

易熔玻璃

.71

中国建筑工程出版社

易 熔 玻 璃

[苏联] H·M·巴夫鲁什夫 编
A·K·茹拉夫列夫

陈树森 译

龚方田 黄朝恩 校

中国 建 筑 工 业 出 版 社

易熔玻璃是指软化温度低于600°C的玻璃。

易熔玻璃用途很广，作为焊料，可应用于真空技术和电子工业中；作为磁漆，可涂在金属表面以提高金属抗腐蚀和抗断裂的能力；作为涂料，可在玻璃制品上作各种标记、刻度和图案等。

本书综述了苏联和其他国家有关易熔玻璃的制备和研究方法以及应用等方面的科学研究成果。书中论述了易熔玻璃结构的理论概念，叙述了氧化物玻璃、无氧玻璃和氧化硫属化物玻璃的研究方法和结果。引用了许多关于易熔玻璃应用于各种电子装置中作为密封涂料和作为焊料的资料。

本书供从事易熔玻璃的研究、制造以及使用易熔玻璃的有关人员参考。

Н.М.ПАВЛУШКИН И А.К.ЖУРАВЛЕВ
ЛЕГКОПЛАВКИЕ СТЕКЛА
«ЭНЕРГИЯ» МОСКВА—1970

易 熔 玻 璃

陈树森 译

龚方田 黄朝恩 校

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/32 印张：5 7/16 字数：119 千字

1975年7月第一版 1975年7月第一次印刷

印数：1—5,110 册 定价：0.40 元

统一书号：15040·3232

目 录

概 论	1
易熔玻璃的种类及其制备方法	5
铅玻璃	7
硼酸盐玻璃	13
磷酸盐玻璃	25
铋玻璃	31
钽玻璃	36
钒玻璃	37
碲玻璃	41
锗玻璃	46
锌玻璃	47
含氧化锑的玻璃	49
含氧化砷的玻璃	51
钼玻璃和钨玻璃	53
氟玻璃	55
硝酸盐玻璃和其他特种玻璃	59
硫属化物玻璃	62
氧化硫属化物玻璃	68
易熔玻璃的性能	72
软化温度	72
线膨胀系数	83
化学稳定性	92
电气性能	102

易熔玻璃在光谱红外区的透过率	119
其他性能	126
易熔玻璃的应用	130
易熔玻璃在电子工业中的应用	130
易熔玻璃作为金属珐琅的应用	140
易熔珐琅作为各种玻璃涂层的应用	147
易熔玻璃的制备条件	154
参考文献	158

概 论

易熔玻璃一般指的是这样一种玻璃，其软化温度低于普通窗玻璃，即不高于 600°C 。

易熔玻璃作为一种焊料应用于真空技术和电子技术中，它还可以成为易熔釉和珐琅的一种组分，作为热敏电阻、晶体三极管和微型电路的防护层而应用于微电子学中。无线电电子技术的仪器仪表和元件的防潮是一项非常重要的科学技术任务，这是人所共知的。在半导体仪器仪表的无壳密封中应用无机玻璃较有机电介质在防潮性和坚固性方面都具有很明显的优越性。此外，无机玻璃还比有机电介质能够耐更高的温度；玻璃的线膨胀系数比有机漆和树脂的膨胀系数小，这样就提高了在温度急剧下降的条件下对半导体仪器仪表保护的可靠性。

由于铝产量的显著增加和铝作为建筑构件的出现，这就提出了保护其表面不被锈蚀的问题。采用有机涂料不耐火，机械强度不高，抗风化作用不好，而且很容易磨损。

阳极化作用并不能防止铝免受风化和化学试剂的作用。因此普遍推广使用玻璃珐琅作铝的保护涂层。由于铝的熔化温度低，因此要求各种玻璃珐琅的焙烧温度也不能高于 600°C 。目前已经研制出许多铝用珐琅：如，铅珐琅、碱性硼硅酸盐珐琅、含磷的珐琅和氟硼硅酸盐珐琅。

