

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.02.004

Zahn 黏度杯测定液体黏度规范的比较

Comparison of Zahn Viscosity Cups Specifications for Determination of Liquid Viscosity

程传亮 孙波 / CHENG Chuanliang SUN Bo

(上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 200436, China)

摘要:

黏度是液体的重要理化性能指标。工程上常用 Zahn 黏度杯快速检查不同液体的黏度。不同的制造商生产出来的 Zahn 黏度杯有一定的差异,企业在使用 Zahn 黏度杯时有其具体引用的规范或标准。目前,国际通用的 Zahn 黏度杯的规范标准为 ASTM D4212,而波音等国外飞机制造商的 Zahn 黏度杯规范中关于液体黏度和流出时间特性转换公式与通用标准存在差异。基于同一种标准黏度液体,系统地比较了两种规范中特性转换公式的差异,并分析产生差异的原因,同时给出了这些差异可能造成的影响。

关键词:黏度; Zahn 黏度杯; 动力黏度; 运动黏度; 流出时间

中图分类号: V241.7⁺²

文献标识码: A

[Abstract] Viscosity of the fluid is an important physical and chemical property index of the liquid. Zahn viscosity cups are used to check the viscosity of different liquids quickly in engineering. Each manufacturer produces a different cup. And a specific specification or standard has been noted in every enterprise when using these cups. ASTM D4212 is currently regarded as general international standards. The equation of converting the time of flow in seconds to kinematic viscosity in Zahn viscosity cup specification from Boeing or other foreign aircraft manufacturers is different from the general international standards (ASTM D4212). Based on the same standard viscosity liquid, the differences between the two specifications were systematically compared, and the reasons for these differences were analyzed, the possible effects of these differences were also given.

[Keywords] viscosity; Zahn cups; dynamic viscosity; kinematic viscosity; efflux time

0 引言

黏度是流体物质的一种物理特性^[1],在宏观上反映了流体黏滞性,在微观上反映流体受外力作用时分子间呈现的内部摩擦力。黏度的测定在理论上和工程中都有非常重要的意义,在工业生产和科学研究中,常通过测量黏度来监控物质的成分或品质。如石油裂化、润滑油掺合、高分子材料的生产过程中反应点的自动控制,原油管道输送过程监测,各种石油制品和油漆的品质检验等,都需要进行黏度测量^[2]。

在测定黏度这一参数的诸多仪器中,流出型黏度计^[3]现今使用最为广泛,因为其经济、实用且操

作方便。流出型黏度计型号繁多且互不统一,如美国的 Ford Cup、德国的 DIN Cup、法国的 Afnor Cup、英国的 BS Cup,以及 Zahn Cup、Shell Cup 等。流出型黏度计利用试样液体本身重力而产生的流动特性,通过测定试样液体在一定温度下从黏度杯流出的时间(通常以秒作为单位),然后根据其操作原理,将试样的流出时间通过特性曲线换算成相应的黏度值^[4]。

在工厂、车间或者实验室等地方使用流出型黏度计测定黏度时,为了快速检查不同液体的黏度,需要将流出时间控制在 20 s ~ 80 s, ASTM D4212 据此给出了 5 种型号的 Zahn 杯,用于测定牛顿型或者近似牛顿型流体(通常指油漆、清漆或者类似相关

的液体)的黏度。由于不同制造商生产出来的 Zahn 黏度杯有一定的差异,企业在测定 Zahn 黏度杯时应指明其具体引用的规范或标准^[5]。例如波音公司将 ASTM D4212 中 Zahn 黏度测定过程进行了一定的简化,根据其企业需求制定了一份规范,在其规范中将液体流出时间定义为 Zahn 秒,且重新指定了黏度和流出时间的转换公式。在 2016 年 12 月 NADCAP(国家航空航天和国防合同方授信项目,它是美国航空航天和国防工业对航空航天工业的特殊产品和工艺认证)对国内某飞机制造公司的评审中,对 Zahn 黏度杯测定某一液体开出了不符合项,因为在进行测试时黏度和流出时间的转换中本应引用波音公司规范中的转换公式,却采用了国际通用标准 ASTM D4212 中的转换公式。此次 NADCAP 所列不符合项仅针对单一液体由于引用不同规范中的转换公式造成的明显黏度差异,这暴露出了单一 Zahn 黏度杯在测定特定黏度液体时由于引用规范的不同产生了不可忽视的差异,而对于其它型号黏度杯是否还有如此差异还不曾确定,也未见相关报道,因此,有必要系统地研究 Zahn 黏度杯使用不同规范测定液体黏度之间的差异,以评估误用规范带来的影响。

