

硅酸铝耐火材料的 热机械性质

Э.К. 克列尔 著

钢铁研究院耐火材料室 译

冶金工业出版社

81.5562
247
C3

硅酸鋁耐火材料的热机械性質

Э. К. 克列尔 著
鋼鉄研究院耐火材料室 譯

34234 105

冶金工业出版社

Э. К. Келер
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ОГНЕУПОРОВ

Металлургиздат (Москва—1949)

硅酸铝耐火材料的热机械性质

钢铁研究院耐火材料室 译

— * —

冶金工业出版社出版(北京市灯市口甲45号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第003号

冶金工业出版社 印刷厂印 新华书店发行

— * —

1959年8月 第一版

1959年8月北京第一次印刷

印数3,510册

开本850×1168·1/32·130,000字·印张6

— * —

统一书号 15062·1692 定价 0.77 元

內 容 簡 介

本書介紹的是在高溫和各种不同的机械作用的条件
下硅酸鋁耐火材料的性行、耐火材料的檢驗方法，有关
半硅質耐火材料、粘土耐火材料和高鋁耐火材各种性質
的文献上介紹的資料和实验所得的資料，耐火制品的各
个性質之間的相互关系的探討，以及專門用途的穩定的
耐火材料的制造方法。

本書供从事生产、選擇和使用耐火材料的工程师和
科学研究工作者参考用。

本書最后还比較完全和系統地編輯了参 考 文 献 索
引，可幫助讀者更易于利用各种参考文献。

02540

目 录

序.....	1
緒論.....	3
硅酸鋁耐火材料的性質同化学組成、瘠化程度、成型方法和 燒成溫度的关系的試驗研究.....	26
1. 工作安排和准备工序.....	26
2. 檢驗用仪器和檢驗方法.....	40
3. 試驗用泥料的化学矿物和技术特性.....	54
收縮率、气孔率、体积密度、比重.....	54
綫膨脹系数.....	60
热容量.....	65
导热性.....	67
热稳定性.....	70
抗渣性.....	74
相組成.....	77
4. 常溫机械强度.....	84
5. 热机械性質.....	87
高溫荷重軟化.....	87
高溫断裂作用.....	93
高溫弯曲作用.....	101
在常溫和高溫下扭轉时的彈性变形和永久变形.....	103
常溫和高溫的磨損性.....	122
6. 各种性質間的相互关系.....	125
磨化物的性質、顆粒組成、泥料的加工方法及其它因素 对耐火材料热机械性質的影响.....	133
1. 半硅制品.....	133
2. 粘土制品.....	146
3. 高鋁制品.....	158
4. 燒成时耐火材料在荷重下的性行.....	166
耐火材料的生产要点.....	168
参考文献.....	174

序

根据偉大的斯大林計劃，“每年需要生产生铁达五千万吨，生产鋼达六千万吨……”，給苏联冶金工作者提出了新的技术任务。高速度增加生产，不仅要求建設新的企業，并且必須充分發揮現有工厂的潛在力量。在耐火材料工業中，这些未加利用的潛力还是很大的。这些潛力首先在于有很大的可能性使耐火材料制品高度的專門化，并通过这条途徑以提高耐火材料的使用效率。

要达到这个目的，我們的耐火材料工業是具有很大可能性的：各种各样高質量原料的巨大儲存量，具有头等裝備的工厂，优秀的工人和技术干部，宏偉的科学研究机关。

不过，耐火材料的專門化，要求首先进行复杂而費力的准备工作，要求用实验方法来闡明原料的性質、工艺过程的特点、成品的性質与成品的使用情况之間的相互关系。尽管已作过为数很多的研究工作，但在这方面做的还远远不够的；而且，并非所有現成的資料都已加利用。因此，最迫切需要的是把已有的报道和發現系統化，并在此基础上找出耐火材料專門化的具体道路。显然，这巨大的任务只有研究工作者和实际工作者的集体力量才能解决。作者收集了文献上仅屬有限的，但对本工作有密切联系的問題上的論証，希望能竭尽个人的能力，来解决上述任务。

