不发生熔化或軟化;
 - 2) 在高溫使用情况下能承受一定的压力及其他机械負荷而不变形;
 - 3) 在高溫长期使用情况下应保持一定的体积稳定性;
 - 4) 当溫度急剧变化时不致破裂和剝落;
 - 5) 能抵抗金屬及爐气等的化学侵蝕作用;
 - 6) 制品必須具备一定的外形尺寸;
 - 7) 对于热处理电阻爐来說, 还要求在高溫下有良好的絕緣性能, 不致因与发 热 体 接触而产生漏电。同时要求在高溫下耐火材料与电热体相互間不起化学作用;
 - 8) 在不影响强度的情况下, 密度应愈小愈好, 这样既能减少爐衬耐火磚体的蓄热, 又能降低爐子的热傳导損失, 但必須注意用作馬弗室或爐底板的耐火材料, 要求則相反。
- 但到目前为止, 还没有任何一种耐火材料能同时滿足以上这些要求, 因而我們应充分了解耐火材料的基本性能, 以便根据实际需要, 正确地选择和使用耐火材料。

表 1-1

分 类	氧化硅質	硅酸鋁質	氧化鎂質	鉻質	碳質	鉛質	氧化物質	碳化物、氮化物、硼化物質
1	硅石質 SiO ₂ 含量 不 小 于 90%	半酸性質 SiO ₂ 含量不 小于 65% Al ₂ O ₃ 不超 过 30%	鎂石質 MgO 含量 不 小 于 85%	鉻鉄質 Cr ₂ O ₃ 含量 約 30%	石墨質 含有 20~ 70% 的 C	鉻英石 質 ZnO· SiO ₂	氧化 鋁質	碳化硅質含 SiC 30~90%
2	石英玻 璃SiO ₂ 含 量在99% 以上	粘土質SiO ₂ 不大于65% Al ₂ O ₃ 30~ 46%	白云石質 CaO 含量不小 于40%MgO含 量不小于35%	鉻鎂質含 有10~30% Cr ₂ O ₃ 和 30 ~70% MgO	焦炭質 含有70~ 90% 的 C	氧化鉛 質 ZnO	氧化 鈦質	硼, 鈦, 鋁等的氮化 物鈦, 鉛, 鋁, 鎢, 鉛 等的碳化物 鈦, 鉛, 鎢 等的硼化物
3		高鋁質 Al ₂ O ₃ 含量 大于 45%*	鎂橄欖石質 2MgO·SiO ₂				氧化 鎂質	
4			尖晶石質 MgO·Al ₂ O ₃					

* 我国部頒标准規定三級高鋁質制品含 Al₂O₃ 应大于46%。

第二章 · 耐火材料的物理性能和工作性能

耐火材料的基本特性可以通过它的物理性能和工作性能来表示。

§1. 耐火材料的物理性能

耐火材料的物理性能包括体积密度、真比重、气孔率、吸水率、透气性、耐压强

度、热膨胀性、导热性、导电性及热容量等。这些物理性能的好坏，影响着耐火材料的工作性能。

一、体积密度、真比重、气孔率、吸水率

耐火制品的致密程度是評定耐火制品质量的重要指标之一，它可以用体积密度、真比重、气孔率来表示。

1. 体积密度：以克/厘米³表示，它是包括全部气孔在内的单位体积制品的重量，它的数值相当于容积比重的大小。

2. 真比重：除去全部气孔后单位体积制品的重量。对大部分耐火材料来说，它的真比重只决定于化学矿物成份，工艺过程对它影响不大，故对这个指标一般不作测定，但硅磚例外，因为石英在燒成过程中有同素异晶体的转变，所以为了評定硅磚的质量，应测定其真比重。

