（2）基础不平整或不均匀沉陷引发裂缝。某些混凝土的裂缝与基础不平整或基础不均匀沉陷有关。将混凝土浇筑在高低相差较大的基岩面上，混凝土从较高的温度降温过程中受到基础的约束产生较大的温度拉应力，由于基岩表面高低相差较大，在突变位置将产生较大的应力集中，加之突变部位左右两部分混凝土变形存在较大的差异，导致混凝土在突变部位开裂形成裂缝。当混凝土浇筑在非均质的基础上时，由于混凝土自身重量的作用，基础发生不均匀的沉陷。基础坚实、强度高的部位沉陷少，基础软弱、强度低的部位沉陷大。较大的沉陷差异使混凝土发生裂缝。基础不均匀沉陷引发的裂缝一般发生在基础内有较大的断层破碎带时。

（3）结构引发裂缝。混凝土结构物外形设计欠合理，造成应力集中引发的裂缝，称为结构引发裂缝。水工混凝土结构物不可避免地设有孔洞、牛腿等，这些部位若设计外形不合理，都容易产生巨大的应力集中而导致拉裂。为了避免这一类裂缝，应注意将孔洞的直角形棱角设计成 45° 斜角或圆角。对于较大的混凝土结构旁边伸出的较小断面的结构，由于两者散热条件相差太大，内表温差差别较大，很容易在联结处产生裂缝。此时若对两者有形成整体结构的要求，则应设计成渐变断面，若无整体结构要求，则可设伸缩缝分缝施工。

（4）干缩裂缝。混凝土的干缩是混凝土中水分散失引起的。当混凝土在空气中硬化时，由于水分蒸发，水泥石凝胶体逐渐干燥收缩，使混凝土产生干缩。在干燥环境中，混凝土的干缩持续进行着。有资料报道，甚至 38 年之后仍能观测到一些变化，其中长期收缩中的很小部分可能是由于碳化作用的结果，不过收缩的速率却随时间而急剧减小。如 14 d 内的收缩为 20 年收缩的 14%～34%，3 个月内的收缩为 20 年收缩的 40%～80%，1 年之内的收缩为 20

年收缩的 66%～85%。

干缩变形可使混凝土表面产生拉应力，当拉应力超过混凝土当时的极限抗拉强度时，将引起混凝土表面裂缝。裂缝方向一般与构件长度方向垂直，从构件棱角开始逐渐向两边面发展。

（5）寒潮袭击引发混凝土裂缝。混凝土也像大多数材料一样，受热时膨胀，冷却时收缩。混凝土结构物（特别是浇筑不久，混凝土内部温度较高，混凝土强度不高时）在寒潮到来之前若没有采取防护措施，混凝土表面温度迅速降低，此时混凝土存在较大的内表温差，表面受到较大的温度拉应力，可能引起混凝土开裂。寒潮袭击引发的裂缝，一般在寒潮到来之后较短时间内发生，裂缝方向一般与混凝土构件的长边大致垂直，裂缝一般也不太深，属表面裂缝。

（6）碳化引发混凝土裂缝。混凝土由于碳化作用也会产生收缩。混凝土干燥收缩的许多试验数据实际上包括了碳化作用的影响。然而，干燥收缩和碳化收缩在本质上是完全不同的。

存在于大气中的 CO_2 在湿度适宜的情况下，可与混凝土中水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 发生反应生成 $CaCO_3$，并产生收缩。CO_2 的这种作用，即使在其浓度很低的情况下如在乡村空气中（CO_2 含量按体积计仅约占 0.03%），也能发生。在通风不良的实验室中，CO_2 含量可升高到 0.1%以上。在大城市中 CO_2 平均含量达到 0.3%，个别的达到 1%。碳化速度随 CO_2 浓度增高而加快。完全干燥的混凝土不会发生碳化，因为碳化必须有一定的水分存在，使 CO_2 溶解于水变为碳酸，否则不能发生反应。过于潮湿或浸于水中的混凝土也不会发生碳化，因为空气难于深入混凝土中。碳化作用由混凝土表面向内部深入极其缓慢。碳化速度大致与时间的平

方根成正比，也就是 1 年与 4 年之间碳化深度成倍增长。此外，碳化深度还与混凝土的水灰比、水泥品种及用量等因素有关。碳化深度随混凝土水灰比的加大而增加、随混凝土水泥用量的增大而减小。混凝土使用掺有混合材料的水泥比使用纯硅酸盐水泥时碳化深。

碳化收缩使混凝土表面产生不规则的微观裂缝。碳化严重时，将影响钢筋混凝土的使用寿命。在硬化混凝土的孔隙中充满了饱和 $Ca(OH)_2$ 溶液，此碱性介质使钢筋表面产生一层难溶的 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 薄膜，称为钝化膜，它能防止钢筋锈蚀。碳化后，混凝土碱度降低，当碳化深度超过钢筋保护层时，钝化膜遭到破坏，混凝土失去对钢筋的保护作用，钢筋开始生锈。生锈的钢筋体积膨胀，使混凝土保护层顺着钢筋方向出现宏观裂缝，加速了钢筋的锈蚀。

（7）荷载引发的裂缝。由外荷载（静、动荷载和其他荷载）作用引起的裂缝，也称荷载裂缝。荷载引发的裂缝往往是因为结构较复杂，计算应力与实际承受应力存在较大差异或者因为结构设计考虑不周，疏漏了某些荷载及影响荷载的因素造成结构内应力过大而引发。

