

技术论文

聚醚型多元醇液压油：探寻液压自动测量仪器控制系统牵引泵内部的奥妙

本论文介绍的是新一代防火型液压油：聚醚型多元醇液压油。文中着重强调了对于一个可变排量轴活塞泵的内部检测，这台活塞泵已在 345 bar (或 5,000 psi) 的压力下运转了 4,000 小时。该液压油用于印第安那州伯利恒钢铁公司伯恩斯厂 160 英寸钢板厂的液压自动测量仪器控制系统中的牵引泵中。

Kevin P. Kovanda (成员, STLE)
美国化学技术公司
密歇根州威克索姆市 48393
&
Philip R. Miller (成员, STLE)
Gateway Additive 公司
南卡罗来纳州斯巴达堡 29304
&
Hans M. Melief
Mannesmann Rexroth 公司
宾西法尼亚州伯利恒

关键字：液压、活塞、合成原油

介绍

伯利恒钢铁公司伯恩斯厂是全球首屈一指的钢板生产商。该厂采用业内最为先进的技术设备，年产量逾百万吨，各级生产均处于严格监控和计算机控制之下。

轧压钢板的第一步工作从回动粗轧机开始。在这个过程中，机器将钢板卷成需要的宽度。然后由回动精轧机将钢板卷至需要的厚度。就是在这一步骤中液压自动测量仪器控制系统 (HAGC) 发挥着重要的作用。(见图 1) HAGC 是钢铁行业中最先进的厚度控制系统，内有 93 个连续的联机同位素测量传感器自动测量整张钢板的厚度。测量得出的数据馈送至 HAGC，当钢板置于轧机上时，HAGC 会不断调整轧滚，因此需要一个制动装置进行精确调校，在负载不满的情况下补偿机器偏差。有关 HAGC 系统的技术指标请参阅表 1。

严格的测量控制可以最大限度地减少钢板测量偏差，从而增加收益并减少重量偏差。对于钢板生产商来说，控制测量偏差至关重要，因为他们生产出来的钢板必须符合用户提出的“精确重量”。通常，造船和交通运输行业对于钢板的重量限制非常严格。

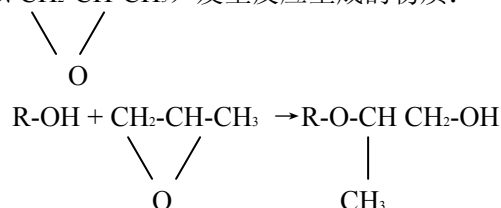
伯恩斯厂于 1991 年安装了 HAGC 系统，当时选择的是一种多元醇酯液压油。在安装后的六年时间里，该系统共发生过 35 次灾难性的水泵故障，没有任何一个水泵使用寿命超过 4000 小时，其中最长的水泵寿命为 3800 小时。在此期间，该系统使用过两种不同的多元醇酯液压油，由于 TAN 值过高 (超过 5.0mg KOH/g 液压油)，每个供应商都不得不对系统进行两次排空和重注液压油的操作。此外，由于多元醇酯液压油形成的清漆、泥渍及锈斑而导

致的伺服阀门提前失效也时有发生。

1998年4月18日，该厂将系统液压油更换为聚醚型多元醇液压油，并安装了新的轴活泵。其中 Rexroth 泵用作牵引泵，Denison 泵负责供应辅助流。截至 1998 年 10 月底，每台水泵无故障运转时间均略微超过 4000 小时。该厂将两台水泵分别拆卸下来并送交供应商检验。本文即着重介绍有关牵引泵的送检结果。

液压油描述

要想了解聚醚型多元醇液压油的一些关键特性，首先让我们来分析一下它形成的化学过程。聚醚型多元醇是由某种醇类（通常为丁醇，以 R-OH 表示）和某种环氧化物（如环氧丙烷，以 CH₂-CH-CH₃）发生反应生成的物质：



通过控制加入醇类分子中环氧丙烷的单位数量，我们可以得到需要的合成分子，进而决定该聚合物的重量和粘度。

聚醚型多元醇的一个突出优点就是水解稳定性，即抵制与水发生化学反应的趋势。由于大多数制钢设备都是在潮湿的环境下工作的，湿气可能会进入蓄水池与液压油相遇。同样，在气缸伸缩过程中，活塞杆也可能将湿气带入系统中。在这两种情况下，进入液压系统中的水都有可能与液压油发生水解反应生成酸，导致酸含量的快速增加，进而造成腐蚀并最终导致设备停机。

