

自应力混凝土与自应力混凝土管

吳中偉 曹永康

(在辽阳水泥制品厂由建筑工程部举办的預应力混凝土管訓練班中報告之一*)

自应力混凝土是預应力混凝土的一种,它采用一种特殊的膠凝材料(在苏联叫作应力水泥),具有很高的强度和膨脹能力(膨脹率比膨脹水泥大出4—6倍),經過一定的水热处理,正确地控制膨脹与强度发展的关系,使混凝土在具有足够鋼筋粘結力的条件下大量膨脹。通过混凝土帶着鋼筋一起伸長,在鋼筋中产生拉应力,在混凝土中預先建立了压应力,所以自应力混凝土是不借助外力(机械力或电热)只用自身膨脹的能力来拉張鋼筋达到預应力的目的。

自应力混凝土同样具有預应力混凝土的一切优点,加上自应力混凝土密实性特别好,有极高的抗滲能力,所以尤适用于貯藏和輸送液体气体的建筑物如高压輸水、輸油、輸气管等。

自应力混凝土是苏联首先試制成功的,至今不过3—4年,全世界除苏联和中国外,还没有別的国家做成。法国水泥科学家, H. 劳西叶早在1935年就发表文章介紹他的自应力膨脹水泥,但是劳氏的水泥膨脹能太小,体积稳定太迟,自应力值太小,所以未見使用。英、美学者到1952年还断言自应力混凝土不可能做成功。苏联学者非但制成应力水泥,解决水热处理这一关键問題,并且提出了提高自应力值的“应力校正”的天才方法;苏联同志因一直未能解决快凝問題,自应力混凝土尚未大量推广,基本上停留在試驗研究阶段;他們已做好推广方案,快凝問題一解决,立刻在高压管、农田灌溉水管、簿屋面板、水压建筑等方面应用。

我国水泥研究院从1956年底学习苏联資料,1957年4月就用唐山机土水泥,本溪500号矽酸鹽水泥熟料与二水石膏制成自应力混凝土,效果与苏联接近但无快凝缺点,10月用离心法制成200公厘直徑的管子,壁厚25公厘,

能承受20气压以上,到1958年初我們又制成4种自应力混凝土,4月制成汽油管,15气压不滲汽油,最近試驗8气压不漏气,10气压只有极少几点漏气,我們正研究玻璃絲自应力混凝土,有极大的抗折强度,初步計算200公厘管,管壁厚20公厘可能承受60气压,現正在試驗中,由于大跃进和整风运动解放了思想,只要我們大家努力,自应力混凝土技术一定能走到世界最前列。

一、应力水泥

自应力混凝土的主要膠凝材料应力水泥是一种快硬高强度水泥,它用石膏矾土水泥熟料,矽酸鹽水泥熟料按一定比例干磨混拌均匀而成,三种原料的配合比一般是石膏不大于15%,矾土水泥不大于20%,平均配合比是14:12:74(石膏:矾土水泥:矽酸鹽水泥),水灰比小于0.28,这三种原料中石膏与矾土水泥是膨脹的来源所以叫做膨脹組分,矽酸鹽水泥产生强度所以叫做强度組分,通过增减这二种組分的数量能够調节膨脹与强度的大小。

应力水泥的細度也很重要,影响膨脹和强度发生的迟早与膨脹延續時間的長短。我們控制細度在4,900孔篩余5%以下,更好的控制是用比面积4,500—5,500公分²/克(透气法)。

应力水泥很易风化,风化引起自应力值的严重降低,所以希望磨后就用或現场磨制。

二、膨脹的生产

自应力混凝土的膨脹是由于形成了硫鋁酸鹽的含水結晶。关于硫鋁酸鹽結晶的形成机

* 这是学会配合主管部門的現場會議进行的学术活动,曾指定一些分会派人参加,并回去进行传达。

理,至今还在探索中。根据苏联学者的解释:应力水泥在少量水与饱和的氢氧化钙的介质中首先形成低硫酸盐的硫铝酸钙水化物($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)是六角形板状结晶;后来给予充分的水并且有着大量硫酸钙的存在,这种六角形结晶就转为高硫酸盐的硫铝酸钙水化物($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)是针状结晶,体积大大增加,所以自应力混凝土是由于结晶改变形状而得到大的膨胀,自应力混凝土的膨胀过程也就是内部结晶的改形过程,我们水泥研究院已能用偏光显微镜看到这两种结晶,但还不能看到他们的转化。我们认为上述解释可能是正确的。

根据上述理论,我们要得到大的膨胀,就必须在早期生成最多量的低硫酸盐硫铝酸钙,这样就必须严格控制加水量,所以水灰比必须限制在 0.28 (或 0.3) 以下,早期不能放入水中。后来要它膨胀的时候,就应放入水中,成分中的石膏大量供给 CaSO_4 , 就使结晶大量向高硫酸盐硫铝酸钙转化,直到石膏消耗完毕膨胀就终止,体积就稳定下来;可见石膏渗量和适时放入水中这两点对控制自应力混凝土的膨胀也很重要。

三、自应力的产生和影响自应力值的主要因素

要产生自应力必须有膨胀,强度和弹性阻抗(钢筋)。只有强度没有膨胀当然不能拉张钢筋;结晶改形引起了膨胀,但同时也会减弱甚至破坏水泥石本身的结构,引起强度下降甚至开裂崩溃;没有强度也不能拉张钢筋,在一定配筋率的条件下,在自应力混凝土获得足够强度后的最大膨胀,产生最大的自应力,这就要求如何来正确调节膨胀与强度的关系——时间与数量两重关系。

米哈依洛夫教授提出水热处理的方法解决了上述问题,这是法国劳西叶几十年未能解决的,水热处理的作用是加速应力水泥强度组分(硫酸盐水泥)的硬化作用,来补足由于膨胀所破坏的结构连系,并且产生比膨胀所破坏的更多的新的连系,从而保持和增长自应力混凝土

强度。如将自应力混凝土不经水热处理就放在常温水中,膨胀就不断增加最后必定崩溃。较高的温度又能减缓硫铝酸钙结晶改形的速度,所以水热处理还能对强度和膨胀的关系起调节作用,改变强度与膨胀发展过程中的矛盾现象——强度高就使膨胀小,膨胀大就降低强度;并且使膨胀较早稳定下来,减少生产中的困难。