本文从 Zahn 黏度杯的不同标准规范出发,从理论上系统地比较了两种规范中由于特性转换公式不同带来的差异,并分析了造成此差异的原因,以及可能产生的影响。

1 Zahn 黏度杯工作原理

Zahn 黏度杯通常有 5 种杯号,1 号杯孔径最小,通常用来确定稀薄液体的黏度;2 号杯通常用于确定较稀的混合涂料、清漆等的黏度;3 号和 4 号杯用于确定中粘稠的清漆、混合涂料的黏度;5 号杯通常用来确定特别粘稠的液体,譬如丝网漏印油墨的黏度。

图 1 是 Zahn 黏度杯构型示意图,当需要测定某待测液体的黏度时,首先,选择合适的 Zahn 黏度杯使得待测液体流出时间在 20 s ~ 70 s (ASTM D4212 在 20 s ~ 80 s)之间。其次,将 Zahn 黏度杯放入液体中足够时间,使得黏度杯的温度和液体的温度不再变化。再次,使用黏度杯尾部的吊环竖直拉起黏度杯,快速平稳地升起黏度杯直到黏度杯底部的孔离液面约 6 in(1 in ≈ 2.54 cm),在黏度杯底部边缘与

液面脱离时开始计时,当液体流线第一次断掉时停止计时,此时所得时间即为待测液体的流出时间;最后,使用 Zahn 黏度杯修正系数表将液体流出时间转换成黏度。通常对于统一的标准,只需要给定流出时间即可,在校准时,需要将标准液体的黏度转换为标准流出时间,然后比较标准流出时间和实际流出时间,给出修正系数。对于使用标准液体校准黏度杯的流出时间所涉及的转换公式,不同的飞机制造商有着不同的规范要求。

Zahn 黏度杯流出时间与测定时的温度相关,本文中分析不涉及到温度的变化,所以暂不考虑温度的影响。

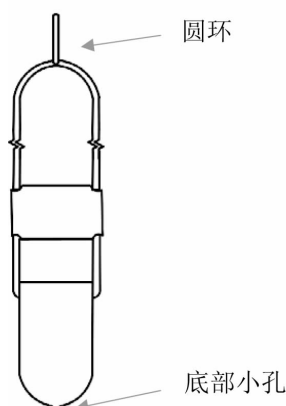


图 1 Zahn 黏度杯示意图

2 Zahn 黏度杯校准要求

以波音为代表的国外飞机制造商在规范中要求 Zahn 秒用转换式(1)确定。

$$Z = (A \times C) + B \quad (1)$$

式中,Z 表示 Zahn 黏度,用 Zahn 秒表示;A 和 B 是常数,见表 1;C 是液体动力黏度,单位是 mPa · s。

表 1 波音等国外飞机制造商 Zahn 杯规范中转换公式中的常数

Zahn 黏度杯号 (波音等国外飞机制造商)	A	B	动力黏度范围/mPa · s
G1	0.760 5	24.30	1.0 ~ 80.0
G2	0.278 0	13.10	25.0 ~ 205.0
G3	0.118 2	3.13	145.0 ~ 565.0
G4	0.077 3	3.92	208.0 ~ 855.0
G5	0.040 0	5.22	370.0 ~ 1 620.0

国际通用的 ASTM D4212 标准规范中要求转换时间和运动黏度的表达式为:

$$V = K(t - c) \quad (2)$$

式中, V 表示液体运动黏度(其与密度相乘即是动力黏度), 单位是 $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; t 表示流出时间, 单位是 s; K 和 c 是常数, 取值见表 2。

