

# 第一届国际轻混凝土 会议文集

中国建筑工业出版社

# 第一届国际轻混凝土 会议文集

宋培建译

郑法学校

中国建筑工业出版社

本书包括苏联、澳大利亚、英国、美国、瑞典等九个国家的二十篇论文。主要介绍轻骨料的生产、性能，轻混凝土拌合料配合比设计，轻混凝土性能和在工业与民用建筑中的应用以及轻混凝土建筑结构的施工、成本分析等。

本书可供从事轻骨料、轻混凝土研究、设计以及施工的有关人员参考。

Proceedings of the First international  
Congress on Lightweight Concrete  
London, May 1968

第一届国际轻混凝土

会议文集

宋培建译

郑法学校

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: 10 3/16 字数: 228千字

1977年11月第一版 1977年11月第一次印刷

印数: 1—4,980册 定价: 0.74元

统一书号: 15040·3385

## 译 者 的 话

第一届国际轻混凝土会议于一九六八年在英国伦敦召开。本书译自这次会议文集的第一卷。第二卷是会议期间的讨论记录、作者答辩以及补充稿件等。

《第一届国际轻混凝土会议文集》第一卷汇集了苏联、澳大利亚、英国、美国、瑞典等九个国家二十余篇论文。遵循伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们翻译了此书，供有关人员参考。值得注意的是，书中介绍的某些经验和数据，特别是关于钢筋混凝土和预应力轻混凝土法规，不完全符合我国的实际情况，希读者根据实际情况，酌情取舍。

本书删掉了原书的前言、无关的叙述以及参考价值不大的论文。原书中错误之处，凡发现的，均予改正。

有些译文沿用了原文中的英制单位，为了读者方便，书末附单位换算表，供读者参考。

由于水平有限，有些地方可能会有误译，望读者批评指正。

1977年1月

## 目 录

### 轻骨料和新拌混凝土的性能、试验、配合比设计以及运送、浇筑等

苏联用于混凝土的轻骨料的结构、组成和某些

性能.....〔苏联〕П.П.布特尼可夫等 (1)

澳大利亚结构用轻混凝土的生产和性能

.....〔澳大利亚〕W.G.瑞安 (23)

英国轻骨料的性能及其在混凝土中的应用

.....〔英国〕D.C.泰切恩 (30)

美国配制轻骨料混凝土的实践.....〔美国〕J.A.汉森 (54)

轻骨料混凝土的处理、搅拌、运送和浇灌

.....〔英国〕J.D.卢埃林 (80)

### 轻混凝土的外观、弹性、收缩、徐变、粘结性、力学强度、耐久性以及隔音、隔热等性能

加气混凝土构件在低层住宅建筑中的应用

.....〔瑞典〕I.文施特勒姆 (91)

加气混凝土的一些性能与实用情况

.....〔瑞典〕O.埃德林德 (106)

轻骨料混凝土无梁平板式楼面结构

.....〔澳大利亚〕F.A.布莱基 (122)

结构用轻骨料混凝土的短期和长期变形

.....〔捷克斯洛伐克〕F.克鲁姆尔 (135)

轻混凝土中钢筋的防锈……………〔民主德国〕W. 舒尔策等 (152)

玻璃质细骨料配制的结构轻混凝土的应用技术

……………〔奥地利〕K.F. 奥特 (168)

## 轻混凝土的应用、经济效果和有关规范

轻混凝土在墨尔本地区, 特别是在高层装配式

住宅建筑中的应用……………〔澳大利亚〕W.P. 布朗 (183)

轻骨料混凝土的应用和经济分析

……………〔美国〕E.V. 康克尔 (196)

苏联应用轻骨料混凝土制品的经验

……………〔苏联〕H.A. 科尔涅夫等 (216)

澳大利亚两座用轻混凝土建造的五十层的高层建筑

……………〔澳大利亚〕J. 施蒂格特 (233)

英国在结构上应用轻混凝土的一些情况

……………〔英国〕G.J. 赞兹 (250)

