

惠宁线添加液体降凝剂室内实验和现场试验

黄晨阳¹ 李其抚² 李鸿英¹

1. 中国石油大学 (北京) 北京昌平 102249
2. 国家管网集团科学技术研究总院分公司 天津滨海新区 300450

摘 要: 惠宁线所输送的长庆原油含蜡量高, 凝点基本在 18℃左右, 低温流动性较差。为了保证冬季的安全输送, 对某公司开发的有表活和无表活两种液体降凝剂进行评价, 对影响降凝效果的因素进行了分析研究。惠宁线推荐选用无表活剂, 实验结果表明, 加剂原油热处理温度为 50℃, 合理的加剂浓度为 12.5 mg/L, 可使原油的凝点由 18℃降至 10℃。加剂位置筛选试验及降凝剂稳定性分析表明, 加热炉前 3-5 米处加剂相较于常规的降凝剂间加剂可显著提升改性效果。本研究为惠宁线冬季添加降凝剂安全运行提供了重要依据。

关键词: 含蜡原油; 液体降凝剂; 凝点; 室内实验; 现场试验

长庆油田生产的原油含蜡量达到 14% 左右, 凝点通常在 18℃左右。由于冬季 (特别是 1-2 月份) 西北地区气温低, 地温不到 10℃甚至更低, 远低于原油的凝点, 对原油管道的安全输送造成了巨大的威胁。因此, 从降低能耗和生产成本、提高管道运行的安全性角度^[1]来看, 采用化学降凝法是实现原油安全输送的最简便、最有效的方法^[2]。降凝剂改变了原油中蜡的发育过程^[3-5], 化学降凝剂改性是改善含蜡原油低温流动性的重要方法^[6], 通过共晶、吸附、晶核等作用改变蜡晶间的相互作用, 从而改善蜡晶的结构和形态, 阻碍其形成较为稳固的三维网状结构^[7], 最终达到降凝降黏的目的^[8], 从而确保含蜡原油管道安全高效运行。

冀东油田高迁线现场试验表明, 添加 50 mg/L 的 JD1 型降凝剂可将凝点从 26℃降至 13℃, 且低温段 (<30℃) 降黏效果显著^[9]; 万周输油管道应用 BEM-5P 降凝剂后, 管道启输温度降低至 26℃, 经济效益提升显著^[10]。然而传统固体降凝剂存在溶解效率低、剂量控制难等问题, 而液体降凝剂凭借溶解快、易调控等优势成为研究热点。本文针对惠安堡长庆原油特性对某公司开发的两种液体降凝剂 (以下简称有表活剂和无表活剂) 进行了筛选并对影响降凝效果的因素进

行了室内实验分析及现场试验应用研究, 为油田安全生产和原油的安全输送提供技术支持和帮助。

1 惠宁线运行现状

惠宁线设计输量为 500×10^4 t/a, 全程 105.98km, 管道设惠安堡首站, 滚泉热泵站, 渠口热站和石空末站 4 座站场^[11]。根据往年对惠宁线原油物性的测试结果统计, 其输送的原油凝点约为 18℃。管道采取的运行方式为: 当管道沿线地温高于 18℃时, 宜采取常温输送工艺; 地温处于 9℃~18℃时, 可采取加热输送工艺; 地温低于 9℃时, 可采取加热或加剂综合处理输送工艺^[12]。加热输送期间一般采用“一炉到底”的运行方式 (惠安堡首站点炉, 其他站场不点炉)。热处理与加剂综合处理输送时, 热油出炉温度不应低于 60℃。冬季运行期间, 当管道输量低于 405 m³/h 时, 宜采用热处理或加剂综合处理方式。

2 原油物性实验室测试结果

2.1 基础物性

实验室测试的惠安堡首站原油的基础物性特征的相关数据见表 1。凝点测试方法按照原油凝点测定法^[13]执行。

表 1 原油的基础物性

密度 (20℃) / (kg/m ³)	含蜡量 /%	动力黏度 (50℃) / (mPa · s)	析蜡点 /℃	反常点 /℃	凝点 (室温约 31℃装样) /℃
843.1	13.86	9.0	33.3	25	19

