

混凝土真空脱水技术

程作渭 陈章洪 主编



中国建筑工业出版社

混凝土真空脱水技术

程作渭 陈章洪 主编

中国建筑工业出版社

本书内容包括：混凝土真空脱水技术的基础理论、真空脱水装置、真空脱水混凝土的密实机理、真空脱水混凝土物理力学性质、真空脱水轻骨料与细粒混凝土、混凝土真空处理综合工艺、真空脱水混凝土技术的应用以及真空系统的设计及计算等。

本书可供从事土木建筑混凝土工程与科学研究的工程技术人员参考，并可作大专院校的研究生专业教材。

混凝土真空脱水技术

程作涓 陈章洪 主编

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

北京市平谷县大华山印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/32印张：9¹/₂ 字数：212 千字

1986年10月第一版 1986年10月第一次印刷

印数：1—7,700册 定价：1.45元

统一书号：15040·5052

前 言

混凝土真空脱水技术是七十年代混凝土工程新工艺之一。由于真空装置不断改进与完善，国内外使用与研究逐渐广泛。真空脱水技术可应用于混凝土楼地面、机场道坪、道路、桥墩、水工结构以及预制构件等工程中。

本书着重对混凝土真空脱水技术的物理基础、混凝土密实机理、工艺制度、真空脱水装置、真空脱水混凝土的物理力学性能以及真空脱水技术综合工艺与扩大使用等进行介绍，力求理论联系实际。书中收集了国内外近20年的科学研究成果和生产经验。全书共九章二十四节。

本书有不少内容取材于国内有关单位的科研成果，其中有我国著名混凝土研究工作的老专家吴中伟教授和黄大能教授、国家建材局苏州混凝土水泥制品研究院、江苏建筑科学研究所、常州建筑构件厂以及徐自毅工程师的研究成果。此外，选用了城乡建设环境保护部主持的混凝土养护工艺（其中包括真空脱水工艺）鉴定会资料；全国混凝土气垫薄膜真空吸水应用技术交流推广会资料。对此，谨向有关单位或个人表示衷心感谢。

参加本书编写的有五人，其中楼幸年编写第五章第一、三节及第八章第一节；陆乃一编写第六章；舒适编写第七章第一节，并与陈章洪合编第五章第二节；陈章洪编写第四章第一、二节，第七章第二、三节，第八章第二、三、四节及第九

目 录

第一章 绪言	1
一、真空脱水混凝土在国内外发展概况	1
二、混凝土真空脱水技术的优越性及适用范围	4
三、真空度的单位及真空区域的划分	6
第二章 混凝土真空脱水技术的基础理论	9
第一节 混凝土真空脱水的物理基础	9
第二节 新拌混凝土的性质	23
第三章 混凝土真空脱水装置	41
第一节 真空泵	41
第二节 真空吸垫(真空腔)	53
第三节 真空脱水方法	63
第四节 混凝土真空脱水工艺	66
第四章 真空脱水混凝土的密实机理	69
第一节 真空脱水过程中混凝土脱水及密实	69
第二节 真空脱水过程对混凝土组成结构的影响	82
第三节 混凝土真空脱水“有效系数”与“工艺参数”	100
第四节 真空脱水混凝土的配合比	115
第五章 真空脱水混凝土的物理力学性能	133
第一节 真空脱水混凝土的力学性能	133
第二节 真空脱水混凝土的物理性能	144
第三节 真空脱水混凝土的取样方法	165
第四节 真空混凝土组成成分的不均匀性	175

第六章	真空脱水轻骨料(陶粒)混凝土与细粒混凝土	179
第一节	真空脱水轻骨料(陶粒)混凝土	179
第二节	细粒混凝土真空脱水处理	187
第七章	混凝土真空处理综合工艺	196
第一节	振动—真空工艺	196
第二节	真空压榨混凝土	200
第三节	用内泌发综合真空处理方法制作预制构件	214
第八章	真空脱水混凝土技术的应用	229
第一节	真空处理混凝土的热养护	229
第二节	真空脱水混凝土的冬期施工	238
第三节	用真空技术对混凝土进行聚合物浸渍	251
第四节	热拌混凝土真空处理	260
第九章	真空系统的设计及计算	267
第一节	用于真空脱水的真空系统设计原理	267
第二节	用于真空脱水的真空系统计算	282
参考文献		290

第一章 绪 言

一、真空脱水混凝土在国内外发展概况

用真空抽吸装置从混凝土拌合物中脱出一部分多余的水分，使混凝土的水灰比降低并得到密实，从而提高混凝土的强度，尤其是早期强度，并改善混凝土的其他物理力学性能。采用真空脱水技术是混凝土施工工艺的重要改革，它可以节约水泥，提高模板周转率，缩短混凝土养护周期，因此被列为当代混凝土施工四项新技术之一。

