大坝混凝土水泥选用的几个问题

戴镇潮
（武警水电第二总队，江西万安，343800）

摘　要　文章讨论了大坝混凝土水泥品种和供应方式的选择及低热微膨胀水泥的使用。认为：由于工地上已普遍掺用粉煤灰，对大坝混凝土水泥品种的限制可以放宽，要求可以降低，不一定非要采用大坝水泥和矿渣大坝水泥，水泥的供应方式，应尽量少用或不用袋装，多用散装；向远离水泥厂的大坝工地供应水泥熟料，在工地设粉磨站磨成水泥，比采用散装水泥更优越、更经济。目前试用的底热微膨胀水泥，最适用于完全受约束的工程部位，用于大坝基础约束部位，对防裂有一定作用，但作用不大，用于大坝非约束区，对防裂无益且有害。

关键词　大坝混凝土　水泥品种　低热微膨胀水泥　供应方式

大坝混凝土水泥需用量大。一座大坝需用水泥少则数万吨，多则几十万吨，甚至百万吨以上。而且质量要满足大坝要求，如低热、低收缩、抗侵蚀、耐久……等。正确选用水泥在技术、经济上具有重大意义。近50年来，我国大坝混凝土水泥选用的主要情况见表1。

表1　不同时期我国大坝混凝土水泥选用的主要情况

时　期	早　期（1950～1965年）	中　期（1966～1980年）	近　期（1981～1994年）
水泥品种	大多用火山灰水泥、矿渣水泥，少数用普通水泥、混合水泥，个别用大坝水泥、矿渣大坝水泥	多数使用大坝水泥、矿渣大坝水泥、矿渣水泥及水化热较低的普通水泥	使用中热水泥（大坝水泥）低热矿渣水泥及水化热较低的普通水泥和矿渣水泥
水泥标号	多数400#，少数300#	开始多为400#，以后多为500#	多数为425#和525#（相当于前500#和600#），少数为625#（相当于前700#）
一座坝使用的水泥种类多少	有的较少，有的较多，多的达20—30种	多为1～2种	多为1—2种
供应方式	普遍的袋装，个别散装	大多袋装，部分散装	大多散装，部分袋装
运输距离	较　远	大多较近，部分较远	较　近
工地掺加混合材	多数未掺，少数掺加烧粘土，烧白土，分别掺加粉煤灰	开始多数未掺，以后部分掺加粉煤灰	大多掺加粉煤灰

在过去的近50年中，虽然由于各种条件的限制（特别是早期和中期），水泥的选用基本上满足了大坝的要求，没有因水泥品种质量影响安全运行。大坝混凝土水泥选用情况（表1）也表明，我国水泥工业和混凝土坝施工技术的长足进步。水泥厂遍布全国各地，产量跃居世界第一，品种齐全，供应方式由袋装走向散装，以及普遍在工地掺加粉煤灰，更加便于大坝混凝土水泥的选用。为进一步选好用好大坝混凝土的水泥，需对以下三个问题加以讨论。

1 水泥品种

为保证工程质量，大坝混凝土的水泥品种选择十分重要。主要是为防止因体积大发生温度裂缝，需选择水化热较低的水泥。50、60年代，由于缺少专供大坝使用的低水化热水泥，主要使用火山灰水泥、矿渣水泥，不得已时也曾用普通水泥，后来则使用专为大坝生产的大坝水泥（现称中热水泥）和矿渣大坝水泥（现称低热矿渣水泥），以及水化热较低（接近大坝水泥）的普通水泥和硅酸盐水泥。

