摩擦学学报
TRIBOLOGY

流动点法表征润滑脂流动性与传统评定方法相关性研究

王亚南，赵启龙，孙龙琦，于延晨，蔡浩鹏，娄文静

Correlation Between the Flow Point method and Traditional Evaluation Methods for Characterizing Grease Flow Performance

WANG Yanan, ZHAO Qilong, SUN Longqi, YU Yanchen, CAI Haopeng, LOU Wenjing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022225

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

胺分子结构对聚脲润滑脂流变学性能的影响
Effect of Amine Molecular Structure on Rheological Properties of Polyurea Grease
摩擦学学报. 2020, 40(3): 378 https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020006

油–气润滑流动行为对点接触副摩擦特性的影响
Influence of Oil – Air Lubrication Flow Behavior on Frictional Characteristics of Point Contact
摩擦学学报. 2018, 38(6): 700 https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018034

润滑脂性能对RV减速机疲劳寿命的影响
Influence of Grease on the Fatigue Life of RV Reducer
摩擦学学报. 2020, 40(6): 808 https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019250

食品级滑石粉对复合铝基润滑脂摩擦学性能的影响
Effect of Food-Grade Talc on Tribological Properties of Composite Aluminum-Based Grease
摩擦学学报. 2021, 41(6): 833 https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020255

轴电流作用下电机轴承润滑脂研究进展
Research Progress in Tribology of Lubricating Grease under Axial Current
摩擦学学报. 2021, 41(3): 437 https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020068

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王亚南, 赵启龙, 孙龙琦, 于延晨, 蔡浩鹏, 娄文静. 流动点法表征润滑脂流动性与传统评定方法相关性研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(1): 78−86. WANG Yanan, ZHAO Qilong, SUN Longqi, YU Yanchen, CAI Haopeng, LOU Wenjing. Correlation between the Flow Point Method and Traditional Evaluation Methods for Characterizing Grease Flow Performance[J]. Tribology, 2024, 44(1): 78−86. DOI: 10.16078/j.tribology.2022225

流动点法表征润滑脂流动性与传统评定方法相关性研究

王亚南[1,2], 赵启龙[1,2], 孙龙琦[1,2], 于延晨[3], 蔡浩鹏[3], 娄文静[1,2*]

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 青岛市高端装备润滑技术重点实验室 青岛市资源化学与新材料研究中心, 山东 青岛 266100;
3. 淄博高端合成润滑材料创新中心, 山东 淄博 255035)

摘 要: 为建立更完善、高效的轴承润滑脂流动性能评价体系，采用旋转流变仪、润滑脂和石油脂锥入度试验器、润滑脂相似黏度试验器、FFK低温流压仪测试了锂基润滑脂、脲基润滑脂和磺酸钙基润滑脂3种不同稠化剂类型的润滑脂的流动点、锥入度、相似黏度和流动压力，分别研究了锂基润滑脂、脲基润滑脂和磺酸钙基润滑脂3种不同稠化剂的流动点与锥入度、流动点与相似黏度、流动点与流动压力随温度的变化规律并分别计算了它们的皮尔逊相关系数，结果显示润滑脂的流动点与锥入度、流动点与相似黏度、流动点与流动压力具有线性关系，其中流动点与锥入度呈中等相关，流动点与相似黏度、流动点与流动压力呈高度相关，说明利用旋转流变仪测定润滑脂的流动点亦可用于评价润滑脂的流动性能.

关键词: 润滑脂; 流动点; 锥入度; 相似黏度; 流动压力
中图分类号: TH117.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0595(2024)01–0078–09

Correlation between the Flow Point Method and Traditional Evaluation Methods for Characterizing Grease Flow Performance

WANG Yanan[1,2], ZHAO Qilong[1,2], SUN Longqi[1,2], YU Yanchen[3], CAI Haopeng[3], LOU Wenjing[1,2*]

(*1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China;*
2. Qingdao Center of Resource Chemistry and New Materials, Qingdao Key Laboratory of Lubrication Technology for Advanced Equipment, Shandong Qingdao 266100, China;
3. Zibo Innovation Center of High-end Synthetic Lubricating Materials, Shandong Zibo 255035, China)

Abstract: With the development of modern machinery and equipment of large-scale, heavy-duty, automation trends, high-end equipment manufacturing industry has encountered a bottleneck in the development of the research in the field of aerospace, precision machine tools, automotive industry, rail transportation and energy industry. Bearing has been clearly placed as the development focus in the high-end manufacturing industry in Made in China 2025，and high

Received 28 October 2022, revised 8 February 2023, accepted 9 February 2023, available online 13 February 2023.
*Corresponding author. E-mail: wjlou@licp.cas.cn, Tel: +86-18562522825.
This project was supported by the Strategic Pioneer Science and Technology Special Project of Chinese Academy of Sciences (XDC04020601) and Taishan Scholar Youth Expert Program.
中国科学院战略性先导科技专项(XDC04020601)和山东省泰山学者青年专家计划资助.

