

第 1 章 绪论

1-1 混凝土结构发展简介

1-1-1 混凝土结构特点

采用混凝土作建筑结构材料，主要是混凝土的原材料（砂、石等）来源丰富，钢材用量较少，结构承载力和刚度大，防火性能好，造价便宜。

1-1-2 混凝土结构发展概况

自 1903 年我国建成第一座钢筋混凝土建筑——上海东风饭店后，混凝土已逐步成为我国发展高层建筑的主要结构材料。据统计，在国有建筑企业年竣工面积中，混凝土结构所占比重，从 1984 年的 29.9%，逐年递增，到 1995 年已达到 58.5%，见表 1-1。其中 10 层以上的高层建筑占 90% 左右，见表 1-2。

表 1-1 国有建筑企业竣工建筑各类结构比重 (%)

年度	钢结构、 钢—混结构	混凝土 结构	混合	砖木	其他
1984	1.6	29.9	66.5	0.5	1.5
1985	1.4	35.1	62.1	0.3	1.1
1986	1.8	39.6	56.9	0.5	1.2
1987	2.7	46.8	48.8	0.4	1.3
1991	2.8	51.0	45.2	0.3	0.7
1992	2.1	52.5	44.1	0.4	1.0
1993	2.8	52.9	42.8	0.4	1.0
1994	1.5	53.2	44.0	0.5	0.8
1995	3.5	58.5	36.2	0.4	1.4

表 1-2 建设部系统国有建筑企业 10 层以上竣工建筑结构比重 (%)

竣工结构	1984 年	1986 年	1991 年	1993 年	1995 年
钢筋混凝土结构	91.7	95.7	94.1	91.1	87.3
钢结构及钢—混凝土结构	1.1	1.3	2.5	3.9	6.1
混合结构	6.1	3.0	2.7	3.8	6.5
其他	1.1	0	0.7	1.2	0.1

1-2 混凝土结构分类

1-2-1 按结构类型分类

1-2-1-1 竖向结构

建筑结构主要是承受垂直荷载和水平荷载。垂直荷载要求结构具有足够的抗压强度，水平荷载则要求结构具有足够的抗弯、抗剪强度以及刚度和延性。层数越高，水平荷载的作用越突出。

不同结构类型所能承受的水平荷载能力不同，因此，他们均有各自的特点和适用范围。

混凝土结构按竖向结构类型分类；主要可分为：框架结构、剪力墙结构、框架—剪力墙结构和筒体结构等几种主要结构类型。

1. 框架结构

框架结构是由柱和梁、板所组成的承重结构。由于不设承重墙，建筑平面布置灵活，可以形成较大的空间，特别适用于各类公共建筑和仓库、车间。

如果柱间梁的高度压缩到与楼板同样高度，成为楼板内的暗梁，称为板柱体系。平面布置更为灵活，层高也可适当降低。

框架承受垂直荷载的能力强，抵抗水平荷载的能力较低，侧向刚度差，水平位移大。

高烈度地震区一般不宜采用纯框架结构建造高层建筑。

在我国，框架结构高层建筑已有较长的发展历史，从 20 世纪 20 年代 ~ 60 年代兴建的高层建筑基本上采用钢筋混凝土纯框架结构。

2. 剪力墙结构

剪力墙结构是由承重墙和楼板组成的承重结构，以承重墙代替框架中的梁、柱承受建筑物的垂直荷载和水平荷载。由于建筑结构的承重墙除了要承受由于垂直荷载所产生的竖向压力外，还要承受由水平荷载所产生的剪力和弯矩，所以称为剪力墙，国外也有称结构墙的。

剪力墙结构较框架结构承受水平荷载的能力强，刚度大，水平位移小。故建造层数一般比纯框架结构要多。剪力墙既作承重墙，又作围护墙。

剪力墙结构由于承重墙多，不如框架结构灵活。改善途径之一是适当扩大承重墙的间距，采用大开间；如住宅的开间由 2.4 ~ 4.2m 发展到 4.8 ~ 7.2m，分户墙仍为承重墙，户内分室墙采用轻隔墙；旅馆的客房开间由 3.3 ~ 4.5m 发展到 6.6 ~ 9.0m，每两间设一道承重墙和一道轻隔墙。改善途径之二是减少承重内纵墙，以增加进深方向的灵活性。

为了解决住宅、旅馆等高层剪力墙结构的底层设置商店、餐厅、门厅、会议厅等大空间的需要，可以采用底层为部分框架，上部标准层为剪力墙的框支剪力墙结构，如图 1-1。

在地震区，不允许采用底层为纯框架的鸡腿式框支剪力墙结构，而应将一部分剪力墙落地形成封闭筒体，成为象腿式框支剪力墙结构，落地剪力墙的间距 L 不宜大于建筑物宽度 B 的 2.5 倍（如图 1-2）。

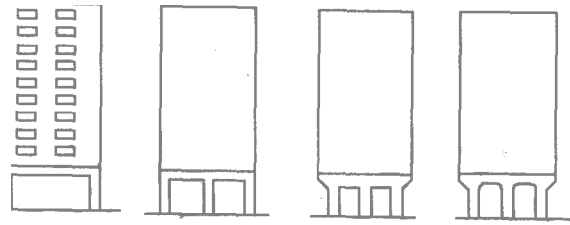


图 1-1 框支剪力墙结构剖面图

3 框架—剪力墙结构

在框架结构中设置一部分剪力墙（如在楼梯间、电梯间等部位），形成由框架和剪力墙共同作用的框架—剪力墙结构。与框架结构相比，增强了抵抗水平荷载的能力，提高了侧向刚度；基本保持了平面布置灵活的优点。房屋的垂直荷载通过楼板分别由框架和剪力墙共同承担，而水平荷载则主要由剪力墙承担。

由于框架—剪力墙结构兼具框架结构和剪力墙结构的优点，从 20 世纪 70 年代初以来，已广泛应用于各类公共建筑、旅馆和厂房、仓库。

4. 筒体结构

筒体结构是由框架结构和剪力墙结构发展而成的一种空间结构。由若干片纵横交接的框架或剪力墙，与楼板连接，围成筒状封闭骨架。

筒体结构由于具有承受水平荷载的良好刚度，并能形成较大的使用空间，多用于较高的建筑物。

筒体结构可分为框架—筒体、筒中筒和组合筒，其中组合筒包括成束筒和成组筒，见图 1-3。我国目前采用前两种筒体结构较多。

框架—筒体结构的内筒结构是指在建筑的平面中心部分设置由电梯井、楼梯间、管道间和服务间等形成的筒体，而建筑物的周圈为一般柱距的框架，由内筒承受主要的水平荷载和一部分垂直荷载，外框架仅承受另一部分垂直荷载和很小的水平荷载。

