

高等学校

# 陶瓷和耐火材料工艺学

第二

耐火材料

П. П. 布德

建筑工程

### 原 本 說 明

|               |                                  |
|---------------|----------------------------------|
| 書 名           | Технология Керамики и огнеупоров |
| 著 者           | П.П.БУДНИКОВ                     |
| 出 版 者         | Промстройиздат                   |
| 出版地点<br>及 年 份 | Москва—1955                      |

### 陶瓷和耐火材料工艺学

#### 第二册

(耐火材料工艺学)

徐忠本 译

編 輯: 朱黎明      設 計: 徐毓茹

---

1958年9月 第1版    1958年9月 第1次印刷    3,050册  
850×1168 •  $\frac{1}{32}$ •250千字 • 印張10 $\frac{5}{8}$  • 定价(10) 1.70元  
建筑工程出版社印刷厂印刷 • 新华书店發行 • 書号1173

---

建筑工程出版社出版(北京市阜成門外大街)

(北京市書刊出版業營業許可証出字第052号)

## 簡 介

本書系根据苏联国立建筑材料書籍出版社（Государственное издательство Литературы по строительным материалам）1955年出版的，由烏克蘭蘇維埃社会主义共和国科学院院士、苏联科学院通訊院士П.П.布德尼柯夫（П.П.Будников）主編的“陶瓷与耐火材料工艺学”（Технология Керамики и огнеупоров）第二版譯出。本書仅节譯原書第二篇耐火材料部分。原書經苏联高等教育部审定为化工学院、建筑材料学院及化工系“硅酸盐工艺学”專業的教科書。

本書系統地闡述了耐火材料的分类、性質和用途，介紹了粘土制品、高岭土制品、半硅制品、高铝制品、硅磚、鎂石耐火材料、鎂橄欖石耐火材料、尖晶石耐火材料及其同鎂石的复合物、白云石耐火材料、含碳耐火材料的制造工艺；还介紹了耐火砌泥、粉料和混凝土、輕量耐火材料的制造方法。

譯者在翻譯过程中不断承原書主編П.П.布德尼柯夫院士的重視和关怀，并寄予勘誤表。对于П.П.布德尼柯夫院士的这种重視和关怀，表示衷心的感謝。另外，П.П.布德尼柯夫院士还寄来了“純氧化物高級耐火材料和制品”的一份材料，現已編于本書第十五章中。这部分材料承郭長生同志譯出，亦致以謝意。