3. 气孔率：在所有耐火制品的内部都有着大小不等的气孔存在。有些气孔和大气相通，叫开口气孔；有些气孔不和大气相通，叫闭口气孔；二者的总和称为总气孔。

开口气孔率（显气孔率）指的是与大气相通的气孔的体积占耐火制品总体积的百分数，它是表示耐火材料致密程度的常用指标之一。

显气孔率的测定方法：按规定取一試样，称其重量 G_1 ，將試样放入容器中，抽真空后注水浸沒試样，这时試样的开口气孔均被水充滿，取出試样后用湿布擦去表面多余的水份，称其重量 G_2 ，最后將試样悬于水中，称其重量 G_3 ，則試样的显气孔率为：

$$\frac{G_2 - G_1}{G_2 - G_3} \times 100\% .$$

总气孔率是制品全部气孔体积占制品总体积的百分数，闭口气孔率是制品闭口气孔总体积占制品总体积的百分数，总气孔率的大小可由真比重計算出来，闭口气孔率等于总气孔率和开口气孔率之差。

4. 吸水率是試样所吸收的水重与干燥試样重量之比。在測定耐火原料的燒結程度时常作这项指标的測定。

二、透气性

耐火制品的透气性可用透气系数来表示，它是在1毫米水柱压力差下，1小时内通过厚度为1米，面积为1米²的耐火制品的空气质量（以升計）。透气性的大小和制品气孔的大小、气孔的特性、制品结构的均匀性以及气体的压力差等因素有关，并随着气体温度的升高而降低，因为这时同样重量的气体它的体积增大了，而且气体的粘度也增加了。

三、耐压强度

耐压强度是耐火材料常温机械强度的指标之一。这个指标的实际意义主要是表示耐火制品成型泥料的加工质量、制品组织的均匀性以及制品的燒成质量等，它可以在一定程度上用来说明制品对冲击作用、摩擦作用、和其他机械作用的抵抗能力。

国家对于各种耐火制品的体积密度，显气孔率和耐压强度都有规定。见表2-1。

四、热膨胀性

耐火制品受热膨胀，冷后收缩，这种热膨胀是属于可逆变化的。热膨胀性可用线膨胀的百分数 α 来表示， $\alpha = \frac{L_1 - L}{L} \times 100\%$ ，式中 L ，为样品加热到规定温度后的长度， L

耐火制品的体积密度, 显气孔率和耐压强度(部颁标准)

表 2-1

制 品 种 类	体积密度, 克/厘米 ³	显气孔率, %	耐压强度, 公斤/厘米 ²
粘 土 磚	—	—	不小于 80~125
硅 磚	—	不大于 23~25	150~200
高 鋁 磚	—	21~23	400
鎂 磚	不小于 2.6	—	400
耐崩裂性鎂磚	—	25	250

为加热开始前的长度。

热膨胀性只取决于耐火制品的化学-矿物成份。

图 2-1 是最常用的几种耐火制品热膨胀百分数。

五、导热性

它表示制品导热能力的大小, 导热性系用导热系数 λ 来表示, 它的工程单位是: 千卡/米·小时·度, 它的物理意义是: 当厚度为 1 米, 温度差为 1°C 时, 在 1米^2 面积上, 在 1 小时内所通过的热量。

耐火材料的导热性除和其本身的化学矿物成分有关外, 还随温度而变化。大部分耐火材料的导热系数随着温度的升高而增大。但鎂磚、碳化硅磚正相反, 随温度的升高而减小。除此之外, 气孔率也是影响耐火材料导热性的主要因素, 气孔率愈大, 导热性则愈小。

