



中国矿业大学博士学位论文出版基金资助

润滑脂流变和输送特性研究

RUNHUAZHI LIUBIAN HE SHUSONG TEXING YANJIU

徐桂云 张永忠 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

润滑脂流变和输送特性研究/徐桂云,张永忠著.

—徐州:中国矿业大学出版社,2005.2

ISBN 7-81107-203-3

I. 润… I. ①徐…②张… II. 润滑脂—特性

—研究 N. TH117.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 115366 号

书 名 润滑脂流变和输送特性研究

著 者 徐桂云 张永忠

责任编辑 耿东锋

责任校对 张海平

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> **E-mail** cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 **印张** 7.5 **字数** 194 千字

版次印次 2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

润滑脂是将稠化剂分散在润滑油内形成的半固体、半流体物质,加入添加剂,可使它具有特殊的性能,相比润滑油有独特的作用,广泛用于各种润滑系统中。润滑脂属非牛顿流体,具有复杂的流变特性——粘性、粘弹性、触变性、壁滑移等,尤其粘性大、流动性差。将润滑脂加注到润滑点较困难,研究润滑脂流变和输送特性具有重要的理论意义和工程实用价值。作者在系统了解该领域前人主要工作和成果的基础上,对该问题进行了较深入的理论和实验研究,撰写出这本书。

该书系统地研究了润滑脂流变和输送特性,以壁滑移为基础,在流变模型、动能修正系数准则方程、流动阻力特性和壁滑移减阻等方面的研究,均有创见和成果,在学术上向前推进了一步。为了验证理论论断,作者研制了流变输送实验台,证实了理论结果的可靠性。润滑脂流变和输送特性问题综合性较强,涉及机械、力学、流变学、物理化学等不同学科。该书内容丰富、深入,值得推荐给读者作为教学和科研参考书。

张明

前 言

据估计,全世界开发的能量约有三分之一消耗于摩擦过程中,润滑剂是加入到两个相对运动的接触表面之间的降低其摩擦和磨损的物质,润滑是降低摩擦和减少磨损的主要手段。润滑脂是将固体稠化剂分散在润滑油内所形成的物质。固体稠化剂以极细纤维分散在液体组分中,并通过彼此之间的吸引力搭成庞大的三维网络结构,使润滑油蕴含其中形成稳定的半固体、半流体胶体分散体系。

润滑脂属非牛顿流体,具有独特的流变特性——弹性、粘弹性、触变性、壁滑移等,它不仅具有良好的润滑特性,还具有密封和保护作用。加入添加剂,还可使它具有特殊的性能,从而润滑脂广泛用于各种润滑系统中。

润滑脂粘性大、流动性差,从而使得加注到润滑点较困难。注脂方法主要有人工涂抹、脂枪加注、集中输送等。目前机械设备的脂润滑向着集中润滑系统方向发展,它向众多润滑点自动输送润滑脂,对减少润滑的事故率和提高脂润滑的经济性起着日益重要的作用。据统计,目前集中润滑约占 90%。

将润滑脂有效地分配输送到各润滑点必须对润滑脂的输送特性进行研究,为此美国 NLGI 协会早在 1946 年就成立了润滑脂集中润滑系统分配输送分会,进行了输送特性理论和实验研究,其他国家也进行了相关的研究,大大促进了集中润滑系统的使用。在润滑脂输送系统的设计中,主要任务之一是在给定的流量下确定系统的压力损失。以往大多是通过反复计算或查阅专用图表进行,但

触变性、壁滑移等流变特性的影响并未体现。

综上所述,润滑脂的应用量大而广,集中润滑是现代机械设备多点润滑的发展趋势,以流变特性为基础系统研究润滑脂的输送特性,具有重要的理论意义和实用价值。

本书是在博士论文基础上撰写而成的,研究了润滑脂流变和输送特性,内容主要包括润滑脂流变特性的研究、实验台的研制、管道流动壁滑移和壁滑移减阻的研究、流变模型建立的方法、产生壁滑移时动能修正系数准则方程的建立、管道流动阻力的特性和近似解的研究。