苏联加气混凝土结构的设计方法

……………〔苏联〕B.B. 马卡里契夫等 (266)

各国关于钢筋轻骨料混凝土和预应力轻骨料混

凝土的规定……………〔西德〕K. 韦舍 (284)

应用玻璃质细骨料轻混凝土的建筑艺术与经济问

题……………〔奥地利〕A. 佩罗蒂 (299)

预应力轻混凝土的有效应用问题

……………〔美国〕B.C. 杰威克 (310)

附录 单位换算 …………… (319)

# 苏联用于混凝土的轻骨料的 结构、组成和某些性能

〔苏联〕П.П. 布特尼可夫 М.П. 埃林桑  
И.А. 雅库勃

在苏联，用天然骨料和人造骨料配制的轻混凝土，做隔热材料和制作墙板和承重构件日益增多。骨料粒径大于5毫米的，松散容重不超过800公斤/米<sup>3</sup>，粒径小于5毫米的，则容重低于1200公斤/米<sup>3</sup>。

由于适宜配制轻混凝土的天然矿藏只有寥寥无几的几个地方，所以在建筑工程中，人造材料占较重要的地位。人造材料有陶粒（膨胀粘土）粗骨料、多孔烧结料、泡沫矿渣和膨胀珍珠岩，以及用这些材料做的轻质砂。近来发展了一种用工业废料和天然原材料生产粗骨料的方法，它与生产陶粒的方法不同。当然，从物理和化学观点来看，用各种原材料和工业废料生产轻质骨料可以有许多不同的方法。

陶粒是用粘土，泥质板岩和粘土页岩或甚至亚粘土制造的。多孔烧结料是用亚粘土，亚砂土，黄土，泥质岩，粘土页岩和粘土质含煤工业废料制造的。泡沫矿渣是用钢铁厂或化工厂的熔融材料直接处理而得。膨胀珍珠岩是用火山岩玻璃——珍珠岩，黑曜岩，松脂岩和玻基斑岩制造的。

同一种原材料常可用来生产不同种类的轻质骨料。但用一种给定的原材料生产一种特定的骨料并不总是经济的。原

材料的选择以及由此引出的规格选择问题是组织轻质骨料生产中必然遇到的首要问题。

生产人造骨料通常的方法是把原材料加热到“高温塑性”状态。

根据原材料的品种，可以通过加热过程中释放气体的膨胀产生孔隙，或者向原材料中引进气体或通过燃烧有机物质产生孔隙。任何一种骨料一般都有一种完美的方法使材料内部产生多孔结构。多孔烧结料是一个例外，它的形成方法不只取决于一个因素，而是由于一系列相关因素。这在下面要详细讨论。

研究和实践经验证明，轻骨料的生产主要取决于下列因素。

在生产膨胀粘土、多孔烧结料和膨胀珍珠岩时，部分材料转变到熔融状态的温度不超过  $1250^{\circ}\text{C}$ 。在生产泡沫矿渣时，熔融材料的温度不超过  $1250^{\circ}\text{C}$ ，而且要一直保持一定的粘度，所需的粘度取决于所生产的骨料的种类，另外就是气体逸出量或引入熔融材料的气体量以及保留在“高温塑性”物质中的气体量。放出气体决定了一些骨料的膨胀程度。亦即使生产出来的骨料颗粒具有规定的容重。

如果熔化体的粘度不对，那末得到的轻骨料就不能令人满意。可能的话，应使骨料颗粒具有均匀的孔隙。

下面将讨论各种轻骨料制造时，膨胀过程中的一些特征。

### 一、四种主要类型的骨料

#### 1. 膨胀粘土（陶粒）

膨胀粘土的多孔结构是由于粘土加热软化，膨胀气体逸出而形成。原材料的膨胀能力取决于它的内在性能和一些其他因素，诸如形状、尺寸、含水量和土丸或土粒的密实程

度，再就是窑内和土丸内部的气体特征、温度以及加热速度。

在高温下，粘土脱水，晶格破坏而形成液相。土丸保持在最高温度区达12分钟。在此期间，粒径5微米以下的颗粒熔化或溶解在熔化体里，石英在熔化体中的溶解深度很小（0.3~3微米）。没有进入熔化体内的颗粒是不活跃的，它阻止着粘土的膨胀。由此可见，原材料中的石英总含量要加以限制。