取样时间: 2024 年 07 月, 测试时间: 2024 年 08 月。

2.2 析蜡特性

使用美国 TA 公司生产的 Q20 型差式扫描量热仪测试油样的析蜡特性, 测试结果见图 1。

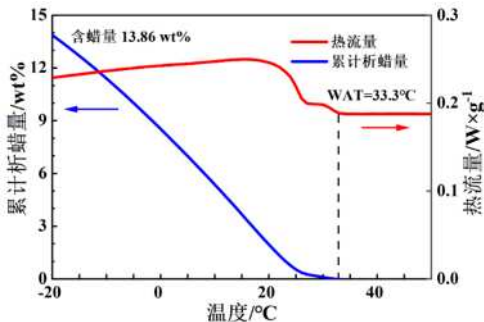


图 1 原油的 DSC 测试结果及析蜡特性曲线

2.3 流变参数及黏温曲线

测试原油在不同温度下的流变参数见表 2。可以看出, 惠安堡首站输送的长庆原油在 25℃ 以上为牛顿流体。

表 2 原油的流变参数

黏度 (mPa · s)	温度 (°C)									
	21	23	25	30	35	40	45	50	55	60
10 s ⁻¹	93.4	34.6	14.2	12.9	11.7	10.7	9.8	9.0	8.2	7.6
20 s ⁻¹	74.1	30.9	14.2	12.9	11.7	10.7	9.8	9.0	8.2	7.6
50 s ⁻¹	54.6	26.6	14.2	12.9	11.7	10.7	9.8	9.0	8.2	7.6

3 室内模拟实验结果与讨论

室内模拟实验流程是将油样分别加热至 50℃、55℃ 并恒温 30min 后以 0.5℃ /min 的降温速率动态降温至 25℃, 测试油样 25℃ 凝点和 20 s⁻¹ 黏度, 继续降温至 18℃ 测试 20 s⁻¹ 黏度。

3.1 首次 50℃ 加剂热处理改性效果

添加 12.5 mg/L 和 25 mg/L 有表活剂和无表活剂的原油首次 50℃ 热处理的实验结果见表 3。

由表 3 可以看出, 在热处理温度 50℃ 时, 加剂量为 12.5 mg/L 和 25 mg/L 的两种降凝剂, 均可以改善该原油的低温流动性。在加剂量一致的情况下, 两种降凝剂都可以降低原油的凝点和黏度。12.5 mg/L 的处理条件下, 加无表活剂和有表活剂的原油 25℃ 下的凝点降幅一致, 黏度方面无表活剂稍好于有表活剂。在加剂量 25 mg/L 的处理条件下, 不论是凝点还是黏度方面, 无表活剂的改性效果稍逊于有表活剂。

表 3 原油首次 50℃ 热处理实验结果

降凝剂种类	加剂量 /mg/L	动冷至 25℃ 凝点 /℃	20 s ⁻¹ 黏度 /mPa · s	
			25℃	18℃
有表活	0	19	11.5	768.5
	12.5	18	13.7	554.7
	25	15	14.7	67.3
无表活	12.5	18	13.4	424.1
	25	16	15.8	101.1

3.2 首次 55℃ 加剂热处理改性效果

添加 12.5 mg/L 和 25 mg/L 有表活剂和无表活剂的惠安堡长庆原油在 55℃ 首次热处理的实验结果见表 4。

由表 4 可以看出, 在热处理温度 55℃ 时, 加剂量 12.5 mg/L 和 25 mg/L 的两种降凝剂, 可以显著改善该原油的低温流动性。首次 55℃ 热处理后, 即使未加剂处理的空白油在 25℃ 下的凝点和黏度与 50℃ 处理的相比未有明显变化, 但 18℃ 黏度却明显大幅降低。

在加剂量一致的情况下, 两种降凝剂均大幅地降低了加剂油的凝点和黏度 (20 s⁻¹、18℃)。加剂量 12.5 mg/L 的原油 25℃ 下的凝点降幅高达 11~12℃, 20 s⁻¹ 剪切率下, 18℃ 平衡黏度降幅高达 90.2% (加无表活剂) ~91.7% (加有表活剂)。加剂量 25 mg/L 的原油 25℃ 下的凝点降幅高达 13~14℃, 20 s⁻¹ 剪切率下, 18℃ 平衡黏度降幅亦高达 91.7% (加有表活剂) ~92.2% (加无表活剂)。因此对于该原油来说, 无表活剂降凝改性效果和有表活剂相当。