水热处理方法很简单,现在常用的是拌和后 8 小时放入 70°C 热水中 4 小时或 80°C 热水中一小时即可,以后放在常温水中养护 5—7 天,就可出厂。

自应力混凝土中必须配置钢筋(或其他弹性体),对膨胀产生弹性阻抗,才能在混凝土中建立起预压应力,达到预应力的目的;如没有钢筋,自应力混凝土虽有大的膨胀,也只是自由变形,内部不产生应力,所以自应力混凝土中自应力的值,还决定于弹性阻抗力的大小,即配筋率愈大,钢筋对膨胀的弹性阻抗力愈大,那么自应力也愈大。苏联学者试验配筋率从 0.24% 到 8.0% 的试件,其中自应力值与配筋率比值的 5 次根成正比:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_0'} = \sqrt[5]{\frac{\mu}{0.24}}.$$

在用 1:1 砂浆用喷浆法(水灰比 0.16—0.22)制成自应力混凝土,试得强度与自应力值如下:

立方体抗压强度 900—1,000 公斤/公分²,
圆柱体抗压强度 600—700 公斤/公分²,
环形抗拉强度 40—50 公斤/公分²,
弹性模量 400,000 公斤/公分²,
一般管中自应力值:

混凝土中 40 (压) 公斤/公分²,

钢筋中 5,000 (拉) 公斤/公分²。

为了得到较大的自应力,对于原料的化学成分,细度、配量、水灰比、水热制度等,我们根据苏联资料和自己的实践经验,摸索出一套规律,请参阅建工部出版社即将出版的“自应力混凝土”一书。

下面是我国制成的三种应力水泥的原料情况与性能:

原料成分:

名 称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	M ₂ O
唐山矾土水泥熟料	6.52	53.70	34.10	1.64	—	0.51
本溪 500 号矽酸鹽水泥熟料	21.74	6.56	61.72	3.49	1.44	3.94
华新高級矽酸鹽水泥熟料	21.03	6.37	65.38	3.14	0.95	1.74
华新普通矽酸鹽水泥熟料	20.89	5.19	61.72	4.28	—	3.94
二水石膏	0.76	(燒失量) 18.31	32.25	(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) 0.21	42.56	1.32

应力水泥性能:

成 分 与 配 比	細 度	水灰比	凝 結 时 間		自应力值(公斤/公分 ²)
			初 凝	終 凝	
二水石膏:矾土水泥:本溪普通(10:12:78)	4,000	0.24	>30 分	> 1 时	70 (淨漿, $\mu=1.3\%$)
二水石膏:矾土水泥:华新高級(14:15:71)	4,300—4,500	0.24	3 时 25 分 (已稍风化)	4 时 30 分	60 (1:1 砂漿, $\mu=1.3\%$)
二水石膏:矾土水泥:华新普通(14:15:71)	4,300	0.24			50 (1:1 砂漿, $\mu=0.93\%$)
半水石膏:矾土水泥:华新高級(12:15:73)	4,300	0.25	5 分 (已稍风化)	7 分	60 (淨漿, $\mu=1.3\%$)

四、自应力混凝土的优缺点
及存在問題

1. 优点:

(1) 簡化預应力的設備与工艺过程,并且能多向預应力。

(2) 有很好的抗滲性能,如 25 公厘厚度可承受汽油压力 15 气压以上,这是一般建筑材料不易达到的。

(3) 快硬高强度,尤其有很高的抗拉强度,增加構件的抗裂性。

2. 缺点:

(1) 自应力值低只有 50—70 公斤/公分²,不及机械張拉的高和容易控制。

(2) 水泥用量多,如 1:1 砂漿每一立方公尺用水泥 1,000 公斤,但由于强度高抗滲好,能將構件尺寸减小,有时反比預应力混凝土用的水泥更少,如自应力管用水泥并不多于預应力管噴漿所需的膨脹水泥量。

(3) 矾土水泥来源少价格貴,但因只占成分 15% 左右,大部分是普通水泥 (70%),比鋁酸鹽膨脹水泥消耗的矾土水泥还少得多,我們正在研究采用品位低的矾土 (B 級) 制成矾土水泥。

3. 存在問題:

推广自应力混凝土的主要困难在于自应力值低,以及因干縮引起自应力損失,使原来不大的自应力減到更低值,几乎丧失了自应力的作用。

针对这問題,我們將在下节專門討論提高自应力值的办法,通过应力校正,可能將自应力值局部提高到 200 公斤/公分²。对于干縮損失我們研究了不同配筋率的干縮变化,发现最終干縮率不超过 0.12%,因此提出采用彈性模量低而极限强度高的彈性体来配筋,玻璃絲就是最理想的配筋材料,玻璃絲彈性模量为鋼筋的 $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{5}$,这样就將自应力損失从原来的 50% 降为 10—20%。

我們認為充分利用自应力混凝土的优点,采用其他新技术来弥补自应力混凝土的缺点,能够得到一种高效能的新型結構材料,如自应力混凝土抗滲性特好,抗拉强度比一般混凝土特高,只是自应力值太小,如采用机械預应力来补充,例如自应力管外繞預应力鋼絲大大增加抵抗內压的能力(縱向有自应力来承担)就可能得到抗气、抗油,或抗 60—70 大气压力水压的管子;也可能与石棉、玻璃絲綜合起来得到高压的管子;我們已做出自应力玻璃絲混凝土板,抗

折达 650 公斤/公分²，可与相等截面（輕三倍）的生鉄相比。

五、提高自应力的方法

要扩大自应力混凝土的用途，特别是适用于梁板等抗弯構件，必須大大提高自应力值。目前用来做小口径压力管，内徑 30 公分以下，耐压 20 气压左右，已可够用。

提高自应力值有二个方法：1. 改进原料分配量和水热处理制度，使材料中全部膨胀能都得到充分利用，因为膨胀与强度之間存在着矛盾，原料的配量与化学成分对膨胀强度又有不同的影响，水热处理的时间与温度又能改变膨胀与强度的关系，所以这一方法还待大量試驗工作，現只能按照过去經驗，取得自应力值为 50—70 公斤/公分²的結果。今后努力方向：一方面提高自应力混凝土的早期强度和增加膨胀值，因此采用高級水泥熟料提高粉磨細度，只用少量强度組分就能得到早期足够强度，以便增加膨胀組分的配量来增加膨胀值；也可提前水热处理和稍增热水温度，取得較高的早期强度，略略延迟膨胀的发生；膨胀組分磨得粗一些也能延迟膨胀作用，但膨胀太迟又使生产工艺增加困难。总之，用一切办法来使自应力混凝土在得到一定强度后产生最大的膨胀，而这种膨胀必須以不降低混凝土的已有强度和不持續太久为限。

2. 应力校正，这一天才創造是从实际試驗中得到的，一根自应力混凝土梁上下側配有不等的鋼筋，如下側配得多，必然发生弯曲，上凸下凹。在变形过程（也就是自应力过程中）用外力加以限制，結果梁非但不发生弯曲，梁内自应力的分布不再是上下均匀而是上小下大，下部边缘压应力达到 150 公斤/公分²以上，这种自应力分布恰巧与荷载所引起的应力分布相反，所以这是合乎理想的自应力分布。应力校正非但使自应力有利分布并且还增加了自应力的总值。