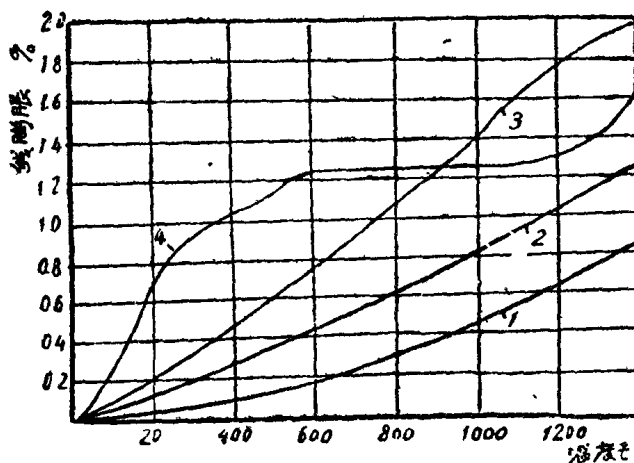


图 2-1 耐火制品的膨胀曲线

1—粘土质；2—刚玉质；3—鎂石质；4—氧化硅质。

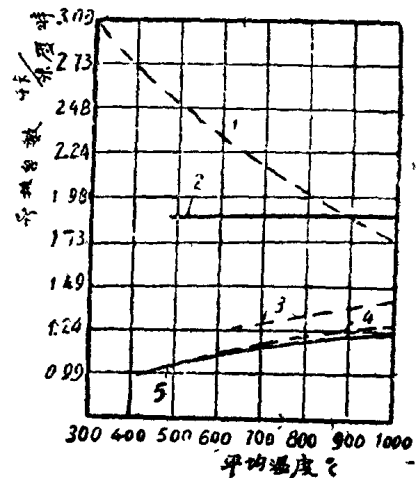


图 2-2 各种耐火材料导热性和温度关系

1—鎂石质；2—稳定白云石；3—鎂质；4—氧化硅质；5—粘土质。

六、导电性

耐火材料在常温下是电的绝缘体, 但当温度升高时则开始导电, 在 1000°C 以上其导电性提高得特别显著, 在高温下耐火材料内部有液相生成, 由于电离的关系, 能大大提高其导电性。当耐火材料用作电炉的衬砖和电的绝缘材料时, 这种性质具有很大的意义。

七、热容量

耐火材料的热容量是以千卡/公斤度来表示, 它随温度的升高而增大。

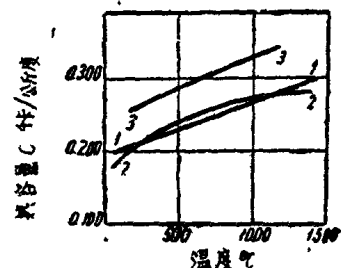


图 2-3 耐火材料的热容量和温度间的关系

1—粘土砖；2—硅砖；3—鎂砖。

§ 2. 耐火材料的使用性能

要說明耐火材料在高溫下的使用性能是很困难的，因为实际工作情况很复杂，影响使用性能的因素太多。通常用来表示耐火材料使用性能的一些指标如耐火度、荷重軟化点、抗渣性、耐急冷急热性、重燒收縮等都是在特定的实验条件下測定出来的，和实际使用情况有着一定距离，虽然如此，但它們仍可作为判断耐火材料使用性能的重要指标。

一、耐火度

耐火度是耐火材料抵抗高溫作用的性能，它是耐火材料的重要性能之一。耐火度并不是耐火材料的“熔点”，因为只有元素或純化合物才具有一定的熔点，而耐火材料是由多种化学成分的矿物所組成，所以它是在一定溫度範圍內逐漸熔化的，因而耐火度仅仅代表材料开始熔化后軟化到一定程度时的溫度。

耐火度的測定方法 耐火材料的耐火度主要是由其化学成份来决定，但它还受着加热速度、材料顆粒度及爐內气氛的影响，所以必需按照一定方法进行測定。根据部頒标准，測定耐火度时应将欲測材料磨碎到全部通过 100 号筛孔，然后制成高 30 毫米、下底边长 8 毫米、上底边长 2 毫米的截头三角錐，并将这个三角錐和由高岭土、氧化铝及石英按不同配比制成的已知耐火度的一些标准測溫錐放在同一个托盘上(图 2-4)然后将其放在炭粒电阻爐內以規定的升溫速度进行加热 (1500°C 以前 $10\sim 15^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ， 1500°C 以上 $5^{\circ}\text{C}/\text{分}$)，到某溫度时待測三角錐和某标准三角錐同时倒下，則待測試样的耐火度就等于該标准三角錐的耐火度。

耐火度的表示方法各国不同，苏联是以符号 ПК 来表示，ПК 后面并附以相当于耐火度的十分之一的数字，如：ПК158 代表耐火度为 1580°C ，ПК170 代表耐火度为 1700°C 等。

欧美各国采用錐号 SK 来表示，如：SK26 代表耐火度 1580°C ，SK34 代表耐火度 1750°C ，这种表示方法应用起来很不方便。

根据耐火度的高低，耐火材料可分为：普通耐火材料，其耐火度在 $1580\sim 1770^{\circ}\text{C}$ 間；高級耐火材料，耐火度在 $1770\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 間；特級耐火材料，其耐火度在 2000°C 以上。

