

无损探伤技术在储层研究中的应用

林万象 李玉兰

(地矿部石油地质中心实验室, 无锡 214151)

无损探伤技术经改进后可用于储层孔裂隙的研究, 本文着重介绍了其中的 X 射线及软 X 射线照相、超声波全息摄影、裂隙着色探测等方法。

关键词 无损探伤 储层研究 X 射线 着色探测

第一作者简介 林万象 男 54 岁 高级工程师 实验测试

工业无损探伤技术在材料与设备质量检验工作中有其十分重要地位, 它已广泛地应用于材料、航空航天、造船、铁路、交通、机械、化工、发电、电子、核工业等等方, 可以说它已深入到各个工业部门。石油工业的大量高压储罐、容器、管道也需经无损探伤的检验才能投入使用。因此无损探伤是一项常用而有效的检验测试方法。

工业无损探伤的方法手段很多, 常用的有 X 射线探伤、 γ 射线探伤、超声波探伤、磁粉探伤、荧光探伤、着色探伤等等方法。新发展的 CT 扫描、超声波全息摄影、核磁共振成像等技术, 也可用于无损探伤。不同性质的材料、不同类型的缺陷, 可以选择一种或几种有效的方法进行探测研究, 在不损坏材料的基础上, 了解其结构、组分分布、受损程度等等, 确定材料或设备的质量及安全状况。

我室由 60 年代末开始, 为了研究碳酸盐的储集性能, 开始探索无损探伤技术在储层研究中的应用, 先后应用工业 X 射线、软 X 射线、超声波全息摄影、着色探测等方法对以碳酸盐岩为主的裂隙型储层进行研究, 取得了一些进展, 其中岩石裂隙着色渗透测定方法已经用于测试生产, 并编写了方法标准正式发布。

1 X 射线照相研究岩石的孔隙和裂隙

我室从 70 年代初开始应用 X 射线对碳酸盐岩的孔隙进行摄片研究, 过去 X 射线照相主要用于研究人体内部病变部位的确定及金属材料内部缺陷的研究, 在地质工作中曾经有人用 X 射线照相的方法研究厚层碎屑岩的细微构造特征并取得了一定的成效。

X 射线照相是依据 X 射线在穿透物质时会被物质所吸收, 使 X 射线强度衰减。当被穿透的物质在等厚条件下, X 射线强度衰减与被穿透的物质密度有关, 物质密度越大, X 射线强度衰减也越大。因此当物质内部密度发生不均匀变化时, X 射线穿透过物质后, 就会出现不同程度地强度衰减, 并可用照相的方法将其记录在照片上, 从而可从照片上分析物质内部结构的差异。岩石内部的各种矿物组分及孔裂隙间亦存在密度差异, 不同的只是这种密度差异没有金属材料那样显著, 没有人体病变那样明显, 只要想法摸索一套适应低密度差、高分辨率的拍摄条件, 就能使 X 射线照相方法为研究储油岩的孔隙与裂隙服务。

我们主要用 X 射线照相来研究碳酸盐岩,由于碳酸盐岩裂隙发育,并且孔隙往往有相当数量是溶孔组成,溶孔孔径一般较大,在 X 射线照片中很容易辨认,因此用 X 射线照相来研究碳酸盐岩是比较有效的。对一些分布不均匀的微孔,在 X 射线照片中也能通过照片中黑白差的不均匀分布进行判断,为了进一步研究孔裂隙的连通性,提高判断微细孔裂隙的分辨率,验证一些细微孔裂隙的存在,可采用岩样在拍摄 X 射线照片后,用真空饱和碘化物溶液,让孔裂隙内充满强烈吸收 X 射线的碘化物,再在同等条件下进行 X 射线照相。这样原来 X 射线容易穿透的孔裂隙,现在由于充满碘化物溶液,X 射线穿透孔裂隙的能力较一般成岩矿物还差,造成 X 射线照片中孔裂隙部份黑白倒转,可从照片中明显看出孔裂隙的分布,对研究孔裂隙的连通性提供了可靠的资料。