reliability and long life of bearings have become its core requirements. Grease is the most commonly used type of lubricant in rolling bearings, so grease becomes an important factor affecting the reliability of bearings. Whether the grease can be effectively delivered to the friction contact area is critical to the reliability of grease lubrication. Difficulties in grease delivery in centralized lubrication systems can lead to equipment damage due to lubrication failure, so research on the flow-ability of grease has received extensive attention. Grease is a stable semi-solid product formed by dispersing a thickening agent in a liquid lubricant, it combines the advantages of a liquid and a solid: the grease does not flow like a solid at room temperature and standstill, and grease precipitates base oil to lubricate the friction pair. As a non-Newtonian fluid, the flow condition of grease is that external force must be applied to make the flow possible, therefore the core content of the study for the flow performance of grease is the relationship between temperature and shear stress. Some traditional test methods for evaluating grease flow properties were established based on applied research, including similar viscosity, flow pressure, low-temperature torque, taper entry and other methods. Flow pressure is the yield shear stress of the grease, and the physical meaning of yield shear stress of the grease is that the maximum shear stress formed by the grease under the external force from standstill to produce flow, and a more visual representation of the energy output that overcomes the grease from standstill to start flowing in the outside world. The flow point is sometimes called the flow stress and refers to the value of shear stress at the intersection of the energy storage modulus and the loss modulus are equal. At the high shear, the viscous part dominates and the sample is in a flowing state. In order to improve the efficiency of grease flow performance testing, establish a more complete evaluation system of grease flow characteristics, and solve the practical problem that the core lubrication point sample collection in the lubrication monitoring process is too small to be analyzed by conventional test methods, this paper used rotary rheometer, grease and petroleum grease cone penetration tester, grease similar viscosity tester, FFK low temperature flow pressure tester to test the cone penetration, similar viscosity, flow pressure and flow point of three different types of thickeners: lithium complex grease, urea base grease and calcium sulfonate base grease. The change law of flow point and one penetration, flow point and similar viscosity, flow point and flow pressure with the temperature of the three types of grease were researched. Meanwhile, the person correlation coefficient of flow point/cone penetration, flow point/similar viscosity and flow point/flow pressure of three different types of thickeners were calculated. The results indicated that the flow point of grease had a linear relationship with cone penetration, similar viscosity and flow pressure. Where the flow point was moderately correlated with the cone penetration, and the flow point was highly correlated with the similar viscosity, and the flow point was also highly correlated with the flow pressure. Therefore, the flow properties of grease could be characterized by flow point which tested by rotary rheometer.
Key words: grease; flow point; cone penetration; similar viscosity; flow pressure

随着现代机械装备的大型化、重载化和自动化趋势发展，高端装备制造业在航空航天、精密机床、汽车工业、轨道交通以及能源工业等领域的研发水平提升遇到瓶颈.《中国制造2025》明确将轴承作为高端制造行业的发展重点，轴承的高可靠性和长寿命已经成为其核心要求. 润滑脂是滚动轴承中最常用的润滑剂类型，是影响轴承可靠性的重要因素. 润滑脂能否有效地被输送到摩擦接触区对其可靠性影响至关重要，集中润滑系统润滑脂输送困难会导致润滑失效设备损坏，因而润滑脂的流动性能研究得到广泛关注[1-5].

润滑脂是将稠化剂分散于液体润滑剂中所形成的1种稳定的半固体产品，其兼具液体和固体的优点：在常温和静止状态下润滑脂像固体一样不流动，润滑脂析出基础油对摩擦副进行润滑. 润滑脂作为非牛顿流体，其流动条件是必须施加外力才有可能流动，所以润滑脂流动性能研究的核心内容是温度和剪切应力的关系[6-10].

一些传统的评价润滑脂流动性能的试验方法是在应用研究的基础上建立的，包括SH/T 0048-1991 (2004)润滑脂相似黏度测定法、NB/SH/T 6038-2021润滑脂流动压力的测定自动法、SH/T 0338-1992滚珠轴承润滑脂低温转矩测定法以及GB/T 269-1991润滑脂和石油脂锥入度测定法[11-15]. 润滑脂流动压力为润滑脂的屈服剪应力，其物理意义为润滑脂在外力下从静止到产生流动所形成的最大剪应力，比较直观地反映外界克服润滑脂从静止到开始流动时的能量输出. 鞍山海华的孙辉[13]利用流动压力测定仪考察了钙基润滑脂和锂基润滑脂的流动性能，研究钙基润滑脂替代锂基润滑脂的可行性，结果表明：随着温度的降低，钙基润滑脂和锂基润滑脂的流动压力均明显增大，变化趋势一致. 周伟东等[14]测试了润滑脂的锥入度和相似黏度用以考察增黏剂对润滑脂稠度和常温流动性的影

响，从相似黏度测试的结果看出加入增黏剂B (乙丙共聚物)的润滑脂相似黏度增大，常温流动性变差，而其他几种增黏剂加入后润滑脂的相似黏度均降低，常温下更易流动. 谭戈等[15]分析了润滑脂在不同温度下相似黏度和锥入度的变化规律，考察基础油类型对锂基润滑脂相似黏度和锥入度的影响，从而判断润滑脂的流动性能.

为提高润滑脂流动性能测试的效率，建立更完善的润滑脂流动特性评价体系，解决润滑监测过程中核心润滑点样品采集量少无法采用常规试验方法分析的实际问题，采用旋转流变仪、低温流动压力测定仪、相似黏度测定器和锥入度仪对锂基润滑脂、脲基润滑脂以及磺酸钙基润滑脂3种主要稠化剂类型润滑脂的流动性能进行系统考察，探讨旋转流变仪法表征润滑脂流动性能与传统评定方法的相关性，对润滑脂的开发和流动性能评价技术具有一定的指导意义.

1 试验部分

1.1 试验材料与制备

本试验中选取实验室自制基础油均为矿物油的3种典型皂基润滑脂：锂基脂、脲基脂和磺酸钙基脂，开展润滑脂流动性能评价方法相关性研究. 样品详细信息列于表1中.

表 1 试验样品基本理化性能

Table 1 Basic physical properties of test samples

Samples	Thickener	NLGI grade	Cone penetration (25℃)/0.1 mm
CHP00#	Lithium base	00	412
CHP0#	Lithium base	0	372
CHP1#	Lithium base	1	335
CHP2#	Lithium base	2	273
YYC00#	Polyurea base	00	400
YYC0#	Polyurea base	0	367
YYC1#	Polyurea base	1	305
YYC2#	Polyurea base	2	295
SLQ00#	Calcium sulfonate base	00	423
SLQ0#	Calcium sulfonate base	0	385
SLQ1#	Calcium sulfonate base	1	327
SLQ2#	Calcium sulfonate base	2	292

Note: NLGI grade is a widely used classification for lubricating greases.

1.2 试验方法

1.2.1 润滑脂流动点测试

流动点(τ_f)有时也称为流动应力，指存储模量(G')和损耗模量(G'')相等，即G'=G''交叉点处的剪切应力值. 在较高的剪切下，黏性部分占主导地位，样品处于流动状态.