（8）钢筋锈蚀引起的裂缝。由于混凝土质量较差或保护层厚度不足，混凝土保护层受二氧化碳侵蚀碳化至钢筋表面，使钢筋周围混凝土碱度降低，引起钢筋表面氧化膜破坏，钢筋中铁离子与侵入到混凝土中的氧气和水分发生锈蚀反应，其锈蚀物（氢氧化铁）体积比原来增长 2～4 倍，从而对周围混凝土产生膨胀应力，导致保护层混凝土开裂、剥离，沿钢筋纵向产生裂缝，并有锈迹渗到混凝土表面。由于锈蚀，钢筋有效断面面积减小，钢筋与混凝土黏结力削弱，结构承载力下降，并将诱发其他形式的裂缝，加剧钢筋锈蚀，导致结构破坏。

（9）施工工艺质量引起的裂缝。在混凝土结构浇筑、构件制作、起模、运输、堆放、拼装及吊装过程中，施工工艺不合理、施工质量低劣，容易产生纵向的、横向的、斜向的、竖向的、水平的、表面的、深进的和贯穿的各种裂缝。

（二）混凝土裂缝的类型及裂缝的危害

1．混凝土裂缝的类型

如上所述，混凝土裂缝成因复杂而繁多，裂缝的形式也多种多样，可从各种角度将混凝土的裂缝划分为不同的类型。

1）按裂缝的活动性质划分

根据裂缝是否随外界因素的改变而变化及变化情况，可将裂缝分为稳定裂缝、准稳定裂缝和不稳定裂缝三类。

（1）稳定裂缝。开度和长度不再变化的裂缝称为稳定裂缝或称死缝。如地下防水工程或其他防水结构上存在的开度较小（0.1～0.2 mm）的裂缝，在一定的水压下，开始有些渗漏，但渗漏水在迁移过程中不断溶解混凝土中的 $Ca(OH)_2$，使渗透液 $Ca(OH)_2$ 的浓度逐渐提高，以致析出结晶沉积于孔隙中，与渗漏水中携带的少量杂质逐渐堵塞渗漏孔隙和裂缝。随着渗漏时间的延长，渗漏量逐渐减少，最终渗漏停止。这种现象称为裂缝的自愈现象。稳定裂缝不影响结构的持久使用。另外，某些结构的初始裂缝，在后期荷载作用下，承受压应力而闭合（或没有完全闭合），尽管裂缝仍然存在，但也是稳定的。

（2）准稳定裂缝。开度随季节或某种因素影响呈周期性变化，长度不变或变化缓慢的裂缝称为准稳定裂缝。许多防水工程冬季渗漏、夏季停止或冬季渗漏较大、夏季渗漏较小，就

是这种裂缝的典型表现。

（3）不稳定裂缝。开度和长度随外界因素的变化而增长的裂缝称为不稳定裂缝或动态缝。不少结构的荷载裂缝或沉陷引起的裂缝在初期均属此类。

2）按裂缝的开度划分

混凝土裂缝按其开度（宽度）可分为微观裂缝和宏观裂缝。微观裂缝不仅开度小至肉眼看不见，且分布是不规则的，沿截面是非贯穿的。具有微观裂缝的混凝土是可以承受拉应力的。宏观裂缝是开度大于 0.02 mm、肉眼可看得见的裂缝。宏观裂缝一般由微观裂缝发展而成，属于混凝土中的次生裂缝。宏观裂缝依引发裂缝原因的不同，一般情况下在分布上（如裂缝方向、间距等）有一定规律。

3）按裂缝发生的部位划分

宏观裂缝按发生在混凝土结构上的部位可分为表面裂缝、深层裂缝及贯穿性裂缝。

（1）表面裂缝。这是指在混凝土表面上出现的深度不大的裂缝。表面裂缝可存在于结构的顶面、侧面或底面。侧面上的表面裂缝可以是竖向的，也可以是水平的。表面裂缝占宏观裂缝的大多数。表面裂缝一般来说危害较小，但某些表面裂缝（如处于大坝上游面、基础部位、水闸底板等的表面裂缝）有可能发展成危害性较大的贯穿性或深层裂缝。稳定或准稳定的表面裂缝一般沿裂缝深度方向开度变小而逐渐消失。

（2）深层裂缝。这是指深度较大、延伸至部分结构断面、对结构有一定危害性的混凝土宏观裂缝。此类裂缝一般是在两种或两种以上因素作用下由表面裂缝逐渐发展而成。深层裂缝一般都会影响结构的安全，需进行必要的处理。

（3）贯穿裂缝。这是指延伸到整个结构断面，将结构分离，严重地破坏结构的整体性和防水性的混凝土宏观裂缝。贯穿裂缝一般易发生在基础部位。存在表面裂缝的基础部位混凝土与受到基岩约束形成的裂缝连通发展成贯穿裂缝。此外，较小构件往往由于中心受拉或偏心受拉而出现贯穿裂缝。坝体内外温差过大的部位也容易产生贯穿裂缝。

4）按裂缝成因划分

按裂缝的成因可将混凝土的裂缝分为荷载裂缝和变形裂缝两大类。荷载裂缝是由外荷载（如静、动荷载）作用产生的应力超过混凝土当时的极限抗拉强度而引起的裂缝。变形裂缝是由结构变形超过混凝土当时的极限拉应变引发的裂缝。它主要包括温度变形裂缝、干缩裂缝、不均匀沉陷裂缝等。此外，还有碱骨料反应引发的裂缝，钢筋锈蚀引起的裂缝等。