为了探索真空脱水技术，早在1909年，德国来因克（Рейнке）公司及伦敦的Peter Jagger先后提出在砌块及混凝土构件生产中使用简单的真空脱水方法，但未能实现。1933年美国费城的Karl P. Billner取得真空混凝土发明专利。此后在三十到五十年代，西欧、苏联和美国等纷纷将真空脱水方法用于预制及现浇钢筋混凝土工程。到了五十年代中后期，各国（尤其是苏联）推广干硬性混凝土，采用强力振动混凝土工艺。而真空工艺由于设备笨重，真空腔复杂以及滤布使用寿命短等原因，因而很少被采用。但是使用强力振动的干硬性混凝土存在设备复杂、耗损快、噪音大、能源消耗多以及构件质量往往产生缺陷等问题，各国又重新广泛采用塑性、流动性混凝土，使混凝土真空工艺开始了新的发展。从六十年代中期开始，苏联及欧洲一些国家又开始研究真空混凝土技术，尤其是瑞典在六十年代末研制出轻巧耐用、能耗

低、性能好的真空脱水设备,从而使该技术重新得到推广。七十年代中期,在斯堪的纳维亚国家约有30~50%混凝土楼板使用真空工艺。七十年代开始,苏联许多研究院及高等学校进行了很多理论研究工作,并制订了用综合真空脱水方法(抽真空过程中加重复振动)制作钢筋混凝土构件的新工艺。此外,西欧和东欧各国、美国、伊朗、印度、伊拉克、澳大利亚等国近年来也不同程度地在推广使用真空混凝土。广泛用于楼地面、停车场、机场道坪、码头、道路、桥梁构件、预制管、现浇柱、壳体屋盖及水工结构等混凝土工程。

目前,国外对真空脱水混凝土的机理与工艺正在进一步研究。法国的I. Leviant,英国的D. F. Orchard,瑞典的R. Malinowski,苏联的Н. А. Сторожук,Л. А. Полонский等均作出了贡献。

我国在五十年代曾一度使用过真空脱水技术,主要在水工建筑。从六十年代开始,原国家建筑材料工业总局水泥研究所(原四川水泥研究所)着手研究真空混凝土。他们对真空细粒混凝土进行了系统的试验研究。

近年来,国内真空混凝土工艺,在理论研究与应用技术方面都取得较大进展。在原国家建筑材料工业总局的组织领导下,于1979年开始组成以江苏省建筑科学研究所为主有天津大学,南京真空泵厂与常州构件厂等单位参加的协作组。江苏省建科所与南京真空泵厂合作,自行设计研制成功HZJ-40型混凝土真空脱水机组和柔性上吸垫,该设备轻巧灵活。此外,该协作组对真空脱水工艺参数及真空脱水混凝土的物理力学性能进行了研究,并于1982年11月在江苏常州通过了部级鉴定。与此同时,国家建筑材料工业总局从瑞典引进“DYNAPAC”真空脱水专用泵,江苏扬州建筑机械厂研制

成功HZX-60型真空脱水装置。同年苏州水泥制品研究所与江苏省公路局合作,研制成功V82型气垫薄膜吸垫。

随着上述真空混凝土装置的研制成功,为推广该工艺提供了有利条件,全国十余个省市自治区逐渐应用于现浇混凝土施工及预制构件生产中。

例如:国家建筑材料工业局苏州水泥制品研究院、苏州建科所、苏州构件厂与东北工业建筑设计院协作,设计了 $3.3 \times 4.8\text{m}^2$ 双向预应力密肋楼板的刚性下吸振动真空工艺,1978年正式投产以来,到1982年已生产20多万 m^2 的楼板,取得较好的技术经济指标。

天津建筑科学研究所,中国建筑工程总公司二局科研所、二局构件厂合作研究了上吸式重复振动真空工艺,采用双层铁丝网刚性吸水真空腔,生产了 $3.3 \times 4.5\text{m}^2$ 复合墙板及 $3.2 \times 4.4\text{m}^2$ 双向预应力大楼板,构件养护后强度较未真空振动处理的提高20~30%,同时也缩短静停时间及生产周期。

北京市建筑工程研究所和北京市第二构件厂也研究真空上吸工艺,对折线窑蒸养流水线上的 $2.9 \times 3.9\text{m}^2$ 轻混凝土外墙板进行面层吸水处理,使静停时间由原来的6h缩短到3h,提高产量达45%。