应力校正除限制变形外还可以采取其他方式，例如在膨胀过程中加大鋼筋中的拉应力。在自应力混凝土管水热处理和常温水养护时，

在管内保持一定水压，使环形鋼筋中拉应力提高，結果管壁自应力就能增加，提高了承受水压的能力。

六、自应力混凝土管的性能与生产工艺

研究自应力混凝土管，一方面是为了解决用非金屬管代替鋼管、鑄鉄管，节省鋼材的問題，另一方面则是为了研究新的生产工艺来代替旧的制管生产工艺，而达到預应力的目的，自应力混凝土管就是利用自应力混凝土这样一項簇新的科学技术，来达到預加应力目的的。从 1957 年 10 月我們在研究自应力混凝土成功的基础上，就进行了自应力混凝土高压水管方面的研究、試制。随后对輸油管方面作了研究；目前正在做輸送气体方面的試驗。下面簡要介紹自应力混凝土管的情况：

1. 自应力混凝土管的制造方法：

目前制造自应力混凝土管的方法有二种：在苏联由于应力水泥的快凝关系，因此創造了在特殊噴漿机組上成型的“压力噴漿法”，同时还采取了分次裝料的离心法。压力噴漿法的生产工序見图 1。而我們制成的自应力水泥是沒有快凝缺陷的，因此采用了目前大家已經熟悉的离心制管方法，其生产工序見图 2，我們正准备研究用振动法制管。

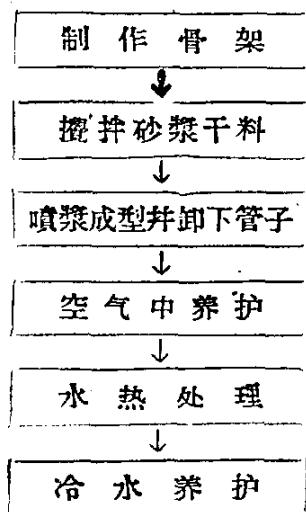


图 1

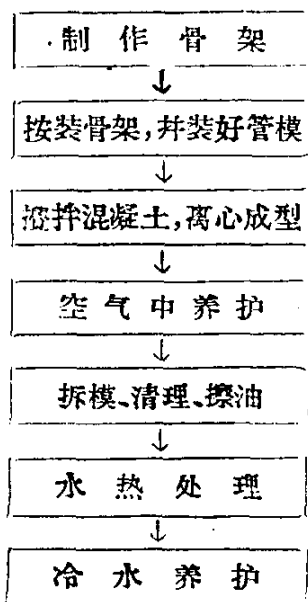


图 2

2. 自应力混凝土管生产过程中的几个問題：

根据我們將近一年来的摸索，制造自应力

混凝土管，必須解決上面一些問題。現分別簡要討論如下：

(1) 骨架直徑大小與自應力混凝土管的保護層厚度：自應力混凝土本身的膨脹性能決定了鋼絲骨架必須盡量靠近管截面的外壁。原因是：

管壁很薄。拿 $\Phi 200$ m/m 管來說，目前因只有 25 m/m 因此如果採用 10 m/m 厚保護層，那末剩下管芯僅為 15 m/m，這樣最有效地能夠產生自應力的混凝土就只占 $\frac{3}{5}$ 管壁厚。因此保護層不宜厚，只需 5 m/m 就夠了。

(2) 骨架的螺距與自應力混凝土管的配筋率：在自應力混凝土管中鋼絲與管芯接觸，不象預應力混凝土管，只是一條直線的接觸，而是鋼絲的半個圓表面積，因此應力的影響範圍較大，分布就可均勻。這樣就可放寬規範中最大螺距的規定（當然規範中是主要考慮螺距太大後有效分力問題）。從另一方面來看，螺距也不應太小，因為管壁薄，遵守了規範，那末會使配筋率太大。配筋率太大對自應力混凝土來說是沒有好處的。

(3) 自應力混凝土的粘結力：

由於混凝土的膨脹，因而破壞了鋼絲表面與混凝土之間的粘結力，因此依靠粘結力來拉張鋼絲，產生自應力是不夠的，我們曾用 $\Phi 1.7$ — $\Phi 5$ m/m 光面鋼絲，以及 $\Phi 3$ 冷軋變形鋼絲作試驗，結果只在開始時產生一小部分聯系變形，以後隨着膨脹的增加，粘結力被破壞，鋼絲回縮，產生很小自應力。

因此在鋼絲二端必須做彎鉤，依靠彎鉤的錨固來產生自應力並保證以後之錨定。

(4) 鋼絲適宜直徑與強度：

由於管壁薄，配筋率又不宜大，因此鋼絲的直徑一般應用 $\Phi 2$ — $\Phi 4$ 為合適，強度則選擇 10,000 kg/cm² 以下就夠了。

(5) 自應力混凝土管中鋼絲變形的測量：

在計算自應力混凝土管時，必須知道管中鋼絲的變形，才能確定鋼絲的預拉應力值。但目前還沒有比較正確的測量方法，只能用檢驗試件來加以估計。用檢驗試件中鋼絲的變形來作為管中鋼絲的變形，求得預拉應力。但實際

上管中鋼絲的變形與檢驗試件不全同，因此是不十分正確的。

(6) 混凝土的攪拌：

自應力混凝土是在強制式拌和機中進行的，必須充分拌和均勻，否則會有砂子或自應力水泥特別多或特別少的地方，那末就會使膨脹過程中，發生不良情況，造成質量事故。

(7) 裝料問題：

在製作 $\Phi 100$ m/m 管時，由於口徑小砂漿干稠。因此必須採取先裝好料，然後上管模，再離心的方法（同製造電桿、樁等一樣），當然製造長管時（4 m—6 m）也必須採用先裝料。然後上模的方法。另外可採用機械裝料的方法。例如用混凝土泵來裝料。

(8) 壓槓方法及離心速度：

在普通混凝土管製造時，由於混凝土流動性很大，因此當離心時，由於離心力的作用很快能使混凝土自動的分布均勻，壓槓用來壓平內壁與刮出多余的材料。但自應力混凝土水灰比很小（0.28—0.30），因此流動性極小，就要求比較快的速度（也就是離心力要求大），壓槓也比較困難，勞動強度比製造普通混凝土時也要大；在製造 $\Phi 100$ m/m 管時，根本不能用目前管廠應用的方法。我們採用了下列新方法，先用一般的壓槓法把混凝土初步的分布好，然後用一根比管子長 2 m 以上的自來水管，穿進管模，由二人各掌握一端，進行壓光，然後抽出壓槓，用最快速度離心。離心時間不要求長，一般 5—10 分鐘。