除上述分类之外，还有按裂缝形状进行划分的。如不规则裂缝、规则裂缝，上宽下窄、下宽上窄的裂缝，龟状裂缝、地图状裂缝、枣核状裂缝等。

2．混凝土裂缝的危害

如前所述，裂缝有各种类型，不同类型的裂缝引起的危害程度不一。同一类型的裂缝，在不同的结构物上引起的危害可能不一样。这里只能一般地介绍裂缝的危害。

一般情况下，微观裂缝是无害的，但宏观裂缝是微观裂缝扩展的结果。由于混凝土中大量微观裂缝的存在，结构物在荷载作用或变形变化情况下，在微裂缝的尖端往往产生应力集中现象。由于应力集中，裂缝尖端附近的应力超过混凝土极限抗拉强度，微裂缝便顺着裂缝尖端方向开裂扩展，逐渐形成宏观裂缝。

表面裂缝有时会诱发深层裂缝或贯穿裂缝。例如，浇筑不久的混凝土受到寒潮袭击时会

产生一些表面裂缝。随着时间的延长，表面温度继续下降，温度梯度增大，裂缝逐渐加深形成深层裂缝。除基础约束引起的贯穿裂缝外，多数贯穿裂缝是由表面裂缝诱发而成。深层裂缝一般都影响结构的安全，如建筑物的整体性和稳定性，而且还会产生大量的漏水，使水工建筑物的安全运行受到严重威胁。贯穿裂缝往往严重地破坏结构的整体性，对结构的安全造成严重危害。不均匀沉陷裂缝不仅破坏了结构的整体性，对结构安全造成严重危害，更严重的是某些不均匀沉陷会给整个建筑物的正常运行带来危害。例如，不均匀沉陷可造成闸门无法开启；在高速水流区的不均匀沉陷裂缝引起混凝土被冲蚀破坏，使混凝土建筑物受到严重的危害。防水结构的裂缝引起建筑物的渗漏，加剧了混凝土的渗透溶蚀破坏和冻融破坏。另外，裂缝的存在往往会引起渗漏溶蚀、钢筋锈蚀和冻融破坏等其他病害的发生和发展，并与它们形成恶性循环，严重降低水工混凝土的耐久性。

第二节　混凝土的冲磨与空蚀破坏

高速水流、含沙水流、推移质水流对水工建筑物的冲刷磨损和空蚀破坏一直是水工泄流建筑物如溢流坝、泄洪洞槽、泄水闸等常见的破坏方式，也一直是水利水电建设中长期关注、有待妥善解决的问题。据调查，我国运行中的大坝泄水建筑物有 70% 存在不同程度的冲磨破坏问题，有的甚至非常严重，不仅自身遭到破坏，而且危及其他建筑物的安全。其中丰满、三门峡、刘家峡、龚嘴等工程，虽经修补，还是屡遭破坏。

我国是一个河流多沙的国家，黄河是典型的多沙河流。根据黄河三门峡排沙底孔的实测

资料，汛期河水平均含沙量达 80～100 kg/m^3，瞬时最大含沙量达 911 kg/m^3。长江、海河及其他河流每年也有大量的泥沙带入大海。河水中携带的泥沙介质分为悬移质和推移质（即在水中处于悬浮状态被水流携带而推移的介质和沉于河床表面被水流推动而运移的介质）。一般情况下，粒径较小的泥沙在水流中多呈悬浮状态。但在高流速、紊动的水流中，大卵石实际上也呈悬浮状态间歇地被水流携带运移。相反，低流速的渠道中，粉沙颗粒也可能呈推移质运动。因此，水流中的颗粒属于悬移质还是推移质取决于颗粒大小、形状和密度，也与水流流速和紊流程度有关。水流中的悬移质呈悬浮状态运移，推移质沙石则沿建筑物表面滑动、滚动或跳跃状态运移。水流中的悬移质和推移质对建筑物都有破坏作用。悬移质泥沙颗粒粒径较小，在高速流动水流的紊动作用下，泥沙颗粒被均匀地混合并与水流一起运动，对过流建筑物表面产生严重的磨损作用，也称冲磨。推移质在水流中以滑动、滚动或跳跃等方式运动，对过流建筑物表面不仅有磨损作用，还有冲击破坏作用，故对过流建筑物的破坏比悬移质更为严重。某些建筑物设计或运行不当，在泄水时将下游河床沙石卷入建筑物（如消力池、消力戽），增加了水流中推移质含量，造成建筑物的冲磨破坏。

过水建筑物的冲磨破坏，有时会与空蚀联合作用，互相交替或促进。有的空蚀是由于冲磨破坏了过流表面，造成凹凸不平而引起。在有空蚀作用同时有冲磨作用的部位，也会因为空蚀加剧冲磨破坏。冲磨与空蚀破坏是水工泄水建筑物常见的病害之一。

我国大量水利水电工程出现过冲磨、空蚀破坏情况。其中，大型水电工程中存在冲磨或空蚀问题的近 70%。灌区水工建筑物也存在冲磨破坏问题，如都江堰水利工程的外江水闸闸室下游护坦及飞沙堰，由于大量的推移质作用，需经常维修。工程运行实践和室内试验研究

表明，清水流过混凝土表面，对混凝土基本上没有破坏作用（除消能不良及产生空蚀破坏者外）。产生冲磨破坏的原因是水流中含有固体颗粒。空蚀则是高速水流流经建筑物体型不佳或不平整处时，产生的空泡进入高压力区溃灭时，对混凝土表面的冲击。本节主要介绍混凝土冲磨、空蚀破坏机理以及影响冲磨、空蚀破坏的因素。