在研究过程中,得到了中国矿业大学黄日恒教授、陈淑连教授、孟宪堂教授,华东理工大学江体乾教授,中国石油化工科学研究院韦淡平教授级高工,清华大学摩擦学实验室胡元中研究员的指导;在实验台的研制和实验过程中,得到了很多老师的帮助;李浴、刘双喜、金余、林学栋 4 位学生,参加了本书的有关实验、数据处理和插图绘制工作;泰州长力树脂管有限公司有关领导和马润先工程师赠送了试验用的高压塑料管,在此对他们的无私帮助表示衷心的感谢。

本书部分内容取材于诸多文献和书籍,对这些学长、专家表示衷心的感谢。由于作者学识有限,润滑脂流变和输送特性又涉及众多学科,理论和实践性较强,本书难免存在疏漏、缺陷和错误,恳请同行、专家、读者批评指正。

著 者

2005 年 1 月

目 录

1 绪论	1
1.1 本书研究的背景	1
1.1.1 润滑脂应用的广泛性	1
1.1.2 研究输送特性的必要性	4
1.2 润滑脂输送的研究现状	6
1.3 润滑脂流变特性的研究现状	11
1.3.1 屈服应力	11
1.3.2 剪切稀化性质	13
1.3.3 触变性	14
1.3.4 粘弹性	14
1.3.5 流变模型	16
1.4 壁滑移和减阻	17
1.4.1 壁滑移	17
1.4.2 减阻	19
1.5 本书主要内容	22
2 润滑脂的流变特性	24
2.1 综述	24
2.2 粘弹性	28
2.2.1 爬杆现象	28
2.2.2 第一法向应力差	30
2.3 稠度	36
2.3.1 稠度及锥入度的概念	36

2.3.2	测定锥入度的意义	37
2.4	屈服应力	38
2.4.1	屈服应力的影响因素	40
2.4.2	屈服应力测定方法	42
2.4.3	使用锥板流变仪时有关屈服应力的问题	44
2.4.4	使用毛细管粘度计测量有关屈服应力的问题	47
2.5	相似粘度	47
2.5.1	粘度的基本概念	47
2.5.2	相似粘度的测试	49
2.5.3	影响测试相似粘度的因素	52
2.5.4	剪切稀化	53
2.5.5	粘度—温度特性	55
2.5.6	润滑脂粘度在使用上的意义	56
2.5.7	相似粘度和锥入度的关系	57
2.6	流变模型	58
2.6.1	流变模型的测定方法	59
2.6.2	触变型流变模型	60
2.7	本章小结	70
3	输送实验台的研制	71
3.1	输送实验台的研制	71
3.1.1	输送实验台的组成	71
3.1.2	低压力波动润滑脂泵的设计	73
3.1.3	无孔穴误差的精确测压装置	75
3.1.4	沿程阻力和局部阻力的测量	77
3.1.5	润滑脂压力表的研制	80
3.2	提高实验精度的措施	84

3.3	本章小结	85
4	润滑脂管道流动的壁滑移研究	86
4.1	管流法研究壁滑移的基本原理	86
4.1.1	壁滑移产生的机理	86
4.1.2	壁滑移速度的确定	88
4.1.3	壁滑移的实验验证	90
4.2	实验分析	90
4.2.1	实验测试结果	90
4.2.2	总流流变模型的建立	96
4.2.3	壁滑移速度	98
4.2.4	扣除壁滑移后的真实流变模型	106
4.3	壁滑移产生的影响	111
4.3.1	对管道流动的减阻效果	111
4.3.2	对弹流润滑特性的影响	112
4.4	本章小结	112
5	润滑脂流变模型的建立方法	113
5.1	问题的提出	113
5.2	已定性润滑脂流变模型的建立	113
5.2.1	幂律流变模型	114
5.2.2	Bingham 流变模型	115
5.2.3	Casson 流变模型	116
5.2.4	Herschel-Bulkley 流变模型	117
5.2.5	已定性润滑脂流变模型的建立方法	118
5.3	未定性润滑脂流变模型的建立	118
5.3.1	无屈服应力流变模型的建立方法	118
5.3.2	有屈服应力流变模型的建立方法	119
5.4	本章小结	120