表 2 ASTM D4212 标准规范中 Zahn 杯规范中转换公式中的常数

Zahn 黏度杯号 (ASTM D4212)	K	c	运动黏度范围/ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
1	1.1	29	5~60
2	3.5	14	20~250
3	11.7	7.5	100~800
4	14.8	5	200~1 200
5	23	0	400~1 800

在实际校准时, ASTM D4212 标准规范推荐使用液体的标准黏度见表 3, 校准时温度为 25 °C。

表 3 ASTM D4212 规范中 Zahn 杯推荐校准点的液体黏度

Zahn 黏度杯号	液体运动黏度 / $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
1	20
2	120
3	480
4	480
5	900, 1 600

3 结果及分析

以波音为代表的国外飞机制造商规范中是将液体动力黏度转换为流出时间 Zahn 秒, 而国际通用的 ASTM D4212 标准规范中是将液体运动黏度转换为流出时间。液体的动力黏度是相应液体的运动黏度和其密度相乘得来, 因此, 以波音为代表的国外飞机制造商的 Zahn 秒是将液体的密度考虑在内的。两种方法的转换液体黏度为流出时间的方式类似, 但是结果却差别较大。下面将具体比较对于同一种 Zahn 黏度杯, 用两种转换方式得到的流出时间的差异。

不妨将两种规范中的液体动力黏度统一为 η , 运动黏度统一为 ν , 流出时间统一为 T , 液体密度为

ρ , 则有 $\eta = \rho\nu$, 对于同一种液体, 使用以波音等国外飞机制造商的规范和 ASTM D4212 的规范中的转换式计算得到的差值为:

$$\Delta T = T_c - T_b = \nu \left(\frac{1}{K} - A\rho \right) + C - B \quad (3)$$

式中, T_c 为使用 ASTM D4212 规范计算而出的流出时间, T_b 为使用波音等国外飞机制造商的规范计算而出的流出时间。

ASTM D4212 标准规范的 Zahn 黏度杯在校准时使用的标准液密度约为 $0.92 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \sim 0.98 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 取标准液体运动黏度范围为 ASTM D4212 标准规范中的范围内定值 $0.92 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 得到每一型号 Zahn 黏度杯使用不同规范的流出时间差值与运动黏度的关系如图 2 所示。

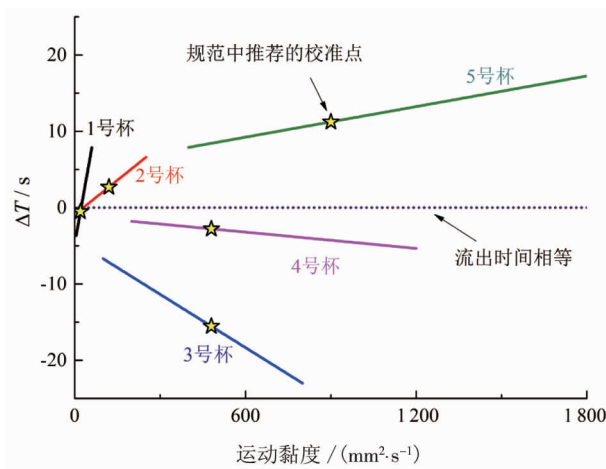


图 2 不同规范的液体流出时间差值与运动黏度的关系

从图 2 可以看出标准液体黏度经转换式得到的 5 种黏度杯最大时间差分别为 7.87 s、6.59 s、-22.99 s、-5.34 s、17.24 s, 其中 1、2、4 号杯流出时间最大差距在 8 s 之内; 3 号和 5 号杯流出时间最大差距超过了 16 s, 其最小差距约为 7 s。因此, 当使用 Zahn 黏度杯进行黏度测定时, 对于 3 号和 5 号 Zahn 黏度杯, 必须注意引用的规范, 以防出现流出时间计算偏差过大而引起质量问题。

当使用 ASTM D4212 规范中推荐的校准点校准 Zahn 黏度杯, 得到的液体运动黏度和流出时间差值对应如图 2 中星标所示的点 (20, -0.51), (120, 2.69), (480, -15.54), (480, -2.78), (900, 11.23)。