一、混凝土冲磨与空蚀破坏的机理

（一）泥沙磨损

如前所述，过水建筑物产生冲磨破坏的原因是水流中含有固体粒子。固体粒子在高速水流的作用下具有一定的动能，当其与过流混凝土表面接触时，会把一部分能量传递给混凝土。当具有足够能量的大量固体颗粒（砂、石）作用于混凝土表面时，就造成混凝土表面的剥落。细粒的悬移质泥沙，在高速水流中与水的质点充分掺混，形成近似均匀的固液两相流。具有紊流结构的高速水流在输水建筑物岸壁附近发生纵向和横向涡旋流体。这些涡旋流体不断地重复着由小到大尔后消失的过程。随着涡旋的形成、扩大和消失，水流中的泥沙颗粒以较小的角度切削和冲击流道表面，从而造成流道表面的磨损。大粒径的推移质沙石，以滑动滚动或跳跃方式摩擦、冲砸建筑物表面，即既有切削作用，也有冲击作用。因此，不管是悬移质还是推移质，对建筑物表面的破坏作用可概括为切削磨损和冲击磨损。当介质以较小的角度接触建筑物表面时，以切削磨损作用为主，冲击磨损作用为辅，而介质以较大的角度接触建筑物表面时，以冲击磨损作用为主，切削磨损作用为辅。介质对建筑物表面的总磨损量由两种磨损量相加而成。

1962 年彼德（J. G. Bitter）建立了磨粒磨损能量理论，随后尼尔森（J. H. Nelson）和基尔兹瑞斯特（A. Gilchrist）给出了简化的磨粒磨损公式

$$I(\alpha)=1/(2\varepsilon)(V_s\sin\alpha-V_0)^2+1/(2\xi)V_s^2\cos^2\sin(n\alpha)\qquad(\alpha\leqslant\alpha_0)\tag{2-3}$$

$$I(\alpha)=1/(2\varepsilon)(V_s\sin\alpha-V_0)^2+1/(2\xi)V_s^2\cos^2\alpha\qquad(\alpha>\alpha_0)\tag{2-4}$$

式中：$I(\alpha)$为磨损失重率，g/kg，$I(\alpha)=W(\alpha)/M_s$，M_s为磨料沙质量，kg；$W(\alpha)$为质量为M_S的沙以冲角α对材料冲磨所造成的磨损失重，g；V_s为沙速，m/s；α为冲角；α_0为临界冲角，$\alpha_0=\pi/(2n)$；V_0为临界沙速，m/s，$V_S\sin\alpha\leqslant V_0$时，$I(\alpha)=0$；$\varepsilon$为冲击磨损耗能因数，$\mathrm{kg\cdot m^2/(g\cdot s^2)}$；$\xi$为微切削磨损耗能因数，$\mathrm{kg\cdot m^2/(g\cdot s^2)}$；$n$为水平弹率因数。

当V_0、ε、ξ、n四个材料抗冲磨特性参数确定后，上式可描述材料被磨损情况。试验研究表明，材料性能对磨损量与冲角关系有很大影响。对于塑性材料，冲击磨损分量通常很小。当冲角较小时，磨损量就具有最大值。随着冲角的进一步增大，磨损总量反而下降。对于脆性材料，磨损总量与冲角关系曲线呈单调递增。当$\alpha=90°$时，磨损总量最大。

（二）空蚀破坏

在高水头泄水建筑物体型不佳或不平整处，高速水流会与边界分离，降低局部动水压强。当流场中压强低于该温度下水的蒸汽压强P_v时，水就会沸腾，水中所含的气核急骤膨胀，形成空泡，称为空化。不同温度时水的蒸汽压强见表 2-1。这些空泡聚集在低压区附近，形成空泡组和空泡群。它们随水流流向下游，进入高压区时因高压即行溃灭。因为空泡的溃灭意味着高速水流进入本来为空气占据的空间，所以在很短的时间（一般仅为万分之几秒）之内从空泡中心辐射出极高的冲击压力，作用于泄水建筑物的材料表面。由于空泡不断发生、发展、溃灭，冲击作用不断产生，连续冲击混凝土表面。这种冲击力超过混凝土材料颗粒的内聚力时，混凝土表面产生剥落破坏，这便是空蚀破坏。空蚀破坏的程度随不

平整度及水流速度的增加而增大，与水流速度的 5～7 次方成正比。初始的空蚀破坏，增加了混凝土的不平整度，致使空蚀破坏随之加剧。判别某点水流是否会发生空化的参数称为空化数，以 σ 表示：

$$\sigma = \frac{P_0 + P_a - P_v}{0.5\rho V_0^2} \tag{2-5}$$

式中：P_0、V_0 为该处不变边界局部变化影响的相对压强及流速，可以该处的平均压强、平均流速代替；P_a 为蒸汽压强。

表 2-1　不同温度时水的蒸汽强度

温度/°C	60	50	40	30	20	10	5	0
蒸汽压强水头 P_v/γ（m 水柱）	2.03	1.24	0.75	0.43	0.24	0.12	0.09	0.06