为了使讀者閱讀方便起見，已按照勘誤表將原書錯誤之处于譯文中更正，并以\*号標註。

# 目 录

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| <b>第一章 耐火材料的用途和分类</b> ..... | ( 1 )   |
| <b>第二章 耐火材料的性質</b> .....    | ( 3 )   |
| 耐火度 .....                   | ( 5 )   |
| 高溫結構强度 .....                | ( 7 )   |
| 高溫下的体积稳定性 .....             | ( 11 )  |
| 耐急冷急热性 .....                | ( 14 )  |
| 抗渣性 .....                   | ( 19 )  |
| 热膨胀 .....                   | ( 24 )  |
| 导热性、热容和溫度傳导性 .....          | ( 26 )  |
| 彈性变形和可塑变形 .....             | ( 28 )  |
| 密度和强度 .....                 | ( 29 )  |
| 化学-矿物組成 .....               | ( 34 )  |
| 制品形狀的正确性和尺寸的准确性 .....       | ( 36 )  |
| <b>第三章 粘土制品</b> .....       | ( 37 )  |
| 硅酸鋁制品的耐火性質 .....            | ( 37 )  |
| 原料 .....                    | ( 40 )  |
| 制造工艺过程 .....                | ( 52 )  |
| <b>第四章 高岭土制品</b> .....      | ( 97 )  |
| <b>第五章 半硅制品</b> .....       | ( 99 )  |
| <b>第六章 高鋁制品</b> .....       | ( 103 ) |
| 1. 以硅淺石类矿物为原料制成的制品 .....    | ( 105 ) |
| 2. 以含水矾土为原料制成的制品 .....      | ( 108 ) |
| 3. 用剛玉制成的制品 .....           | ( 120 ) |
| 4. 熔融高鋁制品 .....             | ( 124 ) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>第七章 硅、磚</b>              | (128) |
| 氧化硅的各种变体及其性質                | (128) |
| 原料                          | (135) |
| 制造工艺过程                      | (147) |
| <b>第八章 鎂石耐火材料</b>           | (168) |
| 原料                          | (168) |
| 制造工艺过程                      | (185) |
| <b>第九章 鎂橄欖石耐火材料</b>         | (198) |
| <b>第十章 尖晶石耐火材料及其同鎂石的复合物</b> | (212) |
| 鉻鎂耐火材料                      | (213) |
| 含鉻耐火材料                      | (224) |
| <b>第十一章 白云石耐火材料</b>         | (229) |
| 原料                          | (230) |
| 燒結冶金白云石                     | (234) |
| 煨燒白云石时产生的物理化学过程             | (241) |
| 白云石耐火制品和搗打料                 | (251) |
| 用有机物結合的含游离石灰的白云石耐火制<br>品和粉料 | (257) |
| <b>第十二章 含碳耐火材料</b>          | (261) |
| 碳化硅耐火制品                     | (261) |
| 粘土石墨耐火制品                    | (268) |
| 碳質制品                        | (276) |
| <b>第十三章 耐火砌泥、粉料和混凝土</b>     | (278) |
| 結合用耐火砌泥                     | (279) |
| 耐火混凝土                       | (284) |
| 搗筑料                         | (289) |
| 保护用耐火塗料                     | (292) |
| <b>第十四章 輕量(隔熱)耐火材料</b>      | (293) |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 工業密爐的热損失和輕量耐火材料的应用 .....        | (293)        |
| 輕量耐火材料的制造方法 .....               | (296)        |
| <b>第十五章 純氧化物高級耐火材料和制品 .....</b> | <b>(306)</b> |
| 氧化铝制品 .....                     | (311)        |
| 氧化鋁制品 .....                     | (314)        |
| 氧化鎂制品 .....                     | (317)        |
| 氧化鈣制品 .....                     | (320)        |
| 二氧化鋁制品 .....                    | (322)        |
| 二氧化鈦制品 .....                    | (326)        |
| 二氧化鈷制品 .....                    | (328)        |
| <b>补充参考文献 .....</b>             | <b>(333)</b> |

## 第一章 耐火材料的用途和分类

凡砌筑工業窯爐、燃燒室及在高溫加熱條件下( $1000^{\circ}$ 以上)操作的設備各個部分所用的材料，稱為耐火材料。與其他建築材料不同，對耐火材料提出了特別的要求。

在現代工業窯爐和燃燒室中，加熱溫度變動於  $1000\sim 1800^{\circ}$  的範圍內。所以，耐火材料必須具有耐火度，也就是具有抵抗高溫作用不熔化的性能。

但是，對於耐火材料，高溫作用並不局限於使它熔化；大多數耐火材料在  $1650\sim 1750^{\circ}$  以上方熔化。然而，在較低的溫度下耐火材料卻開始軟化，並失去結構強度。所以，也根據在一定溫度下抵抗建築荷重的性能來評定耐火材料。

在高溫作用下，由於再燒結和再密實的作用，大部分耐火材料的體積均開始收縮。少數耐火材料，首先是硅磚，它的體積卻膨脹。耐火材料體積的變化，會損壞甚至完全毀壞窯爐砌體。所以，耐火材料在其使用溫度下必須具有體積穩定性。

在加熱和冷卻窯爐時，溫度的變化使砌體受熱極不均勻，從而促使耐火材料裂開。耐火材料經受溫度變化而不开裂的性能，稱為耐急冷急熱性。耐急冷急熱性不足，是縮短工業窯爐內襯使用期限的最重要的因素之一。

由於同燃料的灰分或同在窯爐中熔煉或焙燒的物料產生化學作用，窯爐耐火內襯損壞得最為嚴重。耐火材料的這種損壞（熔渣侵蝕）程度，取決於對內襯發生作用的物料的化學組成、作用溫度以及耐火材料的化學組成和氣孔率。