耐火度并不能代表耐火材料的实际使用溫度，在实际使用时，由于考虑到高溫机械强度的問題，所以耐火材料的实际允許最高使用溫度要比材料的耐火度为低。

二、高溫結構强度

耐火材料的常溫耐压强度很高，但在高溫下它的結構强度却显著降低，这是因为耐火材料中的低熔点結合物过早熔化，在耐火材料內有液相产生的結果。耐火材料在高溫下使用时都承受一定的負荷(主要是压力)，所以測定它的高溫耐压强度具有很大的意义。

耐火材料高溫耐压强度的測定方法：一般是用荷重軟化点作为評定耐火材料高溫結構强度的指标。所謂荷重軟化点是指在固定压力情况下，耐火材料开始变形及变形到一定程度时的溫度。試驗时将規定大小的試样 ($\phi=36$ 毫米， $L=50$ 毫米) 放在炭粒电阻爐中，在荷重 2 公斤/厘米² 压力下按一定的升溫速度 (800°C 以下每分鐘不超过 10°C ，大于 800°C 时每分鐘不超过 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$) 加热，測出試样的开始变形溫度和压缩 4% 及 40% 的溫度作为試样的荷重軟化点。图 2-5 是某些耐火材料的高溫荷重变形曲綫。

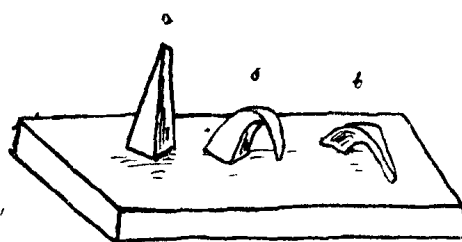


图 2-4 耐火錐軟倒情况

a—軟倒前；б—在耐火度溫度下軟倒情况；

в—超过其耐火度时軟倒情况

从图中可以看出,在荷重下,粘土磚的荷重軟化开始点只有 1350°C 左右,亦即在远比其耐火度为低的温度下就开始变形,而且直到 1600°C 左右才达到荷重軟化温度的终点。这是因为在粘土磚里除了存在着高耐火度的莫来石結晶外还含有几乎达 50% 的玻璃相,后者的开始熔化温度很低,但熔熔物的粘度却很大,因此粘土磚的荷重軟化开始温度较低,且变形温度范围很大。

氧化硅質制品的荷重軟化开始温度和它的耐火度极为接近,其所以如此主要是由于它内部有着发展良好的二氧化硅結晶胶合体。

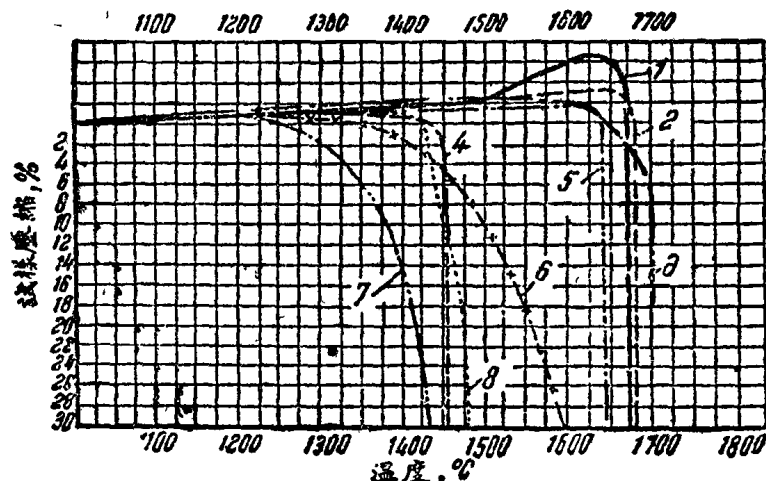


图 2-5 耐火材料荷重下的变形和温度间的关系

1—石英質硅磚; 2—白硅石質磚; 3—菱鎂矿; 4—铬鉄矿;

