

陶瓷专辑之二

玻璃窑用耐火材料 专题译文汇编

建材研究院技术情报咨询服务中心

一九八七年四月



0448726

写在前面

7Q175
13

众所周知，玻璃工业生产技术的发展，在很大程度上取决于耐火材料，特别是优质耐火材料的发展，诸如：锆刚玉电熔耐火材料的广泛应用和其它各种耐火材料性能的不断改善，已使有关国家的池窑熔化率提高近4倍（瓶罐窑达3吨/米²·日以上，平板窑达到2.2~2.5吨/米²·日），窑令延长2~3倍，燃料消耗降低 $\frac{3}{5}$ ~ $\frac{4}{5}$ ，取得了较好的技术经济效益。

为能更好地了解国外玻璃工业生产应用耐火材料的现状，以推进我国玻璃窑用耐火材料的发展，我们有选择地收集了国外最近发表的有关文献13篇汇编成册以飨读者。其中收编有“耐火材料对玻璃工业发展的作用”、“玻璃熔窑耐火材料的起泡缺陷”、“熔铸(AZS)耐火材料玻璃相渗出的重要性”、“玻璃熔窑蓄热室用新型窑衬及受V₂O₅的侵蚀”等。文章从不同角度论述了玻璃窑各部位使用的耐火材料及其受侵蚀的机理和损坏情况，特别是对玻璃相的渗出机理和玻璃中气泡产生的原因进行了深入的讨论，得出了一些重要结论。并提出了相应的对策。另外，我们也收编了英、美、苏等国的有关专利以介绍国外优质耐火材料的生产和应用动向。

该译文汇编收集范围广，加之求其新（几乎全系82年后发表的论文）求其精，希望会对有关科研设计，教学生产及其使用单位有所裨益。在编译过程中曾得到我院陶耐所有关同志的热情帮助，在此一并致谢。

任燕鸣 安时天

一九八七年四月

目 录

耐火材料对玻璃工业发展的作用·····	高季秋译	安时天校 (1)
注浆成形和等静压成形致密锆英		
石耐火材料·····	周庆宏译	安时天校 (19)
高氧化锆熔铸耐火材料制品·····	任燕鸣译	李懋强校 (31)
高铬熔铸耐火材料及其生产方法·····	周庆宏译	安时天校 (43)
熔铸耐火材料制品及在玻璃熔窑		
中的使用·····	任燕鸣译	王 存校 (52)
硅线石砖和莫来石砖在玻璃熔窑		
上的应用·····	郝德性译	(63)
玻璃熔窑耐火材料的起泡缺陷·····	周庆宏译	王 存校 (79)
熔铸(AZS)耐火材料玻璃相渗		
出的重要性·····	周庆宏译	寇小川校 (87)
玻璃熔窑蓄热室的新型窑衬及其		
受 V_2O_5 的侵蚀·····	高季秋译	张鸿庆校 (95)
玻璃熔窑蓄热室用棱柱形耐火砖·····	高季秋译	安时天校 (103)
作为密封和模塑成型用的不定形		
耐火材料·····	高季秋译	毛仲佳校 (111)
电熔耐火材料·····	王海菊译	安时天校 (128)
怎样避免AZS耐火材料在应用中		
出现的问题·····	寇小川译	李懋强校 (132)

耐火材料对玻璃工业发展的作用

前 言

耐火材料的改进对于提高40年来形成的窑炉熔化性能起着重要的作用。这种改进使得熔化温度大大提高,熔化效率也大大提高。从图1(1971年绘制)可看出,自1920年以来熔化温度是稳定上升的。

对于玻璃工业用窑,特别是玻璃接触部位采用的某些耐火材料已进行了研究;玻璃工业使用的耐火材料只占英国耐火材料总产量的5%,是个小用户,因而玻璃工业耐火材料的发展必须依赖于其它工业的发展。钢铁工业广泛应用的碱性耐火材料就是一个典型例子。钢铁工业对耐火材料有许多要求如耐高温以及具有较长的使用寿命等。通过改进生产质量、加强控制、降低杂质及提高烧成温度,以上要求已经达到。这种耐火材料现已在玻璃工业中广泛应用,特别是应用于蓄热室。随着碱性砖烧成设备的发展,已能够生产一些其它高温烧结耐火材料,这些材料性能有较大地改进。如刚玉和锆刚玉系列耐火材料。