屈服点(τ_y)有时也称为屈服应力，指线性黏弹区边界处的剪切应力值.

采用Anton Paar旋转流变仪(MCR 302)测试样品的流动点. 在测量系统中正确充入润滑油脂样品，在达到试验温度后保持必要的恒温时间，然后按照如下测试条件开始测量. 测试条件：采用直径为25 mm的平板振荡模式，测试间距为0.5 mm，恒定角速度为10 rad/s，剪切应力τ=1~10000 Pa，逐级对数提高，进行振幅扫描.

借助于双对数图表，在x轴上分析剪应力τ；在y轴上分析相同比例的存储模量G'和损耗模量G''，如图1所示. G'和G''曲线交点的剪应力值即为该测试温度下的流动点.

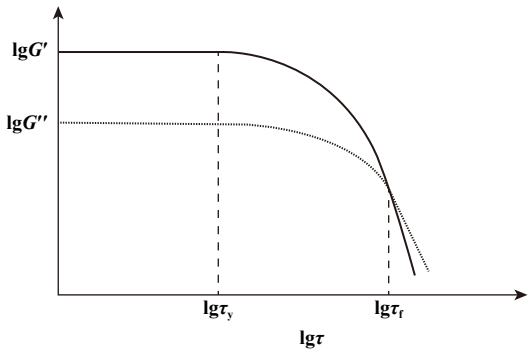

Fig. 1 Graph of amplitude test for the flow point at $G'=G''$ in the linear viscoelastic range

图 1 直线黏弹性范围内$G'=G''$处流动点振幅试验的图示

1.2.2 润滑脂流动压力测试

按照标准NB/SH/T 6038，采用MINITEST FFK低温流压仪测试样品的流动压力. 测试条件：恒温时间为7 200 s，等待时间为30 s，升压速率△P (压力变化)为2 Pa/h.

1.2.3 其他试验测试

试验采用锥入度测定仪和相似黏度测定器测试润滑脂的锥入度和相似黏度，试验评定方法和按照的标准列于表2中.

表 2 试验评定方法

Table 2 Experimental evaluation method

Test parameters	Testing standards
Cone penetration/0.1 mm	GB/T 269
Similar viscosity/(Pa·s)	SH/T 0488

1.2.4 相关性分析方法

相关性分析是指对2个变量之间线性关系的描述与量度[16-17]. 本试验中采用IBM SPSS 22软件用相关性

分析中的皮尔逊相关系数法对锥入度、相似黏度、流动压力和流动点等参数间的相关性进行分析. 对于容量为n的样本，将n个原始数据转换为等级数据，相关系数为

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}$$

其中，$\bar{x}$和$\bar{y}$分别为x_i和y_i的平均值，$\bar{x}_i=[x_1, x_2, \cdots, x_n]$，$\bar{y}_i=[y_1, x_2, \cdots, y_n]$; 相关系数$r_{xy}$表示2个变量$x$和$y$之间的线性相关程度，取值区间为[−1, 1]. 相关系数r_{xy}为负值时为负相关; r_{xy}为正值时为正相关; r_{xy}为0时，称为零相关或无相关; r_{xy}为1时称为完全相关或绝对相关. 变量的相关强度由相关系数绝对值在$|r_{xy}|$的取值范围来判断：当1.0>|r|>0.8时为高度相关；当0.8>|r|>0.5时为中度相关；当0.5>|r|>0.3时为低度相关；当0.3>|r|>0时为非常弱相关或不相关[18].

2　结果与讨论

2.1　锂基脂流动点与锥入度、相似黏度和流动压力的相关性

2.1.1　锂基脂流动点与锥入度、相似黏度和流动压力随温度变化趋势比较

对CHP00#、CHP0#、CHP1#和CHP2#进行锥入度、相似黏度、流动压力和流动点测试，分别考察了流动点和锥入度、流动点和相似黏度以及流动点和流动压力随温度变化趋势曲线，结果如图2、图3和图4所示. 从图2中可以看出润滑脂CHP00#、CHP0#、CHP1#和CHP2#流动点随着温度升高而降低，其中CHP2#和CHP1#流动点随温度变化明显. 结果显示，锂基脂流动点随温度变化趋势与锥入度随温度变化趋势一致. 图3所示为润滑脂CHP00#、CHP0#、CHP1#和CHP2#

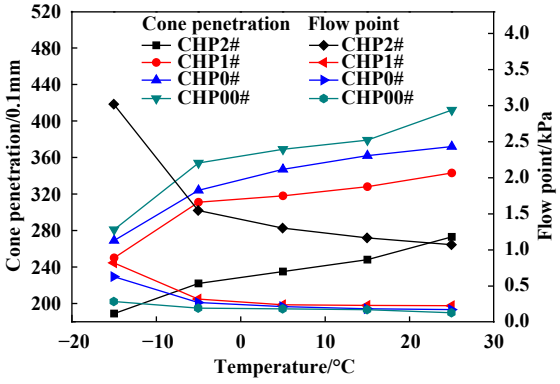

Fig. 2　Trend of the flow point and cone penetration of lithium base grease with temperature

图 2　锂基脂流动点和锥入度随温度变化趋势图

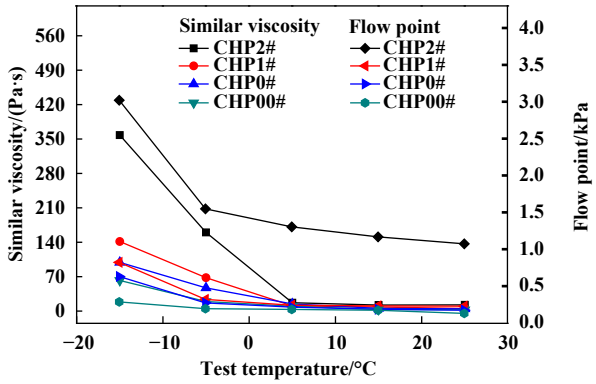

Fig. 3　Trend of the flow point and similar viscosity of lithium base grease with temperature

