

场站出口高压煤浆管道振动动力分析

陈益滨

中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北武汉, 中国

【摘要】本研究以某泵站出口高压煤浆管道系统为研究对象, 针对经多组并联隔膜泵加压后管道压力超过 10MPa、及管道与泵、煤浆液柱间振动可能危及安全运行的问题, 开展了振动特性与安全评估研究。通过计算不同流量工况下隔膜泵对管道的激振频率, 并采用 CAESAR II 软件模拟分析设计载荷下管道系统的前 10 阶固有频率, 综合评价了高压煤浆管道的安全状态。进一步基于煤浆液柱的一阶与二阶共振管长, 为优化布管设计提供了依据, 从而有效提升了管道系统运行的可靠性与安全性, 为同类工程提供了参考。

【关键词】煤浆管道; 隔膜泵; 管道共振; CAESAR II; 布管设计

1. 引言

长距离压力管道输送过程中的振动是无法避免的[1], 与管道直接相连的设备引起的振动、管道内运行的不稳定流动的流体引起的振动是导致管道系统自身产生振动的主要原因[2]。在工程实践中, 管道的强烈振动导致管道与设备、附件的连接部位发生持续性磨损, 在振动所产生的交变应力作用下, 引起管材和设备疲劳破坏, 甚至造成管材断裂以及输送介质泄漏的事故, 给生产运营和环境带来严重危害[3,4]。

往复式隔膜泵具有耐高压、流量大、容积效率高和不易改变浆体性质的特点, 在长距离输送领域广泛应用[5]。实际生产运行过程中, 隔膜泵和管道连接会引起管道振动, 经隔膜泵加压后并进入管道内流动的脉冲煤浆液柱会与管道发生振动, 这些振动所具有频率若与管道的固有频率重合或者接近就会发生共振, 导致管道移位、支架变形, 会对管道的安全运行构成威胁[6-8]。

本文以神渭管道某泵站为例, 计算分析了在不同流量工况下隔膜泵对管道系统的激振频率, 基于 CAESAR II 软件对设计载荷作用下管道系统的前 10 阶固有频率进行了模拟研究, 评估了高压煤浆管道的安全状态。对煤浆液柱的一阶和二阶共振管长进行了计算, 为隔膜泵出口煤浆管道上布管距离提供了实践指导, 提高了管道系统运行的可靠性与安全性。

2. 管道与隔膜泵共振

管道系统由管道及其必要组成件构成, 该组合系统结构本身具有的频率为管道系统固有频率[9]。隔膜泵动力端对管道产生的冲击力所具有的频率为管道系统激振频率。当激振频

率与固有频率重合或者接近时, 即使激发源很小, 二者将会发生共振。

神渭管道某泵站 6 台隔膜泵并联使用, 经隔膜泵加压后的煤浆管道压力为 10MPa 以上, 属高压管道。根据生产需要, 隔膜泵以不同数量和不同频率投入使用, 将煤浆泵送至汇总管路, 汇总管道运行流量范围为 1545m³/h~1775m³/h。

2.1 管道系统主激振频率

2.1.1 管道激振频率计算

往复式隔膜泵与分支管道通过法兰连接, 则其往复运动频率为管道激振频率, 其计算式[4]为:

$$f_j = imn/60 \quad (1)$$

式中: f_j —管道激振频率, Hz; i —管道系统隔膜泵并联数量; m —活塞缸作用数量, 本工程中隔膜泵的活塞缸数为 3; n —隔膜泵的主轴转数, r/min。

2.1.2 多泵组合工况主频计算

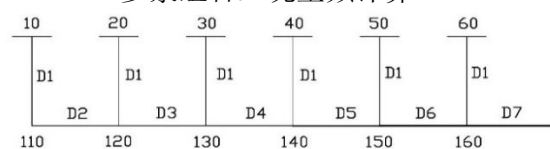


图 1. 隔膜泵出口煤浆管道示意图

如图 1 所示, 经 6 台并联的隔膜泵加压后, 煤浆从不同管径 (D1~D7) 的分支管道最终汇集于汇总管道, 管径介于 DN250~DN600, 节点 10、20、30、40、50、60 表示隔膜泵出口节点, 节点 110、120、130、140、150、160 表示隔膜泵出口煤浆管道节点。

则汇总管道上主激振频率的计算式为:

$$f_{zz} = \sum_{j=1}^p j f_j = \sum_{j=1}^p j imn/60 \quad (2)$$

式中： f_{zz} —汇总管道主激振频率，Hz； j —泵对管道系统作用（ $j=1,2,3\dots p$ ）。

根据厂商提供技术参数，隔膜泵单泵额定冲次为 43r/min，激振频率为 2.15Hz；最大冲次为 47.3r/min，对应极限频率为 2.365Hz。正常工况运行时，隔膜泵激振频率为额定冲次时的频率。考虑到 1 台变频器失效导致其中 1 台