筒中筒结构由内筒和外筒组合而成，通过楼板协同工作，可以共同承担很大的水平荷载。外框架密柱的间距一般在 3m 以内。内筒通常为单筒，也有采用双层筒或三层筒的，如香港合和中心内筒即为三层筒，外筒直径 48m，柱距 3.05m，最大内筒直径 22m。

成束筒是由若干单元筒集中成一体，从而形成刚度极大的空间结构，如目前世界上已建成的超高层建筑芝加哥西尔斯大厦就是由 9 个方形筒形成，每个筒的平面尺寸为 22.9m × 22.9m，整个建筑的平面尺寸为 68.7m × 68.7m。

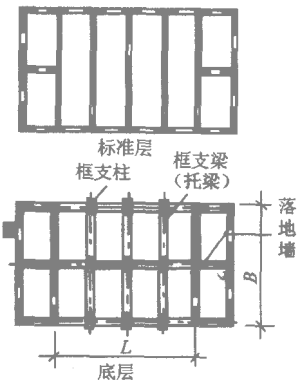


图 1-2 底层大空间剪力墙结构平面图

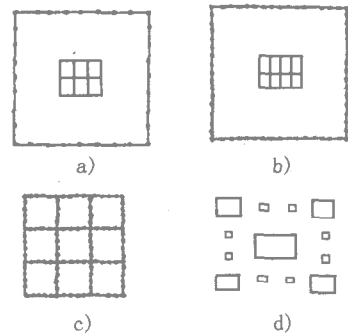


图 1-3 各种筒体典型平面图

- a) 框架—筒体 b) 筒中筒
c) 成束筒 d) 成组筒

成筒是若干个单筒通过楼面组合成的空间结构。

此外，还可在内筒的周围按照客房或办公的需要设置剪力墙，形成剪力墙—筒体结构（如图 1-4）。

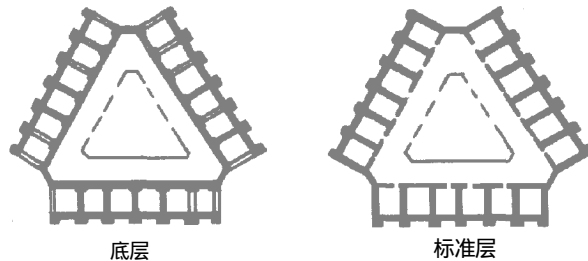


图 1-4 剪力墙—筒体结构示意图

筒体结构是近 20 年来在我国迅速发展起来的，已建成的有深圳国际贸易中心、北京彩电中心、上海电信大楼等。

1-2-1-2 水平结构

上述四类竖向混凝土结构体系所采用的楼盖结构，也由于多层和高层建筑抗震设防的不同而不同，前者可以采用预制楼盖，后者则多采用现浇楼盖。房屋建筑的楼盖结构应符合整体性好、刚度大、结构高度小、自重轻、满足使用要求、造价合理和施工方便等要求；主要有以下几种类型：

1. 有梁楼盖

框架结构传统做法采用有梁楼盖，大柱网常采用主梁—次梁—楼板的做法。优点是楼板厚度较薄，刚度较好；缺点是梁的高度大，层高增大，也不利于灵活布置平面，施工较复杂。

2. 无梁楼盖

在框架和框架—剪力墙结构中，将梁高降至与楼板同一高度，形成楼板中的暗梁，故称为板柱结构；在剪力墙结构中，通常采用无梁平板，称为板墙结构。

为了保证结构的水平刚度，采用平板式楼盖需有一定的厚度。板柱结构中设柱帽的最小厚度为 12cm；无柱帽的最小厚度为 15cm。大跨度无梁楼盖（筒体结构和板柱结构）为了减轻自重，增加楼盖自身的结构刚度，多采用无黏结预应力混凝土楼盖（单向或双向），跨度可达到 6m~12m。

3. 密肋楼盖

由薄板与小梁组成，小梁的断面小且密，故称密肋。密肋可以是单向支承，也可是双向支承（如图 1-5），板的厚度可小至 5cm~6cm。这种楼盖一般用于大柱网的展厅、书库、阅览室等。

4. 叠合楼板

目前，采用的有压型钢板或各种配筋（预应力钢筋、双层钢筋、冷轧扭钢筋）的预制混凝土薄板作现浇层的永久性模板，其上浇筑混凝土，形成叠合层。

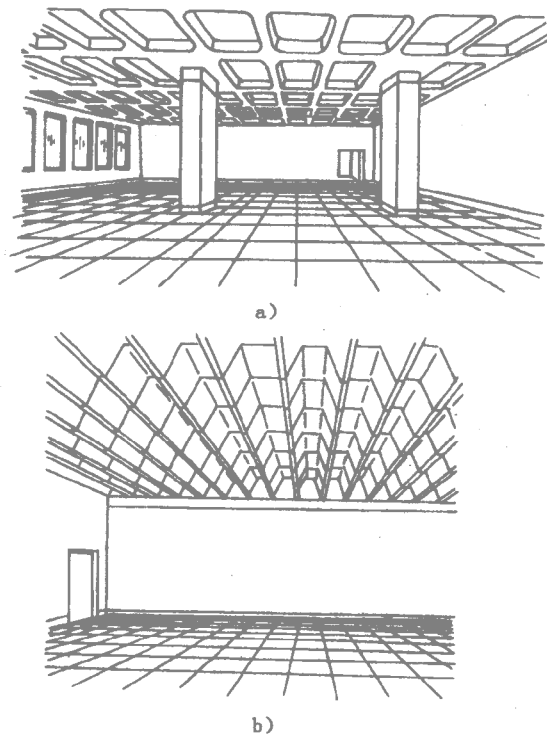


图 1-5 密肋楼板
a) 双向 b) 单向

1-2-2 按施工工艺分类

混凝土结构的成形方法，是完成混凝土结构的主要施工工艺。混凝土结构的施工工艺主要可分为全预制装配、全现浇、预制与现浇相结合三种。这三种施工工艺又与不同的结构体系有关。因此，混凝土结构的结构构造不同，其选用的施工机具、施工组织和技术经济效果也就不相同。所以，混凝土结构的施工工艺现已成为建设单位、设计和施工单位共同关心的问题。