江苏省建筑科学研究所与常州、无锡构件厂采用真空上吸水与热平模养护复合工艺取得明显的技术经济效果,可缩短静停时间4~6h,从而加速了模板的周转,缩短了工序衔接时间。经真空作业后即可原浆抹面,热养护后的混凝土强度可提高20~30%,制品养护时的供蒸汽时间由原来的15~19h缩短到8~10h,蒸汽耗量由原来的 $450\text{kg}/\text{m}^3$ 降到 $300\text{kg}/\text{m}^3$,养护时间从原来的16~20h降至10~12h。单线

投资（锅炉房及土建除外）为同等规模的连续湿热隧道窑的1/3。江苏省建科所还与南京市建筑工程局合作，在南京金陵饭店主楼（37层框架结构）现浇楼板冬季施工，南京罐头厂升板楼板叠制工程，江苏省空军机场道坪以及江苏省公路局公路等现浇混凝土工程中均成功地使用了真空上吸工艺。

东北工业建筑设计院与大连构件一厂合作，在折线窑养护 $4.4 \times 3.22\text{m}^2$ 大楼板生产线上采用真空上吸工艺，提高了板面质量和制品强度，缩短了蒸养时间。

天津大学土木系真空脱水混凝土研究小组从79年开始对真空脱水混凝土的物理力学性能进行了较系统的研究，为真空脱水技术的推广应用提供了一定依据。

二、混凝土真空脱水技术的优越性及适用范围

（一）有利于混凝土拌合物机械化输送并改善成型条件

由于真空混凝土采用了较大的初始水灰比，使拌合物的流动度大为提高，从而为泵送或气力输送等机械化输送创造了条件，经验证明，泵送混凝土经真空处理后效果极好。同时，在浇筑成型中，只需稍加振动即可密实。这就有利于简化振动成型设备，降低动力消耗，减少振动噪音。

（二）实现快速脱模与立即抹光

真空脱水后的混凝土，由于降低了水灰比，提高了密实度，而使内摩擦力增加；由于提高了净浆浓度，在“微细骨架”内均布而细小的毛细孔具有很大的内聚力，使拌合物成为粘土状的集聚体——“假凝结构”，立即具有一定的初期结构强度——瞬时强度。

通过计算可知，此时拌合物可支持4m左右高度的自重，这对于混凝土柱、墙来说，可使高度较大的现浇模板的刚

度要适当降低,如不考虑振动的影响,甚至可不用支撑;在浇筑10~15min后,能实现快速脱模,从而可重复使用而节省模板80%左右。

对整浇的楼地板、道路和飞机场道坪等在真空处理后,可立即进行机械抹光。从浇筑到抹光只需1.5~2h,这对缩短生产周期与提前交付使用都大为有利。

(三) 缩短养护时间,实现快速蒸养

国内外试验资料表明,真空混凝土的早强特性极其明显,其1d强度较振动混凝土提高100%,3d强度提高75%,7d强度提高50%;7~9d强度即能达到28d的强度指标。

在很多情况下,真空混凝土的强度增长速度较快,这对不宜蒸养的大面积施工,有利于缩短工期并降低成本。对多层现浇混凝土楼板,可使底模的脱模时间从7~14d缩短为3~7d。

由于真空混凝土在湿热处理时具有抑制结构破坏的稳定性,残余变形小,因而可采用快速蒸养制度。以真空混凝土与振动混凝土相比,可缩短甚至取消静停期,提高升温速度,减少恒温时间并采用自然降温,使蒸养周期限制在8h以内而达到70~75%强度。

(四) 全面改善混凝土的物理力学性能,提高构件质量:

1. 无论自然养护、蒸汽养护、热模或太阳能养护,真空混凝土的各个龄期抗压强度均有不同程度提高。无重复振动的真空混凝土的28d强度可提高15~25%,后期强度仍稍高于非真空混凝土。

2. 真空混凝土28d劈裂抗拉强度提高15~30%,抗折强

度约提高10~15%，与钢筋粘结力提高50~100%以上。

3.真空混凝土28d 静力弹性模量提高15~30%，动力弹性模量提高10%。

4.真空混凝土28d 的表面耐磨提高一倍，干缩减少10%，抗冻性有所增强；纯真空混凝土的抗渗性比非真空混凝土有所降低；而重复振动的真空混凝土的抗渗性优于非真空混凝土。

真空混凝土的物理力学性质全面得到提高，因而改善了混凝土的耐久性，提高构件质量。真空混凝土与老混凝土的粘结性能提高较大，因而国外将其用于装配整体式构件接头二次浇筑，效果很好。由于耐磨性的提高，也提高了楼地板，道路、机道坪，水工结构的耐久性，美国某仓库混凝土楼板的耐久性提高四倍，省去了耐磨表面层的敷设。

