

天然气管道冲蚀速率公式化估算与应用

涂多运（中国石油工程建设有限公司西南分公司，四川 成都 610041）

摘要：在天然气的输送中，气流中含有固体杂质会对管道产生冲蚀，可能导致管道和设备失效，进而引发安全生产故事，造成巨大的人员和财产损失。管道中的冲蚀是非常复杂的现象，国内外学者大都采用经验公式或者数值模型来预测管道中冲蚀速率，相关研究仍在继续深入，尚无统一共识。结合海外工程项目设计实践，本文介绍一种冲蚀速率的公式化估算方法，能估算出天然气中固体颗粒对直管段、弯头、三通等造成的冲蚀速率，可用于合理确定管道壁厚裕量。

关键词：冲蚀速率；直管段；弯头；三通

0 引言

固体杂质（如砂子）会对天然气输送管道及管件产生磨蚀，常常引发设备和管道失效，进而导致安全生产故事的发生。究其原因，是因为高速流动的固体杂质会对管壁产生非常大的剪切和冲蚀，长时间运行必然会引起管道壁厚变薄。当壁厚减薄不能承受输送压力时，就会出现泄漏或者爆管。若泄露的天然气遇火发生爆炸，不仅会造成不可估量的人员和经济损失，还会带来恶劣的社会影响，故在工程设计和生产运行中合理的评估管道内部冲蚀速率至关重要。

目前，国内外已对管道内气固两相流的冲蚀磨损进行了很长时间的研究，并取得了丰硕的研究成果，主要集中在直管段和弯头的冲蚀磨损试验^[1-3]和数值模拟^[4-6]方面，并形成了较多的理论模型，如微切削理论模型、变形磨损理论模型、二次冲蚀理论模型、弹性压痕破裂理论模型、绝热剪切与变形局部化磨损理论模型、Oka 模型、DNV 模型、E/CRC 模型、Neilson-Gilchrist 模型^[7]。本文中使用的冲蚀速率经验公式是基于 DNV 提出的撞击损伤模型，已广泛应用于油气生产设施中砂管理策略中^[8]。

1 冲蚀机理

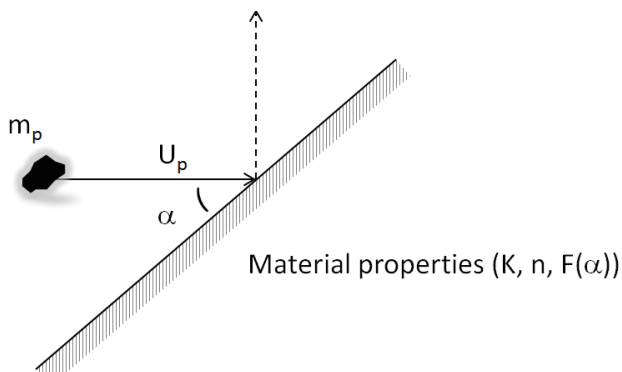


图1 粒子冲击速度和角度

冲蚀是指材料受到小而松散的流动粒子冲击时材料表面出现破坏的一类磨损现象，可以描述为固相表面同含有固相粒子的流体接触，做相对运动固相表面材料所发生的损耗，如图1所示。颗粒的冲击角度就是颗粒撞击材料表面时的入射角。携带固相粒子的流体可以是高速气流，也可以是液流。

研究发现，有多种因素能够影响管道内的冲蚀速率，大致可分为以下几类：①流体介质因素，如速度、粘度、温度、压力和流动状态；②固体颗粒因素，如密度、硬度、体积浓度和形状；③冲蚀表面因素，如硬度、韧性和材料屈服强度；④过流组件的几何形状，如管道直径、弯曲半径与管道直径的比率和弯曲角度，这就导致了冲蚀研究的复杂性。其中，对固体颗粒和流体介质因素研究多，也形成了丰富的认识。

一般而言，在相同的速度、形状、密度和硬度条件下，较大的固体颗粒产生的冲蚀大于较小的固体颗粒。小固体粒子更易受到流体流态的影响，在粒子和流体之间转换动能的效率更高，更容易运动到管壁附近并多次撞击管壁。冲蚀严重的位置一般集中在管道与弯头之间衔接处，并随着流体的输送，颗粒也会随之增大，并逐渐向弯头内部的外侧移动。随着固体颗粒尺寸的增加，冲蚀速率的增长速度表现为增加——不变——变缓的现象，原因是颗粒直径不断增大，流体对其携带的能力也会减弱，导致冲蚀速率增长的速度有所变慢，或者逐渐趋向于一个稳定值^[9]。

较高密度和较大硬度的颗粒能造成更大的冲蚀速率，但存在一个临界硬度；当颗粒的硬度超过该临界硬度，硬度的增加对冲蚀磨损的影响变化不大，而此时颗粒产生的破碎会变少，还有可能削弱二次冲蚀产生的影响。此外，密度较高的颗粒所具有的冲击动能更大，也会导致更大的冲蚀速率^[7]。