图 3　锂基脂流动点和相似黏度随温度变化趋势图

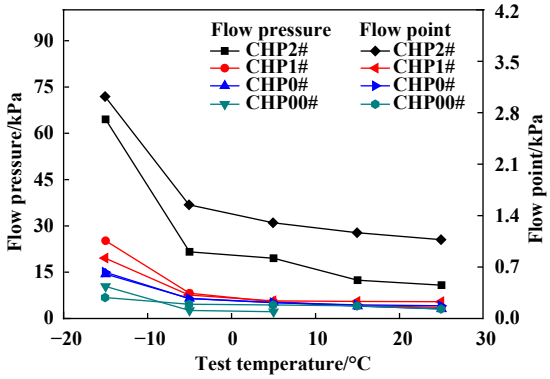

Fig. 4　Trend of the flow point and flow pressure of lithium base grease with temperature

图 4　锂基脂流动点和流动压力随温度变化趋势图

的相似黏度与流动点随温度的变化趋势，从图3中看出润滑脂CHP00#、CHP0#、CHP1#和CHP2#的相似黏度和流动点都随着温度的升高而降低，其中CHP2#和CHP1#的相似黏度和流动点随温度变化明显，变化趋势一致. 图4所示为润滑脂CHP00#、CHP0#、CHP1#和CHP2#的流动压力和流动点随温度的变化趋势，从图4中曲线可以看出润滑脂CHP00#、CHP0#、CHP1#和CHP2#的流动压力和流动点都随着温度的降低而变小，而CHP2#和CHP1#的流动压力和流动点变化率大，两者随温度的变化趋势一致.

2.1.2　锂基脂流动点与锥入度、相似黏度和流动压力的皮尔逊相关系数

在IBM SPSS 22软件中，定义流动点为变量a，锥入度为变量b，相似黏度为变量c，流动压力为变量d，流动点与锥入度的相关系数为r_{ab}，流动点与相似黏度的相关系数为r_{ac}、流动点与流动压力的相关系数为r_{ad}，采用皮尔逊相关系数法对试验数据相关性进行分析，计算结果列于表3和表4中. 表3中考察了锂基润滑脂的

稠度等级对流动点/锥入度、流动点/相似黏度以及流动点/流动压力相关系数的影响，从表3中看出，流动点和锥入度的相关性呈负相关，且随着稠度等级的降低略有增强，但$|r_{ab}|>0.8$，均为高度相关(表3，第2列). 流动点和相似黏度的相关性呈正相关，随着稠度等级的降低变化不再明显，且$|r_{ac}|>0.8$，均位高度相关(表3，第3列). 流动点和流动压力的相关性呈正相关，随着稠度等级的降低相关性略有减弱，但$|r_{ad}|>0.8$，仍然均为高度相关(表3，第4列). 总体来看，锂基脂的流动点和锥入度、相似黏度以及流动压力两两之间都具有高度相关性，稠度等级对其相关性基本没有影响. 图4中考察了试验温度对锂基润滑脂流动点/锥入度、流动点/相似黏度以及流动点/流动压力相关系数的影响，从表4中可以看到，锂基脂的流动点和锥入度的相关性呈负相关，且随着温度的降低相关性增强，同时$|r_{ab}|>0.8$, 两者具有高度相关性(表4，第2列). 流动点和相似黏度的相关性随着温度的降低先减弱后增强，其中25、15、−5和−15 ℃条件下$|r_{ac}|>0.8$，呈高度相关性，5 ℃条件下$0.5<|r_{ac}|<0.8$，呈中度相关(表4，第3列). 流动点和流动压力的相关性呈正相关，随着温度的降低没有明显变化，且$|r_{ad}|>0.8$，具有高度相关性. 总之，锂基脂的稠度等级与其流动点、锥入度、相似黏度以及流动压力的测试温度对其相关系数的影响不明显，具有高度相关性，这与图2、图3和图4的结论一致，说明流动点的测试和锥入度、相似黏度、流动压力的测试具有一定的线性关系，流动点可用来表征锂基脂的流动性能.

表 3 不同稠度等级下锂基脂的流动点与(锥入度、相似黏度和流动压力)皮尔逊相关系数(r)

Table 3 Pearson′s correlation coefficientbetween flow point with cone penetration (or similar viscosity, or flow pressure) of lithium grease at different NLGI grades

NLGI grades	r_{ab}	r_{ac}	r_{ad}
2	−0.902*	0.969**	0.997**
1	−0.967**	0.953*	0.998**
0	−0.968**	0.969**	0.995**
00	−0.998**	0.958*	0.920*

Note: ** represented significant correlation at the 0.01 level. * represented significant correlation at the 0.05 level.

表 4 不同温度下锂基脂流动点与(锥入度、相似黏度和流动压力)皮尔逊相关系数

Table 4 Pearson′s correlation coefficient (r) between flow point with cone penetration (or similar viscosity, or flow pressure) of lithium grease with different temperature

Temperature/℃	r_{ab}	r_{ac}	r_{ad}
25	−0.915	0.985*	0.996**
15	−0.949	0.874	0.983*
5	−0.948	0.791	0.988*
−5	−0.971*	0.969*	0.983*
−15	−0.988*	0.997**	0.993**

2.2 脲基脂流动点与锥入度、相似黏度和流动压力的相关性

2.2.1 脲基脂流动点与锥入度、相似黏度和流动压力随温度变化趋势比较

分别对YYC00#、YYC0#、YYC1#和YYC2#进行锥入度、相似黏度、流动压力和流动点测试，考察了流动点与锥入度、流动点与相似黏度以及流动点与流动压力随温度变化规律，结果如图5、图6和图7所示. 从图5中可以看出，润滑脂YYC00#、YYC0#、YYC1#和YYC2#的流动点随着温度升高而降低，这与锥入度随温度变化的趋势一致. 图6所示为润滑脂YYC00#、YYC0#、YYC1#和YYC2#的相似黏度与流动点随温度的变化趋势，从图6中看出，润滑脂YYC00#、YYC0#、YYC1#和YYC2#的相似黏度和流动点都随着温度的升高而降低，变化趋势一致. 图7所示为润滑脂YYC00#、YYC0#、YYC1#和YYC2#的流动压力和流动点随温度的变化趋势，从图7中曲线可以看出润滑脂YYC00#、YYC0#、YYC1#和YYC2#的流动压力和流动点都随着温度的降低而变小，两者随温度的变化趋势一致.