三、真空度的单位及真空区域的划分

真空度是对气体稀薄程度的一种客观量度。其直接的物理量应该是每单位体积中的分子数。但是，由于历史上的原因，真空度的高低通常都用气体的压强来表示。气体压强越低，真空度越高；反之，压强越高，真空度越低。

气体的压强，是指气体作用于单位面积器壁上的压力，故其单位取决于力及面积所采用的单位。在CGS单位制中，力的单位为达因（dyn），面积单位为 cm^2 ，故压强单位为 dyn/cm^2 ，1 dyn/cm^2 称为1微巴（microbar）。在MKS单位制中，力的单位为牛顿（N），面积单位为 m^2 ，故压强单位就为 N/m^2 ，1 N/m^2 称为一帕斯卡（Pascal），简称帕（Pa）。帕是国际计量大会所规定的国际单位制压强单位，原则上世界各国均应采用。但因早期都用汞柱高度测量压强，故毫米汞柱（mmHg）做为压强单位仍然沿用至

今，并曾将760mm纯汞柱高规定为一个标准大气压。按国际单位制单位为：

$$1 \text{ 标准大气压 (atm)} = 10^5 \text{ Pa}$$

本书中的单位采用我国国务院1984年2月颁布的“法定计量单位制”，故压强的单位采用帕(Pa)。考虑到广大读者对原有毫米汞柱(mmHg)等旧单位比较熟悉，而新采用的帕(Pa)还不太普及，因此书中凡出现压强单位的地方除以Pa表示外，并用括号标出其旧单位，以方便读者对照参比。

各种压强单位的换算见表1。

压强单位换算表

表 1-1

单 位	帕 (Pa)	托 (Torr)	微米汞柱 (μ Hg)	微巴 (μ ba)	毫巴 (mba)	大气压 (atm)	磅/ 英寸 ² (lb/in ²)
1 帕 (1N/m ²)	1	7.50062×10^{-3}	7.50062	10	10^{-2}	9.86923×10^{-6}	1.450×10^{-4}
1 托 (1mmHg)	133.322	1	10^3	1333.22	1.33322	1.31579×10^{-3}	1.934×10^{-2}
1 微米汞柱	0.133322	10^{-3}	1	1.33322×10^{-3}	1.33322×10^{-3}	1.31579×10^{-6}	1.934×10^{-5}
1 微巴 (1dyn/cm ²)	10^{-1}	7.50062×10^{-4}	7.50062×10^{-1}	1	10^{-3}	9.86923×10^{-7}	1.450×10^{-5}
1 毫巴	10^2	7.50062×10^{-1}	7.50062×10^3	10^3	1	9.86923×10^{-4}	1.450×10^{-2}
1 大气压	101325	760	760×10^3	1013.25×10^3	1013.25	1	14.696
1 磅/英寸 ² (1普西)	6895	51.715	51.715×10^3	6.895×10^4	68.95	6.805×10^{-2}	1

关于真空区域的划分问题，在此只需粗略地指出真空度的范围，而无需指出具体数量时，通常为了方便，就使用真空区域的说法。真空区域的划分，国际尚没有统一规定，国内的划分又不统一，现参考有关文献，分为五个区域，见表1-2。

真 空 区 域 划 分

表 1-2

真 空 区 域	真 空 压 强
粗 真 空	101325~1333.22Pa (760)~(10托)
低 真 空	$133.32 \times 10^{-1} \sim 10^{-3} \times 133.32 \text{Pa}$ (10)~(10^{-3} 托)
高 真 空	$10^{-3} \times 133.32 \sim 10^{-8} \times 133.32 \text{Pa}$ (10^{-3})~(10^{-8} 托)
超 高 真 空	$10^{-8} \times 133.32 \sim 10^{-12} \times 133.32 \text{Pa}$ (10^{-8})~(10^{-12} 托)
极 高 真 空	$< 10^{-12} \times 133.32 \text{Pa}$ < (10^{-12} 托)

第二章 混凝土真空脱水技术 的基础理论

第一节 混凝土真空脱水的物理基础

一、气体分子运动

现代物理中把压力低于大气压的气体看作真空状态，或称此状态为真空，气体压力可称为真空压力 P_v 。根据气体分子动力理论，气体中发生的所有物理现象，特别是当真空发生的物理现象，都由于气体分子运动的机械过程。

