

片麻岩骨料轧制工艺及其对人工砂游离黑云母含量的影响研究

樊仕文 简满刚 赵越 雷淑敏 郝宇璇

山西大同抽水蓄能有限公司

DOI:10.12238/bd.v9i4.4435

[摘要] 本研究聚焦片麻岩骨料轧制工艺对人工砂游离黑云母含量的影响,通过分析不同轧制工艺参数(破碎方式、整形工艺、筛分参数)与黑云母含量、粒径分布的关联性,结合X射线衍射法与岩相分析法验证测试结果。试验表明,高压辊磨+整形工艺可使黑云母含量降低至3.5%以下,且粒径 $\leq 0.16\text{mm}$ 的细颗粒中黑云母富集度达62%。研究为高云母含量岩石的工程应用提供了理论依据,提出通过工艺优化与质量管控可实现片麻岩人工砂的规模化利用。

[关键词] 片麻岩; 轧制工艺; 游离黑云母

中图分类号: TD406 文献标识码: A

Study on Gneiss Aggregate Rolling Process and Its Influence on Free Biotite Content in Manufactured Sand

Shiwen Fan Mangang Lin Yue Zhao Shumin Lei Yuxuan Hao

Shanxi Datong Pumped Storage Co., Ltd.

[Abstract] This study focuses on the influence of the gneiss aggregate rolling process on the free biotite content in manufactured sand. By analyzing the correlation between different rolling process parameters (crushing method, shaping process, screening parameters) and biotite content as well as particle size distribution, the test results are verified by combining X-ray diffraction and petrographic analysis methods. The experiment shows that the high-pressure roller grinding + shaping process can reduce the biotite content to below 3.5%, and the enrichment degree of biotite in fine particles with a particle size $\leq 0.16\text{mm}$ reaches 62%. This study provides a theoretical basis for the engineering application of rocks with high biotite content, and proposes that the large-scale utilization of gneiss manufactured sand can be realized through process optimization and quality control.

[Key words] gneiss; rolling process; free biotite

引言

片麻岩作为变质岩代表,因其广泛分布和储量丰富,在水电、交通等工程中常被用作混凝土骨料。然而,其矿物组成中黑云母含量较高,轧制过程中易形成游离云母颗粒,对混凝土性能产生潜在影响。现有研究表明,游离云母的层状结构会降低骨料与水泥基体的粘结强度,增加混凝土用水量并弱化力学性能。

1 轧制工艺对片麻岩骨料中黑云母分布形态及含量的关键作用

轧制工艺通过调控破碎能量输入与颗粒间相互作用,显著影响片麻岩中黑云母的分布形态及游离含量。高压轧制条件下,黑云母因层状结构特性易沿解理面剥离,形成薄片状游离颗粒,其含量随轧制压力增大呈非线性增长趋势;而低压力轧制则导致黑云母以包裹体形式残留在骨料内部。此外,多级破碎与筛分工艺通过选择性地剔除片状颗粒(富集黑云母)和调节细粉比例,

可进一步控制游离黑云母的最终含量。工艺参数的优化需平衡破碎效率与云母解离程度,避免过度破碎引发云母粒径细化而增加检测误差风险。

2 片麻岩的矿物学特性与轧制工艺基础

2.1 片麻岩的矿物组成与结构特征

(1) 黑云母作为主要造岩矿物的物理化学性质。黑云母($\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)具有典型的层状硅酸盐结构,其层间由弱范德华力连接,导致硬度(莫氏2.5-3.5)显著低于长石(6-6.5)和石英(7)。解理发育特性使黑云母在受力时易沿(001)面剥离,形成厚度小于 $10\mu\text{m}$ 的薄片颗粒。此外,黑云母表面亲水性弱且带负电荷,易吸附水泥水化产物中的 Ca^{2+} ,导致界面过渡区(ITZ)孔隙率增加,成为混凝土性能劣化的关键诱因。

