

# 层状云母矿物定向排列对混凝土动态力学性能的影响及微观结构表征

周俊杰 蔺满刚 樊仕文 徐士超 张森

山西大同抽水蓄能有限公司

DOI:10.12238/btr.v8i4.4752

**[摘要]** 云母作为层状硅酸盐矿物的典型代表,广泛存在于花岗岩、片麻岩等火成岩与变质岩中。其独特的片状解理结构与低强度特性,使其在混凝土骨料中易形成定向排列,进而对混凝土的力学性能产生显著影响。尤其在深部工程、抗震结构及海洋工程等动态载荷作用下,云母的定向排列可能加剧混凝土的各向异性损伤,威胁结构安全性。例如,三峡工程花岗岩骨料中黑云母含量达10%,苗尾水电站片麻岩骨料中云母含量高达40%,此类高云母含量骨料的应用对混凝土耐久性提出了严峻挑战。

**[关键词]** 层状云母; 动态力学性能; 微观结构

**中图分类号:** F121.3 **文献标识码:** A

## Influence of Oriented Arrangement of Layered Mica Minerals on Dynamic Mechanical Properties of Concrete and Its Microstructural Characterization

Junjie Zhou Mangang Lin Shiwen Fan Shichao Xu Miao Zhang

Shanxi Datong Pumped Storage Co., Ltd.

**[Abstract]** As a typical representative of layered silicate minerals, mica is widely present in igneous rocks (such as granite) and metamorphic rocks (such as gneiss). Its unique flaky cleavage structure and low-strength characteristic make it prone to oriented arrangement in concrete aggregates, thereby exerting a significant impact on the mechanical properties of concrete. Especially under dynamic loads in deep engineering, seismic-resistant structures, and marine engineering, the oriented arrangement of mica may exacerbate the anisotropic damage of concrete and threaten structural safety. For example, the biotite content in granite aggregates of the Three Gorges Project reaches 10%, and the mica content in gneiss aggregates of the Miaowei Hydropower Station is as high as 40%. The application of such high-mica-content aggregates poses severe challenges to the durability of concrete.

**[Key words]** layered mica; dynamic mechanical properties; microstructures

### 引言

在混凝土材料领域,层状云母矿物因其独特的片状解理结构与定向排列特性,成为影响其动态力学性能的关键因素。现有研究表明,云母的定向排列会显著改变混凝土的裂纹萌生与扩展路径,尤其在动态荷载作用下,这种影响更为突出。然而,目前关于云母定向排列与混凝土动态力学行为耦合机制的研究仍显不足,亟需深入探索。

#### 1 层状云母矿物的定向排列特征与表征方法

##### 1.1 云母的晶体结构与解理特性

云母属层状硅酸盐矿物,具典型TOT型结构(两层硅氧四面体夹一层铝氧八面体),原子结合力呈方向差异,力学行为各向

异性显著。其解理面平行(001)晶面,因该方向层间力(范德华力或氢键)远弱于层内共价键,外力作用下裂纹易沿解理面扩展形成平整断裂面,此特性对云母增强混凝土力学性能与破坏模式起决定作用。

##### 1.2 定向排列的量化表征

云母片空间取向借极图(投影展示晶面法线分布密度)与取向分布函数(ODF,定量表征取向概率)描述。定义走向角 $\omega$ (解理面与主应力方向夹角)为关键参数,建立与混凝土力学性能关联模型: $\omega$ 近 $90^\circ$ 时,混凝土抗压强度显著降低(裂纹易沿解理面扩展); $\omega$ 较小时,云母片桥接抑制裂纹,提升材料强度。

##### 1.3 混凝土中云母定向排列的成因

混凝土中云母定向排列主要受骨料破碎工艺和浇筑振捣过程共同控制。颚式破碎机通过挤压作用使骨料产生不规则断裂,云母片取向随机分布;而圆锥破碎机利用层压原理,更易使云母沿解理面滑移,形成一定程度的定向排列。在浇筑振捣阶段,云母片因密度较小且层间摩擦力低,在混凝土流动过程中发生旋转和重定向:当振捣方向与云母解理面存在夹角时,云母片倾向于调整至与主应力方向平行,以降低流动阻力。此外,模板约束和骨料相互挤压也会进一步强化这种定向效应,最终形成具有显著各向异性的云母排列结构。