以下按不同的混凝土结构体系分别介绍其施工工艺概况。

1-2-2-1 框架结构（包括框架—剪力墙结构）施工工艺概况

1. 全预制装配式框架结构

梁、柱、楼板等构件全部在工厂或施工现场预制，现场组拼全部靠焊接连成整体。如 1958 年兴建的北京民族饭店（12 层）是我国首次采用全预制装配式高层框架结构；1959 年兴建的北京中国民航局办公楼（14 层），除预制框架外，还首次采用了预制外墙；以后又在北京外交公寓（16 层）等工程中推广。

全预制装配高层建筑的工业化程度高，现场工作量小，施工速度快，但不能充分保证高层建筑抗震要求，预制构件的种类、型号、规格尺寸繁杂，需要由有一定规模和生产技术水平较高的构件厂加工制作，焊接量大，造价也较高。因此，从 1976 年唐山地震以来，

在国内高层建筑中已不再采用全预制装配框架。

2. 全现浇框架结构

板、梁、柱的全部混凝土都在施工现场建筑物上就地浇筑。这是应用最广泛最常见的成形方法，这种方法整体性好，适应性强。但施工现场工作量大，存在现浇混凝土的拌制、运输、浇灌、振捣、养护等问题。

改革开放以来，特别是高层建筑的兴建，现浇工业化施工工艺有了很大的发展，模板技术已发展成定型化、工具化；粗直径钢筋现场连接技术已系列化；混凝土已发展为预拌商品混凝土和泵送技术，成为混凝土结构发展的主导工艺。

3. 装配整体式框架结构

为了满足抗震要求，将预制装配框架的梁柱接头由焊接改为现浇钢筋混凝土连接，提高了结构的整体性，在地震区可用于高度不超过 50m 的高层建筑。

4. 现浇框架、预制梁和楼板框架结构

这是现浇和预制相结合的施工工艺。将施工较简易的竖向结构采用现浇工艺，而施工较复杂的水平结构采用预制工艺，就形成了现浇柱、预制梁板框架。这种结构施工较适用于符合标准化系列参数，且当地有商品梁、板构件供应的建筑。

5. 升板结构

是将预制柱和楼板在现场进行预制，也有采用在现场现浇筑、预制楼板，但楼板是采取就位重叠生产，然后将升板机安装在柱头上，将各层楼板逐一提升到设计位置，并与柱连接固定。

升板法施工可以节约大量模板，减少高空作业，不需大型起重设备，节约施工用地，特别适用于现场狭窄的建筑。

6. 整体预应力板柱结构

整体预应力板柱施工的特点是采用预应力方法将预制的柱子和楼板等构件拼接起来，并与剪力墙结合，现浇连接成整体空间结构。

这种建造方法从 20 世纪 70 年代后期在国内开始试验和推行，在北京和成都已分别建成 12 层科研楼、教学楼和 15 层旅馆。

1-2-2-2 剪力墙结构施工工艺概况

1. 预制装配式工艺

将墙板、楼板以及楼梯、阳台等全部采取在工厂预制生产，运往施工现场安装，简称装配式大板建筑，多用于建造住宅。我国 1959 年开始试验装配式大板建筑，多用于建造多层住宅。1974 年用于高层，已建成一批 10~18 层高层住宅。

大板建筑预制装配化程度高，现场工作量少，施工速度快，劳动条件有所改善。高层大板建筑较多层大板建筑在造价、材料耗用量及用工上增加不多，具有较好的经济效益。

在我国进一步发展装配式大板高层建筑，还需要着重解决好抗震措施和多样化的问题。

2. 全现浇施工工艺

(1) 大模板工艺：我国从 1974 年在高层民用建筑中开始采用大模板工艺，整体性好，墙面平整，技术较易掌握。大模板建筑的内承重墙均用大模板施工，外墙逐步形成现浇、

预制和砌筑三种做法，楼板可根据不同情况采用预制、现浇或预制和现浇相结合三种方式。

大模板建筑除大量用于住宅建筑外，高层旅馆也较多地采用了大模板施工方法，如北京的燕京饭店、西苑饭店、昆仑饭店、兆龙饭店、京西宾馆、和平宾馆、渔阳饭店和广州的白天鹅宾馆等。

(2) 滑模工艺：国内 1974 年开始将滑模工艺用于民用建筑，其整体性好，结构施工速度快，在寒冷地区近年发展了冬施滑模技术。对高耸建筑物、构筑物 and 曲线墙体更加适宜。楼板一般为现浇，也可以采用预制。

在我国超高层建筑中，采用滑模工艺的有：深圳国际贸易中心、香港合和中心、广州花园酒店（东楼）、上海花园饭店、北京国际饭店等。

(3) 盒子结构施工工艺

盒子建筑是用工厂预制的盒子状空间构件运到施工现场组装成的房屋，预制装配化程度较装配式大板建筑更高，因此工期更短，现场用工更少，劳动条件显著改善。但一次投资较大，需要解决大吨位运输设备和吊装设备。

20 世纪 60 年代我国在哈尔滨就建成一栋盒子建筑试验楼。1979 年以来在北京建成用钢、木和钢筋混凝土建成的盒子住宅、旅馆和工地暂设工程、办公营业用房。在南通建成 2 万多平方米住宅以及在上海建成的利民饭店等，每个盒子自重 8~30t。

1-2-2-3 筒体结构施工工艺概况

采用筒体结构的建筑均为高耸建筑物，内筒与外筒（柱）的楼板跨度达 8~12m。竖向结构可采用组合式模板成形混凝土，也可采用大模板成形（如南京金陵饭店），亦可采用滑动模板工艺成形（如深圳国贸中心）。近几年来，在超高层建筑中多采用爬升模板工艺成形，如深圳 325m 高 81 层的地王大厦、上海 420m 高 88 层的金茂大厦均采用了爬模工艺。楼板一般采用现浇楼板或以压型钢板、混凝土薄板作永久性模板的现浇叠合楼板。

第 2 章 混凝土外加剂

外加剂是一种改变混凝土流变、硬化和耐久性能所掺入的化学制剂总称。有早强剂、缓凝剂、引气剂、减水剂、早强减水剂、缓凝减水剂、引气减水剂、高效减水剂、速凝剂、抗水剂、发气剂、膨胀剂等。