聚醚型多元醇液压油的水解稳定性与酯基液压油形成了鲜明对比，后者遇水极易发生水解（1），而对于磷酸盐酯液压油来说，达到一定水量时还会形成凝胶状物质。图 2 列出了聚醚型多元醇、多元醇酯液压油及天然甘油三酸酯（蔬菜油酯）液压油的抗氧化和水解特性。

聚醚型多元醇本身还具有良好的润滑性（2）。图 3 显示了在相同的粘度级别范围内对以石油为主要成分的液压油和以聚醚型多元醇为主要成分的液压油（无添加剂）所作的四球磨损试验数据。由于聚醚型多元醇属于完全饱和酯（碘价<1），因此具有良好的抗氧化稳定性，也不会在水泵的各个部件上产生清漆、粘性沉淀或锈迹等物质。另外，聚醚型多元醇去垢性能也相当好，可以确保系统的清洁运行。聚醚型多元醇之所以有良好的去垢性能，最起码的原因就是多元醇本身即是其自身分解产物的溶剂。这种可溶性就避免了杂质沉积的可能。在制成成品液压油之前，再加入适当的添加剂，以帮助各种有色及无色金属防止腐蚀，并进一步增强其抗氧化稳定性和耐磨损特性。

表 2 列出了三种合成聚醚型多元醇液压油的典型物理特性。表 3、4、5 中对这三个粘度级别的产品性能作了着重概括。

水泵检查

如图 4 所示, Rexroth 可变排量轴活塞泵在压力为 345bar(5000psi)的条件下运转了 4000 小时。其表面情况和平滑度接近 5 μ m,可以说是处于最佳水泵性能状态。如果间隙 (clearance) 过大,将会造成容积效率的损失和局部温度的升高并最终导致水泵故障。同样对于高压活塞泵来说,活塞也的同心性和直线性也至关重要。在关此类型活塞泵的关键润滑部位简要概括如下:

1. 磨损 (冲激) 片及活塞金属箍
2. 活塞筒终端及阀门片
3. 活塞及活塞孔
4. 前后轴承
5. 轴封盖

对于磨损 (冲激) 片及活塞金属箍的检测

在磨损 (冲激) 片及活塞金属箍中间的部分,液压油的润滑性能和长期防腐蚀的性能同样重要。这个位置位于泵体的负载区,处于极高压力之下,同时也是连接两种不同金属的区域。磨损 (冲激) 片是以碳钢合金为材料的,而活塞金属箍则为黄铜合金制品。一旦润滑油膜发生分解,即可立刻损伤相对较软的黄铜表面,在活塞金属箍和反面活塞压力侧分配压力并最终导致水泵故障。同时,如果液压油的抗氧化性和水解稳定性较弱,则会在液压油内生成酸性物质沥滤黄铜中的各种合金,最终导致活塞金属箍提前失效。如果不稳定的液压油继续分解就会出现沉积,进而在金属表面形成研磨复合层。这两种情况都会导致水泵的提前失效,原因可能是机箱过度排空 (容积效率的损失) 或者发生灾难性故障。

对活塞金属箍的检测显示这些金属箍均处于极佳状态,磨损 (冲激) 片除略有运转痕迹外状态正常。见图 5。

对于活塞筒终端及阀门片的检测

在这里讨论的仍然是连接两种不同金属的区域。在这个区域,润滑作用的重要性并不很明显,因为水泵中的所有液压油都流经这里,因此很容易形成一个良好的液压油膜。在这里,更为敏感的问题是液压油的清洁度问题,因为游离出来的金属会导致内部泄露进而降低水泵的工作效能。造成泄露的原因可能是颗粒污染,也可能是在液压油流经金属疲劳区域时造成腐蚀引起的。另外,液压油消散空气的作用在这一区域也尤为重要。在这个区域,气体由进气口进入高压条件之下,在这一转变过程中,任何气泡都会对导致金属表面的气蚀。这种情况同样会降低水泵的工作效能进而导致其提前失效。最后,在这个区域,抗腐蚀性仍然是一个重要性能。对黄铜造成的任何腐蚀及金属表面的蚀损斑都会造成内部泄漏。