玻璃熔化效率的改进研究提示我们,可进一步提高熔化温度。然而,从俄国人Botvinkin所作的一些工作可以看出,是能够找到最适宜的熔化温度的。Botvinkin在实验室中探索了在 $1400\sim 1700^{\circ}\text{C}$ 温度范围内全部熔化平板玻璃料成份所需的时间。实验表明,在玻璃形成过程中,当温度从 1500°C 升到 1600°C 时,熔化速度达到最快,熔化温度提高 50°C ,缩短熔化时间2.5倍,但进一步增加温度,没有得到相同比例熔

化速率的增加。这也许表明目前的熔化温度是最适宜的，已接近于极限。

实际上，由于窑的散热损失影响熔化温度。欧洲经济共同体刚刚宣布了它的一个正式命令，指示成员国要在1987年6月以前实施此命令，此命令为空气提供了质量标准，按此标准，年产量在5000吨以上的玻璃制造厂必须要控制的污染物质有 SO_2 、 NO_x 、重金属、灰尘、氯及其化合物，氟及其化合物。由于 NO_x 的形成直接影响火焰温度，可以说 NO_x 是难以控制的污染物。因此，满足空气质量标准的要求能够降低熔化温度并可采用电熔窑直接熔化或加速熔化。

玻璃工业窑的产量是与改进的耐火材料及其合理地使用有关系。各种熔铸耐火材料在侧壁，上部结构和底部取代结合耐火材料增加了池窑寿命，并能在较高温度下应用，使得生产率得到提高。另外，格子砖采用碱性砖也延长了熔窑蓄热室的寿命。扩大保温材料的应用也能提高效率，并能节省燃料。改进了流液洞耐火材料，从而提高了生产效率。

然而，拟使耐火材料供应厂家能够跟上玻璃工业发展的需要，那么要注意下面的研究范围和产品改进：

玻璃接触侵蚀基本特性的研究。

玻璃池窑流液洞的设计。

玻璃耐火材料界面处气泡的消除。

外部冷却和保温对侵蚀速率的影响。

耐侵蚀性优良的耐火材料的研制。

改进窑顶硅石砖质量或选择代用材料。

蓄热室砖化学侵蚀机理

玻璃接触侵蚀基本特性的研究

窑炉运转一个周期后对池窑的检查表明，能够检查出由熔化玻璃侵蚀的许多不同的部位。在竖直壁上侵蚀较为严重，并且，通常随着池壁的高度，其侵蚀增大。任何朝下的表面都呈现严重的凹坑状，这种侵蚀称为向上钻孔侵蚀（图2）。砌块的顶部，熔融玻璃表面处，是一种特殊的沟槽，称为液面线侵蚀（图3）。砌块之间的水平接缝被严重侵蚀，这种侵蚀引起上部表面的砌砖砖缝的大范围的侵蚀。

大多数侵蚀反应在下面三种场合下发生：

- 1、反应材料不断地移动；
- 2、自身反应；
- 3、反应产物的移动。

整个侵蚀过程速率取决于最慢的步骤，在玻璃侵蚀的情况下，这个侵蚀过程是指材料朝着或离开反应面移动；然后一般认为反应是可控扩散。当铅玻璃和钨玻璃中的铅单晶溶化时，发现在液面线下方，样品呈现锥形状，对于上述两种玻璃，样品的锥形方向相反。这种现象可用玻璃密度变化来解释，由于氧化铝的溶解，引起在两种玻璃情况下产生的相反方向的流动。将样品侵蚀边缘长度的对数相对溶解速率的对数作图，所得结果是一条斜率为 $-\frac{1}{4}$ 的直线，这与扩散理论所预示的相仿（图4）。所以氧化铝在液面线下方熔融玻璃中的溶解是一个可控扩散过程，此扩散过程可由高铝耐火材料在玻璃中的溶解所引起的重流来鉴别。