1. 早强剂：能提高混凝土早期强度，并对后期强度无显著影响的外加剂。
2. 缓凝剂：能延缓混凝土凝结时间，并对后期强度无显著影响的外加剂。
3. 引气剂：能使混凝土产生细小均匀分布的微气泡，并在硬化后仍能保留其气泡功能的外加剂。
4. 减水剂：在不影响混凝土工作性能的条件下，能使用水量减少，或在不改变用水量的条件下，可改变混凝土的工作性能，或者同时具有以上两种效果，但又不显著改变混凝土含气量的外加剂。
5. 早强减水剂：除具有减水性能外，并兼有早强作用的外加剂。
6. 缓凝减水剂：除具有减水性能外，并兼有缓凝作用的减水剂。
7. 引气减水剂：除具有减水性能外，并兼有引气作用的减水剂。
8. 高效减水剂：在不改变混凝土工作性能的条件下能大幅度地减少用水量，并显著提高混凝土的强度，或者在不改变用水量的条件下，可显著改善混凝土工作性能的减水剂。
9. 速凝剂：一种能增加水泥和水之间反应速度，从而促进混凝土迅速凝结硬化的外加剂。
10. 防水剂：由化学制剂配制而成的一种能起到速凝和提高水泥砂浆或混凝土抗渗性能的外加剂。
11. 抗冻剂：指防止混凝土冻结的外加剂。
12. 发气剂、泡沫剂：指具有在混凝土中产生气泡效果的外加剂。
13. 膨胀剂：一种使混凝土在凝结硬化过程中，通过化学作用使混凝土膨胀以增强其密实度的外加剂。
14. 混合材料：是一种磨细的矿物质掺合料。分活性混合材料和惰性混合材料（微活性混合材料）。前者如粉煤灰、硅灰，用以增加含灰量、提高塑性，调节混凝土强度；后者如石英砂、石灰岩，它在常温下不起反应，只作水泥填充料。可见，混合材料与一般外加剂有所区别。

2-1 缓凝型泵送剂

2-1-1 工程概况

某电信枢纽主楼高 203m，筒体框架结构，基础底板混凝土设计为 C40、S8，板厚 2m，

表面系数 1.1，混凝土总量 4100m^3 。

2-1-2 原材料及混凝土配合比

缓凝泵送混凝土（以下简称缓泵混凝土）采用的原材料为：425 号矿渣水泥（ $R_{28} = 47.6\text{MPa}$ ），中砂（细度模数 2.6），5~31.5 mm 碎石（压碎指标 8%），UEA 微膨胀剂（外掺 10%），SKY-5 缓凝型泵送剂（掺量 1.2%）。与此对照，采用无缓凝作用的 SKY-1 泵送剂（掺量 1.4%）配制普通泵送混凝土（以下简称普泵混凝土）。缓泵混凝土与普泵混凝土的配合比及物理性能见表 2-1。

表 2-1 混凝土配合比及物理性能表

	配合比 (kg/m ³)						坍落度 (mm)	坍落度损失 (mm)			R_3 (MPa)	R_7 (MPa)	R_{28} (MPa)	抗渗性能
	C	S	G	W	UEA	SKY		30min	60min	90min				
缓泵混凝土	423	735	1055	715	47	5.08	210	5	15	25	22.1	34.2	50.5	≥S12
普泵混凝土	423	735	1055	175	47	5.92	205	45	95	150	24.3	34.8	50.4	≥S12

2-1-3 混凝土凝结时间与浇筑方案

虽然目前对设置施工缝的具体时间界限还没有定论，但混凝土的凝结时间直接关系到施工缝的设置。经试验研究，缓泵混凝土和普泵混凝土在初凝前 2h 时仍都具有较大的塑性，此时浇筑次层混凝土可以不设置施工缝。另一方面，二次振动不仅可以改善骨料间的塑性收缩应力，而且能够消除由塑性沉降引起的裂缝和内部泌水。经试验，缓泵混凝土与普泵混凝土的贯入阻力见图 2-1（为反映混凝土凝结时期的强度增长，图 2-1 中将 2cm^2 探针的阻力值按面积比例换算为 0.1cm^2 探针的阻力值）

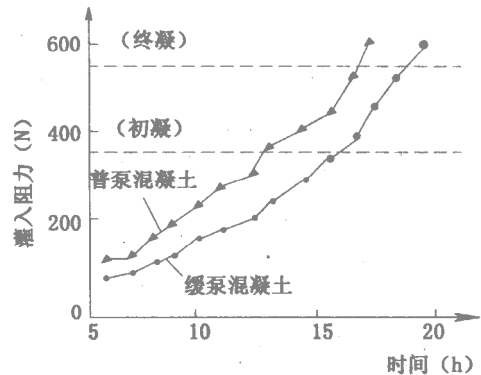


图 2-1 混凝土的贯入阻力

由图 2-1 可以看出，缓泵混凝土的初凝时间为 15h25min，终凝时间为 18h45min，分别比普泵混凝土推迟 170min 和 155min。在该工程中考虑到现场环境及设备情况，采用分三层梯次浇筑的方法泵送施工，每层 650mm 厚，每层浇筑段宽约 6m，混凝土约 190m^3 。使用 4 台 60 型混凝土输送泵（1 台备用），每台泵浇筑一层，混凝土输送量为 $45\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{台}$ ，层间浇筑间隔 4.5h。由于浇筑间隔比混凝土终凝时间短约 10h，因而无需设置混凝土施工缝。这样既加快了施工进度，节省了模板，又增强了混凝土的内部质量和整体性。

2-1-4 水化热与温度曲线

由于大体积混凝土的表面系数小，散热条件差，水化热大都积蓄在混凝土浇筑块内部，使得混凝土内外温差较大，因而容易产生温度裂缝。本工程选用 425 号矿渣水泥，其水化热为 240kJ/kg ，根据混凝土绝热升温法所测结果推算缓泵混凝土和普泵混凝土的放热

曲线见图 2-2。

由图 2-2 可知，普泵混凝土在 18h 时即达到放热高峰，3d 内的放热量约占 7d 总放热量的 80%；与普泵混凝土相比，缓泵混凝土的放热高峰相对延迟，峰值降低，而且放热曲线平缓，3d 内的放热量约占 7d 总放热量的 65%，因而在混凝土强度增长初期能够降低混凝土的内外温差。

在该底板厚度中部和距表面 50mm 处分别埋置了两层共 50 个测温点，自混凝土浇筑 2d 后开始测温。在升温阶段，每隔 3h 测温一次，在降温阶段，每隔 8h 测温一次，14d 内底板混凝土的温度变化见图 2-3。