气体分子是永久不停地作无规则的运动，在这种运动中，分子和它周围的分子互相碰撞，在碰撞时，就象弹性球一样地来回运动。在此情况下，分子间产生相互作用力，作用力的大小决定于分子间的距离，分子间距离增大，相互作用力减小，相反分子间距离减小时，相互作用力增大。气体分子在相互的作用下改变自己的运动方向，产生碰撞过程。

气体的压强，是由于分子对器壁的碰撞而产生的，压强大小决定条件为：

1. 气体分子撞击到器壁表面的速度越大，它所产生的压强也越大；
2. 在单位时间内撞击到器壁表面分子数目越多，表面上所受的压强越大。为了使问题简化，对气体分子的性质作以下假定：

(1) 同类气体分子的质量是相等的；

(2) 气体分子本身的大小可以忽略不计, 每个分子可以当作弹性小球来看待;

(3) 假定气体分子间的平均距离相当大, 因此除碰撞外, 分子间的相互作用力可以忽略不计, 重力影响也不计;

(4) 由于容器中气体密度到处均匀等事实, 对于大量分子来说, 沿各方向运动的机会是均等的, 故沿各方向运动的分子数目也相等, 而每个分子运动的速度在各个方向的分量的各种平均值也是相等的。例如: $\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$ 。

设一个边长分别为 l_1, l_2, l_3 的长方形的容器, 见图2-1所示。并设容器中有 N 个同类气体分子, 作不规则的热运动, 每个分子的质量都是 m 。

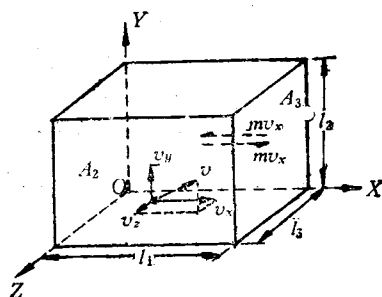


图 2-1 推导气体压强公式图

在平衡状态下, 器壁各处的压强完全相同, 现计算器壁 A_1 所受的压强, 先选一分子 α 来研究, 它的速度 v , 在 X、Y、Z 三个方向的速度分量分别为 v_x 、 v_y 、 v_z 。当分子 α 撞击器壁 A_1 时, 它将受到器壁 A_1 沿 $-x$ 方向所施的作用力, 因为碰撞是完全弹性的, 所以就 X 方向的运动来看, 分子 α 以速度 v_x 撞击 A_1 面, 然后以速度 $-v_x$ 弹回。这样, 每与 A_1 面碰撞一次, 分子动量改变为 $(-mv_x) - mv_x = -2mv_x$ 。按动

量定理，这一动量的改变等于 A_1 面沿 $-X$ 方向，作用在分子 α 上的冲量。根据牛顿第三运动定律，这时分子 α 对 A_1 面必有一个沿 $+X$ 方向的同样大小的反作用冲量。在与 A_1 面作相继两次碰撞之间，由于分子 α 在 X 方向的速度分量 v_x 的大小不变，而在 X 方向上所经过的路程是 $2l_1$ ，因此所需时间为 $\frac{2l_1}{v_x}$ ，在单位时间内，分子 α 就要与 A_1 面作不连续的碰撞共 $\frac{v_x}{2l_1}$ 次。因为每碰撞一次，分子 α 作用在 A_1 面上的冲量为 $2mv_x$ ，在单位时间内，分子 α 作用在 A_1 面上的冲量总值为 $2mv_x \frac{v_x}{2l_1}$ 。同理，在单位时间内，任一分子 i 在 A_1 面上作用的冲量总值都可记作 $2mv_{ix} \frac{v_{ix}}{2l_1}$ 。

上述分析可知，每一分子对器壁的碰撞以及作用在器壁上的冲量是间歇的不连续的。但是，事实上容器内所有分子对 A_1 面都在碰撞，且由于分子总数 N 很大，因此从时间上说，这样的碰撞是均匀地先后参差的。从空间分布上说，是均匀地遍及整个 A_1 面的，其总的效果是使器壁受到一个连续而均匀的压强。正像密集的雨点打到雨伞上一样，感到一个均匀的作用力。 A_1 面所受的平均力 $\bar{F}$ 的大小应该等于单位时间内所有分子与 A_1 面碰撞时所作用的冲量的总和，即：

$$\begin{aligned}\bar{F} &= \sum_{i=1}^N \left(2mv_{ix} \frac{v_{ix}}{2l_1} \right) \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{mv_{ix}^2}{l_1} = \frac{m}{l_1} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2\end{aligned}\quad (2-1)$$

式中 v_{ix} 是第 i 个分子在 X 方向上的速度分量。按压强定义