另一种可控扩散过程是冰在水和甲醇混合液中的溶解。这个扩散过程已被用来模拟耐火材料在熔融玻璃中的溶解以论证液面线侵蚀和向上钻孔侵蚀。模拟实验表明，在两种情况下溶解增加是由于搅动作用，这种作用干扰了正常的扩散层并使得溶解速率局部增加。这种反应的驱动力产生于界面处表面张力梯度。这样可以推断熔融玻璃对耐火材料的侵蚀是一个单溶解过程，但可由扩散来控制。在任何有额外搅动的地方，溶解速率增加，例如在液面线处或由于朝上钻孔侵蚀或者由于鼓泡器引起流动的地方或在辅助电极周围。

玻璃熔池流液洞的设计

熔铸耐火材料首先被应用在玻璃接触部位最易于受损坏的地方，流液洞是一个很明显的地方。最初砌块主要采用含莫来石质材料，但后来又采用了氧化锆——氧化铝——氧化硅成份的材料。这种材料的氧化锆含量约为32%，具有良好的抗玻璃溶解性。然而，由于所有熔铸砌块在此时期仍存在缩孔，所以流液洞过早地损坏仍旧发生。因此需要改进材料和速率，或可考虑金刚石磨削凸块工艺。这种技术能够生产出无孔密实的大砖，就是在规定形状的容器中浇注大砖。在慢慢地凝固和退火时期继续往这个容器供给熔液以补充浇注时发生的总体积收缩。当大砖完成一个退火周期后，用金刚石锯将多余的料切除。

流液洞结构接缝的侵蚀仍有可能发生，所以下一步是采用金刚石研磨接合表面。这种方法大大有助于减少接缝处的侵蚀，但是由于很难在现场安装一台设备，制作良好的流液洞部件由于现

场施工质量缝口仍受到侵蚀。

众所周知，三氧化二铬在许多玻璃中难于溶解，但由于氧化铬色彩在含铝钠钙玻璃中的应用受到了限制。然而，简单的计算表明含铬材料的溶解度是传统耐火材料的一半——实验室实验表明这是对的——此外，流液洞是用含有27%氧化铬的大砖砌成，流过流液洞的玻璃中所含有的 Cr_2O_3 ，仅为五百万分之一，如此少量的 Cr_2O_3 对颜色没有什么影响。熔铸耐火材料例如高铝熔铸耐火材料K₂和BR 2161，它们的 Cr_2O_3 含量为27%，它们现已在无色玻璃池窑中应用。

可以假定，流液洞的横截面与每天流过流液洞的玻璃总吨数有关，或者假定与窑炉作业周期流过流液洞的玻璃总吨数有关，但实际上不是这样。在对玻璃瓶罐业260个流液洞的调查中，流过流液洞的玻璃吨数为每24小时每 cm^2 0.0003至0.16吨，比例为50:1。窑炉作业周期结束后对流液洞作检查时，在上部区域侵蚀图形中很难见到玻璃流动的痕迹。侵蚀主要为向上钻孔凹坑形状，在应用两个流液洞时，侵蚀结果似乎与玻璃流过每个流液洞的总量无关。

流液洞的侵蚀主要是由于向上钻孔气泡造成的。由于了解了流液洞盖砖表面有一定地倾斜气泡就无处依托，朝上钻孔侵蚀就会减少的事实，设计了这样的流液洞结构。在这种结构中，流液洞盖砖与水平的夹角是 11° 。然而倾斜流液洞在工业中应用仍不够理想。流液洞的冷却通常采用通冷气、冷却水管或水冷箱等方式。Bruning 提出通气冷却是最有效的方法，但即使那样，对于250 mm厚的砌块，空气冷却对内部砌块温度几乎没有什