就 1 号杯而言, 不同规范间差值仅为 0.5 s 左右, 此种误差与人为操作带来的误差类似, 可以认为 1 号杯的校准与引用规范无关。

就 3 号和 5 号杯而言,不同规范间差值在 10 s 以上。根据 ASTM D4212 中的要求,在校准 Zahn 黏度杯流出时间时,当标准黏度液的流出时间差值超过 20% 时,即判定此黏度杯为损坏状态,而 Zahn 黏度杯流出时间一般控制在 20 s ~ 80 s 之内,所以可以认为流出时间可修正误差范围为 4 s ~ 16 s。由引用规范不同而产生的 4 s 以内的误差可以被修正,误差在 16 s 以上的情况,即被判定为损坏。因此对于 3 号和 5 号杯,如果混淆使用规范,将得到错误的结果。

就 2 和 4 号杯而言,不同规范之间的差异约为 2 s,此种情况不可忽略。因为 2 s 比计时器精度 0.2 s 高一个量级,可认为超出 2 s 时与人为因素无关,此时就算很小的流出时间差异也可能出现将不合格的黏度杯判定为合格的情形。例如,研究者在对国内某飞机制造公司 Zahn 黏度杯校准时发现,某工艺文件要求 Zahn 黏度杯误差为 $48\text{ s} \pm 3\text{ s}$,校准时引用工艺文件要求的 ASTM D4212 规范得到的结果是 52 s,黏度杯是不符合工艺文件要求的;而如果误引用以波音为代表的规范得出的结果是 50 s,单从结果来看是符合工艺文件要求的。此时,虽然引用两种规范得出的结果差值仅 2 s,但是如果引用了不符合要求的规范将黏度杯判定为合格,有可能造成油品质量测定出错乃至航空事故,必须纠正这一问题。

此外,为了评估引言中提到的 NADCAP 所列不符合项中对零件的影响,对受影响的 2 号 Zahn 黏度杯又重新使用波音等国外飞机制造商规范进行校准。校准结果显示:标准液体流出时间为 21 s,按国际 ASTM D4212 规范,修正系数 1.24,修正流出时间为 $26(24 \times 1.24 = 26)\text{ s}$;按波音等国际制造商规范,根据修正表,当流出时间为 21 s 时,对应的修正流出时间为 24 s;两种规范结果相差 2 s,与理论计算结果吻合。

4 结论

通过比较国际通用规范 ASTM D4212 和以波音为代表的 Zahn 黏度杯的规范,发现两种规范中液体黏度和流出时间的特性转换公式存在差异。波音引用的规范中的黏度指液体动力黏度,其与液体密度有关,单位为 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,而 ASTM D4212 规范中黏度指液体运动黏度,单位为 $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。使用同一标准液体,用两种规范转换时,3 号 Zahn 杯差异最大,最坏情况时达到 23 s,2 号 Zahn 杯差异最小,最好情况时差异仅 0.3 s,其它 Zahn 杯最坏情况仅为 6 s 左右。虽然两种方法由于计算引起的测量偏差有大有小,但是无论是对 Zahn 黏度杯本身的校准还是使用 Zahn 黏度杯对液体黏度进行测定都会对所得结果造成影响。

参考文献:

- [1] 陈惠钊. 黏度测量[M]. 2 版. 北京:中国计量出版社,2003.
- [2] 黄智伟,李富英. 油品黏度的在线测量[J]. 计量与测试技术,2001,28(4):40-41.
- [3] 朱佳奇. 流出杯式黏度计校正系数不确定度评定分析[J]. 计量与测试技术,2015,42(7):93-95.
- [4] 郭树强. 流出杯式黏度计校正系数的测量不确定度评定[J]. 计量与测试技术,2013,40(3):57-58.
- [5] 刘元俊,刘云英. 我国黏度计量工作中存在的问题[J]. 化学分析计量,2003,12(2):37-38.

作者简介

程传亮 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:成品件测试技术;E-mail:chengchuanliang@comac.cc

孙波 男,本科,高级工程师。主要研究方向:力学计量测试技术;E-mail:sunbo@comac.cc