(9) 自應力混凝土管適宜的直徑。

在當前自應力值較低的情況下，自應力混凝土管還不適宜做成大口徑，否則不經濟，一般直徑從 $\Phi 100$ — $\Phi 600$ m/m，厚度從 20—50 m/m 而更合理的是用來製造 $\Phi 300$ m/m 以下的高壓高抗滲管子。將來通過研究，自應力值提高後，就能製造 600 m/m 以上的壓力管。

3. 製造自應力混凝土管用的設備：

(1) 熟料破碎機；(2) 球磨機；(3) 強制式混凝土攪拌機；(4) 離心制管機；(5) 管模；(6) 熱水養護池；(7) 蒸汽鍋爐或電熱器用來使水加熱；(8) 冷水養護池；(9) 吊車，綁扎骨架用的

支架；(10)中心試驗室、綫膨脹模型、抗拉、抗压模型、測量变形用的活动千分尺或千分表、抗拉試驗机、抗压試驗机。水泥細度測定設備，管子內压、外压設備。

4. 自应力混凝土管的技术性能，优缺点，用途与經濟价值：

(1) 技术性能：

1) 能承受 30 公斤/公分²($\Phi 100$)，20 公斤/公分²($\Phi 200$) 的破坏內压力。

2) 具有极好的抗滲性：在破坏以前，管壁沒有发潮、变色、冒汗等滲透現象。

3) 在 15 公斤/公分² 压力之下做汽油滲透試驗，未发现任何滲透情况。

4) 經压缩空气初步試驗，8 公斤/公分² 压力下，沒有漏气发生。

(2) 优点：

1) 制造設備少而簡單，工厂投資少。

2) 制造工序少而簡單，动力、劳动力消耗少。

3) 管壁簿，自重輕，縱向剛性大，便于运输、按裝。

4) 用鋼量低。

(3) 缺点：

1) 应力不易精确控制。

2) 目前自应力較低，不适宜作大口徑管子。

(4) 用途及經濟价值：

代替鑄鉄管及部分无縫鋼管，用作高压輸水管、高压輸油管(特別用来輸送汽油)，高压輸气管(煤气、天然气)以及排水、农田水利等工程上。可以节省鋼材 95%。

5. 自应力混凝土管的計算：

自应力混凝土管，由于目前还没有一套正确的設計数据，加上自应力值不能很好控制与測定，因此未能定出一套比較完善的計算方法，現就預应力混凝土管的計算公式作了部分的修改，作为自应力混凝土管計算內压与外压之用。

(1) 檢驗管之破坏內压力(不考虑外压)：

$$P_{mp} = \frac{R_p^* b d + [\sigma_{a1}(1 + m\mu) + 300] F_a}{r b}$$

(2) 檢驗管之破坏外压力(不考虑內压)：

$$M_{mp} = 0.318 F_{mp} r_1$$

$$= R_p^* b d^2 \left[0.29 + \frac{\sigma_{a1} \mu (1 + m\mu)}{6 R_p^*} \right]$$

附註：式中符号同預应力混凝土管計算公式。

預应力鋼結構的工作性能及其新形式建議

鍾 善 桐

預应力鋼結構是鋼結構发展的新途徑。因为在鋼結構中采用預加应力的方法，可以增加構件的承载能力，达到大量节约鋼材(可达30—40%)和降低造价的目的。[然而，到目前为止，世界各国在預应力鋼結構方面的研究工作做得还非常少，实际采用也不多。因而要广泛地采用这种新型結構，还必须进行大量的科学研究工作。我国鋼材还很缺乏，所以預应力鋼結構的研究对我国來說更具有特殊的现实意义。

作者曾对預应力鋼梁进行了实验研究。試件采用了 I14 型鋼簡支梁(尤3)，跨度 180 cm，

用 8 Φ 5 mm 高强度鋼絲平行配索，計算按二阶段設計，梁在受外力作用以前，先加預張力 6.5 t，然后再受跨中集中力 P 的作用。用正反螺絲套加預应力。試件共四个，一个不帶鋼索，三个預应力梁。

实验目的：1) 观测梁在彈性工作阶段的工作性能，验证計算方法是否正确。

2) 观测梁进入塑性工作阶段的工作性能。

3) 測定梁的承载能力。

4) 观测梁的破坏性質。

梁的跨中荷载撓度曲綫如图 3 所示。

高强、特高强水泥基材料 的研究与应用

吴 中 伟

《高强混凝土及其应用》
第一届学术讨论会论文集
1992 年 6 月

水泥基材料这一名称，开始于80年代初，用以概括一切以水泥为主要胶结材的各种砂浆、混凝土、钢筋混凝土、纤维增强混凝土、聚合物增强混凝土以及各种多孔材料和密实材料。

常用的普通混凝土与高强混凝土是以抗压强度50MPa来分界的,因为性能的差别必定带来安全合理使用范围的不同。例如美国钢筋混凝土设计规程(ACI318-89)只适用于抗压强度小于6000Psi(42MPa)的混凝土。我国现行混凝土结构设计规范(GBJ10-89)的公式和规定,也都建立在抗压强度小于50MPa的混凝土的试验基础上。

作者建议特高强与高强水泥基材料可按下列三个特征来划分:

- 1、抗压强度大于100MPa;
- 2、抗压与抗拉强度之比小于4;
- 3、与传统混凝土有明显不同的制作工艺。

此外, 1990年美国提出高功能混凝土(HPC)应具备下列条件^[1]:

- 1、工作性好；
- 2、早期强度高，后期强度不倒缩；
- 3、韧性好；
- 4、体积稳定；
- 5、在严酷环境中安全稳定期长。

HPC对混凝土提出了更全面的要求。为了满足特殊功能的需要, 可加入增强纤维或聚合物等, 甚至用蒸压处理或真空脱水等工艺, 也可采用几种复合措施。HPC 抗压强度在50MPa以上但不超过100MPa, 压拉比远小于4, 主要工艺与传统工艺相同, 因此仍属于

*吴中伟，中国建筑材料科学研究院原副院长兼总工程师，清华大学土木工程系兼职教授。

高强水泥基材料。

二、特高强水泥基材料

始于80年代初英国帝国化学公司与牛津大学的无宏观缺陷(MDF)“水泥”⁽²⁾。它是用90%以上的铝硅酸盐水泥(或高标号硅酸盐水泥), 1~8%的水溶性高分子聚合物(聚乙烯醇、甲基羟丙基纤维素、聚丙烯酰胺)和适量外加剂, 加少量水(W/C=0.1~0.2)混合, 经特制设备和辊压成均匀的捏塑体, 再在4~10MPa压力下成型并保压一定时间(也可用80~100℃热压加速成型), 脱模后湿养7天。也可掺加硅灰、粉煤灰、纤维以至某些特性填料、也可用挤出或注模成型和真空脱水。

