

釉

刘长荣 译

建筑工程出版社出版

• 1959 •

目 录

第一章 如同玻璃态物質的釉 (1)

1. 引言 (1)

2. 溶液和熔体的基本学理 (2)

3. 均匀結晶化合物和玻璃态物質的熔融 (2)

4. 玻璃(釉)的結晶 (5)

5. 各种成份对玻璃(釉)結晶的影响 (7)

第二章 釉的物理性質和化学性質 (9)

1. 粘度和表面張力 (9)

2. 加和性(加数)規則 (13)

3. 热的性質 (15)

4. 机械性質 (19)

5. 电的性質 (20)

6. 化学稳定性 (25)

第三章 玻璃(釉)的着色和乳濁 (29)

1. 玻璃(釉)的着色理論 (29)

2. 玻璃(釉)着色的物理化学过程 (30)

3. 分子着色剂和分散着色剂 (32)

4. 尖晶石型着色剂 (35)

5. 玻璃(釉)的乳濁作用 (37)

第四章 釉层应力和釉对陶瓷制品机械强度

和热稳定性的影响 (43)

1. 釉层应力 (43)

2. 釉层对陶瓷制品机械强度和热稳定性的影响 (59)

第五章 原料 (68)

1. 主要原料 (68)

2. 輔助原料 (78)

第六章 釉的分类、計算方法、制备和施釉 (85)

1. 釉的分类	(85)
2. 对陶瓷制品种的基本要求	(87)
3. 釉组成的计算方法	(88)
4. 釉的制备和施釉	(91)
第七章 各种陶瓷制品用的典型釉及其主要特性	(94)
1. 瓷器和炻瓷用釉	(94)
2. 卫生-建筑制品(一次烧成)用釉	(101)
3. 建筑炻器制品和耐酸炻器制品用釉	(104)
4. 二次烧成用的精陶釉(易熔釉)	(109)
5. 建筑陶瓷用釉	(115)
6. 易熔釉	(118)
第八章 釉缺陷的产生、防止和消除的方法	(121)
1. 开裂	(121)
2. 流釉和干化	(129)
3. 釉的聚集(卷缩)和针孔	(130)
4. 釉的疤、气泡和鼓胀(起泡)	(132)
5. 结晶、无光和霉腐	(134)
6. 釉的其他缺陷	(136)
第九章 技术控制	(138)
1. 釉的生产控制法	(138)
2. 釉的性质研究法	(138)

参考文献

第一章 如同玻璃态物質的釉

1. 引言

М·В·罗蒙諾索夫是物質玻璃态学說的首創者，他在“物理化学实用教程”中首先闡述了这个問題。

我們把这个学說的进一步发展归功于Д·И·門捷列夫。他在自己的著作“玻璃制造”中闡述了玻璃态的理論，这給我們对玻璃的概念奠定了基础。苏联学者А·А·列別节夫、И·В·格列宾席科夫、О·К·波特文金、Н·А·席沙科夫、Е·А·波拉依-科希茨等对于玻璃结构的科学作出了很大的貢獻。

我們学者們的工作推翻了陈旧的、被認為是古典的Г·泰曼的理論，他把玻璃看作是質点分布異常混乱的过冷液体。在低溫下，玻璃的粘度急速增大，以致具有显著的不可流动性——在机械的意义上來說，就是它有了硬度。因此，玻璃具有了某些眞固体物質的性質，例如脆性。但是基本上玻璃在低溫时还是一种无定形的、和晶体不同的物質，它沒有規則的分子排列（空間晶格）、物理上的各向異性和一定的熔点。

玻璃的各向同性是由于它在各个不同方向上的物理性質均相同的緣故。此外，玻璃不具有从固态变成液态或者从液态变成固态所特有的一切現象——一定的熔融溫度以及粘度和热容的急剧变化。玻璃的某些性質，例如，热膨胀系数、热容、导热性和电容的数值，只有在所謂正常区域內（軟化範圍）才有很大的变动。但是，这些变动不与溫度曲綫上的任何一点有連系。