大量研究的结果指出，为了获得结构良好的轻量级膨胀粘土，原材料至少应含有50%泥质岩（即5微米以下的细粘土颗粒），而大于50微米的砂颗粒不得多于20%。

考虑到膨胀粘土的应用日益增多，下面系统地叙述对粘土颗粒有关的要求。

根据骨料的使用要求，泥质岩和砂的比率可以改变；需要的骨料愈轻，则原材料中的含砂量要愈低。

膨胀粘土的生产取决于固态到液态的转变速度。初液相包含的物质是最易熔的低共熔物，多是像 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 和 $FeO$ 这样的易熔物质。液相随温度升高而增大。粘土中的蒙脱石和贝得石是值得注意的，它们含有最大量的易熔物质，而且特别细。

粉碎的石灰石失去了二氧化碳气体，并在850到1150°C温度下与熔化体同化。粒径在0.1和0.2毫米之间的石灰石颗粒并未完全与熔化体同化，而具有水化能力的游离氧化物存留在核心中。所以对石灰石或其他碳酸盐的含量及其颗粒大小要加以限制。

上面阐述的一般理论，已为实践所证明。这个理论可以作为生产膨胀粘土骨料时，考虑矿物组成选择粘土的准则。

为了使土丸得到最大可能的膨胀，要保一个还原气氛，既要采用内部含有有机掺料或加入有机掺料的原材料，又要使燃烧窑中的土丸在最佳温度下煅烧，保持窑中的干燥时间，热处理、煅烧和冷却之间必要的平衡。

实际上由于需要限定回转窑内的最高温度，土丸是在弱氧化型的大气中煅烧。在土丸中心，通过原材料中有机掺料的燃烧，释放气体，造成一个还原型气氛。存在有机物质时，高温反应递降分解并还原  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。土丸的外壳常厚达 2 毫米，表面粗糙，能增大膨胀粘土骨料的强度，与水泥浆有良好的粘结力，亦即能提高混凝土的强度。

## 2. 多孔烧结料（烧结页岩或其他材料）

装料时，把原材料、燃料松铺在烧结机的炉栅上，并洒水形成炉床。通过燃料燃烧释放出来的热能进行热处理。在燃烧过程中，从炉床下吸入过量空气，由空气产生的氧化型炉气，并不穿透整个料堆。而在土丸中心，由于燃料的气化和不完全燃烧，导致形成还原气氛，并且在整个生产过程都保持这条件。与此同时，在强烈的燃料燃烧区中，温度达到  $1400\sim 1600^\circ\text{C}$ ，而远离该燃烧区的地方仅加热到  $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ 。

多孔烧结料生产过程的主要特征就是高速升温（达到  $250\sim 500^\circ\text{C}/\text{分钟}$ ），当材料进入最高温度区（ $1200\sim 1600^\circ\text{C}$ ），形成烧结层恒温时间要短（不超过  $1\sim 2$  分钟），烧结产品的冷却速度也要快，多孔烧结料在二或三分钟内冷却到  $600\sim 800^\circ\text{C}$  的温度。

高的加热速度导致显著的升温（从  $50$  到  $225^\circ\text{C}$ ）而使原材料脱水和崩碎，在呈液相时的温度下，熔化动力学和熔化体的性质主要取决于烧结中的粘土质材料的矿物组成和细

