

碳酸盐岩储层白云石化作用对储集性能的影响

侯瑞卿

中石化经纬有限公司胜利地质录井公司 山东 东营 257000

摘要：随着油气勘探向深部、复杂构造区推进，碳酸盐岩储层作为全球油气产量的重要支柱，本文聚焦碳酸盐岩储层白云石化作用对储集性能的影响。首先阐述白云石化作用的基本概念与主要类型，接着深入分析其对储集性能的多方面影响，包括孔隙结构、渗透性及储层非均质性。同时探讨影响白云石化作用的关键因素，如流体性质、地质环境和时间因素。最后介绍研究白云石化作用与储集性能的常用方法，涵盖岩相学与显微成像、地球化学示踪、数值模拟以及动态成岩演化分析等技术，旨在为碳酸盐岩储层评价与开发提供理论依据。

关键词：碳酸盐岩储层；白云石化作用；储集性能；影响

引言：碳酸盐岩储层在全球油气储量中占据重要地位，其储集性能受多种成岩作用影响，白云石化作用是其中关键因素之一。白云石化作用能显著改变碳酸盐岩的矿物组成与岩石结构，进而对储层的孔隙度、渗透率等储集性能参数产生重要影响。深入研究白云石化作用对储集性能的影响机制，不仅有助于揭示碳酸盐岩储层的形成与演化规律，还能为油气勘探开发提供重要的地质理论支撑，指导精准寻找优质储层，提高油气采收率，具有重要的理论与实际意义。

1 白云石化作用的基本概念与类型

1.1 基本概念

白云石化作用是碳酸盐岩成岩过程中一种关键的矿物替代反应，指方解石或文石等钙质矿物在特定地质条件下被白云石部分或完全取代的化学过程。这一作用通过镁离子置换钙离子实现，其核心驱动力是流体中镁钙比值的显著升高。当富含镁离子的流体与钙质矿物接触时，镁离子会逐步进入矿物晶格，取代钙离子的位置，最终形成化学式为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 的白云石。白云石化作用可发生于沉积物沉积后的不同阶段，包括沉积物尚未完全固结的准同生期、地层浅埋藏的成岩早期，以及深部埋藏的成岩晚期至变质作用前。该过程会显著改变岩石的物理性质，使原本致密的灰岩转变为孔隙度更高、渗透率更强的白云岩，从而为油气等流体的储集和运移提供有利空间^[1]。

1.2 主要类型

白云石化作用按成因机制可分为三大类：第一类是原生化学沉淀型，主要形成于现代高盐度蒸发环境，如潮上带的萨勃哈盐坪。在这种环境中，海水通过蒸发作用不断浓缩，镁钙比值逐渐升高，当达到一定阈值时，白云石直接从溶液中沉淀出来，形成原生白云岩。这类

白云岩通常具有极细的晶体结构，并常伴随石膏假晶和鸟眼构造等特征性沉积结构。第二类是次生交代型，其形成与沉积物埋藏后的成岩作用密切相关。根据流体来源和作用环境的不同，又可细分为准同生白云石化、埋藏白云石化和混合水白云石化。准同生白云石化发生在潮上带蒸发环境，受毛细管浓缩作用控制；埋藏白云石化则与深部地层压实脱水形成的富镁流体有关；混合水白云石化则是由海水与淡水混合导致方解石溶解度降低而引发。第三类是热液改造型，主要与高温热液活动相关。深部热液沿断裂带上升，携带大量镁离子，在适宜的物理化学条件下，会形成鞍状白云石胶结物，对原有岩石进行改造，形成热液白云岩。这类白云石化作用常伴随硅化、萤石化等其他热液活动标志。

2 白云石化作用对储集性能的影响

2.1 对孔隙结构的影响

白云石化作用通过矿物替代反应显著改变碳酸盐岩的孔隙结构。在交代过程中，白云石晶体通常比原岩方解石更小且自形程度更高，这种晶体形态变化可形成两种截然不同的孔隙效应：一方面，细小自形的白云石晶体可能填充原有孔隙，导致孔隙空间减少，尤其在交代不彻底时，残留的方解石与新生白云石混合，形成低渗透的致密层；另一方面，若交代作用彻底且晶体呈半自形至自形，晶间孔隙将显著发育，形成连通性良好的储集空间。此外，白云石化过程中常伴随重结晶作用，原岩中的微孔隙通过晶体长大和晶界调整，可演变为中-大孔隙，进一步增强孔隙连通性。值得注意的是，白云石化作用还可能诱导溶蚀作用，如酸性流体沿白云石晶界或交代界面选择性溶解，形成次生溶孔，这种复合孔隙系统的发育对储层质量提升具有叠加效应。