么影响，只有在砌块被局部侵蚀掉的情况下，冷却才变得有效。

很明显，说到流液洞性能的改进，主要的改进是耐火材料的质量，而且似乎在这方面能有较大的改进。

玻璃——耐火材料界面处释放的气体

在玻璃液面下方，凡是气泡聚集不动的地方会发生朝上钻孔侵蚀，例如流液洞下方，进料口砌块伸入到池密的地方或者水平接缝的地方。人们常常认为在这些表面下聚集不动的气泡是在熔化过程中残留在玻璃中的气体。然而近几年的许多研究表明，由于玻璃——耐火材料界面处的反应，气体被放出，这些气体完全有可能是引起向上钻孔侵蚀的气泡的根源。这样一来，耐火材料同熔融物的反应会导致耐火材料本身溶解速率的增加。

在靠近耐火材料界面的熔融物中发现了主要含氧的气泡，在耐火材料界面处—— Fe_2O_3 正在玻璃中被溶解（图5）。在玻璃熔融物中 $\text{Fe}(\text{II})$ 和 $\text{Fe}(\text{III})$ 形式之间存在着平衡态，当 Fe_2O_3 溶解时，一部分 $\text{Fe}(\text{III})$ 被还原成 $\text{Fe}(\text{II})$ ，并随后放出了氧气。观察耐火材料中玻璃相对释放气泡的影响结果表明，要认真考虑这个过程。很有可能是在熔铸耐火材料中玻璃相的氧化状态对于释放的气体总量是个重要的条件。

平板玻璃及电视显像管制造者经常研究耐火材料——玻璃界面处的气泡释放问题，因为这些气泡会引起显著的产品损失。然而，如先前指出的那样，很有可能这些反应也是造成气泡的原因，这些气泡引起向上钻孔侵蚀。无疑应对交界处的反应作进一步的研究，然后考虑经济效益。

冷却和保温对玻璃侵蚀速率的影响

具有高导热性能的熔铸耐火材料的应用大大增加了窑衬的热损失。当烧结耐火材料被替换成熔铸材料时，热损失增加了2至3倍。由于熔铸耐火材料能耐较高的熔化温度，会产生进一步的热损失8—10%。最好在凡是可能的地方采用保温材料及合适的结构，非保温熔融耐火材料440℃的外部墙壁采用多层保温后温度可降低到110℃或更低。然而一些部位如液面线需要空气冷却以减少侵蚀，在砌块厚度达到100—120mm之前空气冷却没有什么意义。如果这种情况之前不引入空气冷却，对于普通平板玻璃窑可节省电能1—1.5万度。

Londeree 收集了若干窑炉作业周期的数据并报告了相应的液面线磨损率。这项工作表明早期的侵蚀率最大，由于改进了窑炉作业周期，冷却变得更加有效。如果在窑炉作业周期初期过渡冷却砌块，由于增大的热流，会有一个较大的侵蚀率，但侵蚀速率随着时间而迅速地减小，以致最后砌块的寿命不变。

窑炉底部结构

随着侧壁砌块寿命的改进，有必要研究性能较好的炉底，还要考虑从底部散发掉的热量。这导致应用的熔铸炉底砖超过池壁砖，随着不久以后窑炉作业周期的增长，熔铸炉底砖不能给出所需的寿命。玻璃将控制住炉底铺砌砖并引起向上钻孔侵蚀。池底经常含有一些杂质金属，但在交界面处温度很低，不能将金属熔化。随着机械功率的上升，玻璃吨数的需要量继续上升，并常装备电强化加热装置。通过底部的热损失是燃料消耗的重要因素。