實際上，只是上述某一項損壞因素孤立地發生作用，這是很少的。有時，在受到礦渣作用的同時，耐火材料亦軟化並失去結

构强度。在加热高温下的严重残余收缩作用，会降低耐火材料的耐急冷急热性。

至今，尚没有一种耐火材料能同时具有稳定使用于任何条件下所必须的一切操作性质。每种耐火材料的特征，在于它具有一些固有的性质，我们就根据这些性质来决定它的合理使用范围。例如，硅砖的结构强度大，所以它特别适宜于砌筑平炉的炉顶。但是，硅砖在一定温度范围内的耐急冷急热性不够强，耐火度不够高，抗渣性不够强，从而大大缩短了它在平炉上的使用期限。又如高耐火度的和抗渣的普通镁砖，由于高温结构强度小，耐急冷急热性弱，从而不能用于平炉的支撑式炉顶上。

由此可见，要想正确地选择和在各种不同范围内合理使用耐火材料，一方面必须详细地知道它的最重要的性质，另一方面还必须详细地知道其使用的条件。

使种类繁多的耐火材料分门别类的文件，乃是耐火制品的分类标准—ГОСТ4385-48。按照这一分类，根据原料的物理-化学性质，将耐火制品分为18大类。此外，如表31中所见，某些类别，由于它们的化学性质具有较多的共同特征，故冠以总称；另一些类别又细分为若干组，它们彼此的差别主要在于所用原料的质量不同。

由此可见，在每一类中都包括具有完全一定的化学-矿物组成和性质的数种耐火制品。

此外，根据分类法，全部耐火材料又按下列指标而分类：

1. 根据耐火度，可分为耐火制品（1580~1770°）、高级耐火制品（1770~2000°）和特级耐火制品（2000°以上）。

2. 按照形状和尺寸，分为标准砖和异形制品；前者包括“直形砖”和“楔形砖”；后者包括简单异形制品、复杂异形制品、特复杂异形制品和大形制品。

3. 按照制造方法，分为可塑成型（可塑压型）的制品、半干压型或由粉状非可塑泥料捣固制成的制品、由泥浆浇注的制品、由熔融料浇铸的制品、由岩石锯制成的制品。



同一类的耐火制品，根据所用原料的质量和制造工艺的不同，它们的性质亦有很大差异。例如，采用适当的工艺方法，可以使粘土磚具有强的耐急冷急热性；或者，提高它的密度，从而增加对玻璃、矿渣侵蚀作用的安定性。但是，对于大多数耐火制品，这种可能至今仍然有限。例如，直到现在还不能根本提高硅磚的耐急冷急热性，或提高镁石制品的高温結構强度。用增加密度的方法来提高粘土耐火材料的抗渣性，这种可能也是有限的。

正确和恒定地选择原料的质量，严格遵守已定的工艺制度，均决定着企业产品的性质和它的使用寿命。

耐火材料在各种工业窑爐和燃烧室的使用过程中，凡直接决定它的抵抗各种损坏因素的能力的性质，都是它的最重要的性质。例如：耐火度、高温結構强度、高温下的体积稳定性、耐急冷急热性和抗渣性。这最后两种性质是最难直接評定的，因为测定时的物理-化学过程很复杂。

制品的抗渣性可以根据它的密度和强度来判定；通常直接测定气孔率、体积密度、真比重、气体渗透性、耐压强度、抗拉强度、弯曲强度、耐磨强度和冲击强度，便可評定制品的好坏。

耐压强度和气孔率易于直接而准确地测定出来；此外，这两种性质亦是評定产品质量是否均一、监督工艺过程是否稳定的十分可靠的指标。制品的强度指标和气孔率指标，在砌体必須抵抗机械撞击作用、摩擦作用，以及砌体必須不透气时，亦具有独立的意义。

耐火制品耐急冷急热性、隔热性质和絕电性质的評定，是以测定热膨胀、弹性模数、导热度、热容和导电度为基础的。

研究耐火制品的構造，鑑定它的相組成，以及探討耐火材料在生成和損毀时产生的各种过程，是用显微鏡檢驗法和X光檢驗法，并配合以化学分析来进行的。近年来，为了达到上述目的，力求利用电子显微鏡檢驗法。

最后，必須檢查耐火制品的形狀是否正确，尺寸是否准确；

其所以必要，是为了使砌体致密地連成整体，只有这样才能保証窑爐和燃燒室的耐火內襯使用得更長久。

## 耐火度

在足够高的溫度下，耐火材料会軟化幷成具有某种粘度的液态而流散开来。所以，材料抵抗高溫作用而不熔化的性質，称为耐火度。耐火度是由規定尺寸和形状的試体，以固定升溫速度加热而測定的。