MDF可能达到的主要性能指标: 抗压强度300MPa, 抗折强度150~200MPa, 抗拉强度140MPa, 弹性模量50GPa, 透气(O_2)性 $1 \times 10^{-15} m^3/s$ 。

它与高强水泥基材料在性能上的巨大差别, 表现在:

- ①压拉比2~3(高强混凝土约10);
- ②极限拉伸值 $19 \cdot 10^{-4}$ (高强混凝土为 $6 \cdot 10^{-4}$);
- ③断裂功 $31 \sim 43 J/m^2$ (高强混凝土为20~30)。

与其他材料相比, 抗拉、抗折强度相当于陶瓷, 而断裂能大大高于陶瓷与玻璃, 抗渗性与韧性相当于有机玻璃, 韧性高于铝。但MDF的生产能耗仅为钢的1/70, 陶瓷的1/20。

在MDF之后取得成功的特高强水泥基材料有微粒密实(DSP)“水泥”和化学结合陶瓷(CBC)。前者以水泥和硅灰为主要原料, 也可掺入纤维, 用更低的水灰比(0.1)和较大的成型压力(30MPa)。后者也在水泥中掺加硅灰或用溶胶—凝胶法制得的超细粉末, 在更高的压力(200~300MPa)下成型; 固相间凭化学反应来粘结, 不像陶瓷工艺的高温扩散和熔融, 不掺加聚合物。

DSP与CBC同样具有很高的强度、低压拉比和诸种特性, 制作工艺也基本类似。

由于特高强水泥基材料具有上述优异性能和特殊性能, 非但大大超过传统水泥基材料, 并且能超过和代用某些金属和非金属材料, 而生产能耗(因此预期生产成本)却远低于陶瓷、钢、铝等, 因此十多年来受到各国重视。美、日、苏、中、北欧等国都展开研究, 认为是高新技术。美国国家科学基金会于1989年成立高强水泥基材料科技中心(ACBM), 投资千万美元, 组织大批力量进行多学科攻关。日本一些大企业也进行风险投资, 积极研究开发。

三、特高强水泥基材料的应用问题

尽管有着十分诱人的开发前景, 但由于时间短、性能、工艺、长期记录等方面还待改进与验证, 在产品、成本、尺度等方面还待研究, 大规模应用还必须经过一段时间。

各研究者提出的近期开发目标有:

机械工业: 模具、垫片、低温容器;

电子工业: 电磁屏障、超导元件;

声学材料： 声阻尼部件；

军 工： 防弹、装甲；

医学工业： 人造骨骼、牙；

土建工程： 低温、耐摩、耐腐、抗震和门窗框。

要使特高强水泥基材料得到大范围和大批量的开发应用，还应在土建工程中找出路。除成本将来会随着工艺成熟与用量增加而大幅度降低外，制品尺寸将是主要问题。因结构物和构件都有稳度、刚度、配置钢筋以及特殊荷载和耐久性等对尺寸的要求，现在作到的最大尺度（长、宽尤其是厚度）无法予以满足。因此，作者提出研究开发特高强水泥基材料镶嵌部件，利用特高强水泥基材料的特殊优越性能来弥补普通混凝土以至高强混凝土的不足。

将上述镶嵌部件固定在构件和建筑物表层，充分发挥特高强材料的高强、早强、韧性、高弹模、抗渗、抗冲、耐摩、耐疲劳、耐腐蚀、抗冻融等特点，将作为主体的普通混凝土或高强混凝土保护起来，并与之共同作用，将能使整个构件与结构的使用功能和耐久性得到极大提高，在经济上也可能被接受。

镶嵌部件和材料的性能、尺寸、形状均须经过研究设计。固定方式可采用钢筋或扣件锚固，无机或有机胶接、粘结、插嵌等，也可能用于老建筑物的补强与修复，也可代替施工模板。总之，从混凝土预制构件到特高强水泥基材料镶嵌部件，在土建工程和材料上都是迈出重要的一步。如果混凝土建筑物的功能因此得到大的改进和耐久性得到大的提高，土建工程将会有所改观。除特高强水泥基材料以外，高强水泥基材料与上述高功能混凝土（HPC）也可能用作镶嵌部件。现已应用的钢管混凝土、钢纤维砂浆表层、聚合物水泥表层与真空脱水混凝土等，都可归入镶嵌材料之列；镶嵌也可采取表面处理的方法。

为了提高和稳定特高强水泥基材料的性能，使之早日得到开发应用，从根本上进行材料组成结构的基础研究是十分急需的。

四、高强、特高强水泥基材料的组成与结构模型

作者在50年代中提出混凝土中心质假说^[3]用来说明和改进混凝土的组成结构以提高其性能。与后来的MDF研究者不同之处，在于除密实性和孔结构外，同时强调界面的强化。为了改善集料界面区这一薄弱部分，作者曾用级配熟料代替普通集料制得高强混凝土。

中心质假说基本上按组分（粒子）尺度分为三个层次：大中心质、大介质、次中心质、次介质、微中心质、微介质；此外毛细孔亦属于大中心质，但性质功能不同，名之曰大中心质P。中心质假说适用于各种水泥基材料，包括高强、特高强水泥基材料。见下列图解（图1）：