耐火材料使用在条件極為复杂的現代热工設備上。除了化学作用之外，耐火材料还必须經受得住一系列热机械的作用。工業爐、蒸汽鍋爐、燃燒室等等的使用期限，常常直接取决于用作爐襯的耐火材料的热机械性質。在實踐中經常会遇到爐頂、拱頂和燃燒室牆的变形或甚至破坏，盛鋼桶塞头磚的断裂，玻璃熔爐受到玻璃流体靜压力作用而引起的破裂，鋅罐的

撓曲，高爐、豎窯和迴轉窯爐襯的磨損等等。耐火襯磚損壞的主要形式之一——由于溫度急變而形成裂縫——也依磚體中所產生的剪應力和拉應力而定。

雖然耐火材料的热机械性質有这样巨大的实际意义，但还没有出版过系統綜合有关这方面內容的著作。

即使只能局部地补救这一缺陷，作者力圖說闡耐火材料各种性質之間的关系，从而闡明不同的工艺因素对耐火制品的热机械性質的影响。依此原則，本書还按硅酸鋁耐火材料——半硅磚、粘土磚和高鋁磚——生产的專業性的不同，提出了一些实际的指示。

除了热机械性質之外，本書还包括其他許多种耐火材料的重要指标。这些指标是在設計和运用热工設備的必須通曉的，例如：热膨脹系数、热傳導性、热容量和其他。

本研究的試驗部分工作，是在作者指导下在全苏耐火材料研究設計院于1936~1941年間完成的。参加工作的有檢驗方法試驗室工作人員В. П. 捷格日达(Зегжда)、В. Н. 阿布拉莫娃(Абрамова)、К. А. 季莫費叶娃(Тимофеева)、А. И. 居特(Кютт)和Г. В. 拉札列娃(Лазарева)。他們都十分慎重地完成了極為繁雜的試驗部分工作。在耐火材料研究院的化学分析試驗室、物理試驗室和矿物学試驗室中，分別进行了化学分析、真比重、热膨脹、导热性和热容量的測定，以及矿物岩相的鑑定等。

——作 者——

緒 論

窯業，特別是耐火材料工業，在最近十年來已經顯著地改變了自己的面貌。這一技術落后的生產部門的緩慢進步，在過去僅建立在個人的經驗和企業的“秘密”上。這些經驗和秘密，通常只是在較完善的工作方法之下單憑經驗所摸索到的個人的偶然成就。

目前，現代科學的成就，首先是化學、物理化學和物理的成就，在窯業生產的發展中已成為愈來愈有指導意義的理論基礎。在全世界，大量專門的研究院和試驗室，正在研究着硅酸鹽工藝的各種問題。現在已經完全清楚，只有系統而廣泛地开展研究工作，才能夠保證窯業制品生產的合理的安排。必須指出，大多數硅酸鹽工藝問題的探討，是有較大困難的。由於窯業材料組織不均勻，必須在高溫使用，以及缺乏有關許多性質的現成測定的方法，從而要在这方面安排任何試驗，都是極為複雜的。

窯業生產工藝已及時地劃分為許多單獨的部門，而每一部門都有它本身最迫切的問題。在本書中，我們將述及在耐火材料領域中這些最根本的問題之一。

決定耐火材料是否適用於各種工業部門的最主要性質之一，是它的高溫時抵抗各種機械應力作用的性能。茲舉出一些有代表性的例子。

在蒸汽鍋爐燃燒室的垂直牆上，在熱風爐的爐牆上和格子房中，在多種其他情況下，磚處於層層疊疊的砌磚體所產生的壓縮應力之下。近似地估計：每米高砌磚體的壓力約為 0.2 千克/厘米²；在某些設備中，壓力可能達到 2~3 千克/厘米²，甚至超過此數。

熔制玻璃用的和冶煉金屬用的坩堝的壁上，經受為熔融物

的靜压力所引起的拉力的作用。懸掛式爐頂的个别部位和粘接到水口磚上的塞頭磚在塞棒打開的瞬間，都產生拉应力。在耐火制品中，當迅速冷卻時，也會由於熱應力的作用引起拉应力；而在製造時，則由於燒成時收縮不均勻而產生拉应力。