易熔玻璃可以在低温下进行真空密封焊接。低温焊接能防止金属零件的氧化和变形，因为金属零件处于焊接区，在

高温时就可能被损坏。用易熔玻璃进行焊接，其焊口是均匀的，同时，适当地选择热膨胀系数还可以使焊接消除应力。譬如：易熔的铅硼硅酸盐玻璃可以作为标记珐琅用于各种电子管上，可以在各种玻璃制品上绘制各种类型的图案和标记，还可以在电子换流器中用来焊接玻璃外壳和金属灯座，同样也可以应用于其他各种类型的玻璃和玻璃、玻璃和金属、金属和金属、云母和玻璃及金属的焊接上。

除非薄膜涂于小面积上（如标记）以及焊接处处于外部钢座的压应力作用下，否则在其他所有的焊接中被焊接的各种零件的热膨胀的一致性是很重要的。

近来，玻璃制品的装饰品由于可以利用易熔珐琅（焙烧温度 $550\sim 600^{\circ}\text{C}$ ）透过丝网进行印制，因而在许多国家得到广泛发展。绘制在任何玻璃制品上的洗不掉的彩色珐琅标签，促使产品外观改善，并且使瓶、罐等获得了招人喜欢的式样，这一点已经被人们所公认。这就大大简化了周转使用的玻璃器皿的洗涤过程，而且浸洗商标和胶水以及印刷商标等等都没有必要了。

易熔玻璃还可以用来密封半导体仪器仪表，以保护其不受机械作用和化学腐蚀的影响，防止潮气和杂质的进入，以免电气性能变坏。在某些情况下易熔玻璃的使用受到了焊接最高温度的限制。

彩色电视的屏和锥制造工艺不允许使用氧气火头和电弧焊进行屏锥封接，因为这样有可能损伤萤光粉。但在制造黑白电视管时，有时是使用这种工艺进行屏锥封接的。研制了由硅、硼、铝、钙、镁、锌、铅、钡、钾和锂的氧化物所组成的专用易熔玻璃，这些易熔玻璃都适用于在低温下焊接彩色电视管中的各种零件。这样的玻璃具有以下性能：软化温

度低；可以完全溶于热浓酸中，这在更换焊口时是很重要的；在焊接玻璃零件时浸润快而均匀，并且在焊接之后不残留稳定的应力；焊缝有很大的机械强度；能保证焊接的真空密封性；与被焊接的材料有相似的线膨胀系数。

易熔玻璃可以分为氧化的、无氧的和混合的三类。属于氧化玻璃的有：铅玻璃、硼酸盐玻璃、磷酸盐玻璃、铋玻璃、铊玻璃、钒玻璃、碲玻璃、锗玻璃、锌玻璃、含有锑和砷的氧化物的玻璃、钼玻璃和含有阴离子团 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的玻璃。属于无氧玻璃的有：氟玻璃、硫属化物玻璃和含有氯离子 Cl^- 的玻璃。属于混合易熔玻璃的有：氧化硫属化物和氧化氟化物的玻璃。

铅玻璃、硼酸盐玻璃、磷酸盐玻璃和铋玻璃作为易熔珐琅用于铝、镁和玻璃；也用于各种材料的焊接和密封；以及用作防辐射的保护材料。

大多数以钽酸盐为基础的半导体玻璃及某些硫属化物玻璃都具有电阻低和在光谱红外区有良好的透过性能。这些玻璃可以应用于制造各种整流检波器、红外线滤光片、保护层和红外线测量及信号装置。在光谱红外区具有良好透过率的还有锗玻璃、碲玻璃、氧化硫属化物玻璃和一些其他的玻璃。

玻璃作为微型电路的介质和保护膜使用时，对其提出了要易熔并在真空中易蒸发的要求，这就引起了研究无氧玻璃系统的必要性，其中包括制备具有高欧姆电阻的硫属化物玻璃。含有 S、Se、As、Tl 的玻璃可以用来密封各种电子装置，诸如电容器、电阻器、印刷电路和半导体装置，以保护其不受潮气和大气的作用。在硅半导体领域中，这些玻璃被用来排除表面的杂质，同时改进这些仪器的使用质量。这些

玻璃都具有相当大的线膨胀系数（ $200 \times 10^{-7} \sim 300 \times 10^{-7} 1/\text{度}$ ），这可能是在相应的密封焊缝处出现危险的残存应力的原因。因此玻璃层应当是很薄的。

在制备硫属化物玻璃时应当加入这样的成分，使所获得的材料既可以有低的软化温度（ $100 \sim 200^\circ\text{C}$ ），也可以有高的软化温度（ $400 \sim 500^\circ\text{C}$ ）。低温软化的玻璃用于密封半导体仪器，而高温软化的玻璃则用于光学目的。