软 X 射线照相是在 X 射线照相基础上发展起来的,一般 X 射线管的阳极靶为钨靶,由于钨的原子序数较高(74),产生的 X 射线波长很短、能量高、穿透能力强,一般 250kV、15mA 的 X 射线机可穿透 80mm 钢板或 200mm 铝板。而软 X 射线管的阳极靶为钼靶,原子序数较低(42),产生的 X 射线波长长,能量较低、穿透力弱。由于 X 射线穿透力强,而岩石密度一般均较低,造岩矿物间的密度差很小,X 射线均极易穿透,造成岩石的细微构造及一些小的孔裂隙在底片上显示反差不大。软 X 射线容易被低密度物质吸收,当岩石组份密度有所改变时,射线穿过岩石的强度会发生较明显变化,在 X 射线照片中留下较明显的反差。另外因为软 X 射管的电子流能量小,靶上的焦点面积可以比 X 射线管小一至二个数量级,焦点面积越小,X 射线的照片清晰度和分辨率越高,因此软 X 射线对岩石照相比 X 射线照相所取得的照片,反映岩石的结构构造及孔裂隙要清晰得多。

通过岩石 X 射线照片的判读分析,能研究三方面的问题。一是定性解释组成碳酸盐岩的矿物成份差异。二是显示说明碳酸盐岩的一些结构与构造特征。三是能详细解释孔隙与裂隙的大小、多少、形态、充填程度及连通性,清楚地阐述孔隙与裂隙的展布情况。不但能将碳酸盐岩区划为孔隙型、裂隙型及孔隙-裂隙混合型三种储集类型,还可以和其他实验方法配合,全面认识碳酸盐岩的储油特征。

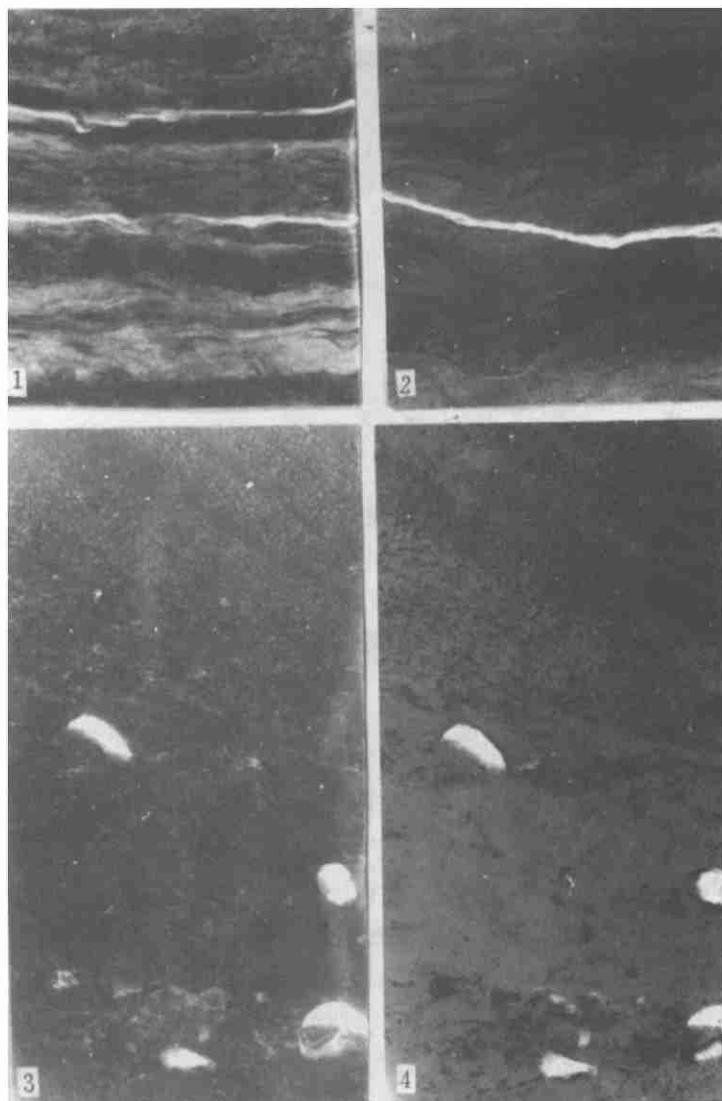
照片 1 为含陆屑粉晶介壳泥灰岩的软 X 射线照片。从照片中可清晰看到岩石具条带状构造,深色为富含介壳的粗晶方解石,浅色条带以泥质为主,上部介壳碎屑和陆源碎屑颗粒混杂,基质填充在碎屑周围(照片中深色微弯曲线状为介壳,介壳周围较浅部分为基质),呈现局部的粒状结构。在泥质和介壳条带之间有两条明显的裂隙和一些显微裂隙存在。因此该岩样有效孔隙率仅为 1.35%,而径向渗透率却为 $8.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