当 σ 降至某一数值 σ_c 时开始发生空化，这个空化数称为初生空化数或临界空化数。初生空化数随边界条件而异，对某种形式的边界轮廓可通过试验研究得出其初生空化数 σ_c 值，将实际空化数 σ 与其比较，若 $\sigma \leqslant \sigma_c$，就表明将发生空化。$\sigma_c$ 值可从有关手册中查到。一般认为，流速在 15～30 m/s 时，空蚀问题应引起注意，当流速超过 35 m/s 时，空蚀问题便十分突出。但空蚀现象并非仅发生在流速很高的泄水建筑物上。当气压相当低，存在压力降低的可能性时，在明渠中只要流速超过 12 m/s，而在封闭的管道中甚至更低的流速下，空蚀破坏也会产生。这种压力降低可能由于虹吸作用或由于弯曲面的惯性力，或由于不规则的界面引起，且往往是这几种情况的综合。

二、影响混凝土建筑物冲磨与空蚀破坏的因素

（一）影响混凝土冲磨破坏的因素

室内试验和原型观测结果表明，混凝土表面的磨损率与水流速度、含沙率、沙石颗粒形状、粒径、硬度、建筑物表面形态以及混凝土本身的抗冲磨能力等多种因素有关。现简要介绍如下。

（1）水流速度（或沙石速度）对磨损率的影响。从式（2-3）和式（2-4）可见，当沙速 $V_s \sin\alpha \leqslant V_0$ 时，材料不受磨损；当 $V_s \sin\alpha > V_0$ 时，材料出现磨损。磨损失重率与沙速呈二次方的关系，沙速或水流速度越大，磨损越严重。尽管由于沙石粒径、粒形的不同，水流流速和流态的差异，水流边壁曲率的不同，抗磨材料的不同以及含沙率一定情况下沙速的增大实际上单位时间内的冲磨沙量也增加等原因，各试验研究单位的试验结果中磨损失重率与沙速并非严格地呈二次方关系，但都表明，水流速度或沙速是影响磨损量的决定性因素。

（2）水流含沙率对磨损率的影响。如前所述，清水流过混凝土表面，对混凝土基本上没有破坏作用。产生冲磨破坏的原因是水流中含有固体颗粒。在高速水流作用下的固体颗粒通过摩擦、冲击等方式将一部分能量传递给混凝土。在相同流速情况下，水流含沙率越高，传递给混凝土的能量越多，对混凝土的冲磨破坏就越严重。

（3）沙石粒径对磨损率的影响。水流中所含沙石颗粒的粒径直接影响沙石颗粒受水流的拖曳力、浮力以及水中质量的大小，从而影响颗粒在水中的运动状态。而且，当沙石粒径不同时，即使沙速、冲角等都相同，对材料的磨损失重率仍是不同的。武汉水利电力大学用喷沙法进行的试验结果表明，混凝土磨损率随沙粒的增大而增大。成都勘测设计研究院科学研究所用平均粒径 0.9～5.0 mm 的沙进行试验，结果表明，随着沙石粒径的增大，磨损率显著增大。

工程实践和试验研究表明，当固体颗粒小至某一极限以下时，对材料几乎不产生磨损作

用。常将此颗粒粒径极限称为“有效磨损粒径”或“最小临界粒径”。武汉水利电力大学的研究表明，对于水泥混凝土材料，有效磨损粒径与混凝土强度及沙速有关，见表 2-2。

表 2-2　不同沙速时混凝土的有效磨损粒径　　mm

沙速 V_s/（m/s）		5.0	10.0	15.0	20.0	30.0	40.0
混凝土强度等级/MPa	20	0.41	0.073	0.026	0.013	0.005	0.002
	30	0.79	0.139	0.050	0.025	0.009	0.004
	40	1.28	0.226	0.082	0.040	0.015	0.007

应该指出的是，水流速度与沙速不都是一致的。在某一水流速度情况下，存在某一粒径，小于或等于该粒径的颗粒速度与水流速度一致，大于该粒径的颗粒，在水流中的运移速度小于流速。因此，沙石粒径大小与磨损率的关系是有条件的。

（4）泥沙颗粒形状及硬度对磨损率的影响。泥沙颗粒形状对磨损率有较大的影响。颗粒棱角尖利者，磨损作用较强。一般认为，圆球形、棱角形、尖角形的泥沙磨损能力之比为 1:2:3。武汉水利电力大学用喷沙法进行天然河沙（石英颗粒占 80% 以上）与石英岩人工沙比较试验，结果显示，垂直冲击磨损时，使用人工沙的磨损率为天然沙的 1.25 倍，水平微切削磨损时，此比值为 2.0～2.4。泥沙颗粒与受冲磨材料的硬度差异是影响磨损率的因素。中国水利水电第十一工程局科研所曾根据三门峡工程原型观测资料得出，当悬移质泥沙颗粒硬度小于或等于混凝土材料硬度时，不产生明显的磨损作用。悬移质泥沙颗粒硬度越高，混凝土磨损越严重。

（5）混凝土建筑物表面形态以及混凝土本身的抗冲耐磨性能对磨损率的影响。混凝土建筑物表面的平整度、密实性以及混凝土本身的抗冲耐磨性能是影响磨损率的重要因素之一。

表面密实、平整光滑的建筑物表面，对切削磨损有明显的改善作用。具有足够高的强度和较好韧性的混凝土，切削磨损和冲击磨损量都较小。

（6）冲磨历时对磨损率的影响。试验研究表明，随着挟沙水流作用时间的延长，混凝土材料的单位磨损率逐渐降低，经过一段时间后，磨损率趋于某一定值。这种现象主要是由于混凝土表面砂浆层抗冲磨性能较低所致。一般情况下，水泥石及砂浆不及骨料坚硬耐磨。在挟沙水流作用的初期，砂浆层首先被磨损。随着水流作用时间的延长，粗骨料逐渐裸露增强了混凝土的抗冲耐磨性能，故混凝土的冲磨失重率逐渐趋于稳定。