2.2 对渗透性的影响

白云石化作用对渗透性的影响呈现双重性特征。在交代初期,若白云石晶体细小且分布均匀,可能堵塞原有喉道,导致渗透率降低;但随着交代作用的持续进行,晶间孔隙的发育和连通性改善逐渐成为主导因素。当白云石晶体达到半自形至自形阶段时,晶间孔隙形成稳定的渗流通道,渗透率可提升数倍至数十倍。此外,白云石化作用通过改变岩石的矿物组成和结构,增强了岩石的抗压实能力,使得埋藏过程中孔隙不易被压实闭合,从而保留了更高的渗透率。在热液改造型白云石化中,高温流体携带的镁离子快速交代方解石,形成鞍状白云石胶结物,这种胶结物虽部分充填孔隙,但常伴随热液溶蚀作用,形成高渗透的裂缝-孔洞系统,显著提升储层的渗流能力。

2.3 对储层非均质性的影响

白云石化作用是导致碳酸盐岩储层非均质性的重要控制因素。由于白云石化流体的运移路径和反应强度存在差异,不同区域或层位的白云石化程度往往不均一,形成斑块状或层状分布的白云岩体。这种非均质分布直接导致储层孔隙度和渗透性的空间变异,例如,白云石化强烈的区域可形成高产富集区,而未交代或交代微弱的区域则构成低渗透隔层。此外,白云石化作用常与断裂、溶蚀等构造-成岩作用耦合,形成复杂的孔隙网络系统,进一步加剧储层的非均质性。在埋藏环境中,白云石化作用与压实、压溶等成岩作用叠加,导致储层垂向上呈现明显的韵律性变化,如白云岩与致密灰岩的互层分布。这种多尺度非均质性对油气开发提出挑战,需通过精细地质建模和动态分析来优化开发方案^[2]。

3 影响白云石化作用的主要因素

3.1 流体性质

流体性质是白云石化作用的核心控制因素,其化学组成、物理状态及运移能力直接影响反应的进行。首先,流体的镁钙比(Mg/Ca)是决定白云石化能否发生的直接条件,通常需达到5:1以上才能驱动方解石向白云石的转化。高盐度流体(如蒸发海水)通过蒸发浓缩作用可显著提高 Mg/Ca 比值,而深部地层中的泥岩脱水或热液活动也能形成富镁流体。其次,流体的酸碱度(pH 值)和氧化还原条件(Eh)影响白云石的稳定性,中性至弱碱性环境(pH 7-9)更有利于白云石沉淀。此外,流体的温度和压力通过改变矿物溶解度和反应动力学速率,调控白云石化的强度和产物特征,例如高温热液流体($>120^{\circ}\text{C}$)可形成鞍状白云石,而低温流体则生成细晶白云石。

3.2 地质环境

地质环境通过控制流体来源、运移路径和反应空间,

间接调控白云石化作用的类型和规模。在沉积环境方面,潮上带萨勃哈盐坪、潟湖等蒸发环境是原生白云石化的主场所,其高盐度、高 Mg/Ca 比值流体为白云石沉淀提供了理想条件;而埋藏环境中,压实脱水作用和热液活动则成为富镁流体的主要来源。构造环境同样关键,断裂带和裂缝网络可作为流体运移的通道,促进区域性白云石化,例如背斜轴部或断层附近常发育大规模白云岩体。此外,地层岩性组合影响白云石化的选择性,厚层灰岩因渗透率低易形成斑块状白云岩,而薄层灰岩与蒸发岩互层则有利于层状白云岩的发育。古气候条件也通过控制蒸发作用强度,间接影响蒸发环境中白云石化的发生频率,干旱气候区更易形成大规模白云岩。

3.3 时间因素

时间因素通过控制白云石化作用的持续时长和反应阶段,影响其最终产物特征。在准同生期,沉积物尚未完全固结,毛细管浓缩作用可快速形成原生白云石,但交代作用通常不彻底,易残留方解石;随着埋藏深度增加,成岩早期至中期的埋藏白云石化作用因流体运移距离短、反应速率慢,常形成细晶至中晶白云岩,且孔隙度随交代程度加深而逐渐降低;深埋藏期($>3\text{ km}$)的白云石化作用则与热液活动或构造挤压相关,高温高压条件加速反应动力学,形成粗晶或鞍状白云石,并伴随溶蚀作用形成次生孔隙。此外,白云石化作用的时间跨度也影响储层非均质性,长期持续的流体活动可形成多期白云石叠加的复合储层,而短期作用则导致白云岩分布局限。