施于陶瓷坯体上的釉，由于高溫的化学作用，在化学成份和结构上，尤其是在与坯体的接触面上发生一系列的变化（參閱第四章）；这时坯外的薄釉层保持着玻璃的结构。但是釉的均匀程度与工业玻璃是有区别的。玻璃可認為是眞正的均匀体，而釉則与上釉制品的成份、燒成溫度和燒成時間有关，可能含有或多或

少的气体包裹物、未起反应的石英結晶和新形成的矿物結晶。

一般說来，釉就是玻璃，它具有玻璃所固有的一切性質。釉与玻璃相仿，它在相当高的溫度下熔融，并具有或大或小的流动性，这流动性决定于熔体的粘度，而熔体的粘度又决定于釉的化学成份。

釉是由熔融的配合料形成的，所以应当在与溶液和熔体有关的問題上作一簡略的闡述。

2. 溶液和熔体的基本学理

混合物可以根据其中各組份由于相互关系不同而所处的不同状态分为机械混合物和物理混合物两种。机械混合物的特征是其中的組成部份（組份）能比較容易地按下述方法彼此分离：沉淀或者溶解混合物中的一种組份，离心分离乳濁体組份等等。一般的机械混合物、悬浮液和胶体溶液都属于这一类。

属于物理混合物的是这样一些体系，即一种組份的分子扩散到另一組份分子間的孔隙中而形成完全均一的混合物，这种混合物在各部份均具有同一的成份，并且混合物的各个部份即使是在超显微鏡下也不能把它們区别开来，真溶液和熔合物属于这类。固体物質間这样密切的联系只是当他們各别的分子或分子团具有可动性时才有可能，要具有可动性就必须把混合物加热到相当高的溫度，加热溫度的高低决定于組份的物理性質和化学性質。

矽酸盐熔体（釉）就是矽氧在矽酸盐中的饱和溶液（高溫下）；当冷却时，过多的組份开始析出結晶。这就说明了釉的析晶現象。

3. 均匀結晶化合物和玻璃态物質的熔融

在图 1、2、3 上的曲綫表示化学均匀物質、真固体物質和玻璃态物質的正常的熔解过程和凝固过程。試分析图 1 的曲綫，我們可以看出，当逐漸加热的时候，溫度沿 $a-b$ 綫几乎是直綫地上升，到 b 点（熔点）曲綫出現一轉折点并与橫軸平行地到达 c

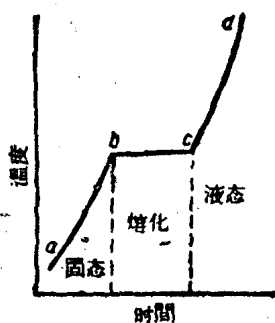


图 1 固态物質的正常熔化曲綫

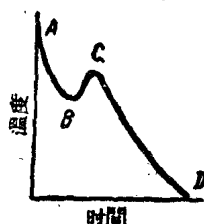


图 2 过冷液体的結晶曲綫

点。这就是說，在 b 点物質开始熔解，但在它还没有完全熔解变成液体之前，溫度并不升高。这个过程在图上用 bc 綫段来表示。 c 点表示物質已完全轉变成液体，在这以后溫度又开始升高，在图上出現平稳上升的 cd 綫段。

凝固是按着同样的曲綫进行的，但是方向相反。有时結晶过程以其他的方式进行（图 2）。例如，如果熔融的物質小心地冷却，那么它的溫度可以降低到正常的結晶点以下，并繼續保持液体状态。但是这样的状态极不稳定：往往只由于稍加攪动便开始結晶。結晶所放出的結晶热又使溫度升高到該物質的正常的熔点（結晶点）；这溫度一直保持不变，直到液相轉变成固相为止。

