管体视电阻率与腐蚀和疲劳损伤的关系

李永年　李晓松　吕桂玉

（中国冶金地质勘查工程总局地球物理勘查院　保定 071051）

摘要：根据视电阻率异常可以探查管体腐蚀与疲劳损伤并确定其位置；文中给出了管体视电阻率的定义，分析了管体腐蚀和疲劳损伤与其视电阻率之间的关系。

1．引言

腐蚀和疲劳损伤引发的管道运行事故不可忽视。当前，有关管道腐蚀与防护状况的地面无损检测方法大多是针对防腐层的，鲜有涉及管体腐蚀和疲劳状况的地面检测手段。检测实践证明：埋入地下的管道经过一个阶段的运行后，管体的磁导率、电阻率都与埋敷以前的有所不同，而且，腐蚀越是显著的部位，管体磁导率、电阻率的变化越大。研究表明，管体视电阻率异常与管道腐蚀以及疲劳损伤现象之间存在密切的依存关系，根据视电阻率异常可以分析管体腐蚀与疲劳损伤程度，探查管体腐蚀缺陷的部位。

2．管体视电阻率的定义

管体外径为 b，管壁厚度为 d，内径则为 $a=b-d$；管材的电阻率、磁导率分别为 ρ_G、μ_G；管内介质的电阻率、磁导率分别为 ρ_J、μ_J；管体的等效电阻率和等效磁导率分别为 ρ_{DX}、μ_{DX}；充满介质的管体视电阻率 R_m 定义为：

$$R_m = sqrt(\mu_{DX}\cdot\rho_{DX})$$

$$\rho_{DX}=\frac{b^2\cdot\rho_G\cdot\rho_J}{b^2\rho_J-a^2(\rho_J-\rho_G)}$$

$$\mu_{DX}=\frac{1+\kappa}{1-\kappa}$$

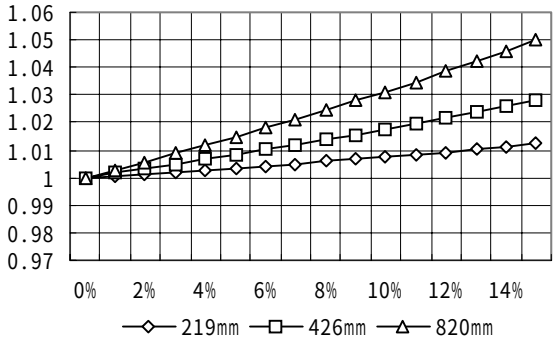
$$\kappa=(\frac{\mu_G-\mu_J}{\mu_G+\mu_J})\cdot\frac{(b^2-a^2)(\mu_G+\mu_J)}{b^2(\mu_G+\mu_J)-a^2(\mu_G-\mu_J)}$$

管体视电阻率的量纲为欧姆·米。显然，它与管体的几何尺寸、材质以及管内所输送介质的电磁特性有关。

3．管体视电阻率异常与其腐蚀和疲劳损伤现象之间的关系

（1）如果腐蚀导致管壁减薄（例如均匀腐蚀、脱层腐蚀等），一方面是管体金属横截面的面积减小，等效电阻率 ρ_{DX} 增大；另一方面是管壁的两个壁面相互靠近，消磁作用加强，等效磁导率 μ_{DX} 减小。在其它条件不变的情况下，等效电阻率 ρ_{DX} 增大的幅度超过等效磁导率 μ_{DX} 减小的幅度，相对于管壁未减薄管段而言，管体视电阻率 R_m 增大，而且管径越大其增大幅度越大（图1）；图中，横坐标为管壁的减小率（金属蚀失量），纵坐标为管体的归一化视电阻率变化值。

图1　管体视电阻率随壁厚减薄而增大



（2）在运行环境下，管材电阻率 ρ_G 会随着时间的加长而增大。导致管材电阻率 ρ_G 增高的原因很复杂，晶间腐蚀或穿晶腐蚀、氢腐蚀（氢鼓泡、氢脆等）、应力腐蚀破裂以及热胀冷缩等都是导致管材电阻率增大的重要因素。图 3 是高倍显微镜下观察到的不锈钢气穴结构（引自 Corrosion Source），该图说明：当钢质（或铁制）管体（或管件）含有非金属（硫、磷、碳等）夹杂时，溶液中产生的氢原子很容易扩散到金属内部，大部分氢原子通过管壁在另一侧结合为氢分子逸出，但有少量氢原子积滞在管体内并结合为氢分子，氢分子不能扩散，必然占据空间，导致管材电阻率 ρ_G 增大。图 2 横坐标是管材电阻率，单位为