4 白云石化作用与储集性能研究的方法

4.1 岩相学与显微成像技术

岩相学与显微成像技术是研究白云石化作用的基础方法,通过显微观察揭示矿物交代关系、晶体结构及孔隙特征。普通光学显微镜可识别白云石与方解石的交代边界、残余结构及孔隙类型(如晶间孔、溶蚀孔),结合染色技术可区分不同成岩阶段的矿物组合。扫描电子显微镜(SEM)与能谱分析(EDS)进一步揭示白云石晶体形态(自形、半自形或他形)、晶格缺陷及微量元素分布,例如镁离子在晶格中的有序度可反映成岩流体性质。阴极发光技术通过矿物发光特性区分母岩类型,如潮上带白云岩常呈现橙黄色发光,而埋藏白云岩因重结晶作用发光较弱。透射电镜(TEM)则用于研究纳米级孔隙结构及晶体缺陷,揭示白云石化对储层微观连通性的影响。近年来,三维X射线显微成像(3D-XRM)技术实现了孔隙网络的三维重构,可量化孔隙体积、比表面积及连通性,为渗透率模拟提供关键参数。

4.2 地球化学示踪技术

地球化学示踪技术通过分析白云岩及成岩流体的同位素与元素组成,重建白云石化作用的环境与过程。碳-氧同位素($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$)是判断流体来源与温度的重要指标,蒸发泵模式形成的白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正,反映高盐度流体作用;而埋藏白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负,提示深部热液或压实脱水流体的参与。锶同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)可区分海水与大陆淡水来源,例如海相白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 接近同期海水值,而混合水白云石化则显示中间值。微量元素(如Fe、Mn、Zn)的含量与比值可指示氧化还原条件,例如高Fe、Mn含量反映还原环境,与热液白云石化相关。稀土元素(REE)配分模式可追溯流体来源,如热液流体常显示轻稀土富集特征。近年来,非传统稳定同位素(如Cl、Mg同位素)的应用进一步细化了白云石化机制,例如Mg同位素分馏可区分蒸发浓缩与热液交代作用。

4.3 数值模拟技术

数值模拟技术通过建立数学模型,量化白云石化作用的动力学过程及其对储层性能的影响。反应-输运模型耦合流体流动、化学平衡与矿物反应,模拟白云石化过程中孔隙度、渗透率的动态演化,例如揭示富镁流体迁移路径对白云岩分布的控制作用。热力学计算软件(如PHREEQC、GEMS)可预测不同温压条件下白云石的稳定性,优化地球化学示踪结果的解释。孔隙网络模型基于显微成像数据构建三维孔隙结构,模拟流体在白云岩中的渗流行为,评估晶间孔与溶蚀孔的连通性对渗透率的贡献。机器学习算法则用于处理多源数据(如岩相、地球化学、测井),建立白云石化强度与储层质量的预测模型,提高勘探开发效率。此外,地质时间尺度模拟可再现白云石化作用的分期性,例如区分准同生期、埋藏期与构造期白云石化的叠加效应,为储层非均质性评价提供理论依据。数值模拟与实验数据的交叉验证,显著提升了白云石化作用研究的定量化和预测能力。

4.4 动态成岩演化分析

动态成岩演化分析通过整合多学科数据,重建白云石化作用的时间序列与空间分布规律。沉积相与层序地

层分析可确定白云石化作用的初始环境,例如潮上带萨勃哈环境是原生白云石化的典型场所。构造变形分析揭示断裂、褶皱对流体运移的控制作用,例如断层相关裂隙为富镁流体提供了渗透通道,促进区域性白云石化。热史与埋藏史模拟可量化温度-压力条件对白云石化反应速率的影响,例如深部热事件可加速热液白云石化作用。成岩序列分析通过交叉切割关系确定白云石化与其他成岩作用(如压实、胶结、溶蚀)的先后顺序,例如白云石化可能早于或晚于方解石胶结,形成不同的孔隙演化路径。同位素年代学(如U-Pb定年)可直接测定白云石的形成时代,结合区域构造-热事件,建立白云石化作用的年代学框架。动态成岩演化分析强调成岩过程的连续性与反馈机制,例如白云石化通过改变岩石力学性质影响后续构造变形,而构造活动又为新的白云石化提供条件,形成“构造-成岩-储层”的耦合演化模型^[3]。

结语

白云石化作用作为碳酸盐岩储层改造的关键机制,通过晶体结构重构与孔隙系统优化显著提升了储层的渗流能力。其影响具有双重性:一方面,白云石对方解石的交代作用可形成晶间孔、溶蚀孔等有效储集空间,配合裂隙网络构建高渗透通道;另一方面,过度白云石化或后期胶结可能堵塞孔隙,导致储层非均质性增强。深入理解白云石化作用的类型、期次及与构造-热事件的耦合关系,是精准预测优质储层分布的核心。

参考文献

- [1] 时国,田景春,吴永良,等.南华北地区下古生界碳酸盐岩成岩作用及其对储层的影响[J].地质科技情报.2021,(2)134-135
- [2] 牛永斌,钟建华,王培俊,等.成岩作用对塔河油田二区奥陶系碳酸盐岩储集空间发育的影响[J].中国石油大学学报(自然科学版).2022,(6).1673-5005
- [3] 杜红权,朱如凯,何幼斌,等.柴西南地区古-新近系砂岩储层成岩作用及其对储层物性的影响[J].中国地质.2021,(1).1000-3657