易熔玻璃中具有最低的线膨胀系数的是锌玻璃（ $60 \times 10^{-7} \sim 70 \times 10^{-7} 1/\text{度}$ ）。玻璃的软化温度越低，其线膨胀系数就越高，反之则相反。只有锌玻璃在降低其软化温度时，其线膨胀系数也降低，同时，玻璃的热稳定性和机械强度也增加。具有一定组分比的铅玻璃既在酸性介质也在碱性介质中都具有较好的化学稳定性。

硫属化物玻璃在酸性介质中，包括在氢氟酸中，都十分稳定，而普通的硅酸盐玻璃却很易溶于氢氟酸中。

为了避免破坏仪器的性能，密封或者焊接温度不允许超过 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 时，必须用易熔玻璃。但是软化温度低的玻璃，其结构一般都比较弱，物理化学性能比较低。因此，用引入各种组分的途径力图制造出比较完善的玻璃，引入的组分最好是既能稳定玻璃结构，同时又不提高其软化温度。这种玻璃的获得将使仪器仪表可以在腐蚀性的介质中和在各种类型的外部作用影响下使用，提高采用易熔玻璃的各种各样仪器仪表使用的可靠性和耐久性。

易熔玻璃的种类及其制备方法

易熔玻璃具有低的软化温度。文献[1,2]的作者把物质熔化温度的降低和电子或阴离子对正电核的屏蔽程度联系起来。阴离子对阳离子的屏蔽在很大程度上决定了物质的结构及其性质。

如果说 CO_2 在正常条件下是气体，这是因为尺寸小的碳阳离子($r_{\text{C}^{4+}}=0.15\text{\AA}$)可能被中和碳原子核所需的两个氧离子完全屏蔽的缘故，那么 SiO_2 在高温下才能熔化(1710°C)的原因就是阳离子 Si^{4+} ($r_{\text{Si}^{4+}}=0.39\text{\AA}$)不能被两个氧离子所充分屏蔽。屏蔽的程度首先与离子的极化率(形变率)有关，也就是与离子的电子相对于原子核的位移有关。离子的极化率越高，物质的熔化温度就越低。同时文献[1,2]的作者又把离子的极化率看作它使自己的电子壳层发生形变的能力，以求保证对原子核最佳条件的屏蔽。照例说，最外电子层由18个(Zn^{2+})或者18+2个电子构成的阳离子(Tl^{1+} 、 Pb^{2+} 、 As^{3+} 、 Bi^{3+} 、 Sb^{3+})所组成的化合物，同阳离子具有同样的半径，但与最外电子层是由8个电子(Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Mg^{2+})所组成的惰性气体型的化合物相比，前者由于有较大的极化率，其熔化温度要低于后者。在这种情况下，18个电子的最外电子层比8个电子的最外电子层能更好地保证对核的最佳条件的屏蔽。

此外，增大阴离子与阳离子的比例也能改善阳离子的屏蔽程度，从而也降低物质的熔化温度。因此，降低玻璃的熔

化温度办法有种种，如用 P_2O_5 （这里 $O/P=2.5$ ）来代替玻璃的形成体 SiO_2 （这里 $O/Si=2$ ）；用一价的阴离子 F^- 来代替二价的阴离子 O^{2-} ；引入附加的氧离子，而这些氧离子被电场强度很小的阳离子所中和（加入碱金属氧化物）。在后一种情况下，碱性阳离子对自己的氧极化作用很弱，因此氧具有比较大的极化能力，从而可能更好地屏蔽玻璃形成体的阳离子。

文献[3]的作者把各种元素和它们的高价氧化物熔化温度的变化与化学元素周期律所引伸出来的规律性联系起来了。把高价氧化物的熔化温度写在周期表的相应格子里，可以发现那些最难熔的氧化物都分布在周期表的偶数列里，并且从左向右熔化温度逐渐降低（表1）。

表 1

列	类									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1	H									
2	Li 1700	Be 2570	B 600	C -79	N 32	O	F			
3	Na	Mg 2650	Al 2050	Si 1713	P 355	S 17	Cl			
4	K	Ca 2620	Sc	Ti 1825	V 675	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
5	Cu 1235	Zn 1936	Ga	Ge 1115	As	Se	Br			
6	Rb 400	Sr 2430	Y 2410	Zr 2700	Nb 1520	Mo 795	Tc	Ru	Rh	Pd