度，也取决于炉气。

必须强调的是，烧结页岩的多孔隙结构在很大程度上取决于熔化体的数量、组成和性能（粘度、表面张力和冷却时的结晶能力）〔1〕。

多孔烧结料生产过程中，通过游离水和结合水的转移、有机化合物的燃烧、土丸接触点上的烧结、软化物质的吸入空气以及粘土矿物和远离燃烧中心区的某些掺料，在热处理期间释放气体，使熔化材料部分膨胀，从而产生了孔隙。起初，粘土矿物中的游离裂隙水和结合水逸出，形成不规则的内部连通的微细孔隙。然后，随着熔化体粘度的降低，孔隙处就会凝固。这是由于部分膨胀和微细孔隙连成一起两个原因造成的。而微细孔隙的连通是由于气体把比较弱的和粘的孔隙壁破坏了。同时，通过薄膜的破坏和烧结、就形成厚壁的大孔隙。具有最大量不连续的细孔隙的（宽达 0.2 毫米，由薄的玻璃相的壁隔开），是最优的结构。多孔烧结料的主要结构单元是各种组成的玻璃质。毗连单元是来源于原材料的或在熔化体冷却期间形成的剩余结晶组分。

研究和实践指出，与陶粒膨胀粘土骨料相比，在生产多孔烧结料时，原材料应至少含有 15~20%、至多含有 40~50% 的要熔化的粘土物质。

这就是为什么亚砂土、黄土、亚粘土、砂质粘土或合适的工业废料，最宜用于生产多孔烧结料的原因。与陶粒相反，生产多孔烧结料用的原材料中，可以含有大量的石灰石或其他碳酸盐。

### 3. 泡沫矿渣

一般来说，造成熔化物质的过程包括了形成均匀分布的气泡。原先存在的或者向熔化物质中引进的气体或水蒸气，

它们在逸出时受粘性材料的阻力而使熔化体膨胀，在气体释放的同时，熔化体形成结晶。熔化体被大量细晶体贯入，气泡被吸引到表面，从而促进多孔结构的形成。膨胀的程度以及孔隙的尺寸和特征，取决于熔化体的粘度和表面张力，也取决于气体的特性和体积。

膨胀了的熔化矿渣可以看成是由气泡乳化的一种乳油液。玻璃质薄膜把气泡封闭起来，形成囊状泡。

在泡沫矿渣生产中，膨胀过程伴随着气泡的释放，均匀地分布在整個熔化体中，冷却时表面出现各相。因而，熔成矿渣的膨胀与冷却速度密切相关，主要由于温度下降到细晶体形成时，熔化体的粘度会快速地增大。泡沫矿渣生产过程的参数以及材料的性能取决于膨胀中的熔化体的化学组成和物理性能。在泡沫矿渣生产中，可以采用冶金矿渣和含磷矿渣，只要这类矿渣没有倾向于亚铁、锰、石灰或硅酸盐的不稳定性。

#### 4. 膨胀珍珠岩

珍珠岩的膨胀过程的机理，大致与陶粒膨胀粘土骨料类似。

从大量研究结果的分析看出，珍珠岩的膨胀主要取决于下列因素：原材料到“高温塑性”状态的过程；部分材料转变到熔化体，其粘度快速减小；气相的浓集，其压力快速增加；气相压力必需克服熔化体的粘度和表面张力。

珍珠岩生产中气体的主要来源，首先是包含在材料中的岩浆组分；其次是沸石水。在高温煅烧中，使包含在岩石孔隙中的气体释放出来。

人造珍珠岩骨料的性能（容重、强度、稳定性、导热系数等、决定于相的组成和结构。而相的组成和结构都是在材

料软化时形成的，并且由玻璃体、晶体和气相的比率以及晶相类型这二者所决定。

在所有这些类型的骨料中，某些固相化合物能提高骨料在混凝土中的耐久性，而另有一些化合物会导致强度的降低，或者促使混凝土随时间而逐渐变化。这就是为什么可以把人造骨料的相组成和固相结构当作估价质量的标准。