6	润滑脂产生壁滑移时的动能修正系数	122
6.1	动能修正系数公式	122
6.2	动能修正系数准则方程的建立	127
6.3	实验进一步验证准则方程	133
6.3.1	准则方程中参数的确定	133
6.3.2	通过实测数据验证准则方程	136
6.4	本章小结	140
7	润滑脂管道输送的阻力特性	142
7.1	通过含壁滑移的流动方程研究阻力特性	142
7.1.1	含有壁滑移的广义雷诺数和 摩阻系数的确定	142
7.1.2	阻力特性的实验研究	144
7.1.3	Re_s 的通用性	151
7.1.4	由含壁滑移的流动方程确定阻力	153
7.2	通过总流流变模型研究阻力特性	153
7.2.1	由总流流动方程确定阻力	154
7.2.2	阻力特性	159
7.2.3	紊流流动的阻力特性	163
7.3	各雷诺数之间的关系	167
7.4	局部阻力	171
7.4.1	入口处的局部阻力	171
7.4.2	扩径、缩径、弯头处局部阻力	171
7.4.3	管道输送系统的局部阻力	174
7.5	管道输送系统的总阻力	176
7.5.1	总阻力	176
7.5.2	各种因素对阻力的影响	177
7.6	本章小结	180

8 润滑脂管道流动壁滑移减阻的研究	182
8.1 液体和固体两相间的相互作用	182
8.1.1 液体表面	182
8.1.2 固体表面	184
8.1.3 固体与液体表面的相互粘附作用	185
8.2 壁滑移和粘附功之间的关系	187
8.3 润滑脂壁滑移减阻	188
8.3.1 壁滑移减阻的机理	188
8.3.2 不同管径的壁滑移减阻效果	189
8.3.3 不同管壁材料的壁滑移减阻效果	189
8.4 本章小结	192
9 润滑脂流动阻力近似解公式的研究	193
9.1 Bingham 流体阻力近似解的优化	193
9.1.1 近似解公式分析	194
9.1.2 降低近似解的偏差	194
9.2 Herschel-Bulkley 流体阻力近似解的优化	199
9.2.1 偏差方程的数学分析	199
9.2.2 通过三维优化降低偏差	200
9.3 Casson 流体阻力近似解的推导和优化	204
9.3.1 Casson 流体阻力近似解的推导	204
9.3.2 通过三维优化降低偏差	206
9.4 本章小结	210
10 全书结论	212
参考文献	215

1 绪 论

1.1 本书研究的背景

1.1.1 润滑脂应用的广泛性

摩擦学是研究摩擦、磨损及润滑的学科。据估计,全世界开发的能量约有三分之一消耗于摩擦过程中^[1]。摩擦、磨损是能量消耗和材料损失的重要原因,润滑是降低摩擦和减少磨损的主要手段。润滑剂是加入到两个相对运动的接触表面之间,以降低其摩擦和磨损的物质。润滑剂按其聚集状态分为气体、液体、半固体及固体四类。润滑脂是润滑剂中的一类,是一种稠化了的润滑油,世界上公认润滑脂为:“将稠化剂分散在液体润滑剂内形成的固体至半流体物质,还可加入添加剂,使之赋有特殊的性能。”固态稠化剂以极细纤维分散在液体组分中,并通过彼此之间的吸引力搭成庞大的三维网络结构,使基础油蕴含其中形成稳定的固体、半固体或半流体胶体分散体系。在常温和静止状态时它像固体,能保持自己的形状而不流动,能粘附在金属上而不滑落;在高温或受到超过一定限度的外力时,它又像液体能产生流动。润滑脂在机械中受到运动部件的剪切作用时,能产生流动并进行润滑,减低运动表面间的摩擦和磨损;当剪切作用停止后,它又能恢复一定的稠度,使脂在机械不运动时不宜流失。润滑脂属非牛顿流体,具有独特的流变特性——弹性、粘弹性、粘性、屈服应力、触变性、壁滑移等。

独特的流变特性决定了润滑脂比润滑油有独特作用,即可以在不适宜油润滑的部位进行润滑,密封作用和保护作用较好。绝大多数润滑脂用于润滑,称为减摩润滑脂,同时还兼起密封防尘作用和防止金属腐蚀的保护作用。润滑脂在摩擦表面上保持能力强,密封性能好,有些机械密封不严,使用润滑脂可以防止水分、尘土和其他机械杂质进入摩擦表面,因此它适用于潮湿和多尘环境下机械的摩擦部位。另有少数润滑脂专作密封用,称为密封润滑脂,例如螺纹脂。还有一些润滑脂主要用来防止金属生锈或腐蚀,称为保护润滑脂。由于润滑脂在金属表面上粘附力强,保护润滑脂可以保护金属长期不锈蚀,甚至可保护在水中的金属部件不受腐蚀,例如工业凡士林等。