随着水泥生产技术的进步，熟料烧成质量提高，磨得更细（国家标准筛孔为0.08mm的筛余由<15%降低为<10%～12%）。水泥标号比以前有较大提高。按老标号计，过去大多是400#，现在大多达到500#、600#，甚至高达700#（新标号分别为425#、525#和625#），而大坝混凝土的强度要求较低，重力坝为10～25MPa，拱坝为25～35MPa，且允许在相当长龄期后达到，我国一般取90d，前苏联为180d，美国为1年。折算为28d 龄期，要求强度只为以上的60%～80%。水泥标号和28d 混凝土标号之比以2左右合适。所以目前的水泥标号对大坝混凝土来说是偏高。从水泥工业的发展来看，水泥标号今后还会提高。符合一般工业民用建筑要求混凝土高强的需要。目前生产的早强（R）型水泥，也不适用于大坝。因为大坝混凝土不要求过高的早期强度，而且早强型水泥水化热高且发生得早。

在工地掺加混合材（也称“掺合料”）可“降低”水泥标号，因混合材的活性低于水泥；可减少水泥用量，降低工程造价；可降低水化热，有利温控防裂。优质混合材还可改善混凝土性能，如可降低单位用水量，从而减小干缩；提高抗侵蚀能力和耐久性；还可仰制碱——骨料反应。所以在混凝土坝施工中已逐渐成为必须采取的手段。在50、60年代，矿渣和粉煤灰等优质混合材很少，主要采用烧白土、烧粘土等活性低，需水量高，质量差的混合材。到70年代后，随着我国电力工业的发展，燃煤火力发电厂越来越多，优质混合材——粉煤灰容易获得，大坝混凝土逐步普遍地掺用粉煤灰。由于粉煤灰活性较高，水泥标号也高，大坝混凝土强度要求低，且允许在较长龄期后达到，掺较多粉煤灰仍能达到强度等设计要求。大坝内部混凝土粉煤灰掺量由一般不超过30%，增至40%以上，有的高达50%以上，碾压混凝土坝则达到60%～70%。不少大坝混凝土使用的是“粉煤灰水泥”。

由于粉煤灰掺量大，水泥用量少，削弱了水泥对混凝土的影响，再加上粉煤灰能抑制水泥中有害成分的不良影响，如吸收游离氧化钙，抑制碱——骨料反应等，因此选择大坝混凝土的水泥品种，可不需像过去那样严格。50年代末三门峡大坝的实践作了充分证明。三门峡大坝内部混凝土设计标号为90d、100#，使用太原水泥厂400#矿渣水泥，厂掺40%矿渣，在工地上拌和混凝土时又掺入40%粉煤灰，使水泥变成了“三组分”水泥，即水泥熟料36%，矿渣24%，粉煤灰40%。混凝土水灰比0.8，90d 试件平均强度13.5MPa，10年后钻孔取芯得芯样强度为17.3MPa，增长了28%，没有发生其它质量问题。这也说明，没有必要一定要选用大坝水泥（中热水泥），特别是从远离工地的水泥厂购进大坝水泥。当然，为了更有利于掺加粉煤灰，最好选用硅酸盐水泥或普通水泥，尽量不选用工厂已掺有较多混合材的矿渣、火山灰和粉煤灰水泥，三门峡大坝的实践证明也是可以的。有的工地怕麻烦，不想在工地掺加粉煤灰，请水泥厂掺在水泥中。这样做当然也是可以的。但却将掺粉煤灰的经济效益让给了水泥厂，是不合算的。为了多掺粉煤灰，水泥标号应尽量选得高一些。但标号高的水泥价格高，最终需通过经济核算来选定水泥标号。

对水泥熟料的要求，也可放宽。可比中热水泥和低热矿渣水泥对熟料的要求都低些。

建议对熟料成分的要求和 GB200—89《中热硅酸盐水泥和低热矿渣硅酸盐水泥》对熟料成分的要求一并列于表 2，以兹比较。

表 2　对水泥熟料成分的要求

成分名称	中热水泥要求/%	低热矿渣水泥要求/%	工地掺粉煤灰时的建议要求
硅酸三钙	≯55	≯55	不限制
铝酸三钙	≯6	≯8	≯10%
游离氧化钙	≯1	≯1.2	安定性合格允许≯2%
碱　分	≯0.6	≯1.0	碱——骨料反应试验合格允许≯1.5%