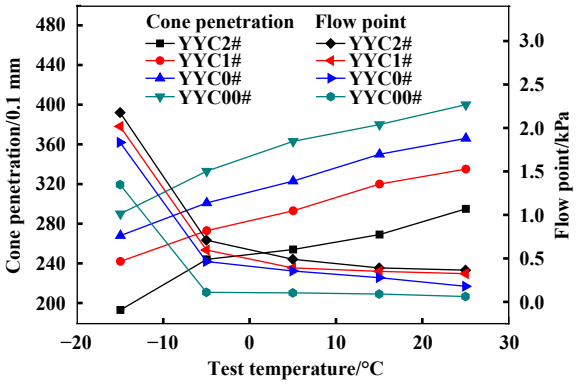

Fig. 5 Trend of the flow point and cone penetration of polyurea base grease with temperature

图 5 脲基脂流动点与锥入度随温度变化趋势图

2.2.2 脲基脂流动点与锥入度、相似黏度和流动压力的皮尔逊相关系数

采用皮尔逊相关系数法对脲基脂实验数据相关性进行分析，结果列于表5和表6中. 表5所列为脲基润滑脂的稠度等级对流动点/锥入度、流动点/相似黏度以及流动点/流动压力相关系数的影响数值，从表5中

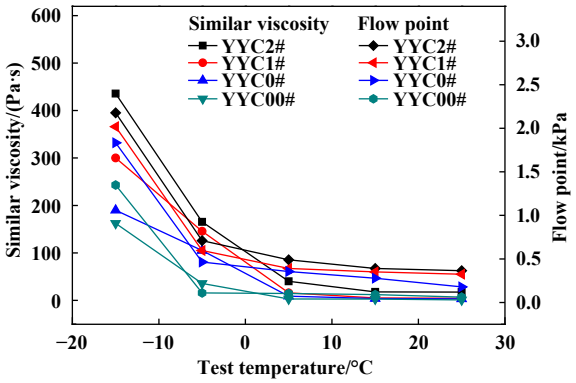

Fig. 6　Trend of the flow point and similar viscosity of polyurea base grease with temperature

图 6　脲基脂流动点和相似黏度随温度变化趋势图

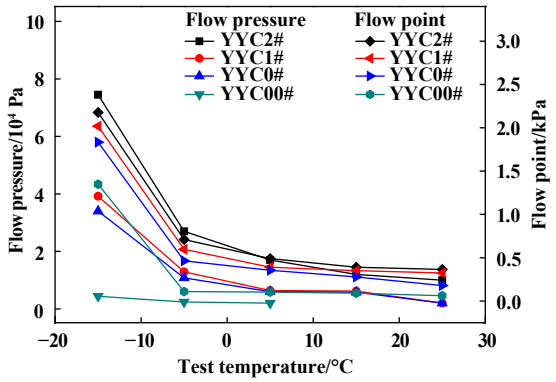

Fig. 7　Trend of the flow point and flow pressure of polyurea base grease with temperature

图 7　脲基脂流动点和流动压力随温度变化趋势图

表 5　脲基脂不同稠度等级下的流动点与(锥入度、相似黏度和流动压力)皮尔逊相关系数

Table 5　Pearson′s correlation coefficient between flow point with cone penetration (or similar viscosity, or flow pressure) of polyurea grease at different NLGI grades

NLGI grades	r_{ab}	r_{ac}	r_{ad}
2	−0.922*	0.984**	0.997**
1	−0.841	0.945*	0.992**
0	−0.856	0.911*	0.995**
00	−0.838	0.982**	0.929*

表 6　脲基脂在不同温度下流动点与(锥入度、相似黏度和流动压力)皮尔逊相关系数

Table 6　Pearson′s correlation coefficient between flow point with cone penetration (or similar viscosity, or flow pressure) of polyurea grease with different temperature

Temperature/℃	r_{ab}	r_{ac}	r_{ad}
25	−0.967*	0.765	0.634
15	−0.898	0.674	0.875
5	−0.950	0.821	0.838
−5	−0.966*	0.996**	0.900
−15	−0.895	0.856	0.938

看出，流动点和锥入度的相关性呈负相关，且随着稠度等级的降低略有减弱，但$|r_{ab}|>0.8$，均呈高度相关(表5，第2列). 流动点和相似黏度的相关性呈正相关，随着稠度等级的降低先减弱后增强，且$|r_{ac}|>0.8$，均呈高度相关(表5，第3列). 流动点和流动压力的相关性呈正相关，YYC2#、YYC1#和YYC0#随着稠度等级的降低相关性系数变化不明显，从YYC0#到YYC00#相关性系数减弱明显，但$|r_{ad}|>0.8$，仍然均呈高度相关(表5，第4列). 总体来看，脲基脂的流动点与锥入度、相似黏度以及流动压力两两之间的都具有高度相关性，稠度等级对其相关性基本没有影响. 图6所列为试验温度对脲基润滑脂流动点/锥入度、流动点/相似黏度以及流动点/流动压力相关系数的影响，从表6中可以看到，脲基脂的流动点和锥入度的相关性呈负相关，随着温度的降低相关性无明显变化，且$|r_{ab}|>0.8$, 两者具有高度相关性(表6，第2列). 流动点和相似黏度的相关性呈正相关，其中在25和15 ℃的条件下，$0.5<|r_{ac}|<0.8$，呈中等相关；5、−5和−15 ℃条件下，$|r_{ac}|>0.8$，呈高度相关(表6，第3列). 流动点和流动压力的相关性呈正相关，随着温度的降低，相关性增强，其中在25 ℃条件下，$0.5<|r_{ac}|<0.8$，呈中等相关；在15、5、−5和−15 ℃条件下，$|r_{ac}|>0.8$，呈高度相关. 脲基脂的稠度等级对其流动点与锥入度、相似黏度以及流动压力两两相关系数影响不明显，均具有高度相关性. 脲基脂的流动点、锥入度、相似黏度以及流动压力的测试温度除个别温度对流动点与锥入度、相似黏度以及流动压力两两呈中等相关性外也都是呈高度相关. 这与锂基脂流动点的测试和锥入度、相似黏度以及流动压力的测试具有一定线性关系的结论基本一致，说明测量流动点可用来表征脲基脂的流动性能.