颗粒冲击速度的不同，固体颗粒产生的冲蚀速率也是不同的。固体颗粒携带的动量随着流体速度变大而增大，产生的冲蚀速率也就越大。且随着速度的增加，管道内最大冲蚀位置也会产生变化，逐渐向弯头的内壁外侧转移。如果冲蚀达到一定程度的话，离散颗粒被连续颗粒完全带动，并且在湍流的作用下，产生相互耦合的状态，此时的颗粒湍流的动能就变大，就会更加严重的冲蚀问题^[9]。

管道内表面的冲蚀速率也会随着流体中颗粒含量的增大而增大，但并不是绝对的线性关系。当流体中颗粒的含量超过一定范围时，颗粒之间的碰撞会加剧，最终可能会削弱颗粒对材料表面的冲蚀作用^[7]。

流体粘度对固体颗粒的冲蚀速率也有很大影响。随着流体粘度增加，管道内冲蚀速率也会有所降低，逐渐呈现稳定的状态，并且物质颗粒在管道弯曲湍流的作用下，流体会起到一定的缓冲作用^[9]。

针对天然气管道，如气流中含有液体，冲蚀常常伴随着电化学腐蚀，交互作用形成的腐蚀速率大于两者单独作用时的腐蚀速率之和。冲蚀形成的蚀坑，加速电化学腐蚀；电化学腐蚀弱化金属材料晶界、相界，暴露材料中耐磨的硬化相，突出基体表面，从而促进冲蚀。

2 冲蚀经验模型在管道系统中应用

为便于工程应用，挪威船级社在 DVN RP 0501 给出推荐做法，SY/T 7394 对其进行了引用。以一定冲击速度和角度撞击目标表面的粒子的冲蚀速率可由以下式估算。

$$\dot{E}_L = \frac{\dot{m}_p K U_p^n F(\alpha)}{\rho_t A_t} C_{unit}$$

公式中符号含义见 SY/T 7394。函数 F(a) 表征了目标材料的延展性，其中延性材料受切削作用的影响较为明显，在 20° 至 50° 的冲击角度范围内冲蚀最大，而脆性材料受冲击作用的影响较为明显，在 90° 冲击角度下冲蚀最大，角度越小，冲蚀越小。保守计算时，F(a) 可直接取值 1。

针对天然气管道系统中的直管段、焊接接头、弯头和三通，应用 DVN 冲蚀经验模型，可得出相应的冲蚀速率计算公式。

2.1 直管段

$$\dot{E}_L = 2.5 \times 10^{-5} U_p^{2.6} D^{-2} \dot{m}_p$$

2.2 焊接接头

焊接点上游：

$$\dot{E}_L = KF(\alpha)U_p^{2.6} \frac{\sin(\alpha)}{\rho_t \frac{\pi D^2}{4}} C_2 C_{unit} \dot{m}_p$$

焊接点下游：

$$\dot{E}_L = 3.3 \times 10^{-2} (7.5 \times 10^{-4} + h) U_p^{2.6} D^{-2} \dot{m}_p$$

2.3 弯头和盲三通

$$\dot{E}_L = C_1 GF \frac{KF(\alpha)U_p^n}{\rho_t \frac{\pi D^2}{4 \sin(\alpha)}} GC_{unit} \dot{m}_p$$

3 工程实例

某天然气站场内部碳钢管道，管道内径 0.5905 m，气体流量 18.889 kg/s，液气比为 0.0008，液相密度为 1004 kg/m³，液相粘度为 0.0008 kg/ms，气相密度为 1.25 kg/m³，气相粘度为 0.000012 kg/ms，杂质颗粒密度为 2950 kg/m³，颗粒平均直径为 15.7 micron，颗粒质量流量为 1.2 × 10⁻⁶ kg/s，直管段颗粒撞击角度未知，F(a)=1。冲蚀计算过程和结果如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 支管段和焊接点冲蚀速率计算结果

项目	单位	数值
气相速度 (V _g)	m/s	55.178
液体质量流量 (M _l)	kg/s	1.511 E-04
液相速度 (V _l)	m/s	5.496 E-07
颗粒冲击速度 (U _p)	m/s	55.178
材料常数 (K)	(m/s) ⁻ⁿ	2.000 E-09
速度指数 (n)	-	2.600
混合流体密度 (ρ _m)	kg/m ³	1.250
颗粒直径 (d _p)	m	1.570 E-05
混合流体粘度 (μ _m)	kg/ms	1.210 E-05
直管段冲蚀速率 (E _l)	mm/year	2.907 E-06
冲蚀面积 (A)	m ²	0.496
颗粒大小校正因子 (C ₂)	-	0.468
焊接点上游冲蚀速率 (E ₁)	mm/year	8.176 E-04
焊缝补强高度 (h)	m	0.001
焊接点下游冲蚀速率 (E ₁)	mm/year	5.314 E-06