表 2中的建议要求，用旋转窑生产容易达到。用立窑生产经过努力也可做到，主要是游离氧化钙不易降至2%以下。

若工地上没有条件掺加粉煤灰或其它优质混合材，则选用水泥品种仍应坚持过去较严格的要求。有条件的(主要是距水泥厂不太远的)应尽量选用中热水泥和低热矿渣水泥；若条件不允许(生产中热水泥和矿渣低热水泥的厂家距工地不远)，可使用矿渣水泥或粉煤灰水泥，但其熟料成分应达到表2的建议要求。我国的火山灰水泥，因火山灰活性低，需水量大，干缩大，不宜使用。

为减小凝固过程中的收缩，大坝混凝土水泥中的石膏含量应用得大些。即在安定性合格的掺量范围内取偏高值。

选用水泥还有一项指标要加以注意，即水泥生产质量的稳定性。包括熟料成分、水泥强度的变化应尽量小。国家建材局要求水泥 28d 抗压强度标准差≯1.6MPa。

2　水泥的供应方式

在50、60年代，我国大坝用的水泥绝大多数工程以纸袋包装供应，个别工程以散装供应。70年代以后，散装水泥供应量增加，特别是大型混凝土坝，大部分水泥以散装方式供应。随着水泥工业的发展和施工机械化程度的提高，散装水泥的供应量将进一步增加。

袋装水泥、特别是纸袋包装的，运输贮存过程中破包多、损耗大，一般达8%～10%，高的达15%～20%。现在部分改为外层用尼龙编织袋，破包和损耗降低。袋装水泥易受潮变质，强度损失大。一般出厂1个月后强度降低5%，3个月后降低10%～20%，6个月后降低15%～20%，一年后约降低30%。散装水泥用密封的专用车、船运输、贮存于水泥罐中，不需包装、运输成本低、损耗少，不易受潮变质，强度损失小。据葛洲坝工程局检查，进水泥罐贮存前强度为48.9MPa，贮存一年后强度为47.1MPa，仅降低3.7%。

供应散装水泥比供应袋装水泥有许多优越性，但需相当数量的专用车、船，特别是远离水泥厂的工地。这些专用车、船，只能向工地运输水泥，一般不能装运其它物资，返回时都是空载，运输效率低。当大坝建成后，这些专用车船可能不再有用，造成浪费。在这种情况下，向大坝工地供应水泥熟料，在工地设粉磨站磨成水泥，将比供应散装水泥更加经济、优越。水泥熟料可用一般通用车、船运输，返回时可装运其它物资，充分发挥运输效率；还可利用地方上的通用车船，工程施工单位不需购置或少购置，因此可以显著降低运输费用。水泥熟料在运输贮存过程中也不易变质。此外，在粉磨时可同时加入混合材共同磨细。特别是我国的粉煤灰大多偏粗，和水泥共同磨细，不仅可显著提高粉煤灰的活性，增加掺量，更多地节约水泥；而且可确保和水泥混合均匀；改变掺量可生产出不同标号的水泥，供不同标号混凝土使用；还可取消混凝土拌和楼的粉煤灰掺加、配料称量设施。

向混凝土坝工地供应水泥熟料的方式在国外早已采用。如已建成的世界最大的依泰普水电站。50年代以来，我国也不断有人提倡过，但一直未能实现。究其原因，主要是我国水泥生产体制不同于国外，水泥厂只供应磨细的水泥，不供应未磨的熟料。其次是工程施工单位不愿承担水泥磨细任务，认为这是水泥厂的事，多一事不如少一事。如今我国的水

利水电工程建设已逐步实行国际通用的招投标方式，承包商（施工单位）为降低施工成本，获得经济效益，将会有积极性来承担磨细水泥的任务；建材部门也已着手改变水泥生产供应体制，使有的水泥厂既供应水泥，也供应熟料，有的水泥厂则只供应熟料。这样一来，向混凝土坝工地供应水泥熟料的方式预期在不久将会实现。