所以采用某些轻质粘土质耐火砖层作为多层保温底。这些措施满足了生产更多吨数玻璃的要求，并改进了已达到的燃料经济效益。

不幸的是不久一系列的底部故障发生了，这些故障是由于杂质金属引起的底部损坏（图6）。池窑内没有带入杂质金属时，粘土质保温耐火砖层的底部结构是令人满意的。然而，不可能保证池窑内一点金属也不含，必须允许含有金属，特别是重复利用碎玻璃的情况下。一些耐火材料混合物被推荐用来防止金属侵入，有些材料采用一层锆英石，据说这层锆英石能截留住金属以防止进一步的损坏，在其它方面，如SEPR推荐的材料，所做的每项工作都是应用铺砌材料，辅助铺砌材料和接口水泥，这些材料耐侵蚀性良好。

然而，尽管对底部结构进行了改进，故障仍时时发生，最理想的是尽力从进料和碎玻璃中去除金属的污染。

较好玻璃接触耐火材料的研制

能够达到改进目的的主要研究课题之一是熔铸耐火材料已改进的质量问题，分为增加抗侵蚀性和改进的熔铸技术的应用两个方面。

A Z S熔铸耐火材料中玻璃相的渗出曾是由于石头和沙子的原因，但由于耐心控制化学成份，已大大地消除了这种现象。由法国、匈牙利、苏联、意大利、美国和日本制造的各种A Z S熔铸耐火材料，主要可归纳为32—33% ZrO_2 含量和41—42% ZrO_2 含量两种。苏联已制造出45%和50% ZrO_2 含量的砖，而最近日本又制造出95% ZrO_2 含量的砖。当 ZrO_2

含量上升时，砖对热震就更加敏感，而价格也就更贵。在大多数应用中，若是综合考虑 42% ZrO_2 含量的砖可能是最佳的砖。

在窑炉冷却部位的耐火材料中，刚玉质熔铸耐火材料性能良好并发现晶粒很小。实验表明，在 1280℃ 下时，熔铸 $\alpha\sim\beta$ 刚玉砖的抗侵蚀性比熔铸 A Z S 要好得多（图 7）。

熔铸产品中的缩孔是一个长期存在的老问题，但这些问题可用高位浇注法或倾斜浇注法将孔穴限制在不重要的部位或应用 RT 或 DCL 工艺将孔穴消除的方法来解决。

从有效成本考虑，改进了的熔铸耐火材料优于其它生产工艺制造的制品，例如：注浆成形和等静压成形工艺制品。取得相当成功的一种材料叫做 Didier Taglor X13181，是含有 26% ZrO_2 的结合 A Z S 材料。虽然用等静压成形法制成的耐火材料质量优于其它一般生产工艺诸如注浆浇注法制成的耐火材料的质量，但成本较高，只有在特殊情况下使用成本才合算。

改进的硅石和窑拱材料

近些年来由于胸墙和小炉采用了熔铸 A Z S 莫来石和碱性耐火材料，玻璃熔窑上部结构的硅质砖用量有所下降。然而，尽管硅石的耐火度几乎处于窑炉最高温度极限，大多数窑炉仍旧在窑拱部位采用硅石。

一般砖在其软化温度范围内，工作状况良好。但对于硅砖来说，则有可能在接近于其临界熔点温度继续使用。这导致了所谓的特级硅的发展，在此材料中耐火度能提高 10℃，尽管这意味着对于氧化铝和碱金属要按照严格的质量标准来操作，但也是值

得考虑的。

改变特级材料成份会明显地影响所计算的液态含量(图8)。

尽管玻璃工业的技术要求条件依赖于化学成份,但在相当的范围内,这似乎并不是得到良好性能的唯一必需条件。Konopicky等人报告了在Glas werke 厂小型池窑不同硅砖应用实验及在Gerresheim 厂大型窑炉应用不同硅砖的实验。最有趣的结果是在这些钠—钙火石玻璃池窑中温度在 1450°C — 1550°C 范围内,硅砖的侵蚀很小。此外,尽管砖有下列范围的实验数据,仍不能区分出品种来。

Al_2O_3	0.2—1.6%
CaO	1.1—2.9%
气孔率	17.2—26.9%
密度	$2.33\text{—}2.46\text{g/cm}^3$
透气性	1.7—20.3 npm