表 4 原油首次 55℃ 热处理实验结果

降凝剂种类	加剂量 /mg/L	动冷至 25℃ 凝点 /℃	20 s ⁻¹ 黏度 /mPa · s	
			25℃	18℃
有表活	0	19	12.0	239.9
	12.5	8	10.7	19.9
	25	6	10.3	20.0
无表活	12.5	7	10.4	23.6
	25	5	10.5	18.8

综合以上结果, 对于有表活和无表活两种剂来说, 加剂前原油的凝点为 19℃, 加剂后原油的凝点和黏度均有不同程度的下降。

4 现场试验结果与讨论

为了评估两种降凝剂 (有表活剂和无表活剂) 现场应用的降凝效果, 2024 年 10 月中下旬在惠宁线现场进行了两种降凝剂的改性效果评价试验。加剂输送期间, 惠宁线全线输量约为 750 m³/h。

4.1 加剂位置对降凝效果的影响

选用有表活剂，进行了 2 种不同加剂位置的降凝剂改性效果评价实验，分别为：

（1）在惠安堡首站加热炉前 3~5 m 处加剂，所有加剂油经历加热，随后与空白油掺混；

（2）在惠安堡首站降凝剂间加剂，约 60% 加剂油经加热炉加热，随后掺混 40% 未经加热的加剂油。

两种情况下的惠安堡首站出站温度均为 50℃左右。测试并统计了加剂量 12.5 mg/L 和 25 mg/L 条件下，两种加剂位置注入降凝剂后的油样凝点，现场试验结果见表 5。可见，在两种不同加剂量条件下，降凝剂在加热炉前 3~5 m 处注入的效果均更佳。

表 5 原油添加降凝剂位置筛选试验结果

加剂位置	加剂量 /mg/L	站场	测试油样凝点 /℃
惠安堡首站加热炉前 3~5 m	12.5	惠安堡出站	11
	25		7
惠安堡首站降凝剂间	12.5	惠安堡出站	16
	25		9

表 6 原油加剂量筛选现场试验结果

降凝剂种类	加剂量 /mg/L	站场	测试油样凝点 /℃
有表活	0	惠安堡进站	18
	12.5	惠安堡出站	11
		石空进站	11
		惠安堡出站	7
	25	石空进站	7
		惠安堡出站	10
无表活	12.5	石空进站	10
		惠安堡出站	7
	25	石空进站	8
		惠安堡出站	7

4.3 温度对加剂效果的影响

4.3.1 热处理温度对原油凝点的影响

该部分试验在加热炉前 3~5 m 前加剂，选择两个出站温度进行试验（50℃和 45℃），现场测试凝点结果见表 7。

对于有表活剂来说，虽然只有 12.5 mg/L 的加剂量，但当首站处理温度由 45℃升至 50℃时，凝点也从 14℃降至 11℃；而对于无表活剂来说，即使加剂量达到 25 mg/L，在 45℃的处理温度下凝点却和 12.5 mg/L 加剂量的有表活剂一致，然而当处理温度由 45℃升至 50℃时，凝点从 14℃降低至 7℃，降幅高达 7℃。可见，只有当热处理达到一定温度时，两种降凝剂才能充分发挥降凝改性效果。

在加热炉前添加降凝剂时，100% 的加剂油均经过了加热处理，实际有效的加剂量等于添加量；而在降凝剂间进行加剂时，只有 60% 的加剂油经历了加热。因此，在降凝剂间添加 25 mg/L 的降凝剂，实际有效加剂量只有 15 mg/L，这也是加剂间加剂效果较差的原因。

4.2 加剂量对降凝效果的影响

在惠安堡加热炉前 3~5 m 处加剂，出站温度为 50℃。测试了 12.5 mg/L 和 25 mg/L 加剂量下两种降凝剂的改性效果，结果如表 6 所示。由试验结果可知，加剂量一致的情况下，有表活剂和无表活剂的降凝效果相差不大，而且稳定性都较好。