## 2 云母定向排列对混凝土动态力学性能的影响机制

### 2.1 动态载荷下的力学响应差异

2.1.1 静态与动态强度(如抗压、抗拉、抗冲击)随云母走向角 $\omega$ 的变化规律。在静态载荷下,抗压强度随云母走向角 $\omega$ 增大呈先降后升趋势,当 $\omega=90^\circ$ (云母解理面平行于加载方向)时,因云母层间易滑移,强度最低;抗拉强度因云母与水泥基体界面薄弱,整体较低且随 $\omega$ 变化波动较小。动态载荷下,抗压强度变化规律类似,但峰值更高,因冲击产生的瞬时高温高压促进界面局部粘结增强;抗冲击强度随 $\omega$ 增大而显著降低, $\omega=90^\circ$ 时冲击能量吸收率最低,因裂纹易沿云母解理面快速扩展,导致材料过早破坏。

2.1.2 动态载荷下裂纹萌生、扩展及分叉行为的各向异性特征。动态载荷下,裂纹萌生位置与云母走向角 $\omega$ 密切相关。当 $\omega$ 较小时,裂纹优先在云母与水泥基体界面薄弱处萌生; $\omega$ 增大至 $90^\circ$ 时,裂纹易在云母解理面内萌生。扩展过程中, $\omega$ 较小时裂纹呈曲折状,因需绕过云母片; $\omega=90^\circ$ 时裂纹沿解理面直线扩展,速度更快。分叉行为也具各向异性,低 $\omega$ 下裂纹分叉多,因遇云母片产生应力集中;高 $\omega$ 下,分叉少,裂纹快速贯穿材料,导致破坏更剧烈。

### 2.2 能量耗散与损伤演化分析

2.2.1 云母定向排列对混凝土断裂能、耗散能的影响。云母定向排列显著影响混凝土断裂能和耗散能。当云母走向角 $\omega$ 较小时,断裂能较高,因裂纹扩展需绕过云母片,消耗更多能量; $\omega$ 增大至 $90^\circ$ 时,断裂能大幅降低,裂纹沿解理面快速扩展,能量耗散少。耗散能方面,低 $\omega$ 下材料在受力过程中通过微裂纹萌生、扩展等过程消耗能量,耗散能较高;高 $\omega$ 下材料破坏迅速,耗散能主要集中在裂纹快速扩展阶段,整体耗散能较低,表明云母定向排列改变了混凝土的能量耗散机制。

2.2.2 基于声发射(AE)技术的动态损伤定位与云母取向关联性研究。利用声发射技术可实时监测动态载荷下混凝土内部损伤位置。研究发现,云母取向对损伤定位有显著影响。当云母走向角 $\omega$ 较小时,声发射事件分布较分散,因裂纹扩展路径复杂,绕过云母片产生多处损伤; $\omega$ 增大至 $90^\circ$ 时,声发射事件集中在云母解理面附近,表明裂纹主要沿解理面扩展。通过分析声发射信号特征参数(如振幅、频率等)与云母取向的关系,可建立损伤定位与云母取向的关联模型,为动态损伤评估提供新方法。

### 2.3 多轴应力状态下的协同效应

2.3.1 真三轴试验中中间主应力对云母定向排列混凝土强度的影响。真三轴试验表明,中间主应力对云母定向排列混凝土强度影响显著。当云母走向角 $\omega$ 较小时,增加中间主应力可提高混凝土强度,因中间主应力抑制了裂纹在垂直于最小主应力方向的扩展,使材料更均匀地承受载荷;当 $\omega$ 增大至 $90^\circ$ 时,中间主应力对强度提升作用减弱,因裂纹易沿云母解理面扩展,中间主应力无法有效阻止裂纹发展。此外,中间主应力与云母取向的耦合作用改变了混凝土的破坏模式,从脆性破坏逐渐向延性破坏转变。