2.3　磺酸钙基脂流动点与锥入度、相似黏度和流动压力的相关性

2.3.1　磺酸钙基脂流动点与锥入度、相似黏度和流动压力随温度变化趋势比较

对SLQ00#、SLQ0#、SLQ1#和SLQ2#进行锥入度、相似黏度、流动压力和流动点测试，考察了锥入度与流动点、相似黏度与流动点以及流动压力与流动点随温度变化趋势曲线，结果如图8、图9和图10所示. 从图8中可以看出，润滑脂LQ00#、SLQ0#、SLQ1#和SLQ2#的流动点随着温度升高而降低，与锥入度随温度变化趋势一致. 图9所示为润滑脂SLQ00#、SLQ0#、SLQ1#和SLQ2#的相似黏度和流动点随温度的变化趋势，从图9中看出，润滑脂SLQ00#、SLQ0#、SLQ1#和

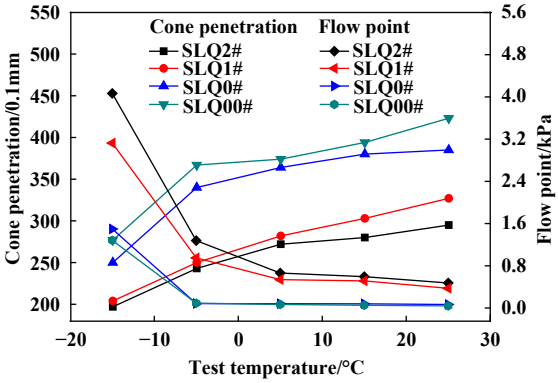

Fig. 8 Trend of the flow point and cone penetration of calcium sulfonate base grease with temperature

图 8 磺酸钙基脂流动点与锥入度随温度变化趋势图

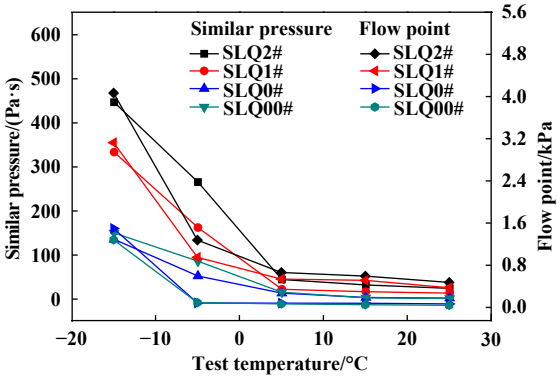

Fig. 9 Trend of the flow point and similar viscosity of calcium sulfonate base grease with temperature

图 9 磺酸钙基脂流动点和相似黏度随温度变化趋势图

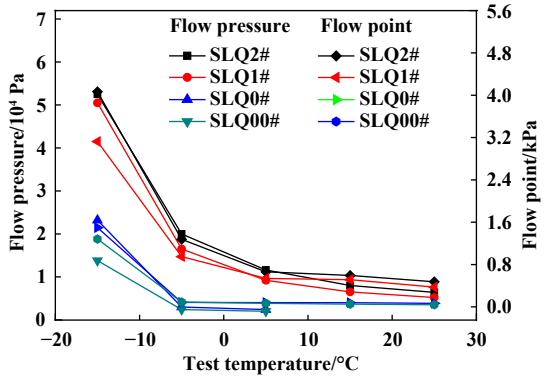

Fig. 10 Trend of the flow point and flow pressure of calcium sulfonate grease with temperature

图 10 磺酸钙基脂流动点和流动压力随温度变化趋势图

SLQ2#的相似黏度和流动点都随着温度的升高而降低，变化趋势一致. 图10所示为润滑脂SLQ00#、SLQ0#、SLQ1#和SLQ2#的流动压力和流动点随温度的变化趋势，从图10中曲线可以看出润滑脂SLQ00#、SLQ0#、SLQ1#和SLQ2#的流动压力和流动点都随着温度的降低而变小，两者随温度的变化趋势一致.

2.3.2 磺酸钙基脂流动点与锥入度、相似黏度和流动压力的皮尔逊相关系数

采用皮尔逊相关系数法对磺酸钙基脂实验数据相关性进行分析，结果列于表7和表8中. 表7所列为磺酸钙基润滑脂的稠度等级对流动点/锥入度、流动点/相似黏度以及流动点/流动压力相关系数的影响，从表7中看出，流动点和锥入度的相关性呈负相关，随着稠度等级的降低没有明显变化，但$|r_{ab}|$> 0.8，均呈高度相关(表7，第2列). 流动点和相似黏度的相关性呈正相关，随着稠度等级的降低先增强后减弱，且$|r_{ac}|$> 0.8，均呈高度相关(表7，第3列). 流动点和流动压力的相关性呈正相关，随着稠度等级的降低变化不明显，但$|r_{ad}|$>0.8，均呈高度相关(表7，第4列). 总体来看，磺酸钙基脂的流动点与锥入度、相似黏度和流动压力两两之间都具有高度相关性，稠度等级对其相关性基本没有影响. 表8所列为试验温度对磺酸钙基润滑脂流动点/锥入度、流动点/相似黏度以及流动点/流动压力相关系数的影响，从表8中可以看到磺酸钙基脂的流动点和锥入度的相关性呈负相关，$|r_{ab}|$>0.8, 均具有高度相关性(表8，第2列). 流动点和相似黏度的相关性随着温度的降低先减弱后增强，$|r_{ac}|$>0.8，均呈高度相关(表8，第3列). 流动点和流动压力的相关性呈正相关，随着温度的降低没有明显变化，且$|r_{ad}|$>0.8，具有高度相关性(表8，第4列). 由此可见磺酸钙基脂的稠度等级与其流动点、锥入度、相似黏度以及流动压力的测试温度对其相关系数的影响不明显，具有高度相关性，这与图8、图9和图10的结论一致，说明流动点的测试与锥入度、相似黏度以及流动压力的测试具有一定的线性关系，测量流动点可用来表征磺酸钙基脂的流动性能.