阀门片、活塞筒终端均处于正常状态。但是,如图 6 所示,可以看到有一小块三角形的金属腐蚀。这种情况在本系列水泵中经常发生,在目前的系列 30 水泵中针对此问题进行了重新设计。这块三角形的金属腐蚀的是在活塞筒于固定阀门片内旋转时,由于高压导致液压油倒喷造成的。活塞筒携带高压液压油至进气口 (低压或零压力) 时,液压油发生迅速倒喷至金属表面造成腐蚀。本检测中活塞筒终端的状态与在同等条件下运转等长工作时间的使用矿物油的水泵活塞筒终端状态相同。见图 6

对于活塞及活塞孔的检测

这里仍然是连接两种不同金属的区域，即连接碳钢合金的活塞和黄铜合金的活塞孔。和活塞筒终端及阀门片相似，在这个区域，润滑作用也不是唯一重要的因素。正常的润滑可以保证活塞在活塞孔中的自如滑动，同时由于力的作用，即使在“零”排量时，活塞也始终在孔内转动，因此润滑性能就更为重要。从理论上讲，接合表面应由液压油膜分开而不彼此接触。然而，润滑油膜内部磨擦生热会导致粘性分解并穿透油膜。此外，颗粒污染也会导致油膜破裂。这样，两种金属的接合表面彼此接触就会产生不期望的热量。总之，液压油的润滑性、清洁度以及抗腐蚀性有助于维护活塞和活塞孔的耐受性，从而确保整个水泵的性能。

检测发现活塞及活塞孔状态良好，只是由于颗粒污染存在轻微划伤。见图 7。

对于前后轴承的检测

本泵轴承完全由泵内泄漏的循环机箱液压油进行润滑。两个轴承均为圆柱形托辊轴承，用于承受大量径向负载。驱动轴终端 OD 被用作内轴承座圈。这一设计允许轴承在由肾形进、出口所限定的有限空间内承受巨大负载。同时此设计提供了足够的轴直径以确保在使用双联泵的情况下发挥充分的驱动作用。除承载性能之外，液压油的清洁度在此区域尤为重要。水泵内过量的颗粒污染物和/或磨损金属在液压油流经机箱排水口时会经过轴承从而导致轴承故障。

检测表明除轻微运转痕迹外，前后轴承均处于良好状态。驱动轴 OD（内轴承座圈）也只有轻微运转痕迹，进一步证明了前后轴承的良好状态。

对于轴封盖的检测

本泵使用的是 BAFSL 型单加固唇形弹簧式轴封盖，材料为 FPM（碳氟化合物橡胶）。本封盖可以允许不形成可见液滴的微量液压油泄漏。这种泄漏十分必要，可在轴转动过程中为唇形封盖提供润滑。要确保长期的密封寿命，要求液压油必须具备良好的抗氧化性。如前所述，由于液压油性质不稳定而形成的氧化物可在泵内形成沉积，进而在唇形封盖表面形成研磨复合层，导致过量泄漏和提前失效。

检测表明轴封盖和陶瓷套管中未见任何沉积，唇形封盖也处于良好状态。因此在该泵运转 4000 小时期间内未出现明显的轴封盖泄漏问题。

结论

通过对已经运转 4000 小时的泵机进行检测，可以得出结论该液压油润滑性能良好，泵机状态至少与使用矿物油时相同。下一步的检测将在泵机运转更长间隔之后进行，以判断该液压油的长期稳定性。

参考书目：

- (1) Marino, M.P. 和 Placek, D. G., “Phosphate Esters,” *CRC Handbook of Lubrication and*

tribology, Booser, E.R., Ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, 111, pp269-286,(1994).

- (2) Aderin, M.E., Johnston, G.J., Spikes, H.A., Balson, T.G. 和 Emery. M. G., “The Film-Forming Properties of Polalkylene Glycols,” *Jour. Of Synthetic Lubricants*, 10-123 0265-6582.

图 1 — 液压 AGC 系统示意图 (内容不清, 略)

图 2 — 对比涡轮油性数据

TOST, ASTM D943-改进版 (干)

(95°C, 铁铜催化剂)

	多元醇液压油	天然甘油酸酯	磷酸盐酯液压油	聚醚型多元醇 液压油
通过/未通过 *	未通过	未通过	未通过	通过
小时数	1512	500	1680	>2000
初始 TAN 值	2.84	0.95	0.06	0.25
终止时 TAN 值	5.18	7.70	2.54	0.31
TAN 增量	2.34	6.75	2.48	0.06

TOST, ASTM D943

(95°C, 铁铜催化剂, 60ml 水)