（二）影响混凝土空蚀破坏的因素

根据空蚀破坏的机理及工程观测经验，形成空蚀破坏的因素有：① 建筑物体形不当引起空蚀破坏。由于建筑物过水表面与水流流线不相符（如矩形门槽、矩形消力墩等）或由于泄洪流量显著超过设计流量，泄流流线与过水表面不符，泄流脱离建筑物过流表面，实际空化数远小于初始空化值，因而产生空蚀破坏。② 建筑物表面平整度不符合设计要求，引起空蚀破坏。这种情况可以是因为施工不良造成表面不平整、不光滑，或因为过流表面受泥沙磨损而凹凸不平。在这种情况下，高速水流受过流表面不平整所干扰，造成压强降低，达到一定程度即产生空蚀。③ 过水表面材料抗空蚀能力较差。过流表面材料强度较低、均匀性和密实性差。

第三节　混凝土的冻融破坏

混凝土结构的冻融破坏是促使混凝土结构老化的主要因素，也是我国水利水电工程中混凝土结构常见的病害之一。工程调查表明，我国有 22% 的大坝和 21% 的中小型水工建筑物存在冻融破坏问题。引起混凝土结构冻融剥蚀的主要原因是混凝土微孔隙中的水在正负温差大幅度变化和交替频繁的作用下，形成结冰膨胀压力和渗透压力联合作用的疲劳应力。在这种综合压力的作用下，混凝土产生由表及里的剥蚀破坏从而降低了结构强度和刚度，并且在其内部产生微裂缝，影响建筑物的安全。一般发生于寒冷地区经常与水接触的混凝土结构物，如水位变动区的海工、水工混凝土结构物，尤其是东北严寒地区的混凝土结构物，几乎 100% 的工程局部或大面积遭受不同程度的冻融破坏。最常见的是由于水泥石的崩裂、砂浆部分呈粉状脱落而露出粗骨料。对于预应力混凝土结构而言，混凝土材料的劣化除了会引起预应力损失外，还会引起结构承载力下降最终导致结构破坏。也有在平行于水工混凝土构筑物水面线处最初产生线状裂缝，裂缝逐渐增多使混凝土表层剥落等。提高混凝土本身的抗冻融破坏能力是减少混凝土冻融破坏病害的主要途径，对遭受冻融破坏的混凝土结构进行修复是延长混凝土寿命的有效措施。

本节内容重点介绍混凝土冻融破坏机理、冻融破坏造成的危害以及影响混凝土冻融破坏的因素。

含水（或水接触）的混凝土在长期正负温度交替作用下会出现由表及里的逐渐剥蚀破坏，称为冻融破坏。混凝土产生冻融破坏有两个必要条件：一是混凝土必须接触水或混凝土中含有一定的水；另一个是混凝土建筑物所处的自然环境必须存在反复交替的正负温度，且负温必须低至一定程度。只有以上两个条件同时存在，混凝土才有可能出现冻融剥蚀破坏。因此，

水利水电工程和港口码头工程发生混凝土冻融破坏较为普遍和严重。

混凝土在大气中遭受冻融破坏的机理还未完全清楚，但一般认为主要是因为在某一冻结温度下存在结冰的和过冷的水，结冰的水产生体积膨胀及过冷的水发生迁移，引起各种压力的结果。混凝土冻融破坏的程度与混凝土本身的抗冻融破坏能力有关，与环境条件因素有关。本节重点介绍混凝土冻融破坏的机理和影响混凝土冻融破坏的因素。

一、混凝土冻融破坏及其危害

如前所述，混凝土的冻融破坏与混凝土中水分结冻膨胀有关。如果混凝土在凝固之前遭受冻结，这种冰冻作用类似于饱和黏土冻胀的情况，即拌和水冻结使混凝土总体积增长，而且，由于水分冻结了，不能参与混凝土中的水泥起化学反应，使混凝土的凝结硬化延迟。当低温一直持续不变，则凝结过程持续中断。若后来开始融化时，对混凝土进行重新振实，则其后的混凝土凝结硬化不会使混凝土的强度降低。然而，若不对混凝土重新振实，则凝结的混凝土会存在大量的孔隙，因而混凝土的强度极低、抗渗性极差。融化之后的重新振实，尽管可以得到令人满意的混凝土，但这是不得已而采取的做法。

如果混凝土在凝结后但未达到要求的强度时遭受冻结，则结冰的膨胀力将引起混凝土破裂，并造成不可恢复的强度破坏。但若混凝土已获得足够的强度，就能抵抗低温冻结而免遭破坏。这不仅是因为混凝土已具有较高的强度能够抵抗结冰的压力，而且还因为大部分拌和水已与水泥化合或处于凝胶孔中，而凝胶孔中的水一般情况下不能冻结。一般说来，混凝土中的水泥水化程度愈高，即强度愈高，则冰冻危害愈小。混凝土的冻融破坏也与其

遭受第一次冻融循环时混凝土的龄期有关。冻融循环的暴露条件比延续冻结无融化期的情况更加恶劣。

当饱和的硬化混凝土温度降低到一定程度时，吸附于混凝土毛细孔内的水冻结，使混凝土发生膨胀，这与岩石中毛细孔水的冻结极为相似。若随后的融化紧接着又重新冻结，则将产生进一步的膨胀，可见冻融反复循环具有累积的效果，因此，这与疲劳破坏极为相似。