5—磷石英質硅磚; 6—优質粘土磚; 7—劣質粘土磚; 8—半酸性磚。

氧化鎂質制品虽然耐火度很高 (2000°C), 但它的荷重軟化开始温度却很低, 只有 1500°C 左右, 这是由于在氧化鎂質制品中高耐火度的方鎂石晶粒之間存在着低熔点的結合物, 而没有形成結晶胶合体的緣故。

三、抗渣性

耐火材料在高温下抵抗爐渣侵蝕作用的能力叫抗渣性。耐火材料受爐渣侵蝕的过程是很复杂的, 它受到工作条件及其本身一些性能的影响。影响抗渣性的因素主要有:

1. 爐渣的化学性質: 爐渣根据其化学性質基本上可分成二类, 即

酸性渣: 含有較多的酸性氧化物 SiO_2 、 P_2O_5 等;

碱性渣: 含有較多的碱性氧化物 CaO 、 MgO 等。

含酸性氧化物較多的耐火材料, 如氧化硅質、半酸性質、粘土質等耐火材料, 对酸性渣抵抗能力强, 对碱性渣的抵抗能力差。

反之, 碱性耐火材料, 如氧化鎂及白云石質耐火材料, 对碱性渣具有較强的抵抗能力, 而对酸性渣的抵抗能力則較差。

中性耐火材料, 如炭質耐火材料, 无论对酸性渣或碱性渣都有极好的抵抗能力。

2. 工作温度: 在 $800\sim 900^{\circ}$ 时, 耐火材料受爐渣侵蝕的情况一般尚不太明显, 但到 $1200\sim 1400^{\circ}$ 或更高温度时, 化学反应迅速增长, 从化学动力学的观点来看, 温度每升高 10° , 反应速度就增加 2~3 倍, 因而高温下侵蝕較快。此外在高温下爐渣的粘度显著降低, 活动性增加, 結果就容易渗入耐火材料的气孔和砌縫中, 增加了反应接触面, 因而也就加剧了对耐火材料的侵蝕作用。

3. 耐火材料的致密程度: 耐火材料愈致密則爐渣愈不容易渗入, 故提高耐火材料的致密程度, 降低其气孔率是改善其抗渣性的主要措施, 如在不爐頂上使用高密度硅磚后可显著提高其抗渣性。为了提高耐火材料的致密度, 降低它的气孔率, 在制磚时就需要有最恰当的顆粒配比及較高的成型压

力。

抗渣性的測定方法很多，最常用的有：

1) 坩堝法：將欲測的耐火材料做成坩堝，放入具有一定成份的爐渣，經高溫熔化後測量熔渣浸透坩堝壁的深度。

2) 標準法：在規定溫度下（1450°C）向試樣上撒布粉末爐渣，待試驗完畢後，用試樣體積或重量的損失來代表它的抗渣性。必須指出，在上述試驗條件下所測得的抗渣性僅僅是一個近似的參考性的指標，因為它沒有充份反映出實際工作條件下的複雜情況。

四、耐急冷急熱性

耐火材料抵抗溫度的急劇變化而不破裂或剝落的能力叫耐急冷急熱性。在實際工作情況下，耐火材料的工作溫度常有急劇的變化，例如車底式正火爐的爐底磚、蓄熱室的格子磚，以及實行快速烘爐時的爐襯等，實際工作溫度波動都比較大，如果這些耐火材料沒有足夠的耐急冷急熱性能，就會使得耐火材料過早地損壞。

影響耐火材料的耐急冷急熱性的因素有：

1. 線膨脹係數：耐火制品在工作時其內部的溫度分布是不均勻的，若制品的線膨脹係數大，則會由於制品各部份的膨脹程度不同而引起較大的應力，因而降低了材料的耐急冷急熱性。

2. 導溫係數：它影響制品內部各層溫度分布的均勻性。它和制品的導熱係數 λ 、熱容量 C 、體積密度 ρ 的關係為：
$$\alpha = \frac{\lambda}{\lambda C} \text{ 米}^2/\text{小時}$$
。制品的導溫係數愈大，其內部的溫度梯度就愈小，由此所產生的內應力也就愈小，因而耐急冷急熱性較好。