此外，当加剂量从 12.5 mg/L 提升至 25 mg/L 时，降凝幅度由 7℃（加有表活剂）或 8℃（加无表活剂）均升至 11℃。

表 7 降凝剂处理温度筛选现场试验结果

降凝剂处理温度	降凝剂种类	加剂量 /mg/L	站场	测试油样凝点 /℃
45	有表活剂	12.5	惠安堡出站	14
			石空进站	14
	无表活剂	25	惠安堡出站	14
			石空进站	14
	有表活剂	12.5	惠安堡出站	11
			石空进站	11
50	无表活剂	25	惠安堡出站	7
			石空进站	8

4.3.2 重复加热对原油凝点的影响

在加热炉前 3~5 m 处注入 12.5 mg/L 无表活剂，惠安

堡首站出站温度 50℃，滚泉站点炉运行，进站油温约为 34℃、出站油温约为 41℃，温升 7℃。现场测试凝点结果见表 8，可见在该工况下，该降凝剂具有较好的重复加热稳定性，虽然重复加热温度并未达到首次处理温度，但末站加剂油样凝点仍为 10℃，加剂效果并未被削弱。结果表明，加剂原油在油样析蜡点以上重复加热，对原油凝点基本无影响，药剂降凝状态良好。猜测由于本次试验滚泉站重复加热前的进站油温较高（34℃），仍高于该油样的析蜡点（室内实验测试结果 33℃），这可能是重复加热对降凝效果影响不大的主要原因。

表 8 惠安堡出站温度 50℃、滚泉站重复加热时的油样凝点

站场	测试油样凝点 /℃
惠安堡出站	10
滚泉进站	10
渠口进站	11
石空进站	10

4.4 剪切稳定性对降凝效果的影响

在加热炉前 3~5 m 处注入 12.5 mg/L 的有表活剂和无表活剂，惠安堡出站温度 50℃，滚泉、渠口站热力越站。现场凝点测试结果见表 9，可以看出有表活剂和无表活剂都具有较好的抗剪切稳定性，两种加剂油在输送过程中全程凝点均没有受到剪切的影响。

表 9 加剂油剪切稳定性现场试验结果

降凝剂种类	站场	测试油样凝点 /℃
有表活剂	惠安堡出站	11
	石空进站	11
无表活剂	惠安堡出站	10
	石空进站	10

4.5 静置稳定性对降凝效果的影响

2024 年 10 月 24 日 9:00，在惠安堡首站加热炉前 3~5 米处加无表活剂。加剂量为 25 mg/L，惠安堡首站出站温度 50℃；滚泉出站温度 45℃。

10 月 25 日 4:00 惠宁线停输 20 h，期间在惠宁线现场进行加剂停输试验，测试了停输静置不同时间、以及启输后的加剂油凝点。停输后滚泉、渠口和石空站现场测试凝点结果见表 10，由表 10 数据可以看出，无表活剂的静置稳定性较好，各站油样静置不同时间的凝点与停输前未见明显差异。

在石空站对启输后 10 h（对应静置 30 h）和启输后 20 h（对应静置 40 h）及更长静置时间的加剂油凝点进行了测试，恒

温温度为 26℃（油样取回时温度）。根据凝点测试结果可见，静置 30 h 和 40 h 的加剂油凝点仍为 7℃，当时间延长至静置 55 h 和 64 h 时，凝点仅上升 2℃至 9℃，表现出较好的静置稳定性。

表 10 不同停输时间和启输时间的加剂油凝点

站场	时间	取样温度 /℃	测试油样凝点 /℃
惠安堡出站	停输前 15h	50.3	7
	停输前 8h	47.0	7
滚泉出站	停输 5h	36.5	7
	停输 9h	35.4	7
	停输 15h	33.5	8
	停输 5h	29.5	8
	停输 9h	29.0	7
渠口进站	停输 15h	27.0	7
	停输 5h	29.4	8
	停输 9h	28.1	7
石空进站	停输 15h	26.3	7
	启输 10h（恒温 26℃油样）	26	7
	启输 20h（恒温 26℃油样）	26	7
	启输 35h（恒温 26℃油样）	26	9
	启输 44h（恒温 26℃油样）	26	9