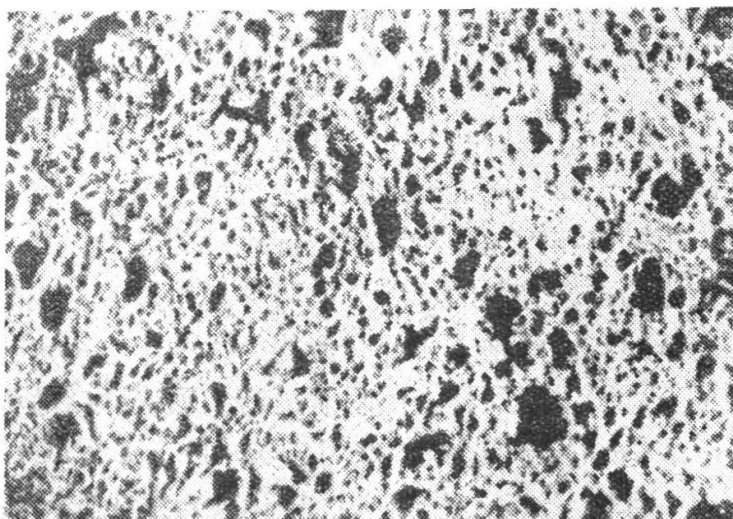
对上述几种轻骨料的相组成的研究指出，相组成是：取决于煅烧不起变化的粘土或部分煅烧的粘土；有再水化能力的脱水粘土；无定形的粘土质物质；膨胀玻璃；烧结泥煤；煤烟碳；煅烧时稍起变化的物质（石英、长石）； $\text{CaO}$ ； $\text{MgO}$ ； $\text{CaSO}_4$ ； $\text{CaCO}_3$ ； $\text{CaS}$ （硫化钙）；硫化铁和硫化锰；硅酸二钙（ $\beta$ 、 $2\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ ）；惰性晶相（黄长岩，假硅灰石，硅钙石、镁蔷薇辉石，辉石）以及新的针形或层状和等轴结晶形式（莫来石，钙长石，赤铁矿，硅石，尖晶石和磁铁矿）。

从上面提到的一些相中，下列的相具有高的强度和稳定性：玻璃体，高硅玻璃体，由莫来石、钙长石和赤铁矿增强的玻璃体；无定形含粘土质物质；与原材料中少量玻璃体和石英相结合的结晶惰性相〔2〕。

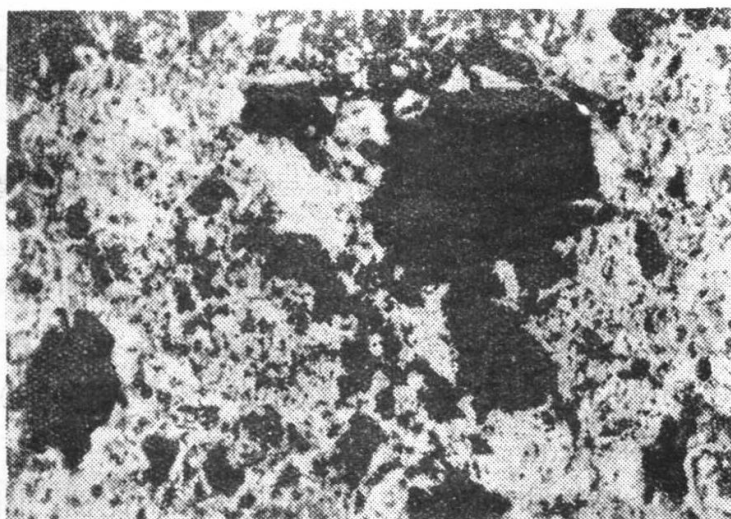
在某些条件下，使骨料的强度和稳定性降低的化合物是：不起变化的和部分煅烧的粘土质物质；烧结碳和煤烟碳； $\text{CaO}$ 和 $\text{MgO}$ ；不稳定的硅酸二钙（ $\beta$ 、 $2\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ ）；也包括硫化铁和硫化锰。