3. 彈性係數：此數值愈小，則制品允許的彈性延伸量或切綫位移就愈大，制品的耐急冷急熱性就愈好。

其它，如制品形狀的複雜程度及尺寸的大小等也能影響耐急冷急熱性。薄的、尺寸不大和形狀簡單的制品比厚的、尺寸較大和形狀複雜的制品有較好的耐急冷急熱性。制品內部的礦物結構也能影響耐急冷急熱性。

耐急冷急熱性的測定方法：部頒的測定方法是將試樣加熱到 850° 後放在流動的冷水中冷卻，並反復進行之，直到其脫落部份的重量達最初總重量的 20% 時為止，此時其經受的急冷急熱次數就作為該種制品的耐急冷急熱性的指標。

五、高溫下的體積穩定性

耐火材料在高溫下長期停留時體積會發生不可逆的變化。這和一般的热脹冷縮物理現象不同，稱為殘余膨脹或殘余收縮。耐火材料的殘余收縮或殘余膨脹過大都會使砌築物的強度受到影響，甚至發生倒塌，尤其是砌築爐頂時更應注意。

殘余收縮或膨脹主要是由於耐火制品燒成不足而引起的。大多數耐火材料，如粘土磚和鎂磚，在高溫下將產生殘余收縮，這是由於制品中的礦物繼續發生再結晶以及在高溫下制品中的低熔點結合物逐漸熔化，在表面張力的作用下促使固體顆粒相互靠攏所致。硅磚在高溫下會產生殘余膨脹，這是由於磚內繼續進行着二氧化硅的同素異晶體的轉變所致。

將試樣在規定溫度下加熱一定時間，待冷卻後測量其體積的變化，後者以試樣原有體積的百分數表示之即為其高溫下的體積穩定性。對各種耐火材料的殘余收縮或殘余膨脹的允許數值已有規定，一般不應超過 0.5~1%。

六、耐火制品的外觀檢查

耐火制品除按它的成份、耐火度、荷重軟化點、重燒收縮、體積密度、氣孔率、耐

压强度等指标分等外，还可按它的外观情况来分级。耐火制品外观检查的项目有：尺寸公差、缺角、缺棱、扭曲、裂纹、裂缝、熔洞、渣蚀等。这些项目的检查是极重要的，如耐火制品的外形尺寸不合格，则在砌筑时会使砌缝过大，超过规定标准，而砌缝是砌筑物最薄弱的地方，易被炉渣、金属、炉气所侵蚀，砌缝过大就会加快这部分的损坏而引起整个砌筑物的毁坏。

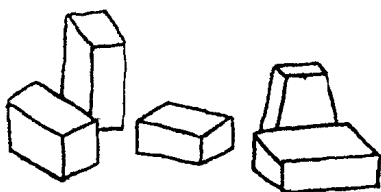


图 2-6 普通型制品

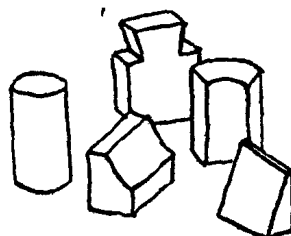


图 2-7 异型制品

各种耐火制品外观检查项目的规格可参考现行的部颁标准。

为了生产和使用方便起见，可按耐火制品的形状将制品分为：标准型、普通型、异型和特异型。最常见的标准型砖的尺寸为：直角砖—— $230 \times 113 \times 65$ 毫米；纵楔形砖或横楔形砖—— $230 \times 113 \times 65 \times 55$ 毫米。

第三章 耐火材料与绝热材料

各种热处理炉中用得比较普遍的耐火材料有：普通耐火粘土砖、轻质耐火粘土砖、高铝砖、刚玉砖、硅砖、金刚砂（即碳化硅）制品等数种。

§1. 粘土砖

粘土砖含 Al_2O_3 30~46%，其余部份主要是 SiO_2 及少量的杂质。

一、原料

粘土砖的原料主要是耐火粘土和高岭土，它是由自然界中花岗岩、片麻岩和基本上由石英、长石、云母等组成的岩石经过日久风化而成，它们的主要矿物成份是高岭石 ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)，其余部份为 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 及 Fe_2O_3 等杂质，它们约占 6~7% 左右。耐火粘土和一般泥土不同的地方是杂质含量少，耐火度高（大于 $1580^\circ C$ ）。

