

固体火箭发动机衬层涂覆工艺特性^{*}

唐汉祥, 吴 倩, 陈 江

(湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄樊 441003)

摘 要: 衬层涂覆工艺是流体的一种成型加工过程, 涂覆的工艺性能与衬层浆料的流变性密切相关。经对发动机涂覆过程的分析和研究, 手工涂刷的工艺性能应包括易刷性、抗垂挂性和流平性, 可分别用涂刷力、屈服值和流平时间表征。通过对一种具有很好涂刷性的实验衬层浆料的流变特性测定, 研究了涂覆工艺性能与衬层浆料流变性的关系。结果表明实际涂刷工艺性能与理论分析十分吻合。从而探索了一条经流变分析来预估、判断和控制发动机衬层涂覆工艺性能的技术途径。

关键词: 火箭发动机; 衬层⁺; 固体推进剂; 流变学; 工艺性能

中图分类号: V512.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 06-0573-04

Swabbing technology characteristics of solid rocket motor liner

TANG Han-xiang, WU Qian, CHEN Jiang

(Hubei Inst. of Aerospace Chemotechnology, Xiangfan 441003, China)

Abstract: The coating technology of liner on a rocket motor is a model covering process and the processing properties are closely related with the rheological behavior of liner slurry. By means of analyzing the coating course of motor liner, it is suggested that the swabbing technology which should deal with swabability, sagging-restricting and flow level can be described by swabbing force, yield value and flow level time, respectively. The experimental results showed that the relation between the practical swabbing behavior and the rheological properties of a liner slurry are in good agreement with the theoretical analysis. As a result, the way to it is pointed predict, evaluate and control the coating characteristics of rocket motor liner by the aid of the testing rheological parameters of liner slurry was suggested.

Key words: Rocket engine; Liner⁺; Solid propellant; Rheology; Technological property

1 引 言

在贴壁浇注固体推进剂的火箭发动机制造中, 为使燃烧室内贴的绝热层与推进剂间有很好的粘结, 需要加上一层衬里材料, 通常称衬层^[1]。一般衬层是通过配制成特种浆料, 然后涂覆于发动机内壁的绝热层表面。以往介绍较多的主要是衬层的性能研究、涂覆方法^[1~3], 关于涂覆的工艺特性研究较少有报道。

衬层涂覆工艺是流体的一种成型加工过程, 涂覆的工艺性能与浆料的流变特性密切相关。但实际中较多的是凭经验和简单地测定浆料粘度, 来控制衬层的工艺性能。如能通过对涂覆工艺过程的分析, 对衬层浆料提出不同的流变性要求; 或通过对衬层浆料流

变性的测定, 预估和评判涂覆的工艺性能, 这是衬层配方研究者和发动机涂覆工作者十分希望的事情。

本文通过对一个实验小发动机燃烧室, 采用手工涂刷工艺过程的分析, 并对实际具有很好涂覆工艺性能的实验浆料, 进行针对性的流变性测定, 解释了这种衬层浆料具有很好涂覆工艺性能的原因。从而尝试了一种通过测定衬层浆料的流变性, 来预估和判断发动机衬层工艺性能的途径, 这可为衬层的配方研究和涂覆工艺提供一定的指导。

2 实验部分

实验发动机燃烧室为 600mm 长的金属圆筒, 涂覆采用手工涂刷工艺。实验发动机壳体先在 70~

* 收稿日期: 2004-01-12; 修订日期: 2004-05-20。

作者简介: 唐汉祥 (1943—), 男, 研究员, 研究领域为复合固体推进剂配方和性能。

80℃下预烘,再将浆料也预热到 70~ 80℃时,取出发动机壳体进行涂刷。涂刷完毕,将发动机壳体直立置于 70~ 80℃烘箱中,进行预固化待用。

实验衬层浆料密度为 1.02g/cm³,要求衬层涂覆厚度为 0.25~ 0.40mm。用该实验浆料手工涂刷实验发动机壳体时,涂刷容易、表面光滑平整、无垂挂流痕。

测定浆料的流变特性,用 HAAKE RV20 旋转粘度计,M5/SV2 测量系统。由于衬层要在 70~ 80℃的烘箱中进行预固化,所以测试温度选择为 75℃。涂刷时间约在 5~ 10min 间完成,考虑到可能出现的一些不可见因素需要一定的时间,假设涂刷一个发动机要在 30min 内完成,所以对实验衬层浆料分别测定初始、15min 和 30min 三个时间下的流变性。