图2　管体视电阻率随管材电阻率增大而增大

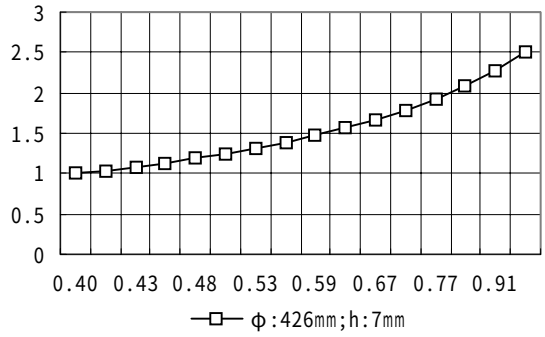
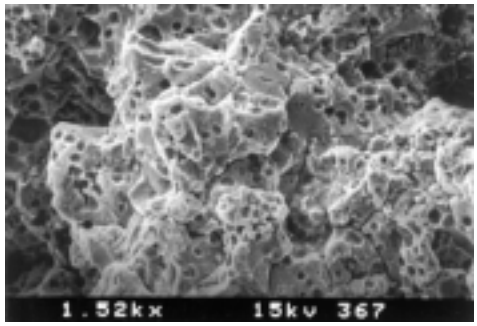


图 3　不锈钢中的气穴结构



Ω · mm^2/m；纵坐标为归一化的管体视电阻率变化值。该图表明：当其他条件相同时，管体视电阻率 R_m 与其管材电阻率 ρ_G 呈正比关系。

（3）如果埋设管道长期处在荷载或周期性应力环境中，其磁导率 μ_G 将在地磁场的作用下渐趋增高（铁制工件的磁记忆效应，图 4-1），一般情况下，位于管道的弯拐或者管件接合部位的管体（或管件）的等效磁导率 μ_{DX} 随之增大，磁场出现异常（图 4-2）；在其他条件不变的情况下，当管壁厚度相同时，如果磁导率 μ_G 变化幅度也相同，则管径大者其视电阻率 R_m 增大幅度小，管径小者其视电阻率 R_m 增大幅度大（图 5，横坐标为管材相对磁导率，纵坐标为归一化的视电阻率变化值）。

图 4 -1

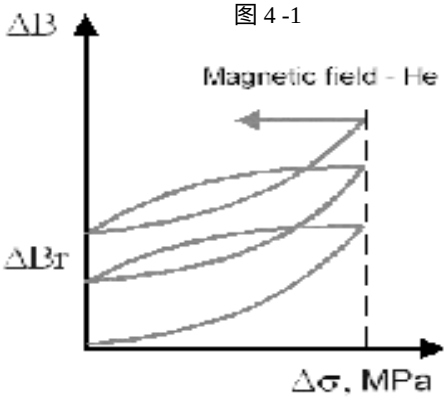


图 4 -2

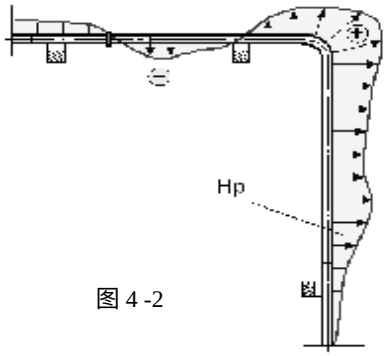


图5　管体视电阻率随管材磁导率增大而增大

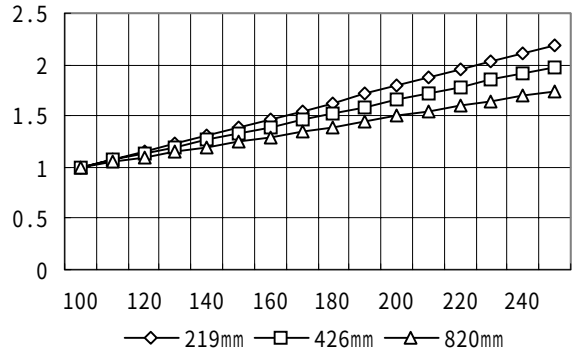
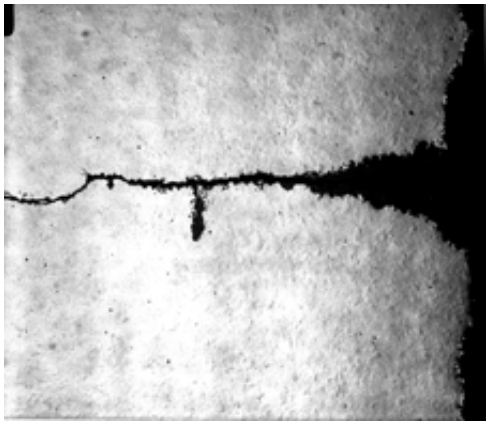


图 6 热力管道的疲劳腐蚀裂纹



（4）如果埋设管道发生隐性裂纹、腐蚀穿孔、沟槽腐蚀等现象，则管体的应力结构必然发生变异，其磁导率将会在地磁场的作用下发生复杂变化，管材磁导率 μ_G 和电阻率 ρ_G 都会增大，相对于完好管段而言，被测管段的视电阻率 R_m 增大。图 6 是高倍显微镜下观察到的热力管道的腐蚀疲劳开裂，主裂纹与次级裂纹明显可见（引自 Corrosion Source），裂纹区的磁各向异性显著，垂直于裂纹方向上的磁导率明显增大。