这种标准試体是截头的三棱形錐体，高30毫米，下底边長8毫米，上底边長2毫米。这就是所謂的“試錐”。由于高溫的作用，試体材料逐漸軟化，幷且隨其中所生成的液体粘度的減小，試錐由于重力作用而向下彎倒幷触及底座。將試体彎倒瞬間的溫度，即試体尖端彎倒幷触及底座的瞬間溫度，取作材料的耐火度或假定“熔点”。材料在这一瞬間粘度的变动范围很广，为 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ 泊。

配制試体所用各矿物相互 作用完全与否和此时得到的熔融料的粘度大小，均同試体的彎倒溫度有关，所以在这相互作用的溫度下，必須保持試体的一定加热速度。試样在較低溫度下長時間保温，其軟化程度与迅速加热至較高溫度时所产生的結果相同。所以，耐火度的測定，即軟化的标准試体彎倒溫度的測定，是有条件的。

既然“試錐”的彎倒溫度是有条件的，就不能用光学高溫計直接来測定耐火度，而必須与用标准錐——測溫錐——測得的彎倒溫度进行比较。測溫錐是用高嶺土、矽土、石英等材料的混合物制成的；制造低溫測溫錐时，还要加入一些熔剂。

耐火材料是由各种矿物組成的，而这些矿物在高溫下彼此会發生反应幷生成易熔的低共熔混合物，所以这些矿物相互作用的表面积的大小，或顆粒的大小，在很多情况下对于耐火度的測定結果有很大的影响。例如，石英粘土耐火材料（кварцеглиняный огнеупор），根据石英顆粒大小不同，測定时可以得到完全不同的指标。含50%耐火粘土和50%石英的混合材料，当石英的顆粒度为0.5毫米时，其耐火度为 $1710^{\circ}$ ，而当石英的顆粒度小于0.06

毫米时，耐火度则为 $1640^{\circ}$ 。这是因为：在試驗时，粗顆粒石英和粘土物料相互反应的完全程度不及細顆粒混合物。

試体在材料的一定粘度值的範圍內發生“弯倒”，所以，即使对純晶态材料而言，被測得的耐火度也不会和它的熔点相符合。

例如，在測定石英的耐火度时，由于熔化所得的石英玻璃的粘度很大，試体在 $1760\sim 1770^{\circ}$ 时才弯倒，也就是在高于 $\alpha$ -石英或 $\alpha$ -方石英的熔点的溫度下才弯倒。

当配制試体所用的各种矿物其粉碎細度足够时，試体的耐火度主要取决于耐火材料的化学組成。所以，測定耐火度首先是为了相对地評定制造該种耐火制品所用原料的純度，而不是为了确定制品使用溫度的上限。

耐火度的測定条件是加热速度、材料的粉碎細度、爐中气态介質的性質（它决定是否有可能使高价氧化鉄还原成为 $\text{FeO}$ 或 $\text{Fe}$ ）及其他，这些条件在試驗法标准ГОСТ4069-48中已作出規定。

各种耐火材料的耐火度和許多組成一些最主要的耐火材料的純晶态物質的熔点，它們的数值如下：

### 耐 火 度

|                                |                                 |                            |
|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 脈石英... $1750\sim 1770^{\circ}$ | 高嶺土... $1740\sim 1770^{\circ}$  | 鎂石制品... $2300^{\circ}$ 以上  |
| 硅石... $1730\sim 1750^{\circ}$  | 熟料制品... $1610\sim 1750^{\circ}$ | 鎂石制品... $2000^{\circ}$ 以上  |
| 硅磚... $1710\sim 1720^{\circ}$  | 半硅制品... $1610\sim 1710^{\circ}$ | 白云石制品... $2000^{\circ}$ 以上 |

耐火粘土... $1580\sim 1750^{\circ}$  高鋁制品... $1780\sim 2000^{\circ}$

### 熔 点

|                                                                  |                                                             |                                                            |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| $\text{SiO}_2$ ..... $1713^{\circ}$                              | $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ..... $2130^{\circ}$         | $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ..... $2300^{\circ}$               |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ ..... $2050^{\circ}$                     | $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ..... $1900^{\circ}$ ②       | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ..... $1560^{\circ}$               |
| $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ... $1870^{\circ}$ ① | $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ..... $2135^{\circ}$ | $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ... $1538^{\circ}$  |
| $\text{MgO}$ ..... $2800^{\circ}$                                | $\text{ZrO}_2$ ..... $2715^{\circ}$                         | $\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ... $>1780^{\circ}$ |