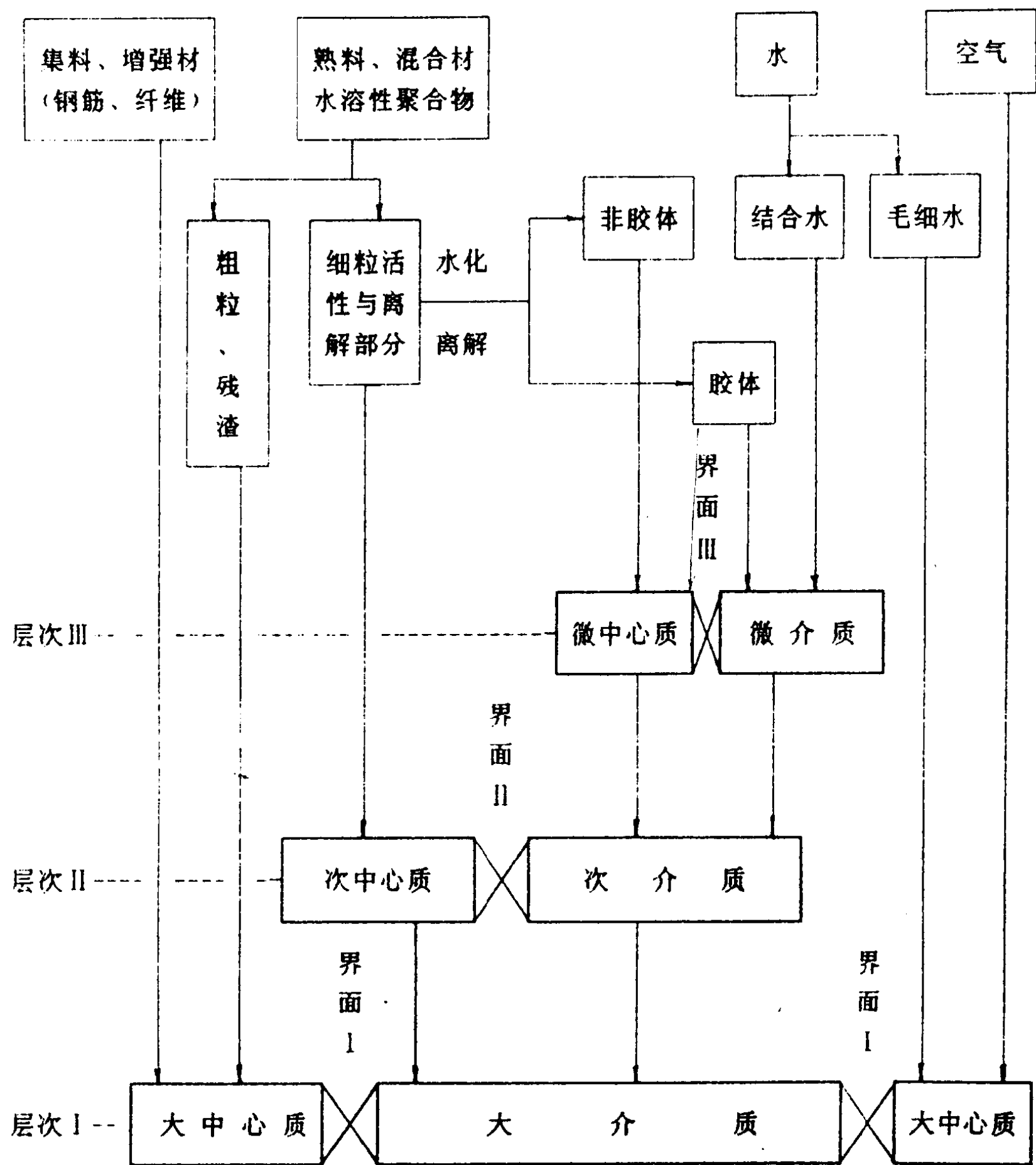


图1 中心质假说组成结构图解

水泥基材料的最终结构模型可概括为下列五类:

- 1、各级中心质(分散相)以最佳状态(均布、网络、紧密)分散在各级介质(连续相)之中。在中心质与介质的界面两侧,存在着过渡性的界面区(过渡带),是渐变的非匀质的过渡结构。排列顺序为中心质—界面区—介质。
- 2、网络化是中心质的特征,各层次的中心质网络构成水泥基材料的骨架,各级介质充填在各级中心质网络之间。均布于水泥基材料中的强化网络骨架是高强、高功能的必要条件。
- 3、界面区保证着中心质与介质的连续性,因此界面区的优劣决定水泥基材料的强度、韧性、耐久性、整体性、均匀性的优劣,强化界面区是高强、高功能水泥基材料的又一必要条件。界面区非但不应是水泥基材料中的薄弱部分,还应有利于网络结构的形成和中心质效应的发挥,将中心质某些性能传给介质。所以界面区的组成结构以及界面区的中心质效应,是研究高强、高功能水泥基材料的重点所在。
- 4、各种尺度的孔缝也是一种分散相,分布在各级介质之中,因此也是中心质。尺寸较大的孔(毛细孔)对强度等性能不利,也不参加构成网络。为了区别于大中心质,暂名之曰大中心质P。它在水泥基材料中也起着补给水分与提供水化物空洞等有利作用。
- 5、综上所述,高强、高功能、特高强水泥基材料是由三个层次的网络化的优质中心质与能够发挥有利作用的界面区和优质的介质所构成,但大中心质P的尺度与含量应加以限制。

上述结构模型,是以水泥基材料性能得到充分发挥时为准,因此称为最终结构模型。这是在一定实验基础上通过抽象、判断、推理而得来的,用来描述、解释和据以改进各种水泥基材料的性能,因此具有理论与实际意义。

下面对中心质网络化、界面区组成结构和中心质效应作些必要的阐述:

1、中心质网络化

除了各种增强纤维(包括钢筋)在水泥基材料中形成宏观网络,还有以网络形式加入的钢筋网、钢丝网、纤维网等大中心质网络骨架外,建材院赵宇平等研究聚合物混凝土时,发现聚合物在混凝土中形成的次中心质网络。用SEM观察MDF“水泥”,可看到熟料粒子间充满聚合物与水泥反应生成的相互交错的网状物,这是次中心质与微中心质网络。用不同尺度、不同性质的纤维增强,在水泥基材料中形成大小不同的网络,这是大中心质与次中心质网络。各种水化产物形成针、柱状结晶相互组成的微中心质网络(以明矾石水泥水化产物的TEM照片为例)。武汉工业大学胡曙光提出⁽⁴⁾:当聚合物与水泥配比适当和采用合适的制作工艺时,二者各形成交联的空间网络,二种网络又相互贯串交织,加上两相间的化学键合作用,形成多点粘结,得到他所称的两相互穿网络结构,并得到SEM的证明。这应是次中心质、微中心质网络结构。

2、界面区的组成结构⁽⁵⁾

50年代中叶法国Farran首先提出水泥石—集料界面附近存在一个过渡带,是薄弱部分。80年代美国普渡大学Barnes等发表水泥石—石英界面区模型,70年代法国INSA首先

用XRD层析法证明过渡带中CH取相性随界面距变小,并据此确定界面区范围(厚度)。80年代作者等首先用XRD层析法测定AFt、CH在界面区内平均尺度和富集程度的变化,以后国内外很多学者进行界面区组成结构的研究,认为要提高混凝土的性能,必须缩小界面区的范围和改善其组成结构。

作者对界面区的认识可归纳为:

- ①用不同方法,根据不同条件测定的界面区范围(厚度)是不同的;
- ②用普通工艺(多水)制作的水泥基材料中的界面区由于多孔、水化物取向性、形貌、分布等原因,比之区外水泥石本体(介质)性能降低,因此常是断裂、渗漏、腐蚀等发生的处所,是材料薄弱部分,也不利于中心质效应的发挥。
- ③界面区通过强化,能够具有比介质更好的物理力学性能,因此强化界面区是提高水泥基材料各种性能的关键。