这种过冷倾向是某些液体尤其是矽酸盐熔体（玻璃）的特有的性質。但是，关于玻璃是簡單的过冷液体的概念，并不能詳尽解答玻璃态的性質。

当結晶物質轉变成熔融状态时，平稳的溫度曲綫也随着被破坏，对玻璃來說这种熔融（凝結）溫度曲綫有着完全平稳的綫段（图 3）。

玻璃从流动状态轉变成不流动状态是逐漸地经过可塑状态进行的。玻璃（釉）和固体熔液相似，它沒有一定的熔点，而一



图 3 玻璃的冷却曲綫

定的熔融溫度却是各別化合物（眞固体結晶物質）所固有的。

上述的各曲綫概略地表示了均匀物質的熔融（凝固）过程。至于較复杂的多元系統（如釉和玻璃）的熔融过程直到目前还没有研究过。二元或者三元系統熔融和凝固时所发生的現象只能給多元系統中所进行的复杂过程提出一般的概念。本書篇幅有限，不能叙述这些复杂的过程。这类問題在有关矽酸盐物理化学的書籍中有所闡明。下面仅对瓷坯上的釉在熔融（本燒）时所发生的各种复杂过程作一概括的說明。当生釉在本燒或是当釉料在做成熔块（熔融）时，随着混合物固体組份之間的反应形成了許多低熔混合物。生成的熔合物逐漸地溶解混合物中多余的非共熔的固体組份，而且熔体的数量随着溫度的提高而增大。

熔块釉在本燒时的熔融过程則完全通过另一种方式进行。釉的熔融如同玻璃一样，当从固态变成液态时沒有任何急剧轉变的特征。在沒有一定的熔点时，从固态变成液态要經過逐漸軟化的溫度范围。

玻璃在凝固时本身能保存熔融潛热的性能引起了这样一种現象，即熔块与成份相似的生釉相比較，前者能在較低的溫度下熔融，后者則为了破坏混合物各別組分的晶体結構而需要消耗附加的热量。当希望不改变成份而能得到易熔的釉的时候，熔块釉（熔融釉）的这种性質才用于實踐中。

在这里我們不談釉成份中各別已被研究过的二元或三元系統的平衡相图和熔融曲綫，我們只想指出它們在闡明釉的熔融方面所起的作用。

某些系統，例如 $\text{PbO}-\text{SiO}_2$ 或者 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ，有着它独特的意义，因为它們可用作选择相应于最易熔融的低熔混合物的釉的根据。这种低熔混合物在 $\text{PbO}-\text{SiO}_2$ 系統中其相应的組成是 $\text{PbO}-85\%$ 和 $\text{SiO}_2-15\%$ ，熔融溫度为 716°C ，它可以用来制备最易熔融的釉，而在 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 的系統中，其相应的組成是 $\text{SiO}_2-62\%$ ， $\text{Al}_2\text{O}_3-14.75\%$ ， $\text{CaO}-23.25\%$ ，熔融溫度为 $1170^\circ\pm 5^\circ\text{C}$ ，它可以用来制备易熔的碱土金屬釉（參閱第七

章)。

包含在比較复杂的多元系統的釉成份中的 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 等系統，可以用來說明任何一种氧化物对整个系統的熔化度的影响。必須指出，这里所发生的并不牽涉到复杂的物理-化学过程，根据溶液和熔合物的基本原理，包括在比較复杂的多元系統的釉成份中的各別簡單系統会使熔化度显著的降低，因为这时形成了互补的和組成較复杂的在較低溫度时熔融的低熔混合物。这种熔体的特性广泛地应用在釉的生产工艺上（參閱第六章和第七章）。