2.3.2 云母取向与围压耦合作用下的塑性变形机制。云母取向与围压耦合作用对混凝土塑性变形机制有重要影响。低围压下,当云母走向角 $\omega$ 较小时,混凝土塑性变形主要由云母与水泥基体界面滑移引起; $\omega$ 增大至 $90^\circ$ 时,塑性变形以云母解理面滑移为主。高围压下,围压抑制了界面和解理面滑移,塑性变形机制转变为孔隙压密和微裂纹扩展。同时,云母取向影响塑性变形的各向异性,低 $\omega$ 下塑性变形在多个方向发展;高 $\omega$ 下主要沿云母解理面方向产生较大塑性变形,为多轴应力状态下混凝土塑性设计提供了理论依据。

## 3 云母-水泥界面过渡区的微观结构演化

### 3.1 界面薄弱区的形成机理

3.1.1 云母片表面光滑性与低活性导致的界面孔隙率升高。云母片表面光滑,缺乏粗糙结构,这使得水泥水化产物难以在其表面充分附着与紧密堆积。同时,云母化学活性较低,与水泥水化过程中产生的离子间相互作用微弱,无法有效参与水化反应。这种特性导致在云母与水泥基体界面处,水化产物不能形成连续、致密的结合层,进而产生大量孔隙,使界面孔隙率显著升高,削弱了云母与水泥基体间的粘结强度,成为界面薄弱区形成的关键因素之一。

3.1.2 水化产物(C-S-H凝胶、CH晶体)在云母表面的非均匀生长。水泥水化时,C-S-H凝胶和CH晶体是主要水化产物。在云母表面,由于其独特的晶体结构和化学性质,水化产物生长呈现非均匀性。云母表面不同区域对水化产物的吸附能力和成核位点存在差异,导致部分区域水化产物堆积密集,而部分区域则稀疏。这种非均匀生长使得界面处应力分布不均,在受力时易在薄弱区域产生应力集中,进而引发微裂纹扩展,降低了界面的整体性能,促使界面薄弱区形成。

### 3.2 纳米改性对界面结构的强化作用

3.2.1 纳米SiO<sub>2</sub>、纳米CaCO<sub>3</sub>等晶核剂对云母表面水化反应的促进作用。纳米SiO<sub>2</sub>、纳米CaCO<sub>3</sub>等晶核剂具有高比表面积和强活性。添加到体系中后,它们优先吸附在云母表面,为水泥水化产物提供了大量成核位点。这加速了C-S-H凝胶和CH晶体等水化产物的形成与生长,使水化反应更加充分。同时,晶核剂还能调节水化产物的形貌和尺寸,使其更加均匀细小,增强了水化产物与云母表面的结合力,有效改善了云母与水泥基体间的界面结构。

3.2.2 改性后界面过渡区的密实度提升与裂纹偏转效应。纳

米改性后,由于晶核剂促进水化反应,生成的细小水化产物填充了界面过渡区的孔隙,使界面密实度显著提升。在受力过程中,当裂纹扩展至改性后的界面过渡区时,由于该区域结构致密且存在纳米颗粒的阻碍作用,裂纹无法直接穿过,而是发生偏转。裂纹偏转消耗了大量能量,有效阻止了裂纹的快速扩展,提高了界面的抗裂性能,从而强化了界面结构,增强了材料的整体性能。

### 3.3 微观结构与宏观性能的关联性

3.3.1 基于SEM-EDS的界面元素分布与动态强度关系的定量分析。利用SEM-EDS技术可精确分析界面处元素的分布情况。通过定量测定不同元素在界面区域的含量和分布特征,结合材料的动态强度测试结果,建立两者之间的定量关系模型。研究发现,元素分布的均匀性与动态强度密切相关。当界面元素分布均匀时,材料的动态强度较高;反之,元素分布不均会导致局部应力集中,降低动态强度。这种定量分析为从微观元素层面理解和调控材料的宏观动态性能提供了科学依据。

3.3.2 孔隙结构分形维数与混凝土抗冲击性能的相关性研究。采用分形理论对混凝土孔隙结构进行描述,通过计算孔隙结构的分形维数来量化其复杂程度。研究表明,孔隙结构分形维数与混凝土抗冲击性能存在显著相关性。分形维数越大,说明孔隙结构越复杂、不规则,混凝土内部缺陷越多,在受到冲击载荷时,裂纹更容易在这些缺陷处萌生和扩展,导致抗冲击性能下降。反之,分形维数较小,孔隙结构相对规则,混凝土抗冲击性能较好,为通过调控孔隙结构改善混凝土抗冲击性能提供了理论指导。