原材料的特性和加热方法决定上列各相的比例，因而决定各种骨料的性能。

图1所示是陶粒（膨胀粘土）、多孔烧结料、泡沫矿渣以及膨胀珍珠岩试样的结构。

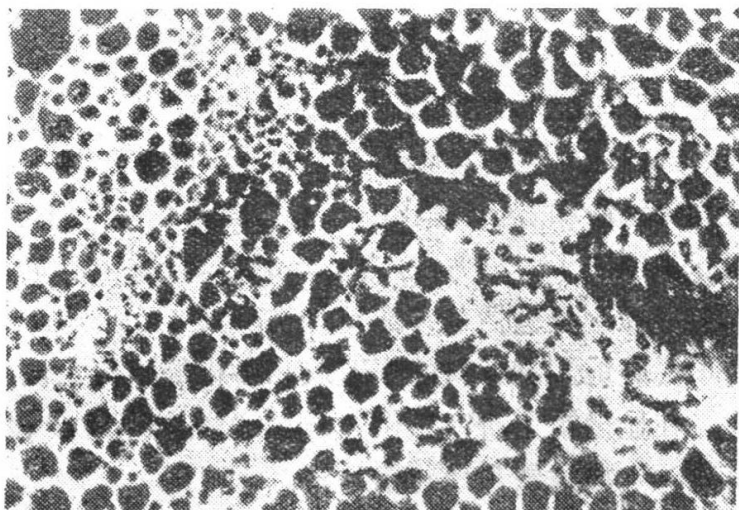


(a) 陶粒 (膨胀粘土)

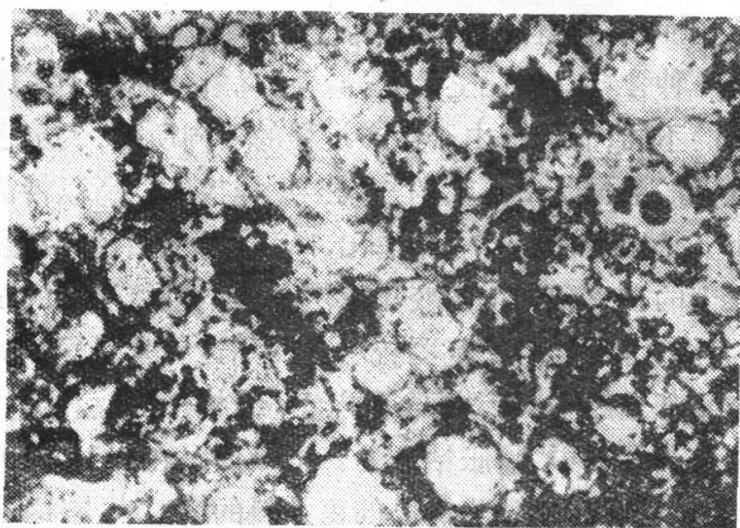


(b) 多孔烧结料

图 1 苏联应用的四种类



(c) 泡沫矿渣



(d) 膨胀珍珠岩

型轻骨料标准试样的结构

下列化合物在骨料颗粒中能引起不稳定的变动：在多孔烧结料中不起变化的粘土质物质（烧结过程控制不当的结果）；有吸水能力的部分煅烧的粘土质物质；烧结碳；烟煤碳和粒径大于5毫米的CaO和MgO颗粒。

对泡沫矿渣的性能有不利影响的化合物是不稳定的硅酸二钙以及硫化铁和硫化锰。

在苏联创造了一种方法，能在10到15分钟内测定骨料中主要的含有物，也包括 $\beta \cdot 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 。