续表

列	类									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
7	Ag 200	Cd 900	In	Sn 1150	Sb 656	Te 450	I 275			
8	Cs 380	Ba 1923	La 2320	Hf 2770	Ta 1470	W 1473	Re 220	Os 40	Ir	Pt
9	Au	Hg 400	Tl 759	Pb >280	Bi 900	Po	At			
10	Fr	Ra	Ac	(Th) 3050	(Pa)	(U)				

从以上所述可以得出这样的结论：决定玻璃易熔性的组分可以是某些重金属离子、含有18个或者更多电子的最外电子层的离子、易形变的大离子和带小电荷的离子。因此易熔玻璃可以根据玻璃组成中那些降低玻璃熔化温度的元素或者氧化物的名称而分类。下面就让我们来研究一下每类玻璃的制备特点、结构和成分。

铅 玻 璃

氧化铅作为许多组成中的重要组分而被采用。由于氧化铅引入玻璃组成从而扩大了工业配方的范围。玻璃中可以加入数量很大的氧化铅。譬如，可以制造出含有90%氧化铅的玻璃。氧化铅由于具有强烈助熔作用，用于制备珐琅和釉的易熔成分，已成为一种不可被代替的物质。铅离子具有由18个电子所组成的最外电子层，同时 Pb^{2+} 中2个最外电子至少是铅离子有高级化率的部分原因^[4]。因此在PbO中出现

了附加偶极子，并且Pb—O键具有共价特征，这就促进了形成玻璃的过程。

在决定组成形成玻璃的能力时，硅酸盐玻璃中的O/Si比例具有很大意义。如果O/Si=2，那么每一个硅氧四面体都以所有的氧离子和其他四面体相联系，这时就组成了三度空间的玻璃网络结构。如果O/Si=4，那么参加联系各四面体的氧离子分数就等于零，而从札哈里阿森的假说来看就不能形成玻璃，因为这时硅氧四面体都是孤立的。所以正硅酸盐 $2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ 不能以玻璃态存在。但是正硅酸铅 $2\text{PbO} \cdot \text{SiO}_2$ 却能以玻璃态存在。这可以这样来解释，PbO的正方形结构乃是一种棱晶，这种棱晶的八个角中，每一个角都被 O^{2-} 离子所占据，而在其内部有一个 Pb^{2+} 离子（图1）。并且Pb和O之间的距离也不相等，有四个角上的O离Pb比较近（ $2.30 \text{ \AA}$ ），另外四个角上的O距Pb较远（ $4.29 \text{ \AA}$ ）。这种结构是这样决定的，由于四个最近的 O^{2-} 离子把容易极化的 Pb^{2+} 离子的外层电子云推移开，特别是把铅的两个最外电子推向另外四个 O^{2-} 离子一边。这样 Pb^{2+} 就失去了球形对称，一头比另一头更带正电。因此铅离子拉那些最靠近的 O^{2-} 就比拉那些距离远的氧离子拉得更紧。假定这种对称性的丧失也适用于硅酸盐中氧离子包围 Pb^{2+} 时的类似情况，那么就可以说明 Pb^{2+} 离子有形成玻璃的能力^[5]。

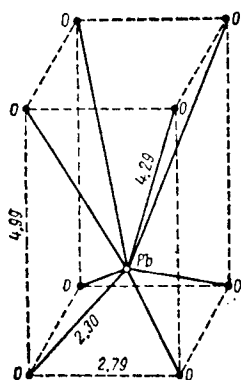


图1 正方形PbO原子间的距离(Å)

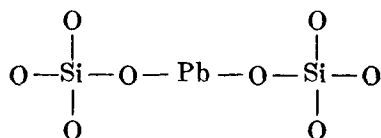
这种结构是这样决定的，由于四个最近的 O^{2-} 离子把容易极化的 Pb^{2+} 离子的外层电子云推移开，特别是把铅的两个最外电子推向另外四个 O^{2-} 离子一边。这样 Pb^{2+} 就失去了球形对称，一头比另一头更带正电。因此铅离子拉那些最靠近的 O^{2-} 就比拉那些距离远的氧离子拉得更紧。假定这种对称性的丧失也适用于硅酸盐中氧离子包围 Pb^{2+} 时的类似情况，那么就可以说明 Pb^{2+} 离子有形成玻璃的能力^[5]。