表 7 磺酸钙基脂不同稠度等级下的流动点与(锥入度、相似黏度和流动压力)皮尔逊相关系数

Table 7 Pearson′s correlation coefficient between flow point with cone penetration (or similar viscosity, or flow pressure) of calcium sulfonate grease at different NLGI grades

NLGI grades	r_{ab}	r_{ac}	r_{ad}
2	−0.951*	0.935*	0.996**
1	−0.897*	0.959**	0.998**
0	−0.951*	0.935*	0.999**
00	−0.930*	0.863	1.000**

2.4 润滑脂流动点与锥入度、相似黏度、流动压力的综合相关性

由图11可以看出这3类润滑脂的流动点/锥入度、流动点/相似黏度以及流动点/流动压力两两之间具有

表 8　磺酸钙基脂在不同温度下流动点与(锥入度、相似黏度和流动压力)皮尔逊相关系数

Table 8　Pearson′s correlation coefficient between flow point with cone penetration (or similar viscosity, or flow pressure) of polyurea grease with different temperature

Temperature/℃	r_{ab}	r_{ac}	r_{ad}
25	−0.974*	0.972*	0.998**
15	−0.997**	0.935*	0.996**
5	−0.994**	0.860	0.999**
−5	−0.969*	0.960*	0.997**
−15	−0.952*	0.994**	0.961**

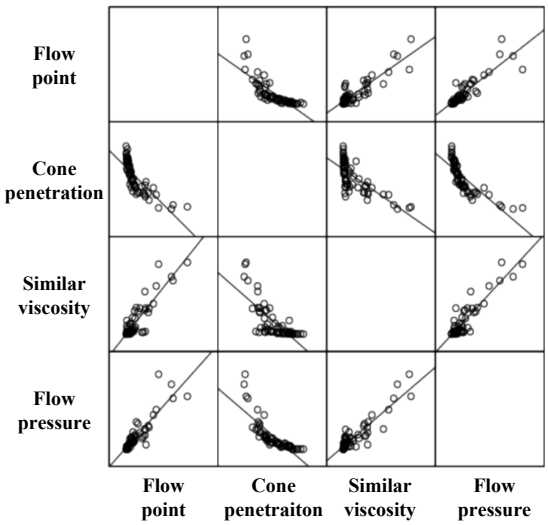

Fig. 11　Scatter matrix and linear plot of flow point/cone penetration, flow point/similar viscosity, and flow point/flow pressure correlation for three types of greases

图 11　3类润滑脂的流动点/锥入度、流动点/相似黏度、流动点/流动压力相关性的散点矩阵和线性曲线图

线性关系，流动点与锥入度呈负相关，流动点与相似黏度呈正相关，流动点与流动压力呈正相关.

3种润滑脂流动点与锥入度、流动点与相似黏度以及流动点与流动压力的综合皮尔逊相关系数列于表9中. 从表9中可以看出，每种皂基脂的流动点与锥入度呈负相关，综合相关系数为−0.796，0.8>$|r_{ab}|$>0.5，呈中等相关；每种皂基脂的流动点与相似黏度的综合相关系数为0.891，$|r_{ac}|$>0.8，呈高度相关；每种皂基脂的流动点与流动压力的综合相关系数为0.880，$|r_{ad}|$>0.8，呈高度相关. 3种润滑脂的综合相关性系数充分印证了流动点可用来表征润滑脂流动性能的可行性.

表 9　3类润滑脂流动点与(锥入度、相似黏度和流动压力)的综合皮尔逊相关系数

Table 9　Pearson′s correlation coefficient between flow point with cone penetration (or similar viscosity, or flow pressure) of three types of greases

Parameters	r_{ab}	r_{ac}	r_{ad}
Pearson correlation coefficient	−0.796**	0.891**	0.880**

3　结论

本文中采用锥入度测定法、低温相似黏度法、低温流动压力测定法以及旋转流变仪流动点法分别对自制的锂基润滑脂、脲基润滑脂和磺酸钙基润滑脂3种不同稠化剂类型的润滑脂流动性能进行考察，并对每种皂基润滑脂的流动点与锥入度、流动点与相似黏度以及流动点与流动压力的相关性进行分析，结果表明旋转流变仪流动点法可用于润滑脂流动性能的表征，为润滑脂的研发工作提供更便捷的表征方法. 具体结论如下：

a. 采用旋转流变仪流动点法评定润滑脂的流动性能，针对相同皂基的润滑脂可通过快速测定其在特定环境下的流动点来评价润滑脂的流动性能，测试结果与SH/T 0048润滑脂相似黏度测定法以及NB/SH/T 6038 润滑脂低温流动压力测定法的试验结果具有强相关性，与GB/T 269锥入度测定法试验结果具有中等相关性.

b. 旋转流变仪流动点法评价润滑脂的流动性能，具有使用样品量少、测试速度快以及适用性广泛等优点，有利于提高润滑脂研发过程对流动性能考察的速度，更有助于解决润滑监测过程中由于核心润滑点样品采集量少而无法采用常规试验方法分析的实际问题.