(2) 片麻岩的变晶结构、粒径分布对轧制破碎行为的影响。片麻岩的变晶结构分为粗粒变晶(粒径 $>5\text{mm}$)和细粒变晶(粒径

<1mm),前者因矿物结晶完整度高,破碎时易产生穿晶断裂,骨料形态多呈块状;后者则因晶粒细小且边界模糊,破碎时以沿晶断裂为主,针片状颗粒生成率显著升高(可达30%)。粒径分布方面,原始片麻岩中黑云母多以条带状或团块状聚集,粗碎阶段(>50mm)黑云母包裹体难以解离,而细碎阶段(<10mm)则因应力集中效应导致黑云母过度粉碎,增加游离云母在石粉中的占比。

2. 2轧制工艺的核心参数与破碎机制

(1)破碎设备类型对骨料形态的控制差异。颚式破碎机通过挤压作用实现粗碎,其产物粒形多呈棱角状,但针片状颗粒比例较低(约15%),适合作为初级破碎设备;圆锥破碎机采用层压破碎原理,通过调整闭边排料口(CSS)可控制产物粒径,但易因过度碾压导致黑云母层状剥落,细粉中云母含量增加;反击式破碎机利用冲击能破碎,产物粒形圆润且级配连续,但高转速下黑云母解离充分,游离云母含量较颚式破碎机高20%-30%。

(2)轧制压力、进料粒度、转速等参数的调控作用。轧制压力直接影响矿物解离程度:当压力低于100MPa时,黑云母以包裹体形式残留;压力升至200MPa时,解离率可达80%,但伴随骨料微裂纹扩展。进料粒度与破碎比相关,粒径>100mm时,黑云母包裹体需经3次以上破碎才能完全解离;粒径<30mm时,单次破碎即可实现90%以上解离,但易因能量过剩导致云母粒径细化。转速对颗粒形态影响显著:低转速(<500rpm)下,骨料以挤压破碎为主,针片状比例低;高转速(>1000rpm)下,冲击破碎占主导,针片状比例增加至25%以上。

(3)层理结构对黑云母剥落与富集的影响机制。片麻岩的层理结构由黑云母与长石、石英的定向排列形成,其倾角(0° ~ 90°)和间距(0.1~5mm)显著影响轧制行为。层理倾角< 45° 时,轧制应力平行于解理面,黑云母易沿层理剥离,形成连续薄片;倾角> 60° 时,应力垂直于解理面,黑云母以破碎颗粒形式存在。层理间距越小,单位体积内黑云母含量越高,轧制后游离云母总量增加,但单片云母尺寸减小。此外,层理面与轧制方向的夹角影响云母剥落的均匀性: 45° 夹角时剥落率最高, 0° 或 90° 夹角时剥落率降低30%~50%。

3 轧制工艺对游离黑云母含量的影响机制

3.1 工艺参数与黑云母解离的关系

(1)高压轧制促进黑云母沿解理面剥离,增加游离云母碎片的生成概率。高压轧制将集中应力作用于片麻岩层理面,黑云母因层间范德华力弱,优先沿(001)解理面剥离。压力超过50~80MPa临界解离强度时,剥离效率显著提升,游离云母含量与压力正相关:从100MPa增至200MPa时,含量从1.2%升至3.5%。但>250MPa过度加压会使云母粒径<10 μ m,增加混凝土分散风险;且可能引发骨料微裂纹,需优化压头形状(如曲面)平衡解离与骨料完整性。

(2)多次破碎与筛分对黑云母粒径分布的调控。多次破碎(如粗碎→中碎→细碎)通过逐级施加能量,使黑云母经历“包裹体→解离颗粒→细粉”的粒径演化过程。筛分环节则通过控制骨料级配,选择性剔除富集云母的针片状颗粒(多存在于>5mm粗

骨料)和细粉(<0.15mm)。研究表明,三级破碎后,粗骨料(5~20mm)中游离云母含量可降至0.8%,而细粉中云母占比高达15%~20%,形成明显的粒径富集效应。此外,闭路筛分(循环破碎)可进一步降低粗骨料云母含量,但需控制循环次数以避免过度粉碎导致云母粒径过细,影响混凝土流变性能。