铅和氧能形成各式各样的多面

体^[8]。例如, Pb^{2+} 离子在钙钛矿型的晶格中配位数是12, 在磁铅酸盐中配位数为6, 在红色的正方形 PbO 晶体中配位数是4, 在 Pb_3O_4 中的配位数为3, 而在黄色的斜方形 PbO 中配位数为2。

文献[12]中报导了铅的配位数的多样性。通过对化合物 $\text{K}_2\text{Pb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 的研究, 作者得出结论, 在高铅玻璃中, 铅具有三角棱锥状的配位结构。因此, 铅在玻璃中能够起到各种不同的作用并不奇怪。

铅玻璃具有和钠硅酸盐玻璃相类似的结构, 其中两个Na原子被一个铅原子所取代, 但在玻璃中氧化铅的含量比较高的情况下, 可以认为Pb原子和Si原子形成了如下的结构:



这里铅原子参与了形成网络结构^[6]。

在文献[7]中, 作者试图把电流的流动机理和铅硅酸盐玻璃的结构特点联系起来。可以认为, 在 PbO 的含量比较高, 即高于50% (克分子) 的玻璃中, 铅可能处于硅氧的网络结构的内部, 而在其含量低于50% (克分子) 时, Pb仅仅作为网络调整离子。这一点已经从测量 $\text{PbO}-\text{SiO}_2-\text{Na}_2\text{O}$ 系统玻璃的导电率得到证实。当氧化铅的含量比较高时, 玻璃的电阻就低些, 因为这时铅作为玻璃形成体而进入硅氧网络结构, 使结构疏松, 从而使载流子钠离子容易迁移。在氧化铅的含量低的时候, 玻璃的电阻就比较高, 因为在硅氧网络结构的空穴中存在铅的网络调整离子而使电流的基本载流子——钠离子很难移动。文献[9,10]的作者认为, 在高铅

(重量含量约90% PbO) 的硅酸盐玻璃中形成了由四面体 $[\text{PbO}_4]$ 和 $[\text{SiO}_4]$ 所组成的两物相。在高铅玻璃里滴状显微物相中, SiO_2 含量高。同样在 $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ 系统的玻璃中也发现有分层现象, 当 PbO 占60% (克分子) 时, 铅原子就开始以 PbO_4 的四面体的形式进入玻璃的网络结构。

文献[11]的作者们用核磁共振的方法研究了硼酸铅玻璃, 他们发现, 当玻璃中 PbO 含量小时, 铅是网络调整体。只有在氧化铅的含量高于 15~20% (克分子) 的时候, Pb 才以 PbO_4 的形式进入到网络结构之中。

文献[13]的作者认为, Pb^{2+} 离子只能作为网络调整体存在于玻璃中。他用 x -射线衍射法研究了 $\text{PbO}-\text{SiO}_2$ 体系玻璃的结构并指出, 这种玻璃的结构是由原子的杂乱网络所组成的, 其中铅原子被 SiO_4 四面体所分开, 而且在任何时候也不直接地或通过氧彼此进行结合。但在这种情况下, 进入玻璃成分中的 PbO 的数量不超过60% (克分子), 大多数作者认为, 铅是玻璃形成体, 也就是说, 它进入了玻璃的网络结构之中。例如, 文献[14]中指出, 在 $\text{PbO}-\text{SiO}_2$ 系统的玻璃 (所谓转化玻璃) 中, 当 $R > 3$ 时, 在一定条件下 Pb^{2+} 离子能起玻璃形成体的作用, 这里 R 是氧离子数与玻璃中存在的玻璃形成体的数目的比值。文献[15]的作者们提出了自己的看法, 他们认为, 铅或者和两个氧离子接合 ($\equiv \text{Si}-\text{O}-\text{Pb}-\text{O}-\text{Pb}-\text{O}-\text{Si} \equiv$), 或者以正方形的 PbO_4 原子团的形式进入玻璃结构。文献[16]的作者推断说, 当存在与氧原子的共价键时, 铅起玻璃形成体的作用。在这种情况下, 铅原子的配位数就变得比较低了。