总之，混凝土坝的水泥供应方式，应减少袋装水泥，尽量多用散装水泥，早日实现供应水泥熟料的方式，特别是远离水泥厂的混凝土坝。

3 低热微膨胀水泥

大坝混凝土体积大，水化温升高，降温时体积收缩，被外部或内部约束将产生拉应力，拉应力超过混凝土抗拉强度，将发生裂缝。为防止裂缝，需采取各方面的措施，但直到现在仍难以完全防止。采用低热微膨胀水泥是利用其水化热低，使混凝土水化温升低；和微膨胀产生的压应力，抵消部分降温时产生的拉应力，达到防止裂缝的目的。

我国的低热微膨胀水泥的主要成分为高炉矿渣，配以一定比例的水泥熟料的石膏磨细而成。由于主要成分是矿渣，故水化热较低，一般为中热水泥的2/3，低热矿渣水泥的80%。微膨胀则由矿渣和熟料中的铝酸三钙和铁铝酸四钙与石膏中的硫酸钙结合生成晶状硫铝酸钙产生的。图1为低热微膨胀水泥与矿渣大坝水泥（低热矿渣水泥）混凝土的胀缩试验结果。表明矿渣大坝水泥是收缩的，90d收缩值达60×10^{-6}；低热微膨胀水泥是膨胀的，最大膨胀量为140×10^{-6}，在3～4d达到，以后则有微小收缩。

我国已在几座坝中试用了少量低热微膨胀水泥，取得了初步试验结果。

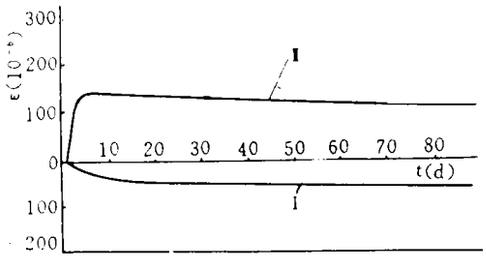

图 1 绝湿养护混凝土的变形过程线

Ⅰ矿渣大坝水泥混凝土；Ⅱ低热微膨胀水泥混凝土（吴来峰等1987）。

低热微膨胀水泥应用于预留孔洞、预留宽缝（槽）回填，隧洞衬砌等最合适。因为这些部位几乎是完全约束的，膨胀能差不多可全部转化为压应力，扣除徐变松驰部分，仍残留约50%，见图2。说明回填仍是紧密的，隧洞衬砌也不大容易会发生裂缝。

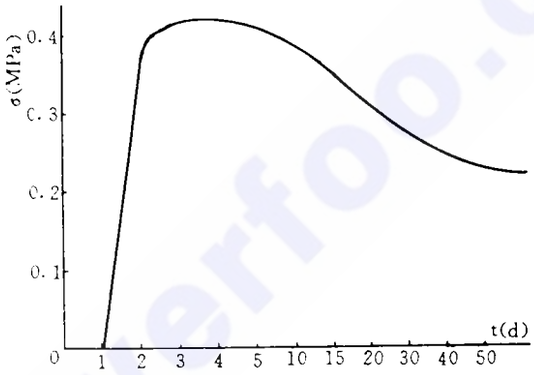

图 2 低热微膨胀混凝土全约束压应力过程线

（吴来峰等1987）

试验结果也证明，低热微膨胀水泥能有效阻止坝块裂缝向上延伸。具体的做法是，在已裂的坝块上用低热微膨胀水泥浇筑一层钢筋混凝土。由于钢筋的约束，使该层混凝土产生压应力，阻止了裂缝向上延伸。这比通常在裂缝上铺骑缝钢筋有效。但必须要在上一层布置足够数量的钢筋，否则不仅不会产生足够的压应力，反而会将下层裂缝胀开而继续上延。