照片 2 为亮晶介壳泥质灰岩的饱和碘化物溶液后软 X 射线照片。照片中较深色微弯曲线状为介壳,浅色为泥晶方解石填充物,深色条带是微孔较为发育的泥质条带,黑色线条为充满碘化物的连通微裂隙。该岩样有效孔隙率为 3.67%,径向渗透率为 $24.91 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

照片 3 为针孔粉晶团粒白云岩软 X 射线照片。照片中白色点为孔隙,浅色的线条为微裂隙,上部针孔发育,呈条带状分布,与下部大孔隙带成约 20° 夹角。下部孔隙较大,其成因和生物碎屑溶蚀有关。在中部有一个象介壳的遮蔽孔,下部有几个大孔从形态看象螺铸模孔,该岩样有效孔隙度为 10.10%,单向气体渗透率为 $34.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

照片 4 为该岩样饱和碘化物溶液后的软 X 射线照片,一些较小的孔隙及微裂隙均由白转黑,大孔隙因碘化物溶液自行流出而未变色。

X射线照片研究碳酸盐岩储层,不损坏岩样,能发现肉眼与薄片鉴定中无法观察的构造特征,能在一个较大面积上研究孔裂隙与碳酸盐岩的组份、结构构造间的关系。应该讲是一个较为有效的方法。



岩石 X 射线照片

2 超声波全息摄影仪试验简况

80年代为了研究超声波在碳酸盐岩储集性能测试方面的作用,使用当时最新的日本 Canon 公司的 M200DH 超声波全息摄影仪进行试验。该仪器可以做超声波 A 显示、B 扫描、C 扫描、3D 扫描、拍摄超声波全息干涉图,并可采用氦氛激光全息成像装置恢复其三维图

像。其最高分辨率为0.7mm,一般在1mm以上。由于一般需用超声波探伤的材料质地均匀,孔裂隙量少而且个体较大,如在探伤过程中一旦发现不是事前预置的孔洞或裂缝,材料就报废不用,所以该仪器在金属材料、部件的无损探伤上是十分有效的。该仪器可以检查材料每一个断面中是否有孔洞或裂隙,也可以确定孔裂隙在平面上的分布位置,得到伤痕在三维空间的方位,并用全息干涉图将测试结果长期保存。

岩石矿物组分、结构构造很复杂,孔裂隙细小而密集,并且上下重叠。根据部份碳酸盐岩岩样的试验,超声波的A显示、回波和杂波很多、很乱,B扫描、C扫描图像不清,特别是C扫描往往出现连成片的显示,不能分辨出孔隙大小、形态、裂隙的宽窄与展布。由于当时体制、人员配备及技术条件,试验工作遇到困难,后人员和设备调走试验工作停止。

3 岩石裂隙着色渗透测定

着色探伤和荧光探伤均为工业金属材料表面微裂隙探测的方法,该两种方法操作过程有些接近,前苏联曾有杂志发表过用荧光探伤的方法,拍摄了碳酸盐岩正立方体上表面裂隙分布的照片。着色探伤用于研究岩石裂隙分布在80年代前未见报道。

我室1973年在上海材料研究所协助下用着色探伤的方法试验了碳酸盐岩表面的裂隙分布,1981年针对着色探伤只能测得岩石表面裂隙;不能了解这些裂隙是否连通,并且表面反映出来的裂隙往往有些是受外界因素影响而产生的。为了克服这些问题,利用着色剂对裂隙面强润湿渗透作用又有鲜艳的色彩,改进原着色探伤方法,使着色剂从片状岩样的底部通过裂隙自然地 toward 岩样顶部渗透,在岩样顶部渐渐呈现出证明存在可连通裂隙的鲜艳的线条,把岩样顶部的着色线条按实际尺寸描绘下来,即可得到该岩样的连通裂隙分布图,改称此方法为平面着色渗透法。1985年通过“六五”科技攻关课题《海相碳酸盐岩储集性能测试方法研究》,再次将着色渗透法从平面着色渗透改进为全岩心径向着色渗透,并将裂隙的量和对油气运移的作用用定量给以评价。1995年又正式制订并发布DZS 2001·41-94《岩石裂隙着色渗透测定方法》标准。