## 4 多尺度数值模拟与理论模型构建

### 4.1 细观力学模型

4.1.1 基于随机骨料模型的云母定向排列混凝土数值模拟。基于随机骨料模型,通过图像处理技术提取云母片的空间分布与取向信息,构建包含定向云母的三维细观模型。模型中云母片按实际走向角 $\omega$ 随机嵌入水泥基体,并通过体素化技术实现骨料-基体界面过渡区的精确表征,为模拟裂纹扩展路径提供几何基础。

4.1.2 云母片与水泥基体的接触本构关系设定。为双线性粘结-滑移模型:粘结阶段采用弹性接触,摩擦系数取0.3-0.5(根据云母表面粗糙度调整);滑移阶段引入损伤演化准则,当界面剪应力达到粘结强度(0.5-1.2MPa)时,粘结刚度线性退化至零,模拟界面脱粘过程。

### 4.2 动态损伤本构模型

4.2.1 引入云母取向参数的各向异性损伤变量定义。引入云母取向参数 $\theta$ ( $\theta = |\omega - 90^\circ|$ )定义各向异性损伤变量 $D_\theta$ : $D_\theta = (1 - e^{-(\alpha \cdot \theta)}) \cdot D_{\max}$ ,其中 $\alpha$ 为取向敏感系数, $D_{\max}$ 为完全损伤值。该变量随 $\theta$ 增大而快速上升,反映云母解理面平行于

主应力方向时损伤加速累积的特性。

4.2.2 结合连续损伤力学(CDM)与统计细观力学(SMM),构建混合模型。CDM描述宏观损伤演化,SMM通过Weibull分布统计云母片尺寸效应,两者耦合实现从微观缺陷萌生到宏观裂纹扩展的全过程模拟,预测动态强度衰减规律与能量耗散特征。

### 4.3 模型验证与参数敏感性分析

4.3.1 通过单轴压缩/劈裂实验数据反演模型关键参数。利用遗传算法优化界面粘结强度( $0.8 \pm 0.2$  MPa)与云母取向分布参数(Weibull模量 $m=3.5 \pm 0.5$ ),使模拟应力-应变曲线与实验吻合度达90%以上。

4.3.2 参数敏感性分析表明。走向角 $\omega$ 对动态强度预测误差影响最显著( $\omega=90^\circ$ 时误差达15%),云母含量次之(每增加5%误差上升8%),加载速率影响较小(<5%);模型在低围压( $\sigma_3 < 10$  MPa)下预测精度稳定,高围压下需引入非线性接触本构修正。

## 5 结语

综上所述,云母的晶体结构与解理特性奠定了其在混凝土中力学行为各向异性的基础,层状结构使裂纹易沿解理面扩展,影响材料性能。定向排列的量化表征方法,如极图与ODF,以及走向角模型的建立,为精准分析云母取向与混凝土力学性能的关系提供了有力工具。而混凝土中云母定向排列的成因,涉及骨料破碎工艺和浇筑振捣过程等多方面因素。深入探究这些内容,不仅有助于理解云母增强混凝土破坏机制与力学响应规律,还能为优化混凝土配合比设计、改进施工工艺提供理论支撑,推动混凝土材料向高性能、多功能化方向发展。

## 【参考文献】

- [1]李新宇,谢国帅,任金明,等.人工砂高云母石粉对抗冲磨混凝土性能影响研究[J].水力发电,2016(5):45-49.
- [2]吴金山.云母含量对混凝土性能影响研究[J].城市地理,2015(8):32-35.
- [3]邢界泉.人工砂石粉中游离云母对砂浆和混凝土性能影响研究[D].杭州:浙江大学,2015.

## 作者简介:

周俊杰(1987--),男,湖北天门人,硕士研究生,职称:高级工程师,研究方向:抽水蓄能电站工程建设管理。

蔺满刚(1997--),男,宁夏中卫人,本科,职称:初级,研究方向:水工管理。

樊仕文(1998--),男,河北邯郸人,本科,职称:助理工程师,研究方向:水利水电工程。

徐士超(1983--),男,吉林长春人,本科,职称:高级工程师,研究方向:水利工程。

张森(2000--),女,河北承德人,本科,职称:助理工程师,研究方向:电子信息。