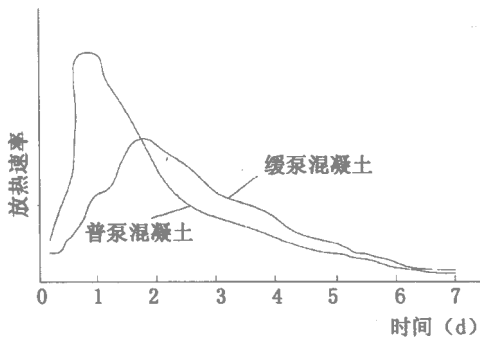


图 2-2 混凝土的放热曲线

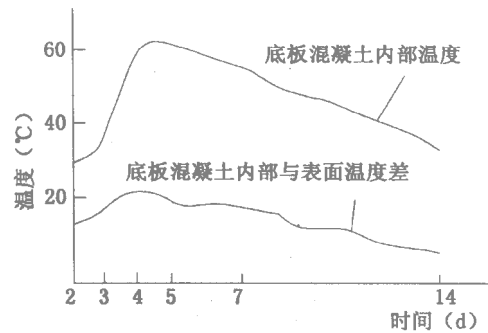


图 2-3 底板混凝土测温曲线

实测表明，同平面内混凝土的温度变化基本一致。底板厚度中部在浇筑后 5d 时达到最高温度 62℃，混凝土内外温差在浇筑后 4d 时达到最大值 21℃，由于此时混凝土已具有一定的抗拉强度，因而不致造成混凝土的质量缺陷。该底板拆模后，经检查，表面和侧壁均未发现温度裂缝。

2-1-5 结论

在本工程中通过使用缓凝型混凝土泵送剂，不但能够避免施工缝的留置、节约模板、加快施工进度、增强底板混凝土的整体性，而且能够延缓混凝土的放热高峰，保证大体积混凝土的内部质量。

1. 优先选用中低水化热的水泥。在本工程中，为了降低混凝土的放热量，在保证混凝土强度的条件下，选用 425 号矿渣水泥（水化热为 240kJ/kg），而未选用 525 号普通水泥（水化热为 360kJ/kg）使混凝土单方放热量降低了 25%。

2. 适量掺加微膨胀剂。在本工程中由于掺加了 10%（水泥量）的 UEA 微膨胀剂，使得在底板降温过程中，混凝土的收缩变形在一定程度上得以抵消，从而避免了因此时混凝土抗拉强度较低而易产生的收缩裂缝。

3. 加强混凝土表面养护。由于混凝土浇筑初期强度较低，放热量较大，若内外温差过大，可导致混凝土表面拉裂。在混凝土终凝后应加强表面养护，在环境温度下降较大时，应及时加强表面保温。有条件时混凝土表面养护可与内部测温相结合，在混凝土内外温差许可时，可除去保温层加快散热。

4. 施工组织要严密,防止意外间歇。泵送混凝土应连续进行,当需停泵时,泵的料斗中应留有适量混凝土,并每隔 4~5min 开泵搅拌一次,以防塞泵堵管。

2-2 硫铝酸钙类膨胀剂

普通水泥在空气中硬化,通常都表现出有一定的收缩值,这种收缩往往在砂浆或混凝土内部产生微裂缝,使硬化体的性能劣化。膨胀剂是在混凝土或砂浆中因化学反应而产生膨胀的外加剂,它依靠本身或与水泥中某些组分的反应,在水化过程中产生有制约的膨胀,有效地克服了以上缺点。膨胀剂主要用于为减小干燥收缩而配制的补偿收缩混凝土和自应力混凝土的结构中。

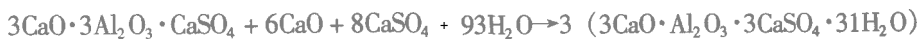
膨胀剂在 60 年代中期首先在日本开发应用,由于使用灵活方便,与采用膨胀水泥相比,成本可大大降低,它的开发给膨胀-自应力混凝土的广泛应用带来了生机。由于膨胀剂优异的应用效果,故其用量逐年上升。

混凝土用膨胀剂可分为硫铝酸钙、氧化钙、氧化钙-硫铝酸钙、氧化镁和金属等 5 类。目前我国已研制出包括 UEA、EA、AEA、EA-L、FN-M 和脂膜石灰膨胀剂等在内的十几个膨胀剂品种,产量也逐年增长,已跃居各种外加剂的首位。

2-2-1 硫铝酸钙类膨胀剂在混凝土中的作用机理

目前应用的大多数膨胀剂是硫铝酸钙类膨胀剂。*硫铝酸钙类膨胀剂包括明矾石膨胀剂和 CSA 膨胀剂,是利用水泥水化过程中所产生的硫铝酸钙的体积膨胀。CSA 和明矾石膨胀剂的化学组成有一定的差别,但他们都含有 C_4A_3S 和石膏,由于 C_4A_3S 活性较高,多在早期形成钙矾石而产生膨胀,但明矾石膨胀剂掺有水化较慢的明矾石,在水化中期(7~14d)仍可形成一定数量的钙矾石而膨胀。

CSA 膨胀剂的主要矿物组分为:蓝方石($3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$)、游离石灰(CaO)、游离无水石膏($CaSO_4$)。以上 3 种成分按下列反应生成钙矾石:

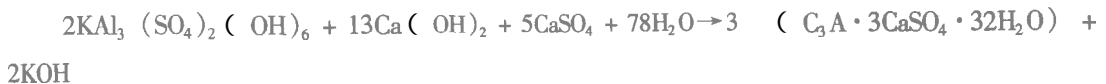


明矾石膨胀剂是由硫铝酸钙熟料(C_4A_3S)、天然明矾石 [$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$] 和石膏按一定比例混合共同磨细而成。按下列方程反应生成钙矾石。

在有充足的 $Ca(OH)_2$ 存在的条件下 C_4A_3S 按下列方程反应:



明矾石在碱和硫酸盐激发下,按下式反应:



2-2-2 硫铝酸钙类膨胀剂应用中有待研究的问题

2-2-2-1 钙矾石稳定性及其相关问题

X-射线物相分析结果表明,掺硫铝酸钙类膨胀剂的水泥浆体的主要水化物是水化硅

酸钙 C-S-H、钙矾石和氢氧化钙。其产生的膨胀是凝胶状钙矾石吸水肿胀和结晶状钙矾石对孔缝产生膨胀压共同作用的结果，并且主要取决于第一种膨胀驱动力，而钙矾石膨胀的根源在于其铝柱表面结合水的单分子层。由此可见，膨胀浆体的性能取决于钙矾石的结构特征及其形成速度和数量，以及它与其他水化物的匹配。