泵达到极限冲次运行使用的可能性较大，计算中亦作考虑。

根据用户年运输量需求，汇总管道运行流量范围为 1545m³/h~1775m³/h，通过调节隔膜泵启用数量以及使用频率来实现运行流量的调控，不同数量隔膜泵投入使用下的管道主激振频率如表 1 所示。

表 1.不同工况下管道激振主频

序号	工况	额定频率下隔膜泵应用情况		极限频率下隔膜泵应用情况		管道主激振频率 (Hz)
		激振频率 (Hz)	泵数量 (台)	激振频率 (Hz)	泵数量 (台)	
1	6 泵并联	1.65	6	2.365	0	9.9
2	5 泵并联	1.98	4		1	10.3
3		1.98	5		0	9.9
4	5 泵并联	1.72	4		1	9.3
5		1.72	5		0	8.6
6	4 泵并联	2.15	3		1	8.8
7		2.15	4		0	8.6

结果表明，不同工况下的管道主激振频率范围为 8.6~10.3Hz，而共振频率区间为主激振频率的 0.8~1.2 倍，因此可以计算得到管道激振共振区间为 6.88~12.36Hz。

2.2 管道系统固有频率

根据管道的实际设计参数，在 CAESAR II 软件中建立隔膜泵出口煤浆管道模型，按照实际受力情况对管道施加约束，受力状态下的管道三维模型如图 2 所示。

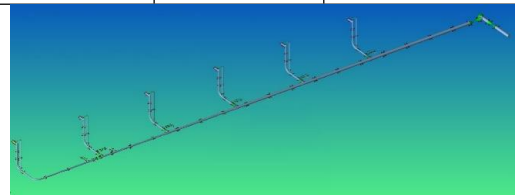


图 2.隔膜泵出口煤浆管道模型

通过 CAESAR II 连续质量点模型对管道系统固有频率进行计算，得出管道系统前十阶固有频率如表 2 所示。

表 2.管道系统前 10 阶固有频率

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率 (Hz)	14.01	15.66	15.78	16.46	16.56	16.72	17.03	17.92	18.37	18.37

结果表明，管道前 10 阶固有频率范围为 14.01~18.37Hz，而管道激振共振区间为 6.88~12.36Hz，表明管道系统低阶固有频率避开激振共振区间，隔膜泵与管道系统不会产生共振。

3.煤浆液柱共振

往复式隔膜泵的工作特点是间歇性和周期性地吸入和排出煤浆，激发隔膜泵出口管道内的浆体呈脉动状态，并使管道内压力、浆体流速随时间和位置呈现周期性变化，这种脉动流体在管道内流动时经由弯头、阀门等元件会产生随时间变化的激振力，其频率表示煤浆液柱的脉动频率[5,10,11]。

由于隔膜泵出口设有缓冲气罐[5]作为脉动抑制装置且流量饱和度控制在±1%，如图 1 所示，泵口节点 10、20、30、40、50、60 可看作声学上的开端，汇总管道节点 150 可视为声学上的开端，因此管道共振管长计算可以

拆分为以下 7 个计算单元：10~120、20~120、30~130、40~140、50~150、60~160、120~150。其中 10~120、20~120、30~130、40~140、50~150、60~160 可以看作开端到开端的单泵激振作用计算单元，120~150 可以看作开端到开端（2#~4#泵）的多泵激振作用计算单元。

对于开端到开端的管道，其一阶共振管长 L_1 和二阶共振管长 L_2 的计算式分别为：

$$L_1 = v/(2f_c) \quad (3)$$

$$L_2 = v/f_c \quad (4)$$

式中： v —流体中的声音传播速度(煤浆液体中取 1200~1400m/s)； f_c —脉动频率。

在进行管道的布置时，除了需要满足工艺要求外，还需要根据管内输送介质的激振频率对可能发生的液柱共振的管道长度进行计算，从而使布置的管长避开 0.8~1.2 倍的共振管长。汇总管道以低阶流量(1545m³/h 左右)运行时，隔膜泵在 4 台隔膜泵并联和 5 台隔膜泵并联工

况下应避开的共振管长计算结果如表 3 所示。 隔膜泵在 5 台隔膜泵并联和 6 台隔膜泵并联工
汇总管道以高阶流量(1775m³/h 左右)运行时, 况下应避开的共振管长计算结果如表 4 所示。