4. 玻璃（釉）的結晶

玻璃本身能保存熔融潛热的性能和玻璃的过冷傾向决定了它在低溫时热力学上的不稳定性。因此所有的玻璃，如同介穩系統一样，有轉变成真穩系統，即确实稳定的結晶状态的傾向。

玻璃的結晶过程，实际上是在不同的溫度下以不同的速度进行的，玻璃的結晶速度决定于熔体的粘度，而熔体的粘度又是化学組成的函数。

Г·泰曼曾經确定，过冷液体（有机的）的結晶，主要决定于两个因素：1）自生的結晶能力，或所謂的自发的能力，此能力用單位時間、單位体积內所形成的晶核的数目来表示；2）結晶速度，它用这些晶核的生長速度来表示。

И·Ф·波諾馬列夫〔39〕經過实验后証明了Г·泰曼在观察有机物的基础上所制得的图表对矽酸盐玻璃也有价值。矽酸盐熔体（在它冷却时）轉变成結晶状态时从来都不是在整体中同时进行的：开始只是产生个别的結晶中心（个别的結晶核），然后在整体中生長并扩大，直到完全結晶为止。

任何一种結晶因素的大小也决定于溫度和粘度。一方面自发能力与溫度間的关系，另方面結晶速度和粘度間的关系都可以清楚地用图4的曲綫來說明。对結晶來說最有利的区域是这样一个区域，即是自发能力十分大且結晶速度接近最大的地方。在这种

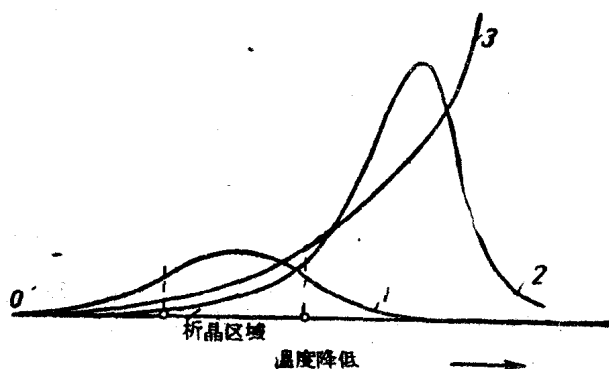


图 4 结晶速度 (1)、自发能力 (2) 和矽酸盐熔体的粘度与温度间的关系

情况下，玻璃質中就生成少量的晶核，但这晶核迅速成長，于是生成較大的晶体。由实际中有这样的現象：在爐中重复处理玻璃时有时会开始“失透”，其原因是玻璃在适于矽酸盐熔体結晶的溫度区域内（靠近軟化点）長時間停留的結果。

由此可以得出实际的結論，如果不希望有結晶出現，即需要得到透明的玻璃（釉）时，熔合物必須快速冷却（这时我們很快地通过适于結晶的溫度帶），相反，如果希望人为地引起結晶，玻璃（釉）必須慢慢地冷却。

如同 Г·Б·烏里夫确定(32)，結晶速度与顆粒質点对任何結晶界面的結合能成直綫关系，結晶界面的表面張力愈大，結合能也愈大。А·В·舒勃尼科夫在研究結晶形成和生長的过程时曾經指出(32)，形成銳角的两相邻界面，沒有生長能力。他又指出，單是有如上所說的热力学条件是不足以使熔体真正的趋于結晶的。这里同样重要的是要克服晶格构成过程的內阻力。

熔体中构成晶格的分子的扩散是促进結晶的很重要的因素。扩散系数与熔体的粘度成反比。

5. 各种成份对玻璃（釉）結晶的影响

作为多元系统的玻璃，它的物理化学性质到现在为止还没有作过系统的研究。因此在玻璃結晶的领域内，我們只作了为数不多的試驗，这些試驗研究了 Al_2O_3 和 MgO 对鈉-鈣玻璃結晶的影响并个别地观察了某些氧化物对結晶的影响。

从下面我們可以看到，析晶在相当大的程度上决定于玻璃的成份，碱土金属氧化物： CaO 、 MgO 和 BaO 愈多，玻璃的結晶愈强烈；碱金属氧化物： K_2O 、 Na_2O 愈多，結晶愈弱。 SiO_2 含量高的玻璃也有結晶的倾向。大家都知道，純石英玻璃在 1200°C 左右下，会遭致反玻璃化，而轉变成 α -方石英。