本方法分为径向着色渗透法及平面着色渗透法两种。径向着色渗透法适用于钻井中取出的全岩心裂隙型岩样,具有接近地层油气的实际渗流方式,剪表性强,裂隙不易破坏等优点,平面着色渗透法适用于非钻井岩样或采不到全岩心的钻井样。

径向着色渗透法的主要操作过程是将已作过全岩心孔隙率和径向气体渗透率的岩样烘干,在岩样圆柱面上画出宽、高各1cm的方格网,并用座标标出每一格的位置,同时在方格计算纸上绘出相应的岩样柱面展开图。将岩样下端面粘在岩样座上,上端面中心孔周围涂一层防渗胶。中心孔内塞入一段纤维条,注入着色剂至近顶端,立即记时。当岩样圆柱面渗出着色剂时记录时间,并在岩样圆柱面展开图上描出已渗出裂隙的相应位置、长度及时间,同时用电烙铁将石蜡熔在渗出着色剂的裂隙上。一定时间间隔进行一次上述操作,并及时往中心孔补充着色剂。一般当渗透速度倒数大于8000s/cm以上,可结束测试工作。对研究一些极微细的裂隙要知道它们的分布情况,可连续观察几天。

整理柱面展开图,丈量各时间段着色裂隙的长度,将岩样直径、中心孔直径、岩样高度、累计渗出时间、累计已渗出裂隙长度记入原始记录,并计算出各累计时间段的着色裂隙密度

和对应的着色裂隙的渗透速度倒数。

某时间已着色裂隙密度为：

$$\rho_{tc} = \frac{\sum L_t}{D\pi h}$$

式中： ρ_{tc} —— t 时间已着色裂隙密度 (cm^{-1})

$\sum L_t$ —— t 时间已着色裂隙累计长度 (cm)

D ——岩样平均外径 (cm)

h ——岩样平均高度 (cm)

某时间已着色裂隙的渗透速度倒数

$$V_t^{-1} = \frac{2t}{D-d}$$

式中： V_t^{-1} —— t 时间已着色裂隙的渗透速度倒数 (s/cm)

t ——着色剂沿裂隙从中心孔渗透到岩样圆柱面所需的时间 (s)

D ——岩样平均外径 (cm)

d ——中心孔直径 (cm)