臥式蒸餾器、匣鉢的底、馬弗爐、各種頂蓋、熱電偶保護管等，在使用時經受着彎曲作用。

在很多設備中，耐火襯磚在工作時經受着磨損作用。這種形式的損耗在連續操作的設備中——高爐、豎窯、迴轉窯等——特別普遍，但是在其他情況下也有這種損耗發生（例如，在燃燒室燒火時，推出焦餅等等）。懸浮於煤氣氣流中的固體微粒（蒸汽鍋爐燃燒室內的煤粉、高爐爐渣等等），對於耐火材料的磨損也起着很大的作用。

在熱工設備的爐頂和其他部分，由於砌磚體的热膨脹作用，就引起顯著的壓縮应力和剪应力。當溫度急劇波動時，剪应力是破壞耐火制品的主要原因之一。

還可以舉出更多的例子，來證明耐火制品必須具有在高溫時足以抵抗不同的機械作用的性能和證明這些性能的重要性。

耐火材料在高溫時所顯示出的機械性質，為了簡便起見，以下特稱它們為熱機械性質。

對於耐火材料熱機械性質的研究，顯然曾經作過大量的工作。可是直到現在為止，這些工作所得到的結果很不統一，也沒有能夠歸納為單一的體系。但是，假如注意到在過去的工作中所採用的試驗方法是各不相同的，所用的試驗材料和試樣制備方法等等也完全相異，這樣，事情就明白了，以這些各式各樣的数据為基礎，當然就不可能作出有充分根據的比較和總結。

但是，搞清楚耐火材料在高溫時各個性質之間的相互關係，以及闡明這些性質對於化學礦物組成和制品的生產條件的依賴關係，是完全必要的。這些数据，對於在耐火材料生產中探討制備特殊制品的合理方法，以及按照各方面的用途更正確

和合适地对用户分配各种类型的耐火材料，都是必需的。

本工作为在已经建立起来的有系统的研究基础上，初步嘗試去解决最通用一类的耐火材料中的这一个任务。如同任何现代的研究工作一样，所获得的实验结果，孤立起来看，当然不可能有什么意义，只有把它们与这方面所积累的所有工艺試驗联系起来考察，才真有意义。有了系统的材料，就可能与其他各种工作的结果联系起来，并加以比較，从而可能作好作这样的比較时的正确的和概括的基础。

在开始叙述和分析实验数据以前，先根据文献来源簡單介紹一下問題的所在。

在耐火材料高溫物理性質的研究上，曾作过很多工作。其中的一部分只是單純地探討方法上的問題。在这些工作中所用的試驗样品，在大多数情况下，或多或少都是不够代表性的材料。

很可惜，在直接研究耐火材料热机械性質对于組成的依賴关系的工作中，仅很少一部分可以作出相应的比較和結論。問題在于，大多数研究工作者在开展他們的工作时沒有事先特地准备有系統地配合而成的样品，而是利用天然原料，或是利用耐火材料企業的現成制品。無論何种情况都会使得本来可以导出确定規律的研究工作的主要原則受到破坏，即無法得到原料的相互比較。例如：当研究粘土的高溫荷重軟化点与氧化鋁含量关系时，曾用氧化鋁含量彼此不同、产地亦不同的粘土作为試驗材料。然而，这些粘土都各有它們完全不同的矿物組成、分散性、可塑性等等。

有許多工作是以耐火材料工業制品作为研究对象的。用来研究的磚塊，不仅本身的氧化鋁含量或者其他借以進行比較的氧化物含量有所不同，同时原料处理方法、顆粒配合、燒成程度等等也各有不同。这种工作的結果，不可避免地导致不肯定的結論。这些結論在安排改进耐火制品質量的工艺操作时，未

必可能有效地加以利用。然而，这一任务正是耐火材料领域中所有研究工作的最终目标。

克列尔(Келер)、捷格日达和克瓦舍宁尼柯夫(Квашенин-ников) [167] 曾详尽地研究了含 Al_2O_3 38%、34% 和 24% 的拉特纳雅粘土做成的粘土质泥料的性质。在我们感到兴趣的热机械性质中，测定了高温荷重软化点和高温断裂。主要结果列于表 1 和表 2。