混凝土的冻融破坏是一个渐进过程，这一方面是因为热量以一定的速率向混凝土外部传递，另一方面是因为混凝土中尚未冻结水的溶液浓度逐渐增高，同时因为孔隙中水的冻结点随孔隙尺寸而异。因此，越进入混凝土内部冻结越难。当冰冻和渗透等压力超过混凝土的抗拉强度时，混凝土发生破坏。破坏的程度随冻融循环次数的增加从表面发生微裂纹到出现宏观裂缝，进而表面剥落直至完全破坏瓦解。这是因为冻结是从裸露的混凝土表面开始逐渐深入到混凝土内部的。

我国水利水电工程受冻融剥蚀破坏极其严重。1985 年水利水电系统曾组织了一次全国性的水工混凝土建筑物病害调查，调查结果表明，有 22% 的大型水工混凝土工程（大坝）存在混凝土的冻融剥蚀破坏，有 21% 的中小型水工钢筋混凝土工程（水闸等）也存在有混凝土的冻融剥蚀破坏。大型水工混凝土建筑物的冻融破坏主要集中在东北、华北和西北地区，中小型水工混凝土建筑物的冻融破坏，不仅东北、华北和西北地区存在，在气候比较温和，但冬季仍然出现冰冻的华东、华中地区以及西南高山地区也普遍存在。位于吉林省鸭绿江中游的云峰水电站，坝高 113.7 m，坝长 828 m，大坝混凝土总量 304.8 万 m^3。坝区极限最低气温 -41 °C，一年内气温正负交替的次数最多时达 74 次左右。大坝建成后运行 10 年即出现了溢流

面的大面积冻融剥蚀破坏。至 1981 年运行 15 年，破坏面积达 9 000 m^2，占溢流面总面积的 50%。剥蚀深度一般为 50～200 mm，个别部位达 400～500 mm。位于北京门头沟区永定河的下马岭水电站，坝高 33.2 m，坝长 132 m，在 30 余年的运行过程中，大坝上游面的水位变化区、溢流面、闸墩等部位均出现了混凝土的冻融剥蚀破坏，破坏面积 300～500 m^2，剥蚀深度 40～60 mm。同一河流上的下苇甸水电站，坝高 19.5 m，坝长 220.7 m，运行 3 0 年，发生在大坝上游面水位变化区、溢流面和闸墩的冻融剥蚀破坏总面积约达 1 500 m^2，最大剥蚀深度 70 mm。位于华东鲁北地区的许多水闸水位变动区都出现了不同程度冻融剥蚀破坏，深度达 5～60 mm，有的已露出钢筋。位于华中地区中部的江苏省万福闸，尽管月平均气温已达 0 °C 以上，冬季最低气温仍低至 - 10 °C 左右，该闸 1960 年建成投入运行，1963 年在闸墩水位变动区就出现冻融剥蚀。至 1985 年，冻融剥蚀面积达 1 500 m^2，最大剥蚀深度达 100 mm，部分主筋已露出。

二、混凝土冻融破坏机理

混凝土的冻融破坏机理研究始于 20 世纪 30 年代，1945 年美国混凝土专家 T. C. Powers 等人从混凝土亚微观层次入手，分析了孔隙水对孔壁的作用，提出了静水压理论和渗透压理论。T. C. Powers 等人的研究工作为冻融破坏机理奠定了理论基础。目前提出的混凝土冻融破坏机理有以下几种：水的离析成层理论、静水压理论、渗透压理论、充水系数理论、临界饱水值理论、现象学理论等。目前，关于混凝土冻融破坏机理的研究仍在进行，并且有越来越多的学者对已有的理论提出质疑，但公认程度较高的，仍是静水压理论和渗透压理论。

一般认为主要是因为在某一冻结温度下，存在结冰的水和过冷的水，结冰的水产生体积膨胀，过冷的水产生迁移，混凝土表面存在温度梯度等引起混凝土表面产生拉应力，混凝土内部孔隙承受各种压力。当这些应力超过混凝土的抗拉强度时，使混凝土表面产生裂缝、内部孔隙及微裂缝逐渐增大、扩散、互相连通，混凝土强度逐渐降低，表面剥落，造成混凝土的破坏。如前所述，混凝土产生冻融破坏有两个必要条件：一是混凝土必须接触水或混凝土中含有一定量的水，另一个是混凝土建筑物所处的自然环境必须存在反复交替的正负温度，且负温必须低至一定温度。只有以上两个条件同时存在，混凝土才有可能出现冻融剥蚀破坏。

（一）混凝土孔隙中水的冰点降低

水的冰点是某一压力下，水、冰共存的平衡温度，通常指 1.013×10^5 Pa 下溶有空气的水与冰平衡共存的温度，即 0 °C。水的冰点根据物理化学条件而变化。由于混凝土的亲水性，混凝土毛细孔中的水呈凹液面，孔径越细，凹液面越弯曲。引起混凝土毛细孔中冰点下降的主要作用是凹液面，它使水面内侧压力减小 Δp，即相当于外部对孔隙内的水增加压力 Δp：

$$\Delta p=\frac{2\sigma}{r} \tag{2-6}$$

式中：σ 为水的表面张力；r 为毛细孔的孔半径。

将 0 °C 时水的表面张力为 7.562×10^{-2} N/m 代入式（2-7），可计算得不同孔径毛细孔中的水所增加的外压力如表 2-3 所列。压力的变化引起相平衡温度的变化。根据克劳修斯-克拉贝龙（Clausius-Clapeymn）方程：