在低温下可观察到有最大侵蚀发生,而较热的部位仍为“干燥”的。损耗似乎与气孔率无关。

从文献给出的结果来看,很明显硅砖窑拱是一个难解决的问题,并且问题产生的原因不十分了解。如果全部采用硅砖窑拱,看来还需做更多的工作。改进砖尺寸的精度以减少接口侵蚀的提议是受欢迎的。

建议为钠—钙—硅玻璃池窑窑拱硅砖寻找替代材料是不足为奇的。窑拱是窑炉温度的限制因素,有一种看法认为,较高的熔化温度能导致较高的生产率,尽管先前已提到最佳熔化温度是可以接近

达到的。对于除了钠—钙玻璃以外的玻璃，如工业铝玻璃，有些时候也采用了硅线石和莫来石等其它材料。

另一次研究是关于熔铸A S Z材料的应用。用这种材料制造的实心砌块拱砖被应用在中性玻璃炉达16年之久，近年来应用在玻璃纤维池窑中。这种材料由于它的高耐火度，高耐侵蚀性及较好的保温性能似乎引起了其它玻璃生产者的兴趣。然而，如果砌块做成标准浇铸砖形状，重量则较大，为7吨/m³而且价格也高。上述的窑炉操作周期经验表明，侵蚀是不显著的，因此可以考虑减小厚度至80mm。为使窑拱稳定，砌块的较厚部位需要安装拱肋。

蓄 热 室 反 应

窑炉的小炉和蓄热室内的环境十分复杂，令人惊奇的是没有作过多次尝试以精确地测量它们。Davis, Manring 和 Bauer 利用了冷却Owens 设计的搅拌棒的水，测量了带有两级蓄热室的马蹄焰窑上的飞散损失。这使得他们能够在若干个位置取样。表1给出了某些普通飞散物样品的成份，样品的Na₂O和SO₂含量较高。另一方面，如果能象在铂接料板上获得热样品那样在蓄热室顶部获得一个热样品，会发现这些表面滴斑含有较高的硅，中等量的碱金属及钙和很低量的SO₂。温度测量也很重要，在蓄热室的顶部温度常达1450℃—1550℃。Cholerton 和 Evans 检测了过早出现故障的蓄热室中的镁砖残余物。他们发现了许多MgO（方镁石）晶体生长的证据，蓄热室外层完全不存在砖与硅酸盐反应。然而在中心部位，硅酸

盐存在并为另一种相，被测定为是钒酸钙。

重油灰中的 V_2O_5 仿佛与加速砖的开裂有关，后来，由实验进一步证实了这个过程。

另一方面，天然气在高温下燃烧速度较慢，这种天然气不含钒，含硫量通常很低。由于这种原因，配料粉化降低，但是熔化配料的挥发增加了，因为主要是碱性混合物挥发，所以在包装过程中，使砖受到了附加的侵蚀。

在蓄热室的中部铝酸盐可能会受到侵蚀，并转变成霞石，但碳酸镁材料也易发生侵蚀。在实验室中进行了将 MgO 转变成 $MgSO_4$ 的研究。在 $1150^\circ C$ 以下发现，在含有亚硫气氛时转变速率很快。另外，当含有硫酸钠时，侵蚀速率大大增加。还发现 V_2O_5 和 As_2O_5 也影响转变速率。当氧化镁以某些方式化合时，例如化合成为尖晶石或硅酸盐时，常常发现这种形式的侵蚀降低了。

在室壁内，特别是在作业区内，相对的第一燃烧器处，应用了镁铬砖，往往没有验证这些砖能否适用于恶劣的条件。可导致实质性改进的研究是采用烧结镁铬砖。由这种材料生产的砖有一个均匀的尖晶石分布，该砖的抗渣侵蚀性得到了改善，具有气孔率低，结构致密、和较高的耐高温强度等特点。

上述结果都与应用碱性耐火材料有关，在蓄热室中心区碱金属类硫酸盐侵蚀占主导作用的地方，含高铝耐火材料的应用引出了问题。在格子砖顶部及在被含有制造玻璃成份如硅、钙材料侵蚀的室壁处，侵蚀是不同的。由烧结熔融莫来石结合再高温烧成的莫来石耐火材料没有碱性耐火材料的膨胀特性，但有一低的蠕