表 3.低阶流量 (1545m³/h) 工况下的共振管长计算结果

计算单元	4 台隔膜泵并联				5 台隔膜泵并联			
	激振主 频 (Hz)	应避开的共振管长(m)		实际管 长 (m)	激振主 频 (Hz)	应避开的共振管长(m)		实际管 长 (m)
		一阶	二阶			一阶	二阶	
10~120	2.15	223.2~390.7	446.4~781.4	28.2	1.72	302.3~453.5	604.6~907	28.2
20~120				12.7				12.7
30~130				12.7				12.7
40~140				12.7				12.7
50~150				12.7				12.7
60~160				12.7				12.7
120~150	4.3	111.6~145.4	223.2~390.7	44	5.16	100.8~151.2	201.6~302.4	44
120~150	6.45	74.4~130.2	148.8~260.4	44	6.88	75.6~113.4	151.2~226.8	44
120~150	8.6	55.8~97.7	111.6~185.4	44	6.88	75.6~113.4	151.2~226.8	44

表 4.高阶流量 (1775m³/h) 工况下的共振管长计算结果

计算单元	5 台隔膜泵并联				6 台隔膜泵并联			
	激振主 频 (Hz)	应避开的共振管长(m)		实际管 长 (m)	激振主 频 (Hz)	应避开的共振管长(m)		实际管 长 (m)
		一阶	二阶			一阶	二阶	
10~120	1.98	262.6~394	525.2~788	28.2	1.65	290.8~509.1	581.6~1018.2	28.2
20~120				12.7				12.7
30~130				12.7				12.7
40~140				12.7				12.7
50~150				12.7				12.7
60~160				12.7				12.7
120~150	5.94	87.5~98.5	175~197	44	6.6	72.7~127.3	145.4~254.6	44
120~150	7.92	65.6~98.5	131.2~197	44				

结果表明, 汇总管道以流量范围为 1545m³/h~1775m³/h 运行时, 应避开的一阶共振管长范围为 55.8~151.2m、223.2~394m, 二阶共振管长范围为 111.6~390.7m、446.4~1018.2m, 配管设计时应予以避免。

通过几种工况计算表明管道布置实际管长远避开了管道声学共振管长, 因此出口管道系统内流体发生液注共振的可能性较小, 管道系统受到流体脉动冲击作用可控制在安全范围内。

4.结论

(1) 汇总管道以 1545m³/h~1775m³/h 的流量范围运行时, 管道激振共振区间为 6.88~12.36Hz, 基于 CAESAR II 的管道系统前 10 阶固有频率模拟结果为 14.01~18.37Hz, 隔膜泵出口煤浆管道系统低阶固有频率大于管道系统激振共振频率的 1.2 倍, 避开了系统激振共振区间。往复隔膜泵并联管道系统中煤浆流体的压力脉动对管道系统的冲击不会引起机械共振。

(2) 不同流量、不同数量隔膜泵启用工况下的煤浆流体脉冲液柱共振管长为 55.8~394m、446.4~1018.2m, 管段布置长度应该回避液柱共振管长, 对配管阶段中的管长设计具有指导意义。

(3) 当隔膜泵出口设有的缓冲气罐作为脉动抑制装置正常使用的情况下, 可改变管道声学上的开端和闭端节点, 避免了管道煤浆由于发生共振现象而出现危险的冲击脉动。

参考文献

- [1] 杜震昊.管道共振的危害及解决措施[J].油气田地面工程, 2019, 38 (09): 128-132.
- [2] 赵力电.压力管道振动分析[J].管道技术与设备, 2006 (6): 36-37.
- [3] 胡庆国.关于管道振动的分析计算及控制[J].化工建设工程, 2001, 23 (3): 42-43.
- [4] 张道刚, 王茂廷, 王杰, 马文涛.往复式压缩机管道振动的 ANSYS 分析[J].化工设备与管道, 2009, 46 (01): 55-57.

- [5] 宋岢岢.压力管道设计及工程实例(第二版)[M].化学工业出版社, 2012.10.
- [6] 胡成名.隔膜泵浆体管道振动分析及减振技术[J].管道技术与设备, 2016(4): 52-54.
- [7] 张勇强.往复压缩机工艺管道振动分析及消减措施[J].化工设计通讯, 2017, 43(06): 123.
- [8] 李晓强, 关志伟, 张博等.活塞式压缩机管道振动分析及消减措施[J].深冷技术, 2016(6): 19-21.
- [9] 张京, 胡跃华.往复式压缩机管道的消振处理措施[J].石油化工设计, 2007(04): 4+23-25.
- [10] 唐永进.压力管道应力分析(第二版)[M].中国石化出版社, 2009.
- [11] 王化民, 姜新嘉.活塞式压缩机的管道振动原因及防振措施[J].科技资讯, 2013(14): 96-96.