① 根据H.A.托罗波夫(Торопов)和Ф.Я.加拉霍夫(Галахов)的資料，这是同成分熔化并且生成熔融物(參看第38頁)。

② 这是異成分熔化并生成熔融物 and 新的晶态物質。

|                                 |                                                 |                                               |
|---------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| CaO..... 2570°                  | ZrO <sub>2</sub> ·SiO <sub>2</sub> ..... 2430°② | MgO·Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ... >1780° |
| MgO·CaO... 2300°                | BeO ..... 2610°                                 | FeO·Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ... >1780° |
| MgO·SiO <sub>2</sub> ... 1557°  | ThO ..... 3050°                                 | SiC ..... 2700°                               |
| 2MgO·SiO <sub>2</sub> ... 1890° | TiO <sub>2</sub> ..... 1850°                    | C ..... 3500°                                 |

純晶态物質的上述熔点，在許多情況下是不能用來說明它的操作極限溫度的，其中的一些物質在空气中会昇华（例如，MgO在1700~1800°昇华）；另一些物質在氧化气氛中（SiC）或在还原气氛中（TiO<sub>2</sub>），虽在比它們的熔点低很多的溫度下却已損坏。

### 高溫結構强度

耐火材料的这个性質，是由耐火材料在2千克/厘米<sup>2</sup>靜荷重的作用下，引起一定程度軟化的溫度所表示的。

实际上，在工業窑爐和燃燒室直立牆壁上的荷重，远比标准荷重（2千克/厘米<sup>2</sup>）为小，只是在某些个别情況下才达到0.5~1千克/厘米<sup>2</sup>，加之在內襯一面受热时，內襯的低溫部分承受的荷重較大。但是，在爐頂和承压支座上，特別是当各面受热时，耐火材料的軟化經常是損坏的原因。尤其是当耐火制品使用于高溫窑爐和燃燒室的支撐式頂上时，其軟化点具有特別重要的意义。爐頂的下部因受热而軟化，就招致爐頂下沉、变形和損坏。严重的过热以及相应的軟化程度，也促使直立牆壁在重力作用下而变形。在大多数情況下，耐火內襯的損坏，同时是由于矿渣、燃料的灰分、矿石的塵粉、水蒸汽和煤气的化学作用而引起的。显然，由于造渣作用，致使耐火材料的化学-矿物組成改变，从而降低了耐火材料的高溫結構强度。

4 耐火材料的軟化点，主要决定于它的化学-矿物性質（即存在的是何种結晶相）、制品結晶構造的特点、結晶相和玻璃相（無定形相）的数量比以及在較易熔的結晶相和玻璃相熔化时所生成的液相的粘度。耐火材料的構造和顆粒組成的特征也具有一些意义。对于較密实和坚固的制品，軟化开始点（开始軟化、收縮4%和10%）是起于較高的溫度。然而，对于軟化終点，坯体的構

造已經起不了什么影响了。

▲純晶态材料的軟化点應該和它的熔点相接近，因为只是在接近熔点的溫度下这种材料方开始产生可塑变形。但是，耐火材料总是含有若干数量雜質的，这些雜質在足够的高溫下生成一定数量的液相，从而降低了軟化点。液相的生成量愈多，它的粘度愈小，那么同耐火度相比，制品的軟化点降低得就愈多。在这时，耐火材料晶态部分的構造特征亦具有很大的意义。基本物質晶粒的相互交織和內聚作用，它們密实地相接触的作用，都能提高軟化点的溫度，限制液相的有害影响。

这种現象在硅磚中表現得最为清楚。在再結晶时，石英生成鱗石英交錯晶粒網（圖39）的能力，致使硅磚具有很高的（与耐火度比較）軟化点，它已达到 $1650\sim 1670^{\circ}$ 。虽然在硅磚中除氧化硅外还有 $4\sim 6\%$ 的雜質（总共約生成 $10\sim 15\%$ 液相），但其耐火度和軟化点只相間 $50\sim 70^{\circ}$ 。在这里，硅質玻璃的粘度很大，这也具有一定的作用。在再結晶剛玉耐火材料中，由于剛玉晶粒（在 $2050^{\circ}$ 熔化）接触得很密实（圖40），軟化开始点很高，达 $1900^{\circ}$ 以上。由此可見，耐火材料在燒成时的再結晶和生成密实晶