动速率。这种莫来石耐火材料被应用在格子砖砌体上顶部，通常它们不显示出与镁质耐火材料那样的由于体积膨胀产生的裂纹，但却慢慢地吸收碱形成釉质侵蚀面，损耗是逐渐地进行的。

碱性砖外加莫来石和致密捣打料应用已导致蓄热室的分区设计，这种蓄热室对于钠钙玻璃窑来说其寿命是令人满意的。但这种设计不适于硼硅酸盐玻璃。

在特制玻璃内首先试验了熔铸十字形灌注的锆—铝—硅或 β 氧化铝耐火材料，这种材料现已扩大到生产铅和钠钙玻璃的池窑中。

对蓄热室所进行的工作是十分重要的，但由于问题的复杂性，很难找到解决的方法。窑炉的这一部分通常仍是故障发生处，在这个重要的位置仍需做进一步的工作。

毫无疑问“耐火材料的改进对于稳步增加窑炉产量做出了很多贡献。耐火材料生产商非常及时地为玻璃商提供较好的材料做出了杰出的工作”。Lionel Norton 1969年说出这些话对于今天来说仍旧是非常正确的。在玻璃工业耐火材料应用中，研究发展的质量和数量给人们留下了深刻的印象。这并不意味着没有什么事情可做了，本文已略述了该做的事情。然而，可以相信在将来现有耐火材料将被较好地利用同时研制出新材料的以满足玻璃工业的要求使产生高的生产率。

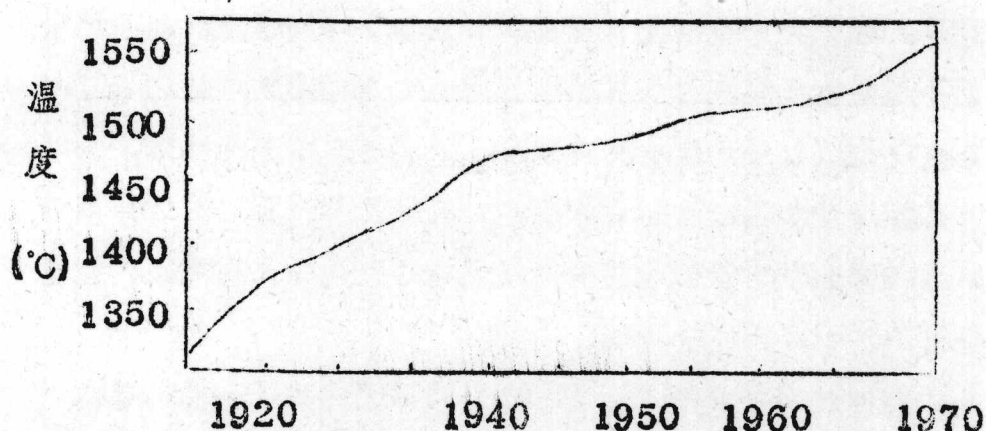


图1 1920—1970年熔化钠钙容器玻璃的池窑温度上升

图2 窑炉作业周期结束后排放玻璃液后流液洞的侵蚀。注意所谓的向上钻孔侵蚀的严重的凹坑（略）

图3、窑炉作业周期结束排放玻璃液后竖砌池壁熔铸砖的典型侵蚀外形。（略）

图4、a 刚玉在铅和Ⅱ玻璃内的溶解。

图5．连续玻璃耐火材料界面处磨片的显微结构。注意来自（白色）氧化铁杂质的气泡流。（略）

图6、带有金属小球的玻璃池窑底部断面。当小球熔化时就形成了明显的侵蚀洞。（略）

图7、钠钙玻璃窑的各种耐火材料的作为温度函数的线性液面线损失速率。

图8、特级硅砖在给定温度下形成的液态要少于常规质量砖。