水化产物的稳定性是首要问题。所谓长期强度稳定性，实际是指水泥水化产物在使用环境下的稳定性。作为主要的水化产物，钙矾石是含有 32 个结晶水的结晶物质，其在冻融和高温（80℃）条件下容易分解，因此硫铝酸钙型膨胀剂的抗冻性和耐热性差，而且由于这种水泥水化产物品型转变引起水泥石结构的破坏势必导致混凝土强度降低。另外，水化硫铝酸钙所含的 32 个分子结晶水，其脱离和吸附是可逆的过程，容易在干燥条件下脱掉，形成中间水化物，因此干缩较大。

延缓钙矾石生成也是应考虑的问题，处于湿热条件下分解的钙矾石，在适当的条件下将重新合成钙矾石，这将使混凝土出现类似于碱-集料反应的网状开裂，这种由延缓钙矾石生成引起的裂纹通常出现在 2~20 年间。

由于钙矾石在高温下的不稳定性，夏天浇筑高强混凝土或大体积混凝土时，要更加小心。此时混凝土内部温升甚至高达 95℃ 以上，因此本应在早期形成的钙矾石将无法生成或生成后立即被分解破坏，不能形成有效膨胀而使冷缩加剧。

2-2-2-2 抗碳化能力

由于产生钙矾石的膨胀消耗了水泥石中的氢氧化钙，减少了碱储备，所以抗碳化能力存在疑问。而且，钙矾石本质上也不能抵抗碳化腐蚀，因为根据钙矾石存在的沟槽结构，周围环境中的 CO₂ 分子较易进入沟槽中，破坏多面体的结构，使钙矾石分解成碳酸钙、石膏和铝胶。虽然由于膨胀剂的作用，混凝土的抗渗性能的提高可在一定程度上改善抗碳化能力，但这方面性能仍值得进一步探讨。

2-2-2-3 碱-集料反应

碱-集料反应是一种极为有害的反应。许多国家规定，凡与水接触或潮湿环境中的混凝土，当使用活性骨料时，水泥的含碱量不得高于 0.6%，并应控制混凝土中的总碱含量不大于 3kg/m³，而以明矾石作为一种膨胀组分的膨胀剂，由于明矾石中含有 K₂O 和少量的 Na₂O，含碱量往往较高。

2-2-2-4 新拌混凝土的性能

1. 需水量。当坍落度相同时，掺硫铝酸钙系膨胀剂的混凝土需水量一般高于不掺的混凝土，这与生成钙矾石需要的水量有关。由膨胀剂水化反应式计算表明，硫铝酸钙膨胀剂，如日本的 CSA 膨胀剂、中国的明矾石膨胀剂等，其完全水化所需的水量均很高。

2. 坍落度。由于迅速形成水化硫铝酸钙产物，需要吸收较多的水量，掺膨胀剂的混凝土坍落度损失很快。

3. 与其他外加剂的适应性。目前混凝土工程中已广泛使用各种外加剂，特别是减水剂，试验发现有些减水剂会降低硫铝酸钙膨胀剂的潜在膨胀，因它影响了钙矾石的形成，影响情况取决于使用早强减水剂或缓凝减水剂，因此膨胀剂与其他外加剂复合使用前应通过试验验证。

2-2-2-5 长期强度的发展情况

混凝土的长期强度问题是与耐久性 & 经济效益紧密相关的问题。由于混凝土的强度更主要依靠水化硅酸钙，因而掺加膨胀剂的混凝土长期强度发展规律，以及水泥、膨胀剂不同时表现是需要深入探讨的问题。诸如掺入量太多是否对后期强度增长不利；由于混凝土材料的微观结构是一个发展变化的过程，因此其孔结构（包括孔形貌），与长期性能的关系仍值得研究。

2-2-3 工程应用中的注意事项

2-2-3-1 强度与膨胀的协调

应注意只有在有约束的条件下膨胀才会有利，并且还存在着强度与膨胀如何协调的问题。为保证在多变的现场条件下所需的膨胀，重要条件是使 CaO 、 SO_3 特别是 Al_2O_3 在适当的时候形成钙矾石。具体地说，大部分钙矾石应在水泥获得一定强度后形成，否则膨胀力将消耗在仍然是塑性混凝土的变形中，结果膨胀就不会受到约束，也不会产生预压应力。另一方面，如果钙矾石较长时间地继续快速形成，则可能会发生破坏性的膨胀。

2-2-3-2 膨胀剂品种及其与水泥的适应性

通常膨胀剂的品种不同，对混凝土坍落度及强度的影响也不同。

膨胀剂与不同水泥混用时的效果是不相同的。主要表现在混凝土的凝结时间、需水量、坍落度保持值、强度及膨胀率上。这与水泥品种、矿物组成、含碱量、细度及调凝剂等有关。混凝土的膨胀率受不同水泥的影响很大，随水泥本身收缩率的不同，需要补偿收缩的膨胀能亦不相同，由此配制的混凝土膨胀率差异也较大。一般矿渣水泥较普通硅酸盐水泥需要用于补偿收缩的膨胀能大，高标号水泥较低标号水泥需要补偿收缩的膨胀能大。因此，膨胀剂的掺量应根据所用水泥的收缩性能来确定，这种膨胀剂对水泥的适应性，在与减水剂复合使用时更应引起注意。

2-2-3-3 对配合比准确的要求

掺有硫铝酸钙类膨胀剂的混凝土在确定配合比时要求更加小心。由于膨胀率受水泥用量影响，故水泥称量要求准确。补偿收缩混凝土需水量大，而用水量增加，膨胀率减小且干缩率增大，所以应在允许条件下尽量少加水；要选择合适的骨料，选用外加剂时要慎重，要求做外加剂匹配试验。

2-2-3-4 对养护的要求

硫铝酸钙型膨胀剂需要高标准的养护条件，保湿养护非常重要。尤其是在 HPC 等低水胶比混凝土中掺加膨胀剂。当水胶比低于 0.38 时，水泥颗粒的水化水已不足，如不及时补水，水化就将停止，而干缩继续，强度不增长，造成裂缝提前发生。

2-2-4 对推广应用膨胀剂的建议

虽然在一些场合采用膨胀剂取得了效果，但由于采用膨胀剂的时间还不长，其理论和实践上都还存在一些疑问，在大规模采用膨胀剂前，还需做大量工作，以确定其长期强度和耐久性能。施工中尤应注意膨胀剂的使用性能受许多因素的影响，包括膨胀剂的组成和细度、水泥用量、养护方法、温度、配筋率、搅拌时间、水灰比、膨胀剂掺量、与其他外加剂的适应性、骨料、存放时间等。目前在积极推广膨胀剂的同时还要求应当慎重，故建