表 1

应用氧化铝含量不同的拉特纳雅粘土制成的粘土质泥料的高温荷重软化点和高温断裂

Al ₂ O ₃ 含 量, %	重烧熟料(1350°C)			轻烧熟料(800°C)		
	荷重软化点, °C		断裂温度 °C	荷重软化点, °C		断 裂 温度, °C
	HP①	40%		HP①	40%	
38	1420	1625	1540	1455	1635	1530
34	1425	1635	1475	1440	1630	1510
28	1390	1600	1435	1395	1600	1470

① HP 为软化开始点。

表 1 中的数据是大量试验泥料的平均值。为了说明化学组成固定时不同生产因素对上述性质的影响，特把三种粘土中的一种 (Al_2O_3 含量为 38%) 的相应数据列于表 2。

由表 2 可见，同一种粘土，由于处理条件的不同，其各种指标发生了如下的变动：

荷重软化开始点由 1270 至 1540°C (波动范围为 270°C)

40% 由 1585 至 1650°C (波动范围为 65°C)

高温断裂温度由 1450 至 1620°C (波动范围为 270°C)

上列数值极明显的证实了我们的观点，即当研究某种因素的影响时，例如化学组成，必须将所有其他条件严格地予以固定。

表 2

应用氧化铝含量为 38% 的拉特納雅粘土制成的粘土質泥料
的高温荷重軟化点和断裂与生产因素的关系

生产因素	泥料的瘠 化 程 度 %	重燒熟料(1350℃)			輕燒熟料 (800℃)		
		荷重軟化点, °C		断裂溫 度, °C	荷重軟化点, °C		断裂溫 度, °C
		HP	40%		HP	40%	

試 样 在 1300℃ 燒 成

熟料的粒度								
粗	{	30	1360	1630	1540	1410	1645	1490
		50	1335	1635	1495	1400	1650	1465
		70	1270	1585	—	1400	1645	1455
中	{	30	1365	1640	1565	1415	1610	1510
		50	1365	1640	1545	1405	1610	1545
		70	1370	1640	1535	1410	1645	1470
細	{	30	1365	1640	1610	1420	1640	1570
		50	1360	1635	1590	1410	1630	1565
		70	1365	1640	—	1400	1645	1550

試 样 在 1410℃ 燒 成

熟料的粒度								
粗	{	30	1505	1620	1560	1490	1620	1535
		50	1480	1610	1485	1490	1620	1495
		70	1315	1575	—	1495	1620	1500
中	{	30	1505	1620	1590	1505	1630	1565
		50	1500	1620	—	1500	1630	1525
		70	1490	1620	1450	1495	1630	1535
細	{	30	1505	1630	1565	1510	1640	1620
		50	1500	1630	1535	1520	1640	1545
		70	1490	1630	—	1525	1640	—

我們感兴趣的是波魯包雅利諾夫(Полубояринов) [231] 所作的关于高鋁泥料中氧化鋁含量对于荷重軟化点的关系的数据。这些泥料是用工業氧化鋁(1~4号泥料)和純电熔氧化鋁(5~7号泥料)所組成的。这些泥料的性質和組成列于表3。

在我們探討範圍內的系統研究中, 注意到了一項誠然已經过了时的研究工作[20]。在該研究中, 仅仅测定了2千克/厘米² 荷重軟化开始点。但是, 在該研究中, 在由一分結合粘土和四分淨高嶺土所組成的主要物料中加入了化学純的氧化硅和氧化鋁, 并确定了含 SiO_2 60~70% 的混合物的一定的最低的軟化点。

表 3

高鋁泥料的荷重軟化点

(根据 Д. Н. 波魯包雅利諾夫的資料)

泥料号	Al_2O_3 含量 %	制品的燒成 溫度, °C	显气孔率 %	荷 重 軟 化 点			
				HP	4 %	10%	40%
1	38	1450	18.0	1400	1460	1520	1590
2	50	1450	20.5	1470	1500	1590	1690
3	60	1450	19.5	1500	1570	1640	1740
4	70	1480	25.0	1500	1580	1640	1750
5	89	1500	—	1610	1700	1780	—
6	89	1600	25.8	1620	1730	1790	—
7	92	1500	24.7	1630	1730	1800	—