由于改变组成润滑脂的基础油、稠化剂和添加剂中的任一组分,可得到不同的性能,再加上存在三维网络结构,因此,润滑脂有着与润滑油不同的特点:(1) 润滑脂的使用寿命长,不需经常添加,在难于经常加油的摩擦部位上,使用润滑脂较为有利。在“终生脂润滑”概念提出后,有些密封轴承可以在装配时填充适量的润滑脂一直润滑到轴承寿命终了为止。“终生脂润滑”还为宇航工具的润滑提供了保证。(2) 由于稠化剂结构的毛细作用,可在较宽的温度范围内^[2](-70~350℃),以及较长时间下放出一定数量的液体润滑剂润滑金属表面,减少机械部件的摩擦和磨损。润滑脂抗磨性用四球法试验,为准确方便测量钢球磨斑直径,笔者研制了基于图像处理的磨斑测量装置^[3]和编制了对应的测量软件^[4]。(3) 同可比粘度的润滑油相比较,润滑脂具有较高的承受负荷的能力和较好的阻尼性(减震性),可适用于重负荷、低速、高速、高温、低温、极压以及有冲击负荷的苛刻条件,也适用于间歇或往复运动的部件上进行润滑。(4) 由于稠化剂的吸附作用,润滑脂比润滑油有较低的蒸发速率,并由此而具有较好的润滑性(如在高温、高速和延长润滑周期的“贫油”润滑条件下)。(5) 由于稠化剂结构的毛细

作用,润滑脂比润滑油的蠕变流失趋势要小,能比较牢固地保持在金属摩擦表面,可防止滴油、溅油污染产品和场地,使机器在垂直位置下正常运转,而不产生漏油,还可保护金属长期不锈蚀。(6)轴承的润滑中,润滑脂可形成环状物,提供密封作用,能防止水分、尘土和其他机械杂质的渗透,可减少复杂的密封装置。

润滑脂因具有以上特点而得到广泛应用。使用脂润滑的机械部件遍及从精密仪表的微型轴承到重型的机械设备,主要有轴承、齿轮、蜗杆蜗轮、链条、轨道、车底盘、关节等。最广泛使用脂润滑的典型部件是轴承,润滑脂很多特性适应轴承润滑,成沟特性更为有利^[5],即润滑脂在轴承中连续工作时形成沟槽的趋向,使一部分未工作的润滑脂构成沟槽的槽壁而起着密封和油池的作用。据估计,约有80%以上的滚动轴承和20%的滑动轴承采用脂润滑^[1]。其次是齿轮箱中的齿轮,以半流体润滑脂润滑齿轮能达到更为满意的效果^[6,7]。这是由于半流体润滑脂有着润滑脂特有的流变性质,在高剪切区有效粘度变得接近于普通齿轮油的粘度而起到良好的润滑作用,在低剪切区或非剪切区却仍然保持半流体固有的粘度,粘附于齿轮箱壁上起到了密封作用。对添加剂的适应性、对齿面的防护性以及齿面上的粘附性上,半流体润滑脂都优于润滑油,特别是停机一段时间后再启动时,齿面的润滑状况比润滑油要好得多。而且只要使用得当,动力消耗不会比润滑油大,其原因是:半流体脂有一定的成沟特性,与润滑油比,齿轮对其搅动要少;润滑脂的摩擦因数比其基础油小;由于其固有的流变性,使其在剪切区的有效粘度接近于基础油的粘度。太原理工大学、首都钢铁公司等单位的实测数据完全证明了这一点^[8]。所以半流体脂是一种优良的齿轮润滑剂。

从润滑脂应用的领域来看,无论是工业、农业、交通运输业还是国防建设事业,各种机械设备都离不开润滑脂。工业上,不仅采矿、冶金、机械制造等许多重工业机械设备需要使用润滑脂,而且