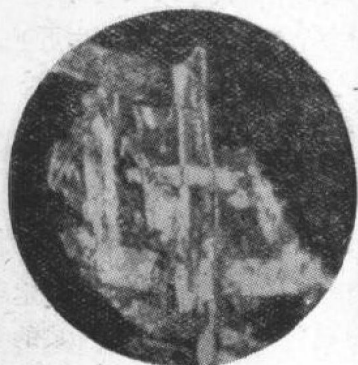


圖 39 硅磚中鱗石英晶粒的構造特征

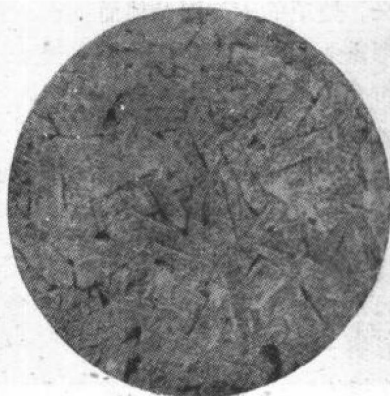


圖 40 剛玉耐火材料的構造特征

粒網的能力，能保證使它具有最高的軟化點。

耐火度在 $2300^{\circ}$ 以上，約含有92% $\text{MgO}$ 的鎂石制品，在加熱時却是另一種情形。鎂石制品的主要部分（約90%）是方鎂石。易熔的結晶生成物（主要是硅酸鹽）和玻璃相的總量達到10%。但是，方鎂石在結晶和晶粒長大時，在制品中生成的不是密實的結晶網，而是由易熔的夾層粘結起來的分散顆粒。由於這種夾層熔化和軟化，制品也就隨着軟化。所以，鎂磚的軟化點僅約 $1550^{\circ}$ ，因而耐火度和軟化點相距達 $700^{\circ}$ 以上。易熔夾層的数量減少，在其中就生成耐火度高的晶態化合物（例如尖晶石），同時易熔夾層的粘度也隨着增大，從而能夠提高鎂磚的軟化點。此外，有人指出：方鎂石晶粒有沿解理層滑動的趨勢，這也促使制品變形。

粘土耐火材料的軟化又是一種情形。製造粘土制品所用的耐火粘土在燒成時亦發生許多變化（參看第94頁），結果生成約50%高耐火的晶態莫來石（ $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ），其餘50%乃是粘度很大的硅質玻璃狀（無定形）物質。莫來石的晶粒是分散的，彼此不相結合，所以不會生成聚結的骨架，然而莫來石的生成是能使軟化作用在較高的溫度下開始的。所以，粘土制品的軟化，首先是由玻璃狀物質軟化引起的；但是，其粘度很大，這就促使軟化過程逐漸地和均勻地進行。含有約5%熔劑的粘土制品，它的耐火度約 $1700 \sim 1750^{\circ}$ ，於 $1350 \sim 1400^{\circ}$ 開始軟化，這種制品的完全軟化點（收縮40%）始於 $1570 \sim 1600^{\circ}$ 。因而，軟化開始點和完全軟化點之間的溫度範圍約為 $200^{\circ}$ 。硅磚的這一溫度範圍為 $10^{\circ}$ ，鎂磚為 $20 \sim 50^{\circ}$ 。硅磚和鎂磚的軟化溫度範圍之所以這樣小，是因為液相的数量少（ $10 \sim 15\%$ ），並且液相在軟化溫度下的粘度小。

▲熔劑數量增多，耐火制品的軟化點就降低，而且降低的數值取決於熔劑的化學組成和結合情況。凡使液相數量增加、使液相粘度減小的熔劑，致使軟化溫度降低得較多。對於粘土制品，這種有害的氧化物是 $\text{Na}_2\text{O}$ ；對於硅磚是 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ；對於鎂磚是 $\text{SiO}_2$ （當存有 $\text{CaO}$ 時）。但是，作為礦化劑的氧化物，即用以改善耐