现在来分別地研究每一种玻璃态矽酸盐的作用，例如，鈉矽酸盐只是在冷却很慢时才結晶出来；鉀矽酸盐即使在冷却緩慢时，实际上也不結晶；鋰矽酸盐則相反，它很难出現玻璃态。碱金属矽酸盐的結晶倾向随着金属原子量的增大而減弱。至于两价金属的矽酸盐类，除掉鉛矽酸盐外，冷却緩慢时都容易結晶。鉛矽酸盐即使在冷却緩慢时也很难出現結晶状态。

所有的矽酸盐熔体（釉）都具有这种特性。

例如，根据我們的观察(8)氧化鋇甚至当其加入量不大（5—6%）时，也会提高玻璃（釉）的結晶能力。B·П·巴尔扎科夫斯基(6)也曾发现 BaO 在高压电瓷釉中也有同样的影响。他还确定，在同样的釉中，在同样的条件下，5%的氧化鋅几乎没有結晶的征象出現，虽然鋅的原子量比鋇要低得多。釉中含有高量的 ZnO 将导致矽鋅矿 $2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$ 晶体的析出，因而可用来制造特种的結晶釉（参閱第七章）。

根据 B·П·巴尔扎科夫斯基的观察，氧化鋁能显著地提高釉的結晶能力，这种情况与鋁的物理特性完全符合（参閱第五章）。

錳和鉄的氧化物即使是含量极少（5%）也能促进釉的結晶。可是在有鋁的氧化物存在时，釉层中即使含有7—8%的氧化鉄和氧化錳，根据作者的观察指出，也不会出現任何的結晶征象。三

氧化二物—— B_2O_3 和 Al_2O_3 阻碍着玻璃结晶过程的进行，根据И·И·基泰戈罗德斯基的资料(31) Al_2O_3 只是在一定的领域内才表示出这种作用。В·П·巴尔扎科夫斯基(8)在研究各种氧化物对釉的结晶能力的影响时，也确定了 B_2O_3 妨碍结晶，而在高岭土中的氧化铝却加强釉的结晶倾向，这与长石里的 Al_2O_3 不同，它有助于玻璃的生成，其原因是由于 Al_2O_3 在两种条件下具有不同的溶解度。

В·П·巴尔扎科夫斯基研究了高压瓷釉的最适于结晶的温度带，根据他的观察，这个带是在950—990°C的范围内（低于这种釉的开始软化点）。

釉的析晶产生了应力，这是因为通常析出的晶体其密度要比析出晶体的玻璃（釉）本体为大，同时其热膨胀系数也各不相同的缘故。各釉层的不同的热膨胀也能产生上述的热应力（参阅第四章）。

第二章 釉的物理性質和化学性質

1. 粘度和表面張力

如果液体的內层具有一定的速度，那么邻层将被它所带动，邻层与具有起始速度的內层的距离越小則速度越大，距离越大，則速度越小，如此逐漸地递减。这种带动周圍各层运动的力称为液体的內摩擦。两个平行层間的力 f 与层間的接触面积 S 和速度梯度 $\frac{dV}{dx}$ 成正比，数学上用下式表示：

$$f = \eta S \frac{dV}{dx},$$

式中： η ——比例系数，表示液体的性質和状态，称为液体的內摩擦系数或液体的粘度系数。

在这种情况下，当 $S = 1$ 和 $\frac{dV}{dx} = 1$ 时，則 $\eta = f$ 。

因此，粘度系数就是当接触面积等于1速度梯度等于1时液体的两平行移动层的摩擦阻力。粘度的絕對單位是泊。

釉的粘度在頗大的程度上决定了它的流动性質。

矽酸盐熔体的粘度在很寬的範圍內变动。当熔体冷却时，它的粘度最初是慢慢地增大，然后迅速而均匀的增加，一直到液体最終轉变成玻璃。

除了溫度之外，玻璃（釉）的粘度首先决定于它的化学成份。玻璃中每一种成份对其粘度的影响如下：在同一溫度下，鈉玻璃的粘度最小，但冷却时鈉玻璃有比較長的粘度增長的溫度範圍。氧化鉀 K_2O 的作用与 Na_2O 相似，但較 Na_2O 为弱。