在大坝紧靠基础的约束区使用低热微膨胀水泥，试验证明对防裂是有一定作用的。池潭大坝中测得的结果见图3。

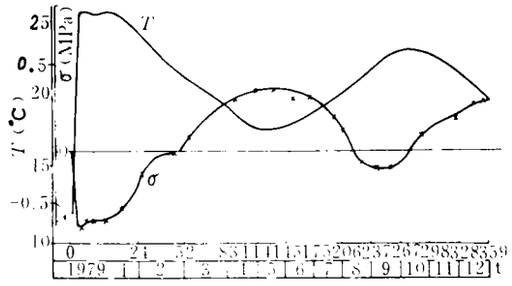

图 3　低热微膨胀水泥浇筑的基础坝块中温度和应力(水流方向)过程线(吴来峰等1987)

图 3表明，混凝土浇筑后因水化温升和微膨胀，使体积膨胀，受基础约束产生0.5 MPa 的压应力，散热后温度下降4.2℃时，压应力被完全抵消，温度继续下降则产生拉应力。扣除水化温升产生的压应力，低热微膨胀水泥膨胀产生的压应力只相当于将混凝土温度削减2.2℃，亦即大致相当于拌和混凝土时，每立米加20kg 冰的作用。

以上表明，低热微膨胀水泥对防止大坝基础约束区的裂缝有一定作用，但不大。其原因是：

1、膨胀发生太早，3～4d 前即发生完毕。其中一部分膨胀在混凝土未完全凝固，处于塑性状态和强度不高时发生；转化的压应力很小；当浇筑速度慢时，部分膨胀在一层混凝土未浇完时已发生，这部分膨胀也不会产生压应力 。早期坝块处于升温阶段，不会产生拉应力。拉应力在降温时产生，可这时却不再膨胀。

2、基岩对混凝土不是完全约束，约束系数一般仅达0.6左右，膨胀不能全部转化为压应力。

3、膨胀产生的压应力被徐变松驰。据池潭大坝试验块实测结果，3个月内徐变使膨胀产生的压应力松驰了50%，5个月松驰了80%，只残留20%。

在大坝上部的非约束区，因不再受基础的约束，膨胀不能转化为压应力(受下层混凝土约束，会产生压应力，但很小)。由于坝块内部温度高，外部温度低，表面因内外温差产生拉应力；再加低热微膨胀水泥在坝块内温度高、湿度大膨胀量大，在表面温度低、湿度低膨胀量小，也使表面产生拉应力。两种拉应力叠加，更容易产生裂缝。所以低热微膨胀水泥用于非约束区是有害无益的。

总之，低热微膨胀水泥最适合用于完全约束的工程部位；用于基础约束区坝块，对防裂有一定作用，但不大；用于非约束区坝块则有害无益。

参 考 文 献

吴来峰，储传英，张锡祥等. 筑坝新途径. 水利电力出版社，1987年4月

(收稿日期：19940719)

Selection of Cement for Dam Concrete

Dai Zenchao

(The Second Hydropower Construction Team of Armed Police)

Abstract　Selection of cement classification and supply way for dam concrete and application of low-heat, micro-dilated cement are discussed. Because fly ash is normally used in the site, limilations and requirements for cement classification of dam concrete will be less. Therefore, dam concrete and slag dam concrete is not invevitably used. Buck cement is used instead of bagged cement. Cement clinker is supplied to dam site far away from cement plant and grinded into cement in grinding plant in site. In this way, cement is gained more cheaper than buck cement. Low-heat, micro-dilated cement which are presently used is best fitted to be used in completely restrained location, when the cement is used in restrained location at dam foundation, it has a certain effect to prevent cracking, but is not obvious. When the cement is used in nonrestrained location of dam, it is harmful to prevent cracking.

Key Words　dam concrete　cement classification　low-heat, micro-dilated cement　supply way