议如下。

1. 硫铝酸钙类膨胀剂应有一定的使用范围，如在地下、隧道等工程中应用，因可保证一定的湿度和温度，有利于钙矾石的稳定性，可提高混凝土的抗渗性能；而在相对比较干燥或温度较高的部位，则尽可能不使用膨胀剂，或选用其他种类的膨胀剂。

2. 不要过分强调膨胀剂在防水、抗渗要求较高的工程中的应用。因为防水是一项系统工程，虽然膨胀剂肯定有利于工程的防水要求，但不等于就能满足防水要求，而且掺加膨胀剂也不是惟一措施。

3. 膨胀剂在防止混凝土开裂方面有一定的作用，但混凝土开裂与许多因素有关，不能认为掺加膨胀剂就可以防止混凝土开裂。

膨胀剂的应用与发展，要求以改善混凝土的性能，并为厂家和施工单位提供技术服务。要求生产厂家稳定产品性能，并对产品做出正确的说明；要求施工单位遵循国家标准，并因地制宜地选用膨胀剂。

2-3 新型蜜胺流化剂

商品混凝土、大型预制场泵送混凝土及离心成型大型混凝土构件等的广泛应用，要求混凝土具有高流动性，因而研制适合于配制高强流态混凝土，具有高减水率、低坍落度损失、强保塑性的混凝土外加剂成为当前国内外研究的热门课题。流化剂即是此类外加剂，其产品有木钙、萘系、蜜胺系等多种。普通蜜胺系流化剂一般具有早强、减水率高、泌水率低、后期强度提高值高等优点，但产品成本高、坍落度损失偏大，因此其应用范围受到限制。新型蜜胺流化剂通过引入两种廉价单体代替部分价格昂贵的三聚氰胺单体，并将合成工艺改进为模糊四步控制法，还引入活性基因接枝和混配的方法，克服了普通蜜胺流化剂的缺点，提高了蜜胺流化剂的性能。

2-3-1 新型蜜胺流化剂应用特性

2-3-1-1 坍落度损失少、易施工、可泵性好

该流化剂在混凝土搅拌过程中一次加入，搅拌均匀，避免了木钙、萘系流化剂可能发生的未溶解流化剂颗粒对混凝土质量的不良影响，也避免了多次添加流化剂的繁琐工艺，由于接枝了羧基羧酸类调凝剂（氧化羧酸），羧基羧酸根离子可与水泥中 Ca^{+2} 产生络合反应生成一种络盐覆盖在水泥颗粒的表面上，从而将水泥颗粒与水隔开，使其无法水化。这种调凝剂还有一大优点，它能够与共聚的蜜胺树脂的超塑化性协调作用呈下降梯度逐步释放，使新拌混凝土在数小时内的坍落度保持值很高。在保持水灰比不变时，掺水泥用量 1% 的流化剂可使混凝土坍落度增加 15cm 以上，并且 1.5h 坍落度损失率在 10% 以下，混凝土 90min 仍保持良好的和易性、流动度。对于添加量小的普通混凝土，即使坍落度有所损失，但经过翻拌和搅拌，混凝土又恢复良好的工作度，满足施工浇捣的要求。新型蜜胺流化剂的这种特性非常宜于配制流态混凝土和泵送混凝土。

2-3-1-2 对水泥的分散性强、大减水、高增强

根据测试，掺水泥用量 0.75% 的水剂流化剂（固含量 45%）的水泥净浆流动度值与

PDN 萘系高效减水剂 0.5% 掺量 (粉剂) 时的流动度值相等。300g 水泥、105g 水时流动度值达到 250mm 以上。1.5 t45% 固含量蜜胺流化剂相当于 1t 粉剂 FDN 萘系高效减水剂。在相同掺量前提下, 蜜胺流化剂对净浆、砂浆、混凝土的减水率都较萘系减水剂高, 减水率可达 25%, 最高可达 32%, 蜜胺流化剂对混凝土的增强效应显著, 提高强度的幅度大于萘系高效减水剂。例如: 根据江苏省某商品混凝土站试配的 C50 测出的强度折算, 掺 1.2% 的水剂 (固含量 45%) 蜜胺流化剂, 其减水率达 29%, 坍落度 21.5cm。3、7、28d 强度比不掺者分别提高 88%、68% 和 42%, 而掺 0.75% 粉剂萘系减水剂 FDN 的减水率约为 18%, 3、7、28d 强度比不掺者提高 58%、49%、30%。

2-3-1-3 改善混凝土品质, 节省水泥

在混凝土中应用新型蜜胺流化剂, 在减水增强的同时, 抗拉强度、抗折强度、弹性模量、抗渗性能相应提高。在相同的抗压强度及流动度要求下, 可节省水泥用量 15% ~ 25%, 加快施工进度, 适用于配制早强及高强混凝土、防渗混凝土、用低标号水泥配制高强混凝土等, 不仅技术简单可行, 而且具有较好的经济效益。

2-3-2 工程应用实例

1. 江苏省某商品混凝土供应站使用新型蜜胺流化剂做了泵送混凝土工程。

(1) 混凝土用原材料

- 1) 水泥: 525 号矿渣硅酸盐水泥, 实测 28d 抗压强度 59.1 MPa, 安定性合格。
- 2) 砂: 中砂, 细度模数 2.67, 含泥量 1.25%。
- 3) 石子: 碎石, 连续级配, 粒径 5 ~ 31.5 mm, 含泥量 0.28%, 空隙率 43%。

(2) 混凝土配合比

商品混凝土供应站为提供的 C40 泵送混凝土每 m³ 的实际配合比 (kg): 水 : 水泥 : 黄砂 : 石子 : BC-1 泵送剂 = 210:477:662:1081:2.39 坍落度为 20 ± 2cm。用提供的 LF 流化剂替代 BC-1 泵送剂, 试验结果见表 2-2。由表 2-2 证明: 掺 0.5% LF 流化剂的混凝土坍落度增加值及坍落度损失值就可达到泵送剂一等品的指标 (30min ≥ 12cm, 60min ≥ 10cm)。掺 0.5% LF 流化剂的泵送性能优于掺 0.5% BC-1 泵送剂的性能。

表 2-2 流化剂配制泵送混凝土试验

编号	外加剂掺量 (%)	水灰比	坍落度 (cm)					抗压强度 (MPa)		
			出机	0.5h	1h	1.5h	2h	3d	7d	28d
省-1	0	0.44	7.5					12.6	22.1	30.3
省-2	0.5	0.44	18.0	16.5	12.5	10.5		20.2	35.4	45.4
省-3	0.75	0.44	20.0	19.5	18.5	16.0	12.0	23.5	38.5	49.2
省-4	1.0	0.44	22.0	21.5	20.5	19.0	16.0	26.5	40.0	51.5
	0	0.44	7.0					13.2	23.7	31.5
	0.5	0.44	18.5	15.0	11.0	7.0		16.5	32.0	42.6
	(BC-1)									