在高溫时氧化鈣、氧化鎂和氧化鋁能降低玻璃（釉）的粘度，而在低溫时則相反，能提高其粘度；同时在冷却时这些成份会急剧地縮短粘度增長的溫度範圍。

其他二价金属氧化物，例如： ZnO 、 BaO 、 PbO 也是在高温下降低粘度，而在低温下则提高粘度，但是在冷却时其粘度增高的温度范围远较有 CaO 和 MgO 存在时为长。

价数较高的氧化物如 Al_2O_3 、 TiO_2 和 ZrO_2 能增大玻璃（釉）的粘度，而 B_2O_3 则相反，会减小其粘度，而且粘度的变化相当慢——温度范围长^①。应当指出，当 B_2O_3 的浓度一定时，釉的某些性质会达到最大值或最小值，例如：根据一些研究资料〔5〕得知，掺加硼酸的量在15%以下时能提高粘度，而超过15%时则会急剧降低粘度，在釉的计算中必须考虑到 B_2O_3 的这些特性。

表面张力就是液体表面上力图缩小这一表面的力。表面张力用为了防止表面收缩所需加在该表面的单位边长上的力来测量，一般以1厘米长度上的达因（达因/厘米）数来表示。

玻璃（釉）的表面张力决定于它的化学成份和温度。有文献〔18〕指出过，以钾代替钠，以硼酐代替氧化砷，以钙代替镁和钡会促使表面张力的减小，同样当以氧化钠代替氧化钙和以氧化铬代替二氧化砷时表面张力也会减小。

根据A·A·阿边整理的资料，玻璃的表面张力通常随着温度的提高而减小（负温度系数）。但铅-砷酸盐熔体例外，它的表面张力随着温度的提高而增加（正温度系数）。

表1列出了玻璃中各种氧化物在 900°C （根据季特切尔的数据）〔53〕时的表面张力的数值，在还原气氛中这些数值应该增加20—30%。

研究表1的数据可以得出如下的结论：

1) 玻璃中一价金属氧化物所产生的表面张力随着相应的阳离子的半径的减小而增大；

2) 在主族（门捷列夫周期表中）中两价金属氧化物，如 BaO 、 CaO 、 MgO 具有和一价金属氧化物同样的规律。当加入副族金属——氧化铅和氧化锌时，因其外电子层结构不同于主族金属离子

① 根据M·M·斯科尔雅科夫的资料，在 1300°C 时高压瓷釉的粘度对数为4.4—4.63，在 1350°C 时为4.03—4.30。

表 1

900°C时玻璃中各种氧化物的表面張力（根据季特切尔的数据）

氧 化 物	表 面 張 力 (达因/厘米)	阳离子半徑(根据 哥尔德席密特) Å
K ₂ O	0.1	1.33
Na ₂ O	1.5	0.98
Li ₂ O	4.6	0.78
MgO	6.6	0.78
CaO	4.8	1.06
ZnO	4.7	0.83
NiO	4.5	—
CoO	4.5	—
MnO	4.5	—
BaO	3.7	1.46
PbO	1.2	0.84
Al ₂ O ₃	6.2	0.72*
Fe ₂ O ₃	4.5	0.67
B ₂ O ₃	0.8	0.31*
V ₂ O ₅	0.1	0.59*
SiO ₂	3.4	0.39
TiO ₂	3.0	0.64
ZrO ₂	4.1	0.87