为了更好地测定骨料的相组成和各相的不稳定性，可制成磨片，在显微镜下研究。例如，用10%盐酸溶液浸蚀截面，可以检定硫化铁和硫化锰等等。

## 二、轻骨料的一些主要性能

苏联建筑材料工业生产四种轻骨料的性能列如表1。

表2列出用这些骨料配制的标号为50~100公斤/厘米<sup>2</sup>的（大孔性和密实性的）轻混凝土的容重。

同一种骨料其性能上的差异，可以解释为由于各厂所用原材料的不同，有的是由于生产过程的不同所致。表示膨胀珍珠岩性能的数据是由最大的一家工厂提供的，所以性能上的差异小。从这两个表可约略看出，轻骨料和用轻骨料配制的轻混凝土的容重和强度的变化范围较大。值得注意的是，轻骨料的松散容重的变化范围较小，而用这些骨料配制的混凝土的容重却显然不同。主要用于配制结构—隔热和结构轻混凝土的几种骨料中，膨胀粘土的容重最低，在300~550公斤/米<sup>3</sup>之间。用膨胀珍珠岩制成的粗骨料的容重也是这样。用亚粘土和矿业废料制成的破碎多孔烧结料的容重在450~750公斤/米<sup>3</sup>的范围内。破碎的泡沫矿渣则在475~850公斤/米<sup>3</sup>之间。

苏联一些工厂生产的轻骨料的性能

表 1

| 性 能                               | 陶 粒<br>(膨胀粘土) | 多孔烧结料<br>(烧结页岩等) | 泡沫矿渣      | 膨胀珍珠岩   |
|-----------------------------------|---------------|------------------|-----------|---------|
| 容重(公斤/米 <sup>3</sup> )            |               |                  |           |         |
| 粒径: 5~10毫米                        | 330~850       | 540~750          | 560~850   | 360~390 |
| 10~20毫米                           | 225~715       | 450~650          | 500~750   | 410~470 |
| 20~40毫米                           | 185~635       | 370~610          | 475~610   | 410~470 |
| 破碎成细颗粒的容重<br>(公斤/米 <sup>3</sup> ) | 430~1270      | 750~900          | 690~1130  | 340~560 |
| 破碎材料的孔隙体积                         |               |                  |           |         |
| 粒径: 5~10毫米                        | 40~49         | 50~54            | 52~56     | 43~48   |
| 10~20毫米                           | 41~47         | 48~56            | 56~57     | 48~52   |
| 单颗粒容重(公斤/米 <sup>3</sup> )         |               |                  |           |         |
| 粒径: 5~10毫米                        | 580~1540      | 1300~1690        | 1475~1720 | 490~690 |
| 10~20毫米                           | 400~1240      | 1040~1330        | 1360~1510 | 780~970 |
| 20~40毫米                           | 320~1140      | —                | 1300~1510 | —       |
| 粒径: 10~20毫米的<br>吸水率(%)            | 8~31          | 15~34            | 13~31     | 23~30   |
| 比重                                | 2.04~2.65     | 2.34~2.63        | 2.75~2.96 | 2.21    |
| 圆柱体的抗压强度<br>(公斤/厘米 <sup>2</sup> ) |               |                  |           |         |
| 粒径: 5~10毫米                        | 18~100        | 7~15             | 9~27      | 8~12    |
| 10~20毫米                           | —             | 5~15             | 6~12      | 7~12.5  |

用轻骨料配制的混凝土的容重范围(公斤/米<sup>3</sup>)

表 2

| 骨 料      | 混 凝 土 的 标 号 和 结 构    |               |                      |               |                       |               |
|----------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
|          | 50公斤/厘米 <sup>2</sup> |               | 75公斤/厘米 <sup>2</sup> |               | 100公斤/厘米 <sup>2</sup> |               |
|          | 密实性                  | 开放性           | 密实性                  | 开放性           | 密实性                   | 开放性           |
| 陶粒(膨胀粘土) | 800~<br>1200         | 850~<br>1100  | 900~<br>1200         | 1000~<br>1100 | 900~<br>1300          | 1000~<br>1250 |
| 多孔烧结料    | 1000~<br>1350        | 1000~<br>1250 | 1200~<br>1350        | 1150~<br>1300 | 1300~<br>1450         | 1250~<br>1400 |
| 泡沫矿渣     | 1175~<br>1600        | 1000~<br>1400 | 1175~<br>1700        | 1150~<br>1450 | 1400~<br>1800         | 1250~<br>1550 |
| 膨胀珍珠岩    | 750~<br>910          | 900~<br>1000  | 870~<br>990          | 1000~<br>1100 | 970~<br>1100          | 1100~<br>1200 |