文献[17]的作者通过对 $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ 系统形成玻璃的范围的研究, 得出了这样的结论: 配位数为4的二价铅离子

是玻璃结构网络的形成体。对于 $\text{PbO—SiO}_2\text{—B}_2\text{O}_3$ 系的高铅玻璃来说，看来是形成了进入玻璃网络结构的四面体的 PbO_4 ，四面体 PbO_4 被原子团 SiO_4 和 BO_4 联接在一起。在 B_2O_3 和 SiO_2 的含量增加时，连续不断的高铅玻璃网络在铅和氧结合处断裂，因为 PbO 的 R—O 键能（36千卡）比 B—O （四配位）的键能和 Si—O 键能（相应为89和106千卡）要小。因此，在显微区里保存着高铅玻璃的网络，基本的母体玻璃具有由 BO_3 原子团（氧化硼在玻璃中的克分子含量大于30%）和 SiO_4 原子团组成的结构，其中少量的铅离子作为网络调整体处于网络的结点间。因此，在 $\text{PbO—SiO}_2\text{—B}_2\text{O}_3$ 系里玻璃就发生分层现象。

这些结论在文献[19]中都得到了证实。作者们熔制了 $\text{PbO—B}_2\text{O}_3$ 组成的玻璃（表2）。氧化物是用 Pb_3O_4 和 H_3BO_3 引入的。在白金坩埚中于 1000°C 熔炼1小时。除1号玻璃乳浊外，所有的玻璃都是光学透明的。所制得的玻璃都曾用电子显微镜和 x -射线小角散射法进行了研究。按组成来说，1号玻璃处于 $\text{PbO—B}_2\text{O}_3$ 平衡相图的两液体稳定区之内，在这里，当冷却时熔体很快被分为两种液体。电子显微镜和 x -射线的结构分析表明，滴状物的直径处于 $3550\sim 3700\text{\AA}$ 的范围内。对于其他玻璃来说，滴状物的直径

表 2

编号	PbO克分子%	B ₂ O ₃ 克分子%	编号	PbO克分子%	B ₂ O ₃ 克分子%
1	15	85	4	30	70
2	18	82	5	35	65
3	25	75			

随着远离不混溶区而减小。

文献[18]的作者坚持这样一种观点：在铅硼酸盐玻璃中铅离子 Pb^{2+} 可以是调整体，也可以是玻璃形成体。当玻璃中含 PbO 少的时候，铅离子 Pb^{2+} 是调整体，并具有较高的配位数，等于6，能够促使 BO_3 原子团变为 BO_4 四面体。在 PbO 的含量超过15%克分子的时候， BO_3 原子团只有一部分变为 BO_4 四面体；当 PbO 的克分子含量为50%时，只有一半硼的原子形成了 BO_4 四面体，另一半组成了 BO_3 原子团。在这种情况下，铅起了玻璃形成体的作用，并以 PbO_4 四面体的形式进入玻璃的网络结构中。

氧化铅含量高的玻璃一般都呈现为深黄色，并且当其溶解于酸时显示出氧化效应。这种现象说明在高铅玻璃中存在高价铅 Pb^{4+} 〔20,21〕。玻璃中 PbO_2 的存在，看来，将容易形成结构原子团 PbO_4 ，该原子团参加高铅玻璃的网络形成。

铅玻璃有强烈的腐蚀性，因此铅玻璃的熔制应在刚玉或烧结致密的高铝坩埚中进行。已有报道，由重量比为90%的 PbO 和10%的 B_2O_3 组成的玻璃甚至连白金也能腐蚀〔22〕。这种玻璃的腐蚀性部分地可以用在熔化温度下其粘度小来解释。熔化温度下的粘度对数曲线的斜率比一般的玻璃大2~6倍〔22〕。

如果利用粒度小于0.3毫米的二氧化硅，那么就能保证铅硅酸盐玻璃得到良好的熔炼。玻璃的最简单易熔成分（表3）是铅的各种化合物〔23〕。在 B_2O_3 — PbO 系中，在相当迅速的冷却条件下，可以制取出 PbO 的重量含量高达95%（克分子百分数为85）的玻璃。熔炼是在白金坩埚中进行的〔24〕。作者们在 PbO — B_2O_3 系中采用刚玉坩埚进行熔炼时，获得了 PbO 的重量含量高达92.76%（克分子百分数为80）的玻璃。