另外, 还对 LF 流化剂进行了 C50、C60 流态混凝土试配, 并与萘系 FDN-5 进行了比

较, 结果见表 2-3。

表 2-3 C50、C60 流态混凝土试配

序号	混凝土配合比 (水:水泥:砂:石子:外加剂)	坍落度 (cm)	减水率 (%)	抗压强度 (MPa)		
				3d	7d	28d
空白	225:625:602:983	19.5		15.5	25.5	45.3
C50	170:488:568:1102:5.86 (LF 流化剂)	21.5	29	29.2	42.9	64.4
C50	184:525:643:1048:3.94 (FDN-5)	20	18	24.5	38.0	58.9
C60	172:549:561:1089:7.8 (LF 流化剂)	19	26	44.7	56.1	70.8
C60	176:587:647:1046:8.2 (FDN-5)	18	24	42.4	51.9	65.7

2. 江苏省建筑工程诊断与处理中心承接的“钢筋混凝土超高层建筑层间位移限值的研究”设计的模型使用了由新型蜜胺流化剂配制的 C40 流态混凝土, 用于钢筋密集混凝土的框架结构。

模型的原型选用上海市某大楼, 52 层, 高度 193m, 长 × 宽为 28.8m × 28.8m, 高宽比 6.7, 模型的制作按 1/10 的比例缩小, 采用模板现浇钢筋混凝土。

(1) 混凝土用原材料

1) 水泥: 525 号硅酸盐水泥, 实测 28d 强度 61.4 MPa, 安定性合格。

2) 砂: 中砂, 偏粗, 细度模数 2.87。

3) 石子: 碎石, 采用 10~20mm 小碎石。

(2) 配合比

水泥 砂 石子 流化剂 = 478:662:1082:0.5 ~ 0.75% W/C + F = 0.41

(3) 实测混凝土性能

按上述配合比, 掺 0.5% 流化剂 (按固体份计), 实测混凝土坍落度 20cm, 7d 抗压强度 33.6 MPa, 28d 抗压强度 45.2 MPa, 达到设计所需强度。模板拆模后表面密实, 外形美观, 取得了较满意的效果。混凝土的其他力学性能见表 2-4。

表 2-4 混凝土的其他力学性能

试验项目	抗拉强度 (MPa)	抗折强度 (MPa)	长直强度 (MPa)	强性模量 (MPa)	120d 收缩值 (mm/m)
空白	3.20	4.50	29.6	3.82×10^4	0.3268
掺 0.5% 流化剂	3.96	5.34	33.1	4.28×10^4	0.3160

3. 南京化纤热电工程 1 号、2 号栈桥柱现浇混凝土中, 对 LF 蜜胺流化剂进行了试用。掺加水泥用量的 0.5% 的流化剂, 每 m^3 混凝土节省水泥 56kg, 混凝土的抗压强度超过设计要求。

2-4 HSM - VI 混凝土高效防冻剂

采用防冻外加剂 (简称防冻剂) 的负温混凝土、综合蓄热法、广义综合蓄热法已被建设部确定为我国混凝土冬期施工的重点施工方法。现行《混凝土防冻剂标准》(JC475)

中，将防冻剂分为无氯盐类、氯盐阻锈类和氯盐类，其共同特点是：含有较大比例的钠盐；掺量大，约占水泥重量的 8% ~ 12%。以此推算，混凝土中的碱含量（以 $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ 计）必然超出 1.87 kg/m^3 这个无害极限值。此外，“JC475-92 行业标准第一号修改单”中又增添了 3 种规定温度（ -5°C 、 -10°C 、 -15°C ）下的 R_{-7} 抗压强度比，这就意味着新型防冻剂应具有促进混凝土在负温下强度增长的性能。

2-4-1 HSM-VI 主要宏观性能

2-4-1-1 抗压强度比指标

JC475 标准及“修改单”规定了 -5°C 、 -10°C 、 -15°C 3 种规定温度下 R_{-7} 、 R_{28} 、 R_{-7-28} 、 R_{-7+56} 各龄期的抗压强度比指标，考虑我国严寒地区冬期施工环境温度的实际情况，有必要增测 -20°C 时上述各龄期的抗压强度比指标。不同掺量条件下，4 种规定温度的试验结果如表 2-5 所示。

表 2-5 掺 HSM-VI 混凝土的强度与抗压强度比

规定温度 ($^\circ\text{C}$)	掺量 ($\text{C}\times\%$)	减水率 (%)	抗压强度 (MPa) / 抗压强度比 (%)			
			-7d	28d	-7+28d	-7+56d
-5	2.0	16.5	6.61/20.7	39.1/123	33.1/104	35.3/111
-10	3.0	21.0	4.01/12.6	41.3/130	34.0/107	36.6/115
-15	4.0	25.0	3.24/10.2	42.6/134	31.8/100	34.3/108
-20	5.0	26.5	2.51/7.9	44.2/139	31.2/98	33.4/105

注：(1) 基准与受检混凝土坍落度均控制在 3.5cm ，基准混凝土标养 28d 抗压强度值为 31.8MPa ；
(2) 表中分子均为立方体抗压强度值，分母为占基准混凝土标养 28d 抗压强度的百分数。

将表 2-5 试验值与表 2-6 规定值对照，可以看出：3 种规定温度下的各龄期抗压强度比均超过标准规定的一等品指标； -20°C 时，仅有 R_{-7} 龄期的抗压强度比略低于 -15°C 时的标准规定值。

表 2-6 JC475-92 标准规定的抗压强度比

试验项目	抗压强度比 (%) 不小于					
	一等品			合格品		
	-5	-10	-15	-5	-10	-15
规定温度 ($^\circ\text{C}$)						
R_{-7}	20	12	10	20	12	10
R_{28}	95	95	90	90	90	85
R_{-7+28}	95	90	85	90	85	80
R_{-7+56}	100			100		

2-4-1-2 耐久性能

HSM-VI 最低掺量 ($\text{C}\times 2.0\%$) 条件下的 90d 收缩率比、抗渗压力比、50 次冻融强度损失率比及对钢筋锈蚀作用的试验结果如表 2-7 所示，对照 JC475 标准，可以看出，上述各项指标均满足一等品的质量要求。