轻工业如纺织、造纸、印染、食品等机械设备上也需用润滑脂。农业上,拖拉机和其农业机械的许多摩擦部位需要润滑脂。在交通运输和国防方面,汽车、铁路机车、飞机、舰船等各种交通运输工具,以及军用车辆、坦克、尖端装备等,也都需用润滑脂来进行润滑或密封和保护。

润滑脂的发展,是与节能及机械发展相联系的。过去由于航空工业及军工等方面的需要,促进了润滑脂的研制;当前由于导弹、火箭和宇宙飞船以及现代机械设备的发展,对润滑脂产品质量提出更高要求,也促进了多方面研究工作的开展:① 发展多效通用脂,以简化品种和降低消耗。例如,1997~2000年,多效通用锂基类脂在润滑脂的总量上所占的比例,美国和欧洲分别稳定在67%~68%和62%~65%,亚洲国家中日本稳定在58%~60%,印度和中国比例逐步上升,分别达到75%和65%^[9]。② 研究新型稠化剂和基础油,以开拓新品种。除生产多效锂基润滑脂外,高滴点、多效能的润滑脂,如脲基润滑脂、复合皂基润滑脂等,也得到了开发。③ 开展基础理论的研究,为关键性技术突破提供理论指导,例如长寿命、抗辐射、可分配性等。

近年来由NLGI(National Lubricating Grease Institute)统计的润滑脂的年产量全球稳定在71万~74万t^[10],我国稳定在6.5万~7万t。就我国的产量讲,20世纪90年代前仅次于前苏联和美国居世界第三位^[11],近年来仅次于美国(NLGI报告未统计俄罗斯数据)^[9]。世界范围内润滑脂生产厂的规模均为大、中、小并存,1999年我国生产厂平均产量为2410t,2000年为2555t。此外,润滑脂品种繁多,目前已有250种以上。

1.1.2 研究输送特性的必要性

润滑脂粘性大,流动性差,将润滑脂加注到润滑点较润滑油困难。注脂方法主要有人工涂抹、手动脂枪、机动脂枪、定期喷射、集

中润滑等。除人工涂抹法外,其他方法都需考虑输送问题。据统计,集中润滑在上述后四种注脂方法中约占 90%。在 20 世纪 70 年代,国产挖掘机^[12]、矿石给矿机的上下托辊^[13]以及煤矿机械轴承^[14]等都采用人工注脂,这种方法输送装置简单,但工作繁重,润滑事故较多,易造成零部件得不到可靠的润滑保证而早期损坏,使备件和维修工作量增加。而目前机械设备的脂润滑向着集中润滑系统方向发展,它是向众多润滑点自动输送润滑脂的整体输送系统,虽然输送设备较复杂,但对减少润滑的事故率和提高脂润滑的经济性起着日益重要的作用。例如 Hatschek^[15]在研究润滑脂使用成本时提到,“据估计,美国工业某些部门每实际使用价值 1 美元的润滑脂所花的成本要 3 至 6 美元”,而集中润滑系统则可以大大降低使用润滑脂的成本。又例如芬兰一家造纸厂^[16],有 3 798 个润滑点,在采用自动润滑之前,1 台机器每年有 5~10 起轴承的故障是由于润滑原因造成的,而使用 1 条自动控制的润滑脂线后 1 起也没有发生。根据这家工厂报告,使用自动润滑之前,1 台主机总的技术维护停工时间的记录为 470 h/a,实行自动润滑以后,减少至 148 h/a,每年可获得 9 万~18 万美元的利润,6 年多时间,设备维护费已经减少 23%,润滑脂的消耗量只是以前人工润滑方式的 85%,消除了过量润滑脂的润滑现象,预防性的技术维护人员(润滑专职人员)已经由 20 人减少到 12 人。

对润滑点较多的大型设备,最好用集中润滑系统,这样可为各个润滑部位提供及时的和精确的润滑。输送到每一个润滑部位的润滑脂量的测量靠计量阀,它是最重要的元件之一,使用成功的计量阀都采用活塞排量的原理。Gesdorf^[17]给出了使用良好的有指示的可调和不可调两种计量阀。集中润滑系统设计适当时,可提供安全、经济、管理方便的润滑,并起到下列作用:保证连续高速运转设备的可靠性工作;保证每个润滑部位都有合理的润滑;减少润滑事故和人身事故;防止润滑过量或不足;节省加注润滑脂的时间;消