火材料的結晶过程的氧化物，却能促使提高耐火材料的軟化点。

耐火材料荷重为 2 千克/厘米<sup>2</sup>时的荷重軟化点，是按照ГОСТ 4070—48測定的。在按照所規定的速度連續和均匀地加热时，記錄下如下的溫度：相当于試样收縮0.3毫米的軟化开始点（H·P·）、收縮 4 % 和 40 % 时的軟化溫度。試样是直徑36毫米、高50毫米的圓柱体。当延長加热時間或增加荷重至 2 千克/厘米<sup>2</sup>以上时，軟化点就会降低。

耐火材料的荷重軟化，是在严格确定的均匀加热速度下測定的，所以在很短的時間內准确測量出收縮的大小，就能够确定在一定的小的溫度範圍內耐火材料的軟化速度。根据耐火材料的軟化速度，按下式可以計算出它的显粘度：

$$\eta = \frac{plz}{3q\Delta l}$$

式中： $\eta$  —— 粘度，泊；

$p$  —— 作用力，达因（荷重的千克数乘以981,000）；

$l$  —— 試样的高度，厘米；

$\Delta l$  —— 在  $Z$  秒鐘內試样高度的变化，厘米；

$q$  —— 横截面积，厘米<sup>2</sup>。

若要得到更大的准确度，必須在恒溫下来測定显粘度。

但是，應該把求得的粘度值看作是假定的，因为耐火材料是由晶态物質和少量液相組成的，而液相在試驗溫度下粘度很大，这时耐火材料是一种可塑物料，因此不能用它来和真正的液体相比，甚至不能和結晶化液体<sup>①</sup>相比。

按这种方法計算所得的粘土制品的显粘度，在1400°时約5×10<sup>10</sup>泊，在1500°时是0.5×10<sup>10</sup>泊。

几类典型的耐火制品的軟化点和变形曲綫如表32和圖41所示。有时还鑑定粘土制品 1～2 千克/厘米<sup>2</sup>恒定荷重时的破裂和

① 所謂結晶化液体（Структурированной жидкостью），是具有晶度夹杂物的液相系統。

折斷溫度。根據單獨進行的一些測定，含40%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的粘土的這兩種溫度約為1600~1700°，而含35%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的粘土，則約為1600°，也就是接近於完全軟化點（收縮40%）的溫度。

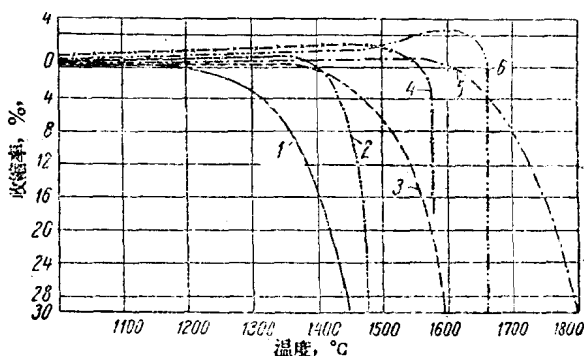


圖 41 各種耐火制品的軟化點

1—B級粘土制品； 2—半硅制品； 3—A級粘土制品； 4—鎂石制品； 5—莫來石制品（ $\text{Al}_2\text{O}_3$  70%）； 6—硅磚

各種耐火材料的荷重（2 千克/厘米）軟化點（°C）表 32

| 耐火材料的名称                                   | 軟化開始點 | 4 %  | 40%  |
|-------------------------------------------|-------|------|------|
| 硅磚.....                                   | 1650  | —    | 1670 |
| 半硅制品.....                                 | 1400  | 1430 | 1500 |
| B級粘土制品.....                               | 1250  | 1320 | 1500 |
| A級粘土制品, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 40% ..... | 1400  | 1470 | 1600 |
| 高嶺土制品, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 42% .....  | 1450  | 1550 | 1650 |
| 燒結莫來石制品, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 70% ..   | 1600  | 1660 | 1800 |
| 燒結剛玉制品, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 99% ..... | 1870  | 1900 | —    |
| 鎂石制品, $\text{MgO}$ 90% .....              | 1550  | —    | 1580 |

### 高溫下的體積穩定性

▷ 耐火材料於高溫窯爐中長時間使用，它的相組成會繼續變化，產生再結晶和再燒結。由於這些變化的影響，制品的體積就