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}p}=\frac{T\Delta V}{\Delta H} \tag{2-7}$$

表 2-3　不同孔径下毛细孔中的水所增加的外压力

r/Å	∞	10 000	550	31	15	9
Δp/MPa	0	0.151	2.75	48.79	100.83	168.04

注：1 Å = 1×10 - 10 m。

应用于水-冰平衡体系中，得：

$$\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}p}\right)_{冰点}=\frac{T(V_{水}-V_{冰})}{\Delta H_{融化}} \tag{2-8}$$

式中：$(\mathrm{d}T/\mathrm{d}p)_{冰点}$ 表示压力对水的冰点的影响。因为水的体积小于冰的体积，故 $V_{水}-V_{冰}$ 为负值，因此 $(\mathrm{d}T/\mathrm{d}p)_{冰点}$ 也为负值，即压力增加时，水的冰点降低。若将 0 °C 冰的融化热 6 008 J/mol，冰和水的体积 19.625 mL/mol 和 18.018 mL/mol 代入式（2-8），则：

$$\Delta H_{融化}=6\ 008\ \mathrm{J/mol}=6\ 008\times\frac{1}{1.013\times10^{2}}\ \mathrm{atmL/mol}$$

$$V_{水}-V_{冰}=(18.018-19.652)\ \mathrm{mL/mol}$$

$$=(18.018-19.652)\times10^{-3}\ \mathrm{L/mol}$$

因此

$$\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}p}\right)_{冰点}=\frac{273.15\times(18.018-19.652)\times10^{-3}}{6\ 008\times\frac{1}{1.013\times10^{2}}}=0.007\ 53\ \mathrm{K/atm}$$

即当压力增大 1.013×10^{5} Pa（一个大气压）时，冰的融点降低 0.007 53 °C。因此，毛细孔中的水 0 °C 时不可能结冰，只有当温度低于 0 °C 时，粗孔中的水才开始结冰。孔径越细，其中的水冰点越低。严格地说，表面张力 σ 和融化热 $\Delta H_{融化}$ 都随温度而变化，温度越低 σ 越大，$\Delta H_{融化}$ 越小。因此，按式（2-8）计算的结果是不可能精确的。当压力增大 1.013×10^{5} Pa 时，冰的融点降低直接测定值为 0.007 6 °C。

另一方面，混凝土孔隙中的水一般都溶有盐类。根据稀溶液的性质，其冰点低于纯水时的冰点，冰点的降低值与溶液的浓度成正比，即：

$$T_0-T=k_f m \tag{2-9}$$

式中：T_0 为水的冰点；T 为稀溶液的冰点；m 为溶液的质量摩尔浓度；k_f 为水的冰点下降常数，k_f=1.86 °C。

尽管混凝土孔隙水中盐溶液浓度不高，但仍对孔隙水的冰点降低产生影响。

由于上述原因，混凝土孔隙中的水必须在 0 °C 以下才会结冰，孔隙越小冰点越低。混凝土中凝胶水，其冰点为 - 73 ~ - 78 °C，实际上是不结冰的。

（二）混凝土冻融破坏的机理

如前所述，一般认为混凝土遭受冻融破坏主要是因为在某一结冰温度下存在结冰的水和过冷的水，结冰的水产生体积膨胀及过冷的水发生迁移，混凝土表面存在温度梯度的结果。

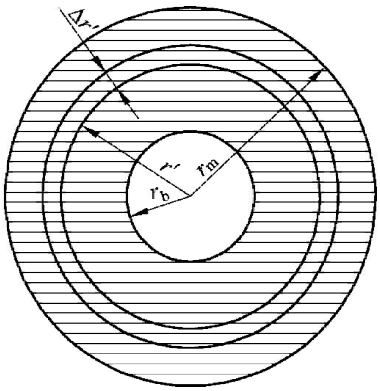

图 2-2　球形气孔

（1）毛细孔水结冰产生的最大膨胀压力。设想混凝土中某一范围水泥石包围着一个半径为 r_b 的球形气孔，气孔周围有一定厚度的水。泥石（相当于一球形壳）中含有可冻结的毛细孔水，如图 2-2 所示。

设水泥石球壳中有一厚度为 $\Delta r'$ 的单元壳，则此单元壳的体积为 $4\pi r'^2\Delta r'$，其中 r' 为气孔中心至单元壳的距离。在 0 °C 时，水的密度为 0.917 g/cm^3，所以水一旦结冰，体积就增大到 1.09 倍，即水结冰时体积膨胀达 9%。由于冻结，从单元壳中排出的水的体积为 ΔV，则：

$$\Delta V=\left(1.09-\frac{1}{S}\right)\Delta\omega_f 4\pi r'^2\Delta r' \tag{2-10}$$

式中：S 为水泥石毛细孔的体积含水率；ω_f 为单位体积的水泥石平均结冰水量（cm^3/cm^3）。

当 $S=1$ 时，$1.09-1/S=0.09$，即 1 cm^3 的水结冰时发生的标准膨胀。

因为冻结水量是温度的函数，因此排出水量也是温度的函数，即：

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}\theta}=\left(1.09-\frac{1}{S}\right)\frac{\mathrm{d}\omega_f}{\mathrm{d}\theta}4\pi r'^2\Delta r' \tag{2-11}$$

式中：θ 为温度，°C。

从单元壳中排出水：

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=\left(1.09-\frac{1}{S}\right)\frac{\mathrm{d}\omega_f}{\mathrm{d}\theta}\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}4\pi r'^2\Delta r' \tag{2-12}$$