* - 根据鲍林的数据。

的結構——电子数不是 8 个，而是 18 个——因而沒有观察到相似的关系。

3) 从表 1 看出，三价金属氧化物呈现直线的关系：表面張力随着阳离子半徑的增加而增大；

4) 四价元素氧化物尚未找到严密的規律，但可以指出，它近似于三价氧化物。

但是必須指出，这些数据既决定于玻璃（釉）的成份和結構，又决定于被潤湿物料的性质（参閱第四章）。因此表中的数据仅仅是大概的，不是能經常符合于实际的。

近年来做了許多試驗，企图根据熔融矽酸盐玻璃的化学成份

找出計算其表面張力的方法。在這方面值得注意的是 A · A · 阿边〔4〕提出的，在 1300°C 时矽酸盐熔体中某些氧化物表面張力分值的平均值(參閱表 2)，按照加和性公式可計算表面張力数值：

$$\sigma_{\text{熔体}} = \sum \sigma_i \times \gamma_i,$$

式中： σ_i ——各組份的表面張力分值；

γ_i ——熔体中每一种成份的分子数。

矽酸盐熔体中（在 1300°C 时）各組份表面張力分值的平均值（系数）

表 2

組 份	系 数	組 份	系 数	組 份	系 数
SiO ₂	290	MgO	520	FeO	490
TiO ₂	250	CaO	510	CoO	430
ZrO ₂	(350)	SrO	490	Li ₂ O	450
SnO ₂	(350)	BaO	470	Na ₂ O	295
Al ₂ O ₃	580	ZnO	450	CaF ₂	(420)
BeO ₃	390	MnO	390		

矽酸盐熔体在其他溫度下的表面張力，可以根据 A · A · 阿边所提出的，当沒有表面活性組份存在时，溫度每升高 100°，表面張力减小 1—2% 这一規律来大概确定。

Al₂O₃、V₂O₅、WO₃、MoO₃、Cr₂O₃、CrO₃ 和 SO₃ 屬於表面活性物質，其特征是表面張力系数（ σ_i ）是負的，并且变化不定。K₂O、PbO、B₂O₃、Sb₂O₃、P₂O₅ 等氧化物的 σ 值很低（甚至是負值）并且也是变化不定的。

必須指出，表 2 所列的表面張力系数是由 A · A · 阿边在对工业玻璃研究时确定的，工业玻璃無論在均匀性方面或者成份方面都与釉有很大的不同，因此，对于釉，当評定某一种氧化物对表面張力变化的影响时，这些系数只能作为大概的数据。

A · A · 阿边确定了二氧化矽对表面張力的影响是各不相同的，它决定于矽酸盐熔体的成份：当有鈉存在时，二氧化矽能减小表面張力，而在鉛-矽熔体中它能增大表面張力。在后一种情况

下，表面張力还随溫度的提高而更加增大（正的溫度系数），对于其他硝酸盐熔体，表面張力则随溫度的提高而减小（負溫度系数）（參閱前面）。

根据 K·C·耶費斯特罗別耶夫的数据〔7〕，电瓷白釉在 1350°C 时的表面張力約为 435 达因/厘米，棕釉約为 510—524 达因/厘米。

表面張力会降低釉的潤湿性能而引起卷縮——聚集現象（參閱第八章）。

根据 Г·B·烏里夫得出的規律，表面張力决定着結晶面成長的綫速度，表面張力愈大，結晶面的成長綫速度就愈大（參閱前面第一章）。

2. 加和性（加数）規則

玻璃的大部份物理性質：比重、机械强度（抗压和抗張）、膨脹系数、比热、导热性、热稳定性都具有加和性規則。根据加和性規則，玻璃的某种性質可以看作是各組份百分含量的直綫函数。玻璃的每一种上述的性質等于每一种玻璃态氧化物的百分含量与相应的常数的乘积的总和，相应的常数反映出这种氧化物对所求的玻璃性質的影响。