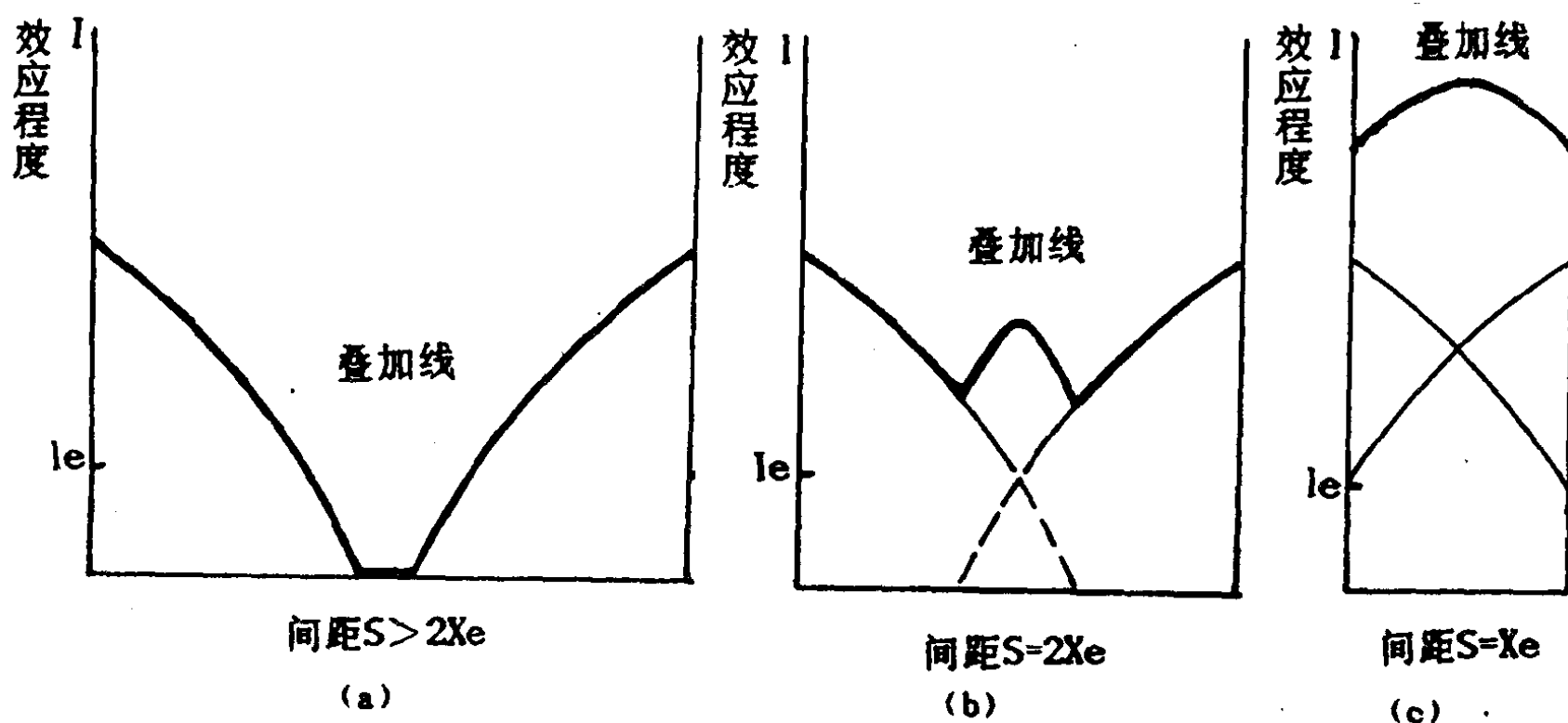
3、中心质效应

首先是大中心质效应^[6]能够改善大介质某些性能,使在效应范围(圈)内的大介质得到强化。作者等在50年代中叶研究钢丝网水泥时测得 $\phi 1\text{mm}$ 钢丝对周围约6mm范围内的水泥砂浆有抑制开裂(联系变形)的效应,即效应半径或有效效应距 $X_e = 6d$ 。又如在自应力混凝土中钢筋受到一定范围内混凝土的膨胀效应。纤维、填料等中心质效应对一定范围内介质的强度(显微硬度)、密实度等的影响,也十分明显。

中心质效应与界面区有密切关系,薄弱的界面区阻断或减弱中心质效应的发挥,界面区性能愈好,中心质效应愈好,中心质效应愈能发挥,有效效应距能得到加大。效应叠加作用也得到加强,对中心质网络化也有利。

当中心质间距小于有效效应距时,由于效应圈的互相重叠,产生效应叠加作用,能使界面得到进一步强化,使水泥基材料有关性能得到显著提高,在钢丝网水泥和后来的钢纤维研究中已得到证明。

不同中心质间距时,效应的叠加作用见图2、图3和图4:



注: S ——中心质间距, I_e ——有效效应程度, X_e ——有效效应距

图2 中心质间距与效应叠加作用

10年
后国
面区

分
的

泥

质
的
应
范

界
应

能
的

从图2(a)可见中心质间距大于2倍有效效应距, 则不起效应叠加作用, 大介质(包括界面区)性能不均匀; 而图2(c)中心质间距等于或小于有效效应距, 大介质处于效应叠加范围内, 性能均匀并得到明显提高。