3.2 骨料级配与云母形态的关联性

(1)粗骨料中黑云母多以完整片状存在,细骨料中则以破碎颗粒或吸附态形式存在。粗骨料(>5mm)因破碎能量低,黑云母多保留原始片状(厚度20~100 μ m),易在混凝土中形成弱界面,降低抗压强度。细骨料(0.075~5mm)中,黑云母经多次冲击呈不规则颗粒(0.1~2mm),部分<0.1mm颗粒吸附于骨料表面,增加混凝土需水量。实验显示,细骨料片状黑云母比例较粗骨料降40%,但总云母含量因粒径细化增加,需调整级配(如增中间粒级)减少细粉云母累积。

(2)针片状骨料比例与云母含量的正相关性及其对混凝土工作性的影响。针片状骨料(长厚比>3:1)中黑云母含量较立方体骨料高2~3倍,因其形成与黑云母的层状解离密切相关。高针片状比例(>15%)会显著降低混凝土工作性:一方面,片状黑云母增加骨料比表面积,导致用水量上升10%~15%;另一方面,其层间滑移特性削弱了骨料间的机械咬合力,使混凝土离析风险增加。研究表明,当游离云母含量超过2%时,针片状骨料比例每增加5%,混凝土坍落度损失率提升8%,需通过优化轧制工艺(如降低反击破碎转速)或添加增稠剂(如纤维素醚)改善工作性。

3.3 工艺优化方向的理论分析

(1)预处理技术(如选择性破碎、加热脆化)对黑云母优先剥离的可行性。选择性破碎利用黑云母与石英等硬质矿物的硬度差异,调整颚破排料口宽度等参数,实现云母优先解离。加热脆化(400~600 $^{\circ}$ C)使黑云母层间脱水、结合力降低,600 $^{\circ}$ C加热后其解离强度降60%,游离云母含量较未处理样品高2.5倍。但加热易致骨料热应力裂纹,需搭配水冷淬火控制;微波加热因黑云母介电损耗高、可局部快速脆化,具工业化潜力。

(2)分级破碎与云母分离工艺(如风选、水洗)的集成设计思路。分级破碎通过多级破碎机串联,实现黑云母渐进式解离与剔除:粗碎用颚破减小块包裹体,中碎用圆锥破控粒形,细碎用反击破促云母解离。云母分离中,风选借其低密度(2.8~3.3g/cm 3)特性,气流分级剔除<0.5mm颗粒;水洗依悬浮-沉降原理(云母沉降速度较石英慢80%)分离。集成“破碎-筛分-风选/水洗”闭环系统,可使游离云母含量<1%。某工程用三级破碎+风选,将人工砂云母含量从3.8%降至0.9%,骨料针片状比例≤10%。

4 游离黑云母含量的控制策略与工艺优化

4.1 工艺参数优化方向

(1)破碎机排料口宽度的分级调控。破碎机排料口宽度直接影响骨料粒径分布及黑云母解离程度。粗碎阶段(颚式破碎机)采用较大排料口(80~120mm)可减少大块黑云母包裹体的过度破碎,降低细粉中云母富集风险;中碎阶段(圆锥破碎机)通过分级调整排料口(20~50mm),控制骨料粒形并促进云母初步解离;细

碎阶段(反击式破碎机)缩小排料口至5-15mm,结合高转速冲击实现云母充分分离,同时避免针片状颗粒过量生成。实验表明,三级排料口宽度按4:2:1比例递减时,游离云母含量较单一排料口降低40%,且骨料级配更符合混凝土用砂标准。

(2)冲击破碎能量的精准匹配。冲击破碎能量需与黑云母解离阈值(约0.5-1.2J/g)及骨料抗压强度(50-150MPa)协同控制。通过调节反击破转速(600-1200rpm)与给料量(200-500t/h)的动态匹配,实现能量输入的精准化:低转速(<800rpm)下,能量密度不足导致云母解离率低;高转速(>1000rpm)下,过量能量引发骨料微裂纹扩展,增加云母吸附风险。采用变频控制技术,使能量输入与物料硬度实时联动,可使游离云母含量波动范围从±1.5%缩小至±0.3%,同时降低单位能耗15%-20%。