加和性規則用下列的通式表示：

$$X = a_1 k_1 + a_2 k_2 + \dots \quad (1)$$

或者
$$X = \frac{1}{100} (a_1 k_1 + a_2 k_2 + a_3 k_3 \dots), \quad (2)$$

式中：X——所求的性質的数值；

a_1, a_2, a_3 ——某一种玻璃态氧化物的百分含量；

k_1, k_2, k_3 ——某一种氧化物的常数。

第一个公式被应用来計算热膨脹系数、机械强度和彈性，而第二个公式被应用来計算比重、比热和玻璃（釉）的导热性。

必須指出，在实际的結果常常会与加和性規則有偏差，这些偏差主要是因为当玻璃（釉）組份的濃度改变时，其分子的結

表 3

主要玻璃态氧化物的主要物理和性能系数 (常数)

氧 化 物	温度从0° 到100°时 的比热容量	导热系数	体 积 膨 胀 系 数		在玻璃 内的比 重 (根 据索特 和艾凯 尔曼的 资料)	极 限 断裂强 度 (根 据艾凯 尔曼的 资料)	极 限 抗压强 度 (根 据艾凯 尔曼的 资料)	各 类 * 弹 性 模量的加和性 系数 (根 据索特和艾凯 尔曼的資料)			油中个别 氧化物的 弹性模量 (根据哈 耳的資 料) (54)			
			15°时 (根 据索特和 艾凯尔曼 的資料)	100° 以 下 (根据因格 利舒的資料)				A	B	C				
												1%氧化物的 所具有的	1%氧化物 所具有的	1%氧化物 所具有的
二氧化矽 (SiO ₂)	0.1913	2.2×10 ⁻⁵	0.8×10 ⁻⁷	0.15×10 ⁻⁷	2.17	0.09	1.23	70	70	70	80 从40到80 (根据主軸 的成份)			
硼 酐 (B ₂ O ₃)	0.2272	1.6×10 ⁻⁵	0.1×10 ⁻⁷	1.98×10 ⁻⁷	1.46	0.065	0.90	—	60	25	—			
磷 酐 (P ₂ O ₅)	0.1902	1.6×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁷	—	2.38	0.075	0.76	—	—	70	—			
氧化鋁 (Al ₂ O ₃)	0.2074	2.2×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁷	0.52×10 ⁻⁷	3.85	0.05	1.00	180	150	130	100			
氧化鈉 (Na ₂ O)	0.2674	1.6×10 ⁻⁵	10.0×10 ⁻⁷	12.96×10 ⁻⁷	2.55	0.02	0.52	61	100	70	53			
氧化鉀 (K ₂ O)	0.1860	1.0×10 ⁻⁵	8.5×10 ⁻⁷	11.70×10 ⁻⁷	2.66	0.01	0.05	40	70	30	43			
氧化鈣 (CaO)	0.1903	3.2×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁷	4.89×10 ⁻⁷	3.15	0.20	0.20	70	70	—	159			
氧化鎂 (MgO)	0.2439	8.4×10 ⁻⁵	0.1×10 ⁻⁷	1.35×10 ⁻⁷	3.40	0.01	1.10	—	40	30	193			
氧化鉛 (PbO)	0.0512	8.0×10 ⁻⁵	3×10 ⁻⁷	3.18×10 ⁻⁷	9.32	0.025	0.48	46	—	55	—			
氧化鋅 (ZnO)	0.1248	1.6×10 ⁻⁵	1.8×10 ⁻⁷	0.21×10 ⁻⁷	5.65	0.15	0.60	52	100	—	100			
氧化鋇 (BaO)	0.0673	1.1×10 ⁻⁵	3×10 ⁻⁷	5.20×10 ⁻⁷	7.0	0.05	0.65	—	70	30	75			
氧化鉄 (Fe ₂ O ₃)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	190			

* A类: 不含B₂O₃、P₂O₅、BaO和MgO的矽酸盐玻璃;B类: 不含PbO和P₂O₅的磷酸盐;

C类: 磷酸盐、硼酸盐和磷酸盐。