提高氧化鋁含量, 可以提高荷重軟化开始点。 Al_2O_3 为43% 的泥料的荷重軟化开始点为1280°C, 而当 Al_2O_3 为 68.9% 时, 則荷重軟化点可高达 1415°C。

在另一文献中列有泥料試驗数据。这些泥料是于粘土和高嶺土內加入二氧化硅(呈灼燒的硅的形态)和氧化鋁(呈重燒形态)所配成。試驗所得的数据列于表4及表5。

表 4

粘土与氧化硅和氧化铝混合物的高温荷重软化点

組成和性質	典型的結合粘土（純的和帶有加入物的）		
Al ₂ O ₃ 分子数	1	1	1
SiO ₂ 分子数	0.5	2.8	4.0
软化开始点, °C	1525	1200	1300
完全软化点, °C	1775	1610	1600
間隔, °C	250	410	300

表 5

高嶺土与氧化硅和氧化铝混合物的高温荷重软化点

組成和性質	高嶺土（純的和帶有加入物的）				石英玻璃
Al ₂ O ₃ 分子数	1	1	1	1	—
SiO ₂ 分子数	0.5	1.0	2.0	4.0	—
软化开始点, °C	1400	1375	1225	1300	1300
完全软化点, °C	1830	1760	1680	1630	1610
間隔, °C	430	385	455	330	310

从表 4 和表 5 来看，耐火粘土和高嶺土的高温荷重稳定性，可借增加游离石英玻璃或氧化铝的含量而得到改进。

这个結論是必要的。不过，作为一个重要的判断，它仅对样品的給定燒成程度，而且显然是不高的燒成程度而言，才是正确的。当在更高温度下燒成时，情形就并非如此，如同在苏联的有关的研究工作中所見的那样。例如，純高嶺土软化开始点不是 1225°C，而接近于 1550°C[161,166,181]。