表2 弯头冲蚀速率计算结果

项目	单位	数值
曲率半径与管道内径之比 ($R_{curvature}$)	-	1.500
冲击角 (α)	Radian	0.524
冲击角 (α)	Degrees	30.000
A (无量纲参数)	-	823.436
核对 (d_{pc}/D)	-	6.44 E-05
临界颗粒与管道直径比 (γ_c)	-	6.44 E-05
颗粒与管道直径比 (γ)	-	2.66 E-05
颗粒直径的校正函数 (G)	-	0.413
材料塑形函数 $F(\alpha)$	-	0.993
模型 / 几何因子 (C_1)	-	2.500
管道横截面积 (A_{pipe})	m^2	0.274
冲蚀速率 (E_L)	mm/year	1.622 E-03

表3 三通冲蚀速率计算结果

项目	单位	数值
颗粒与管道直径比 (γ)	-	2.66 E-05
密度比 (β)	-	2359.981
临界颗粒与管道直径比 (γ_c)	-	7.75 E-05
Re 函数 (b)	-	-0.935
雷诺数 Re	-	3365882.544
Re 函数 (c)	-	1.264
颗粒直径的校正函数 (G)	-	0.259
模型 / 几何因子 (C_1)	-	1.000
冲蚀面积 (A)	m^2	0.274
冲蚀速率 (E_L)	mm/year	8.189 E-04

经计算可得,直管段冲蚀速率为 2.907×10^{-6} mm/year; 焊接点上游冲蚀速率为 8.176×10^{-4} mm/year; 焊接点下游冲蚀速率为 5.314×10^{-6} mm/year; 弯头处冲蚀速率为 1.622×10^{-3} mm/year; 三通处冲蚀速率为 8.189×10^{-4} mm/year。对比发现,弯头处的冲蚀最严重。

4 天然气管道系统冲蚀防护措施

针对冲蚀的成因,在管道设计和运行中应从流体、材料和环境等方面着手,减少流体中固体颗粒冲蚀的影响。

①严控天然气中含液量,避免在管输过程析出,避免形成固体颗粒冲蚀和电化学腐蚀协调作用;

②合理的调控流体流速,调整管件尺寸,如加大弯头的弯曲半径、加装整流件减少节流元件对流体的影响,避免局部流速过大;

③针对流速大和发生流速突变的位置,加厚管件和选择高硬度材质,提高材料本身抗冲蚀能力;

④定期清管,降低流体的固体杂质,减少固体颗粒在高速气流中对管壁的磨损;

⑤对管道内部涂覆涂层(如抗冲刷涂层、抗磨损涂层),特别是管道与弯头衔接位置、管道弯曲处等重点部位;

⑥定期对管道上弯头等容易产生冲蚀的部位测壁厚,发现壁厚减薄现象及时更换。

5 结论

管道内冲蚀通常发生在速度增加的位置和弯头处,导致管道内部出现局部凹槽、凹坑或其他形状缺陷,故有效地计算出固体杂质给设备和管道带来的冲蚀速率则非常重要。根据冲蚀速率可合理地确定管道壁厚裕量,不仅能保护管道在设计寿命内安全运行,又能避免因过大的壁厚造成的投资增加。本文介绍的海外天然气工程项目常用的冲蚀速率计算公式,简单实用,能有效估算管路系统中不同管件的冲蚀量,为合理设定壁厚裕量提供依据。

参考文献:

- [1] 郑云萍,王欢欢,易昊林,等.天然气管道弯头冲蚀与防护仿真研究[J].计算机仿真,2015,32(8):427-430.
- [2] 王郭雨薇,敬加强,梁全胜,等.输气管道砂冲蚀的模拟实验[J].材料科学与工程学报,2016,34(2):310-315.
- [3] 林楠,兰惠清,崔钺,等.冲蚀角度和弯头几何尺寸对冲蚀磨损的影响研究[J].科学技术与工程,2013,13(18):5135-5140.
- [4] 李翔,李介普,么成,等.输气管道冲蚀磨损数值模拟研究[J].当代化工,2015(11):2714-2716.
- [5] 柳成文,毛靖儒,俞茂铮.90°弯管内稀疏气固两相流及固粒对壁面磨损量的数值研究[J].西安交通大学学报,1999,33(9):53-57.
- [6] 黄诗菟.天然气集输管道弯头冲蚀磨损研究[D].南充:西南石油大学,2016.
- [7] 石佳瑞,王森,韩霄,等.油气管道冲蚀模型及影响因素研究进展[J].石油化工设备,2023,52(01):62-70.
- [8] Det Norske Veritas. Recommended practice RP O501 erosive wear in piping systems[R].Technical report,DNV RP O501 - Revision 4.2., 2007.
- [9] 秦丽婷.油气田集输管道的冲蚀模拟研究及影响因素分析[J].清洗世界,2022,38(12):50-52.

作者简介:

涂多运(1988-),男,安徽霍邱人,硕士研究生,主要从事油气田地面工程设计工作。