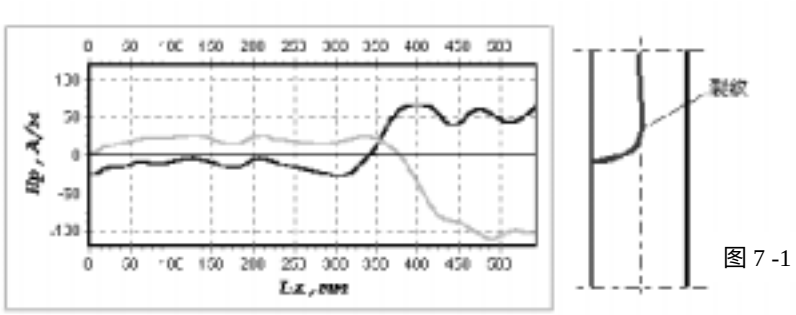


图 7 -1

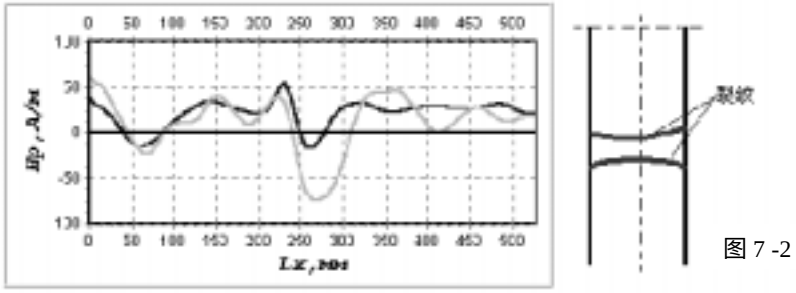


图 7 -2

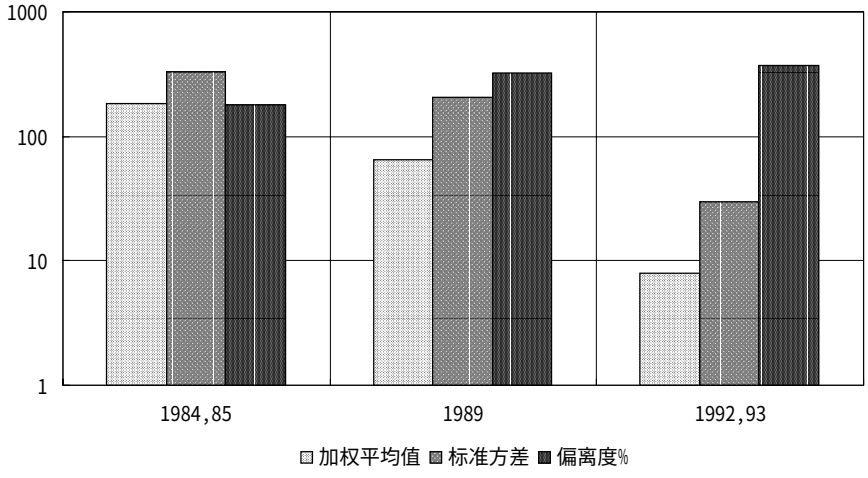
图 7 给出了管体裂纹情况下的磁记忆检测结果，其中图 7-1 表明较长的纵向裂纹对应大段磁场异常，图 7-2 表明横向裂纹对应局部磁场异常。磁场异常的存在表明该处磁导率增大。此外，纵向裂纹使管体的横向电阻增大；横向裂纹使管体的纵向电阻增大。如前所述，管体的视电阻率 R_m 必然增大。

（图 4 和图 7 引自俄罗斯“动力诊断公司”）

4．实例及其所表明的问题

图 8 给出了 2001 年五、六月间对昆明市煤气主干管道检测中管径（529mm）、壁厚（8mm）、管材型号相同，但分属三种不同年份埋设的 11 段管道（总长 9720m）754 个实测管体视电阻率值的统计结果。明显可见，埋设时间越久远的管道（腐蚀与疲劳损伤程度相对严重），其管体视电阻率值也越高。

图 8　不同年份埋设管道的视电阻率对比图



（图 8 中，纵坐标的单位是毫欧姆 · 米）

5．结束语

应当把管体腐蚀与疲劳损伤评价作为埋地管道地面检测工作的首要任务，仅仅局限于对防腐层绝缘性能的调查，显然是不全面的。由于腐蚀既可能使待测管段的壁厚减薄，又可能导致待测管段产生磁导率和电阻率增大现象，因此，相对于未腐蚀管段（背景）而言，只要采用适当的技术措施（足够精度的仪器装备和相应的观测、评价方法），就可在地面上观测到管体的视电阻率异常，从而确定管体腐蚀发生的部位。笔者的检测实践证明，埋地管道腐蚀现象越是剧烈，腐蚀或疲劳损伤缺陷越是明显，其管体视电阻率值就会越大。

主要参考文献

[1] 李永年等，《埋地管道腐蚀与防护状况地面检测评价新技术—综合参数异常评价法》，2001 年 12 月

[2] 李永年等，提高埋地管道防腐层分级评价的可靠性，《地下管线管理》，2002 年第 4 期