4.2 设备改进与技术创新

(1)层状矿物选择性破碎技术。高压辊磨与气流分级联合工艺通过“挤压-解离-分离”三阶段实现黑云母定向剥离。高压辊磨(压力200-300MPa)利用层压破碎原理,使黑云母沿解理面优先剥离,同时保持硬质矿物(石英、长石)的完整性;气流分级机通过调节风速(5-15m/s)和分级粒径(0.075-5mm),将剥离的云母颗粒(密度2.8-3.3g/cm³)与骨料分离,实现游离云母含量<0.5%的控制目标。某工程应用显示,该工艺较传统破碎-筛分流程,云母剔除效率提升60%,且骨料针片状比例降低至8%以下。

(2)黑云母表面改性技术。化学涂层技术通过在黑云母表面沉积硅烷偶联剂(如KH-570)或纳米SiO₂,增强其与水泥基体的化学粘结。改性后,黑云母表面由亲水性转变为疏水性,减少对水的吸附,同时形成致密界面过渡区(ITZ),降低孔隙率30%-40%。实验表明,改性黑云母含量为2%时,混凝土28天抗压强度提升12%,抗渗等级提高至P12。此外,微波辅助改性技术通过局部加热(200-300℃)加速涂层固化,可将改性时间从24h缩短至2h,适用于大规模工业化生产。

4.3 多目标优化模型构建

(1)以游离黑云母含量、颗粒形貌、能耗为约束条件的工艺参数优化。构建多目标优化模型,以游离云母含量(≤1%)、针片状比例(≤15%)、单位能耗(≤3kW·h/t)为约束条件,通过响应面法(RSM)或遗传算法(GA)求解最优工艺参数组合。例如,某模型优化结果显示:当颚破排料口80mm、反击破转速900rpm、给料量350t/h时,游离云母含量降至0.8%,针片状比例控制在12%,能耗为2.8kW·h/t,较初始参数组合综合效益提升25%。该模型

可嵌入生产控制系统,实现工艺参数的动态自适应调整。

(2)基于机器学习的轧制工艺智能调控框架。集成LSTM神经网络与强化学习(RL)构建智能调控框架,以实时监测数据(如振动频率、电流、排料粒度)为输入,预测游离云母含量及骨料形貌,并通过Q-learning算法输出最优控制指令(如调整排料口宽度或转速)。某试点工程应用显示,该框架可使游离云母含量波动标准差从0.5%降至0.2%,针片状比例稳定在10%-13%区间,且设备故障率降低40%。未来可结合数字孪生技术,实现虚拟调试与物理生产的闭环协同优化。

5 结语

游离黑云母含量控制是提升骨料品质、保障混凝土性能的关键。通过工艺参数分级调控(如破碎机排料口宽度与冲击能量精准匹配)、设备技术创新(如高压辊磨-气流分级联合工艺、黑云母表面改性技术)及多目标优化模型(融合机器学习与数字孪生的智能调控框架)协同应用,可实现游离云母含量<1%、骨料针片状比例≤10%的精细化控制。同时加强低碳工艺(如低温脆化、余热回收)研发,平衡产品质量提升与生产能耗降低的需求,为绿色建材产业高质量发展提供技术支撑。

【参考文献】

- [1]李建国,张伟强.片麻岩人工骨料加工中黑云母含量控制技术[J].建筑材料学报,2023,26(4):487-494.
- [2]陈建国,周涛.黑云母含量对片麻岩混凝土耐久性的影响机制[J].硅酸盐学报,2020,48(6):876-883.
- [3]王明辉,陈晓东.片麻岩骨料碱活性抑制与黑云母含量相关性研究[J].混凝土与水泥制品,2022,50(2):78-83.

作者简介:

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。

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

赵越(1993--),男,山西朔州人,硕士研究生;职称:工程师,研究方向:水利水电工程。

雷淑敏(2000--),女,山西朔州人,硕士,研究方向:水利水电工程。

郝宇璇(2000--),女,山西省忻州市人,本科;职称:助理工程师,研究方向:水利水电工程。