	多元醇液压油	天然甘油酸酯	磷酸盐酯液压油	聚醚型多元醇 液压油
通过/未通过 *	未通过	未通过	未通过	通过
小时数	500	500	840	>2000
初始 TAN 值	2.84	0.95	0.06	0.25
终止时 TAN 值	32.93	36.68	2.44	2.21
TAN 增量	30.09	35.73	2.38	1.96

*2000 小时或酸含量发生 2.0 变化

图 3 四球磨损数据

(上方) 四球磨损数据
(左侧) 斑痕直径 (mm)
(下方) ISO 粘度

mineral oil: 矿物油

Polyether Polyol: 聚醚型多元醇液压油

图 4 型号 AA4VS0250 系列 30

图 5 磨损 (冲激) 片及活塞金属箍

图 6 活塞筒终端及阀门片

图 7 活塞及活塞孔

图 8 后轴承及接合轴表面

图 9 轴封盖和陶瓷套管

表 1

表 1-液压自动测量仪器控制系统指标	
液压泵供应技术数据	
泵类型	压力补偿，可变容积，轴活塞
泵型号	Rexroth-AA4VSO250 系列 30Denison-P16
系统中泵数量	4
工作泵数量	2
工作压力	330-345bar (4800-5000psi)
额定供应	345bar 压力下为 208liters (5000psi 压力下为 55gpm)
工作温度	35-41°C (95-105°F)
机箱排空温度	55-66°C (130-150°F)
AC 马达功率	150Kw (200HP)
轴转速	1200rpm
系统容积	6800liters (1800gallons)
气缸技术数据	
活塞直径	111.76 (44in.)
面积	9807sq.cm (1520sq.in)
活塞杆直径	104.14cm (41in.)
面积	8517sq.cm (1320sq.in)
活塞冲程	4.45cm (1.751in.)
设计最大力每气缸	3,438,288kg (7,580,000lbs.)
阀门、过滤器、人造橡胶	
气缸阀门类型	高响应伺服
伺服阀门型号	Bosch-NG16
压力过滤器	Psrker, 3 绝对微米
抛光过滤器	Psrker, 3 绝对微米
预注入过滤器	Psrker, 10 绝对微米
ISO4406 清洁度	14/12 (NAS 6)
密封类型	Buna N
软管类型	Buna N

表 2

表 2-聚醚多元醇酯液压油的典型特性			
试验	粘度等级		
特性			
粘度	ISO-46	ISO-68	ISO-100
@100°F, SUS	230	310	480
@40°C, cSt	46	68	100
@210°F, SUS	53.3	65.3	86.0
@100°C, cSt	8.9	12.1	17.2
粘度指数	185	189	196
流点, °C (°F)	-45 (-55)	-46 (-50)	-40 (-40)
密度@60° (°F), 1b/gal	8.25	8.27	8.29
酸含量, mg KOH/gm (最大)	0.4	0.4	0.4
Factory Mutual 批准	是	是	是
燃点, °C (°F), COC	274 (525)	302 (575)	329 (625)
泡沫测试, ASTM D892	通过	通过	通过
铜腐蚀, ASTM D130	通过	通过	通过

表 3

表 3-聚醚多元醇酯液压油的典型磨损性能特性		
试验	结果	
Vickers 104C 叶轮泵试验, ASTM D2882 (138bar, 100 小时, 65.6°C, 28.4liter/分钟 1200rpm, 13.2l iter 取样)	总磨损<5mg	
四球磨损试验, ASTM D2266 (1800rpm, 1 小时, 75°C, 40kg 负载)	0.35mm	
四方齿轮试验 (FZG) (90°C, 1760rpm, 1600ml 取样)	通过全部 12 级	
Vickers 35VQ25		
工业设备	I-286-S	通过
移动设备	M-2950-S	通过

表 4

表 4 - 聚醚多元醇酯液压油的其它抗氧化特性	
试验	结果
通用玻璃容器 (135°C, 铜铁催化剂) TAN 值增加 0.5 时所用时间	200 小时
RBOT, ASTM D2272 135°C 时所用分钟数	420

表 5

表 5 聚醚多元醇酯液压油的典型环境性能

试验	结果
OECD 确认的生物降解性测试方法 301B, 28 天	70.9
OECD 确认的生物降解性测试方法 301F, 28 天	83.4
OECD 方法 203, 鱼类急性毒性测试 (对道纳尔逊虹鳟鱼进行 96 小时 LC50 测试)	“基本无毒”