作为制造粘土砖的原料，要求耐火粘土及高岭土中所含的 Al_2O_3 要高，杂质要少。含 Al_2O_3 高时原料耐火度高。杂质中的氧化钾、氧化钠、氧化钙、氧化镁、氧化铁等成份能显著降低材料的耐火度，若在原料中铁的化合物分布不均匀时为害更大，其结果在成品上出现熔洞和铁疤，造成废品。

在杂质中还含有石英及少量残存母岩，此外，还可能由植物生成的有机物质，后者使粘土呈灰色或黑色，并增加原料的灼减量。

我国耐火粘土资源极为丰富，分布也极为广泛并且质量很好。表 3-1 中给出了我国

一些著名产地的耐火粘土的化学成份及其主要性能。

我国产一些耐火粘土的化学成份和性能

表 3-1

名 称	化 学 成 份								真比重	耐火度°C
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O Na ₂ O	灼 减		
复州软质粘土	41.35	2.60	36.69	0.80	0.24	1.04	无	14.19	2.59	1730
牛心台软质粘土	51.57	0.53	31.57	0.30	0.09	0.75	1.04	12.22	2.62	1750
占治B级矾土	44.13	0.96	38.23	0.44	0.04	1.65	0.69	14.28	2.61	1770
唐山C级矾土	43.19	0.28	40.32	0.58	0.08	1.48	—	15.88	—	1770
占治紫木节	42.68	1.27	36.15	0.82	0.07	0.48	1.84	16.57	2.64	1750
太原黄灰矸	43.49	0.97	39.41	0.46	0.08	0.27	—	13.98	—	1790
太原灰片矸	54.08	0.50	31.82	0.29	微	0.30	0.99	10.91	2.61	1740
阳泉白羊矸	49.40	0.10	34.43	0.48	微	1.48	2.56	11.54	2.68	1750
山东焦宝石	41.56	0.89	39.36	0.15	—	—	—	11.1	2.62	1770

二、粘土磚的主要性能及其使用

粘土磚的主要性能见表 3-2。

粘 土 磚 的 性 能

表 3-2

指 标	I 等			II 等			III 等	
	一級	二級	三級	一級	二級	三級	一級	二級
化 学 成 份	Al ₂ O ₃ + TiO ₂ 不小于 20%							
耐火度°C 不低于	1730	1730	1730	1670	1670	1670	1580	1580
常温耐压强度 公斤/厘米 ² 不小于	100	100	80	120	100	80	100	80
残余收缩% 不大于	0.7	1	1	0.7	1	1	0.7	1
試驗温度°C	1400	1400	1400	1350	1350	1350	1250	1250

粘土磚是弱酸性的耐火材料，它能抵抗酸性渣的侵蝕，对硷性渣侵蝕作用的抵抗能力則稍差。它的耐急冷急热性很好。荷重軟化开始温度比其耐火度要低得多，只有 1350°C 左右，而且軟化开始温度和終了温度間隔很大。

粘土磚的应用范围极广，可用来修砌热处理爐、燃燒室、烟道、烟囱等以及其他和高温爐气相接触的內衬。在黑色冶金工业中并可用来修砌高爐、热风爐、化鉄爐、平爐和电爐等温度較低的部份，以及用作盛鋼桶內衬、澆注系統用磚。

三、无熟料粘土磚

无熟料粘土磚是利用燒成时收縮很小的一种硬質粘土加結合粘土制成的。我国所产的腊石(A₂O₃·4SiO₂·H₂O)具有在水中不被浸湿的特性，可塑性低，燒成时不收縮，可代替熟料用半干压法生产无熟料粘土磚。无熟料粘土磚中作为瘠化材料的硬質粘土能和結合粘土同时燒結，因而制品致密，耐压强度大，抗渣性好，生产成本低。

四、不燒粘土磚

粘土磚在使用过程中受到高温的作用，能产生类似于磚坯在燒成中所发生的燒結現象，故有可能生产不燒粘土磚，亦即讓磚坯的最終燒成阶段在其使用过程中来完成，这样可以大大提高产量，降低成本。