参 考 文 献

[1] Zhu Tingbin. Lubricating grease technology encyclopedia[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2009 (in Chinese) [朱廷彬. 润滑脂技术大全[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009].

[2] Wang Baomin, Sun Chuandong, Chang Xiao, et al. Numerical analysis of flow characteristics of grease in high-speed angular contact ball bearing[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(8): 109–115,131 (in Chinese) [王保民, 孙传东, 常笑, 等. 高速角接触球轴承腔内润滑脂流动特性数值分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43(8): 109–115,131]. doi: 10.3969/j.issn.02540150.2018.08.018.

[3] Pan Jiabao, Cheng Yanhai, Qian Ming, et al. Thermal-rheological properties and variation mechanisms of lithium lubricating grease[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(4): 1509–1515 (in Chinese) [潘家保, 程延海, 钱明, 等. 锂基润滑脂热流变特性及其变化机理[J]. 化工进展, 2018, 37(4): 1509–1515]. doi: 10.16085/j.issn.1000-6613.2017-1076.

[4] Qian Ming. Research on steady-state flow properties of axial clearance in internal gear grease pump[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2019 (in Chinese) [钱明. 内啮合齿轮润滑

脂泵端面间隙稳态流动特性研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2019].

[5] Li Zhanjun. Effect of graphene additive on tribological and rheological properties of lithium grease[D]. Beijing: Chinese Academy of Machinery Science and Technology, 2021 (in Chinese) [李占君. 石墨烯添加剂对锂基润滑脂摩擦学及流变性能的影响[D]. 北京: 中国机械科学研究总院, 2021].

[6] Ma Aimin, Wu Baojie, Mo Linhe, et al. Study on the application of a kind of testing machine for evaluating low-temperature pumpability of grease[J]. Lubricating Oil, 2012, 27(1): 56–60 (in Chinese) [马爱民, 吴宝杰, 莫林和, 等. 一种润滑脂低温泵送试验机的应用考察[J]. 润滑油, 2012, 27(1): 56–60]. doi: 10.19532/j.cnki.cn21-1265/tq.2012.01.012.

[7] Xu Nan, Li Weimin, Zhao Gaiqing, et al. Tribological properties and rheological behaviors of calcium carbonate nanoparticle as grease additive[J]. Tribology, 2014, 34(2): 203–210 (in Chinese) [徐楠, 李维民, 赵改青, 等. 纳米碳酸钙作为润滑脂添加剂的摩擦学性能及流变行为研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(2): 203–210]. doi: 10.16078/j.tribology.2014.02.006.

[8] Xu Zhuang, Ren Jia, Zhao Gaiqing, et al. Effect of amine molecular structure on rheological properties of polyurea grease[J]. Tribology, 2020, 40(3): 378–384 (in Chinese) [徐状, 任佳, 赵改青, 等. 胺分子结构对聚脲润滑脂流变学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(3): 378–384]. doi: 10.16078/j.tribology.2020006.

[9] Xu Jun, Xu Nan, Wang Xiaobo, et al. Rheology of lithium greases under iced water and room air[J]. Tribology, 2013, 33(4): 406–412 (in Chinese) [许俊, 徐楠, 王晓波, 等. 冰水浴和自然冷却条件下锂基润滑脂的流变学性能[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(4): 406–412]. doi: 10.16078/j.tribology.2013.04.001.

[10] Shen Tiejun, Hu Minghua, Liu Ruigang, et al. The influence of static thermal degradation on microstructure and rheological properties of lithium-calcium base grease[J]. Tribology, 2011, 31(6): 581–586 (in Chinese) [沈铁军, 胡明华, 刘瑞刚, 等. 静态热老化对锂-钙基润滑脂微观结构和流变性的影响[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 581–586]. doi: 10.16078/j.tribology.2011.06.001.

[11] Sun Yi, Liu Jianlong, Wang Shunshun, et al. Evaluation of low temperature performance of bearing grease for air conditioning motor[J]. Petroleum Products Application Research, 2017, 35(2): 52–55 (in Chinese) [孙毅, 刘建龙, 王顺顺, 等. 空调电机轴承润滑脂低温性能评定[J]. 石油商技, 2017, 35(2): 52–55]. doi: 10.3969/j.issn.1006-1479.2017.02.010.

[12] Ning Feilang. Effect of grease cone penetration on elastohydrodynamic friction properties of grease with high shear rate[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology and Education, 2021 (in Chinese) [宁飞浪. 润滑脂锥入度对润滑脂高剪切率弹流摩擦特性的影响[D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2021].

[13] Sun Hui. Feasibility study on replacing lithium grease with calcium grease[J]. Technology Innovation and Application, 2017(10): 22–24 (in Chinese) [孙辉. 钙基润滑脂替代锂基润滑脂可行性研究[J]. 科技创新与应用, 2017(10): 22–24].

[14] Zhou Weidong, Li Wenjie, Zhang Lanying, et al. Influence of tackifier on rheological property of lithium grease[J]. Lubrication engineering, 2015, 40(3): 88–91, 97 (in Chinese) [周伟东, 李文杰, 张兰英, 等. 增黏剂对锂基润滑脂流变性能的影响[J], 2015, 40(3): 88–91, 97].

[15] Tan Ge, Xiao Lihang. Effect of base oil types on similar viscosity and cone penetration of lithium-based grease[J]. Petroleum Products Application Research, 2015, 33(6): 21–23 (in Chinese) [谭戈, 肖立航. 基础油类型对锂基润滑脂相似黏度及锥入度的影响[J]. 石油商技, 2015, 33(6): 21–23]. doi: 10.3969/j.issn.1006-1479.2015.06.004.

[16] Jia Junping. Statistics with R[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2021 (in Chinese) [贾俊平. 统计学: 基于R[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2021].

[17] Lv Yinghai, Yu Hao, Li Guoping. Experimental design and data processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021 (in Chinese) [吕英海, 于昊, 李国平. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021].

[18] Xue Wei. Data analysis based on SPSS[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2022 (in Chinese) [薛薇. 基于SPSS的数据分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2022].