基于大量組成不同的耐火粘土的試驗結果，有可能將耐火粘土划分为数类。由圖 1 可以看出，粘土的組成（氧化鋁含量）及荷重穩定性之間有着一定的联系。

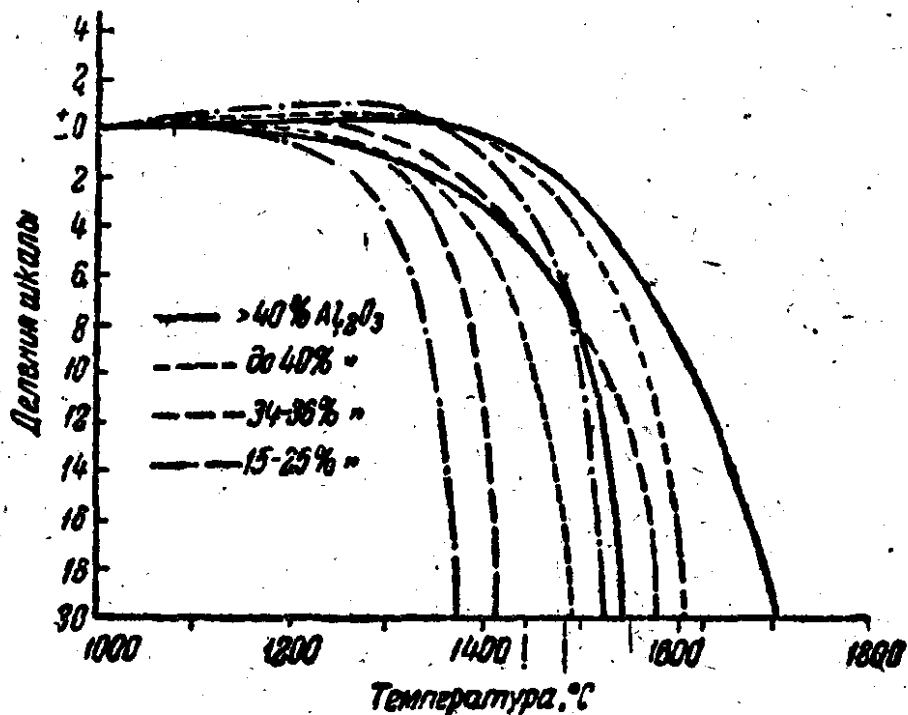


圖 1 耐火粘土的軟化

圖 1 中相對應的兩綫条表示最高與最低的軟化界限。在該界限內排列着該类粘土的軟化曲綫。虽然各类曲綫相互交錯着，但可以看出壓縮40%的平均溫度（在橫坐标上以相应点綫表示）在类与类間約相差50°C。最陡的变形曲綫是氧化硅含量大的粘土的特征。

在同一工作中也提出了許多粘土磚、半硅磚和硅磚的荷重軟化試驗結果。

表 6 和表 7 列出的数据是由這項試驗結果中选出的一部分。

我們已經指出，这样安排試驗所得的結果不可能充分明显的判断关于制品的化学組成对于荷重穩定性的影响。在許多情況下，制品的欠燒显然会大大地降低軟化点的。不仅如此，在

表 6

硅磚及半硅磚的高温荷重軟化点

制 品 类 别	硅 磚 和 半 硅 磚				
磚 号	1	2	3	4	5
化学組成, %					
氧化硅	94.21	90.96	89.96	83.92	72.99
氧化鋁	3.83	5.25	5.82	15.08	23.47
氧化鉄	0.51	0.69	0.52	0.58	1.28
氧化鈣	1.48	2.89	3.67	—	—
耐火度, °C	1770	1730	1730	1660	1690
荷重(2 千克/厘米 ²)軟化开始点	1730	1585	1265	1290	1125
完全軟化点, °C	1750	1600	1325	1370	1525
間隔, °C	20	15	65	80	400

表 7

粘土磚的高温荷重軟化点

制 品 类 别	粘 土 磚				
磚 号	1	2	3	4	5
化学組成, %					
氧化鋁	62.01	60.68	56.01	54.28	52.06
氧化硅	36.67	37.53	41.34	46.65	46.45
氧化鉄	0.80	1.49	1.84	2.30	1.40
耐火度, °C	1710	1730	1750	1745	1765
荷重(2 千克/厘米 ²)軟化开始点	1825	1390	1300	1230	1250
完全軟化点, °C	1590	1650	1575	1410	1510
間隔, °C	265	260	275	180	260

列举的数值中, 某些数值似乎根本不够可靠。例如, 1 号硅磚的耐火度和荷重軟化点显得过高(表 6), 而氧化鋁含量为 43~

46%的粘土磚的軟化点却非常低。这証明用以檢驗的該級制品的質量是显然十分低劣的。

在涉及硅酸鋁耐火材料的化学組成与荷重軟化点的关系的工作中，值得注意的还有一个研究工作[197]，在該工作中曾不同程度地詳細研究了 42 个企業的制品(比利时、英国、捷克、德国、法国、瑞典、西班牙和美国)。全部制品按其氧化鋁含

表 8

耐火材料开始軟化溫度与 $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ 比例的关系

样品 数量	軟化开 始点, °C	当 $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ 的比例为下列数值时, 具有該軟 化点的样品的数量							
		1.00~ 1.99	2.00~ 2.99	3.00~ 3.99	4.00~ 4.99	5.00~ 5.99	6.00~ 6.99	7~8	11~20
7	1500	—	1	5	—	—	—	—	1
15	1450	—	12	1	—	1	—	—	1
53	1400	—	42	8	1	1	—	1	1
107	1350	1	61	33	7	2	2	—	1
80	1300	1	32	18	12	9	7	—	1
42	1250	—	11	13	3	2	9	4	—
25	1200	—	10	8	—	1	6	—	—
11	1150	—	3	4	1	2	1	—	—
7	1100	—	—	7	—	—	—	—	—
5	1050	1	2	—	—	1	—	1	—
1	1000	1	—	—	—	—	—	—	—
每类的平均軟 化点, °C		1343	1332	1300	1306	1280	1256	1241	1402
該类样品的总 数		4	174	97	24	19	25	6	5

量可分为下列各类:

<18%

Al_2O_3