除润滑剂的污染;减少维修;延长机器的寿命;提高生产率和降低保养费。

但使用实践表明,因润滑脂具有复杂的流变特性,且目前对输送特性缺乏深入的研究,在润滑脂集中润滑系统的管道输送中常常发生一些问题:(1) 由于管路中的流量和压力降关系难以准确计算,常出现泵的压力不够,润滑脂输送不到位,造成摩擦副损坏,机器不能正常工作的情况,据统计,设备的润滑事故 50%以上是由此造成的。若选择大功率的泵,出现大马拉小车的现象,浪费能源,并且如果输脂管路承压能力不够,会造成管路破裂。(2) 由于压力降低而形成气穴,致使润滑脂不能流到分配器吸口处,导致输送中断^[18]。(3) 若过滤网孔选择不当^[19],通过网孔时会分离出油,而剩下稠化剂或固体添加剂的硬块,分配管道就有可能阻塞。

综上所述,润滑脂的应用量大面广,其应用领域正不断扩大,集中润滑系统是现代机械设备多点润滑的发展趋势,但在润滑脂的输送中还存在一些问题,因此进行输送特性的理论分析和试验研究具有重要的理论意义和实用价值。该课题涉及机械、化学、非牛顿流体力学、流变学、边界表面学、减阻力学等学科,为此中国矿业大学把该课题列为机械设计理论重点基础理论课题进行研究。

1.2 润滑脂输送的研究现状

将脂分配到润滑点需要掌握润滑脂的输送特性,为此美国 NLGI 协会在 1946 年成立了润滑脂集中润滑系统分配输送分会^[20,21],进行了输送特性理论分析和实验研究,其他国家也进行了这方面的研究。该研究促进了集中润滑系统的研制和使用,集中润滑系统的发展又不断为输送特性的研究提出新的课题。

美国 Lincoln Ventmeter 公司^[22]在 1965 年首先研制了自动集

中润滑系统,随后各国自动集中润滑系统发展很快,广泛用于工程机械、农业机械、轧钢机械、煤矿机械等。随着机器的大型化发展及功能的增多,润滑点数也增多,输脂管路也较复杂,目前输脂范围已达 150 m,润滑点数已达数千个,集中润滑系统已向高压化发展。由于供脂的压力波动对大多数机器的运转影响不大,目前大多使用的是压力波动较大的柱塞泵。但为了满足某些特殊用途对压力波动较小的要求,文献[16]介绍了精心设计的自动集中润滑系统,可以保持较小的压力波动。我国自动集中润滑系统发展较慢,也不为人们重视,虽然 20 世纪 50 年代就有电动双线给脂系统,但系统压力只在 10 MPa 以下,不能满足润滑点较多的大型设备。到 80 年代,在挖掘机、牙轮钻机等机器上引进了美国的“林肯”、“法沃尔”自动集中润滑系统,并在这两种系统的基础上,由太原机械研究所和重庆大学联合研制了挖掘机上的自动集中润滑系统^[23]。目前我国有很多型号型号的润滑脂泵,如 DDB 型、RZB 型、DRB 型等,而且都形成了系列产品,与控制器配套使用可实现设备的自动润滑。其中 RZB 系列润滑脂泵与 RBK 型控制器配套使用效果较好^[13],主要是采用电脑芯片配以完善可靠的程序来控制,具有加脂和停止加脂时间随意设定,短路、过载自动报警等功能。

因为润滑脂使用的温度范围广,例如露天使用的工程机械环境温度达 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,轧钢机械的润滑点达到 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,因此,润滑脂流动性试验方法涉及低温、常温和高温。美国材料试验学会(ASTM)制定的 Method D1092—88 流动试验方法^[24],温度为 $-54\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。美国钢铁协会(USS)制定的 Method DM—43^[25],最低温度为 $-37.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。ASTM 学会制定的高温流动试验方法 Method D3232^[26]和 Method D2270^[27],温度为 $40\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。但为了更迅速、更简便地确定润滑脂的流动性,NLGI 分配输送分会公布了与分配泵输送管路相应的润滑脂流动特性试验方法和进行该试验的设备^[28],建议在 $27\sim 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行试