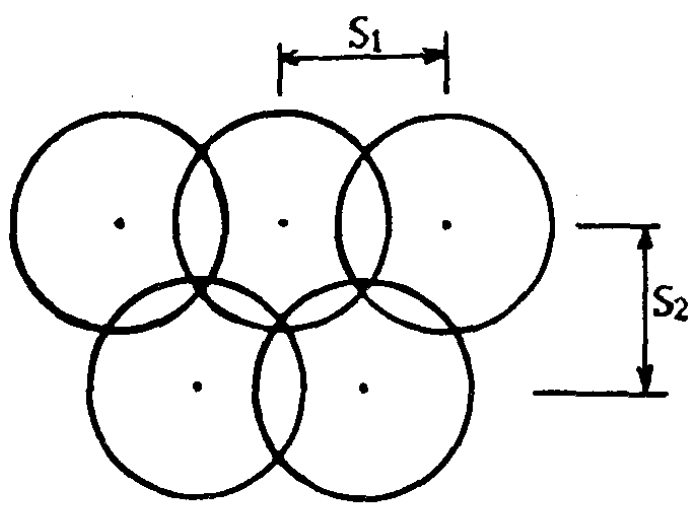


图3 钢丝网水泥中不裂不锈的
钢丝间距 S_1 与 S_2

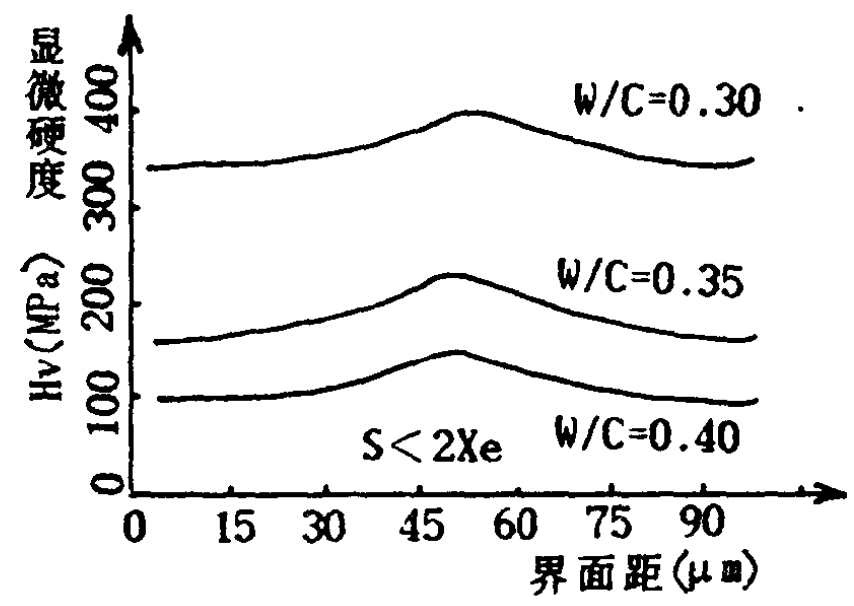


图4 钢纤维效应叠加作用

图3是苏州混凝土水泥制品研究院研究钢丝网水泥中理想的钢丝布置, 钢丝网水泥船不裂不渗。

图4摘自东南大学孙伟等发表的纤维增强水泥基材料的偶联与混杂效应报告^[1], 充分说明钢纤维大中心质效应叠加后, 钢纤维对水泥基材料的增强、增韧和阻裂作用。

在中心质效应的研究中, 可用三个量来描述效应的变化, 称为效应三要素:

- ①效应度或效应程度(I), 即界面处效应的大小主要取决于中心质的表面物理、化学性能, 变形性能等;
- ②效应梯度(γ), 即效应程度随界面距变化(递减)的梯度 $\gamma = dI/dx$, 主要决定于介质, 如界面区的性质优劣;
- ③有效效应距(X_e), 即在介质中明显的中心质效应能达到的距离, 亦即有效效应的范围。

各种性能有其不同的三要素值, 见图5。

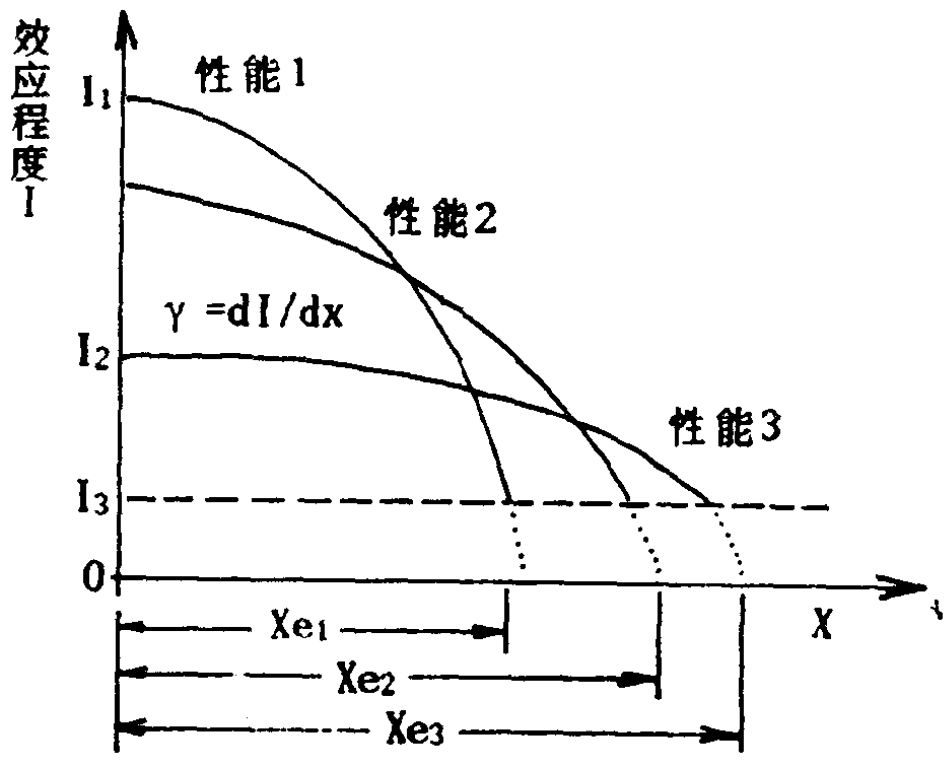


图5 中心质效应三要素

五、结语

- 1、根据中心质假说和最终结构模型，改进和提高高强、特高强水泥基材料性能必须：
 - (1)各级中心质的优质化和具有符合要求的性能，并完善各层次的网络化；
 - (2)各层次界面区的强化；
 - (3)各级中心质效应的充分发挥；
 - (4)孔结构(大中心质P)的改善，限制其尺寸与数量。
- 2、特高强水泥基材料的应用问题尚待解决。在土建工程中发展镶嵌部件，利用特高强水泥基材料的高强、高密实、高耐久性等特性来加强和保护构件与结构物的面层和特定部位，有着良好的发展前景。
- 3、发展特高强水泥基材料镶嵌部件，应研究下列课题：
 - (1)材料的均匀性、可靠性；
 - (2)工艺改进和成本合理；
 - (3)镶嵌工艺、粘接工艺及其可靠性、耐久性；
 - (4)涂覆工艺及其密封性；
 - (5)耐久性和特性试验方法与标准。

参考文献

- [1] J. Nicholas, Concrete International, 1981, September.
- [2] F. Lydon, World Cement, 1983, July/August.
- [3] 吴中伟, 北京水泥学术会议论文集, 1961年.
- [4] 胡曙光, 武汉工业大学博士论文, 1982年2月.
- [5] 吴中伟, 武汉建材学院学报, 1982年第2卷.
- [6] 吴中伟, 清华大学、武汉工业大学北京研究生部研究生讲义, 1980年.
- [7] 孙伟, 陈东彤等, 纤维增强高强水泥基界面强化的物理化学效应论文集(东南大学), 1991年3月.

附高性能砼、高强砼工程照片.

流态、高强、超高强混凝土

清华大学土木系
海华新技术开发中心
一九八七年六月二十五日