径向着色渗透曲线，以裂隙密度为横座标，以相应的渗透速度倒数为纵坐标，在双对数座标纸上作图，得到径向着色渗透曲线图 (图 1)。

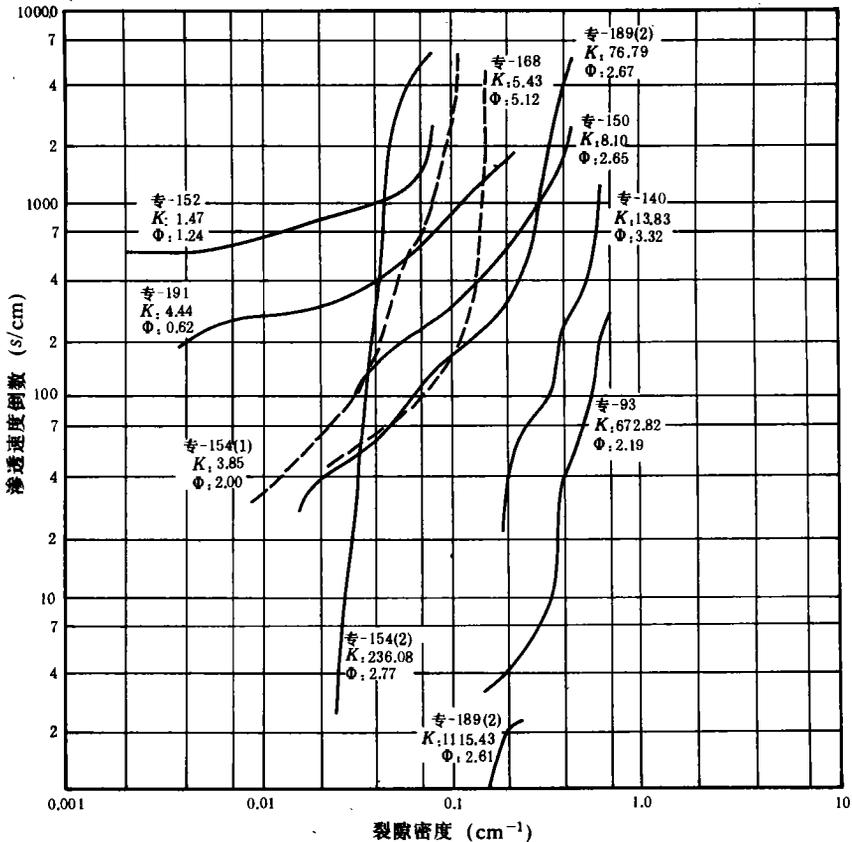


图 1 径向着色渗透曲线综合图

平面着色渗透法和径向着色渗透法相似,不重复介绍。

径向着色渗透曲线图上表示10块碳酸盐岩样所测得的径向着色渗透曲线。着色渗透曲线是反映每块岩样裂隙渗透性好坏和发育程度。

曲线起始点的速度倒数越小,说明裂隙允许流体通过的渗透性能越好。它受到以下因素的控制:(1)裂隙平均宽度的大小;(2)裂隙内充填物多少;(3)充填物成分和胶结程度;(4)裂隙的曲折程度。曲线终止点的裂隙密度越大,说明裂隙越发育。从图中可以看到专-152号岩样的着色渗透曲线在图的左上方,起始点的 $v^{-1}=500\text{s/cm}$,终止点的 $\rho_{\text{f}}=0.0811\text{cm}^{-1}$,说明该岩样裂隙发育程度差,而且渗透性也不好,其实测径向气体渗透率为 $1.4\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。专-93号岩样的着色渗透曲线在图的右下方,曲线的起始点低, $v^{-1}=3.3\text{s/cm}$,终止点靠右, $\rho_{\text{f}}=0.71\text{cm}^{-1}$,说明该岩样裂隙发育程度好,而且渗透性亦佳,其实测径向气体渗透率为 $672.82\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

从着色渗透曲线图看,决定渗透率大小的主要是曲线起始点的速度倒数大小,而终止点的座标居次要地位,以专-154(2)号样和专-140号岩样比较,尽管专-154(2)样的裂隙密度比专-140号样要小近一个数量级。因专-154(2)号样的起始点 $v^{-1}=2.6\text{s/cm}$,比专-140号样的起始点 $v^{-1}=22.5\text{s/cm}$ 要小得多,专-154(2)号样的渗透率仍远高于专-140号样。

有些岩样的着色渗透曲线也有反常现象,例专-189(2)号样的曲线起始点 $v^{-1}=27.7\text{s/cm}$,和专-140号、专-168、专-154(1)号样接近。但其渗透率值要大得多。探讨其原因主要是渗透率是用气体测定的,气体在通过岩样裂隙时,和裂隙表面基本上不发生明显的物理化学作用,而着色剂通过裂隙表面时却会受到裂隙表面的浸润性的影响。另外由于裂隙中充填泥质的多少及泥质组分,会影响对着色剂的吸附作用,也影响着色剂通过裂隙的速度。这说明着色剂测得的曲线更接近原油通过裂隙时的实际状况。

根据金属着色探伤的有关试验,着色探伤可探出金属表面不大于 $0.1\mu\text{m}$ 的微裂隙。据碳酸盐岩着色渗透法试验,着色剂经过2~3天时间可以通过方解石脉的晶间隙渗透过3cm的直线距离。

(收稿日期:1995年12月30日)

AN UNDESTRUCTIVE TRENCH-PROSPECTING TECHNOLOGY APPLIED TO THE RESEARCH OF RESERVOIR

Lin Wanxiang Li Yulan

(Central Lab of Petroleum Geology, MGMR, Wuxi 214151)

Abstract

After being improved, an undestructive trench-prospecting technology can be applied to the research of reservoir pores and fissures. X-ray and soft X-ray photography, super-sonic holography, fissure pigmentation detection and other methods are introduced emphatically in the paper.