5 结论与建议

（1）室内实验和现场试验结果均表明，提高降凝剂的添加量和提高热处理温度均能提高改性效果。室内实验空白油凝点 19℃，两种加剂油均加热至 50℃，加剂量 12.5 mg/L、20 s⁻¹ 剪切率下，动态冷却至 25℃的凝点仅降低 1℃至 18℃，而现场同样的热处理温度下，有表活加剂油凝点为 11℃，无表活加剂油凝点为 10℃，凝点降幅达 7℃~8℃。即说明无表活和有表活两种降凝剂的现场降凝效果都比较显著且相差不大，且现场试验降凝效果比室内实验效果更好。

（2）室内模拟实验和现场试验结果均表明，只有当热处理达到一定温度时，降凝剂才能充分发挥降凝改性效果。

（3）与在常规加剂间加剂的效果相比，在加热炉前 3~5 米处加剂，改性效果更优，因为此时全部的加剂油均经过加热处理，实际有效加剂量等于添加量；而在加剂间加剂时，只有多一半的加剂油经过加热，另有少部分加剂油未经加热，导致实际有效加剂量减小。

（4）基于室内实验数据和现场试验数据，有表活剂和无表活剂在降凝改性效果上较为接近，但无表活剂的价格通常比有表活剂低，因此在降低降凝剂成本方面更具优势。相比于传统的固体降凝剂，液体降凝剂安全环保、节省现场人力，无需预处理便可通过计量泵直接注入管道，操作简便，

而且操作成本低、可以根据管道运行工况（如温度、流量）快速调整添加量。所以从现场实际情况和经济性及降凝改性效果综合考虑认为，无表活剂更具性价比。因此惠宁线推荐使用无表活降凝剂，12.5 mg/L 的加剂量和 50℃ 的热处理温度，加剂位置为加热炉前 3-5 米处，可使原油凝点由空白油的 18℃ 降至 10℃。

参考文献：

- [1] 张付生，王彪，谢慧专，等．原油的族组成对原油加降凝剂处理效果的影响[J]．油田化学，1999，16(2):171-174.
- [2] 关中原，伍丽娟，郭淑凤．大庆原油降凝剂复配试验研究[J]．油气储运，2008，27(9): 37-41.)
- [3] KRISHNA R, JOSHI G. Correlations of pour point of gas oil and vacuum gas oil fractions with compositional parameters[J]. Energy&Fuels,1989, 3(1): 15-20.
- [4] BROWN G L, GASKILL G P. Enhanced diesel fuel low temperature operability[J]. Nissenschaft&Technik,1990, 43(5): 196-204.
- [5] HERAUD A, POULIGNY B. How does a cloud point diesel fuel additive work[J].Journal of Colloid Interface Science, 1992, 153(2): 379-390.
- [6] 陈刚，张洁．原油流动改进剂研究进展[J]．天然气与石油，2013，31(2): 1-5.
- [7] 高志敏，全青．管输含蜡原油添加降凝剂应用进展[J]．精细石油化工进展，2022，23(02): 20-25.
- [8] 蒋庆哲，宋昭峥，葛际江，等．降凝剂对蜡晶晶格参数的影响[J]．中国石油大学学报（自然科学版），2006，30(1): 118-122.
- [9] 聂超飞，刘鑫，潘艳华，等．冀东原油添加降凝剂应用效果现场试验研究[J]．石油工程建设，2015，41(06): 40-43.
- [10] 李海波，曹旦夫，卜祥军，等．万周输油管道添加 BEM-5P 降凝剂现场试验[J]．油气储运，2004,(01): 18-22+61-63.
- [11] 张玉蛟，杜文友，丁秉军，等．惠宁原油管道全年常温输送的可行性研究[J]．油气田地面工程，2018，37(01): 55-58.
- [12] 陈寓兴，林永刚，沈亮等．原油管道工艺运行规范第 6 部分：惠宁原油管道：Q/GCW 02042—2023[S]．北京：石油工业出版社，2023.
- [13] 原油凝点测定法：SY/T 0541-2009[S]，2009.
- 作者简介：**黄晨阳（1999—），男，汉族，2023 年毕业于西安石油大学油气储运工程专业，获学士学位，现为中国石油大学（北京）石油与天然气工程专业在读硕士生，研究方向为油气输送与储存理论与技术。
- 基金项目：**国家管网集团研究总院横向项目“长庆原油管网添加液体降凝剂工业测试项目”，GWHT20240026324。