3 涂刷过程流变分析与工艺性能评估

要对涂覆的工艺性能进行评估,必须要知道衬层有哪些工艺性能要求,用什么流变参数来表征。由于涂覆衬层一般要求使用的浆料量尽量地少,并能形成完全覆盖、尽可能薄的、整体十分均匀平整的涂层。这使衬层的工艺性能要具有良好的可涂性、抗垂挂性和流平性。

本实验小发动机所用的衬层浆料,具有涂刷容易,预固化后表面光滑平整,无流挂现象,厚度均匀,表现为良好的工艺性能。但究竟是涂覆浆料的何种流变特性致使在涂刷工艺中有如此良好的性能?尚不得而知。这里试对涂刷过程进行分析,确定对应的流变参数,并与实际工艺性能进行对比。

3.1 涂刷过程剪切速率估计

衬层涂刷过程,实际是浆料通过刷子的来回运动,在发动机内壁铺展开,浆料发生的是一种剪切流动。为了评估工艺性能,这里首先对这种涂刷过程的剪切速率进行估计。

设涂刷速度和剪切速率由以下两式确定:

$$V = L / t \tag{1}$$

$$\gamma = V / \delta \tag{2}$$

式中 V 为涂刷速度,mm/s; L 为涂刷距离,mm; t 为时间,s; γ 为剪切速率,s⁻¹; δ 为厚度,mm。

实验发动机燃烧室全长为 600mm,涂刷时一般取平置状态,从两端开口伸入刷子,进行手工涂刷。每次刷程约为发动机燃烧室长的二分之一,时间约为 2~ 3s。初始衬层厚度可能要为设计标准的 2~ 3 倍,要经多次来回刷涂,最后才能达到厚度为 0.25~

0.40mm 的标准要求。所以设每次涂刷距离为 300mm,时间为 2s,厚度为 0.80~ 0.30mm。经式(1)、(2)两式估算,可得涂刷这种实验发动机燃烧室的剪切速率范围约在 200~ 500s⁻¹。

3.2 浆料的流变性

根据估计的手工涂刷的剪切速率范围,考虑到实际衬层的浆料较稀,在用同轴圆筒旋转粘度计的 M5/SV2 探头测试时,在高剪切速率下,样品要甩出,致使测定不准。所以选择了 0~ 100s⁻¹剪切速率范围,进行衬层浆料的流变性测定。图 1 和图 2 分别是测定的流动曲线和粘度曲线。

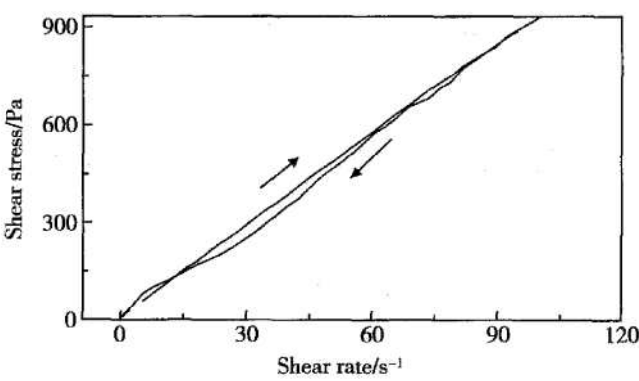


Fig. 1 Flow curves of propellant liner slurry

由图 1 可见,流动曲线几乎呈线性变化,且上升和下降曲线基本重合。对不同时间测定的上升和下降的流动曲线,进行流变模型的最佳拟合,均很好地符合宾汉(Bingham)流体模型。宾汉流体是一种有屈服值的流体,说明衬层浆料具有一定的屈服值。因以后评估垂挂性要用到流动曲线的回线,所以表 1 列出的流变模型参数值是对剪切流动回线拟合的结果。

Table 1 Model-fitting and measuring results for the recovery curve

Time /min	Model equation	R^2	τ_0 /Pa	η /(Pa·s)	η_{measure} /(Pa·s)
0	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$	1.00	15.93	9.43	9.31
15	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$	1.00	41.92	13.47	12.63
30	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$	1.00	32.82	16.68	16.32

由图 2 的粘度曲线可见,初始有一较高的粘度值,以后随剪切速率增加,粘度下降;当剪切速率大于 25s⁻¹时,粘度基本趋于平稳不变,呈类牛顿体特征。令这种牛顿粘度值为 η_N ,若衬层浆料不同时间测定的 η_N 值如表 1 所示的 η_{measure} 值。由表 1 可见,模型所得 η 值和测定所得 η_{measure} 值相当,说明所选模型是合

理的,以后计算时就采用模型的 η 粘度值。表1表明衬层浆料的屈服值和粘度,随时间增加而增加,即随着固化的进行,屈服值和粘度变大。

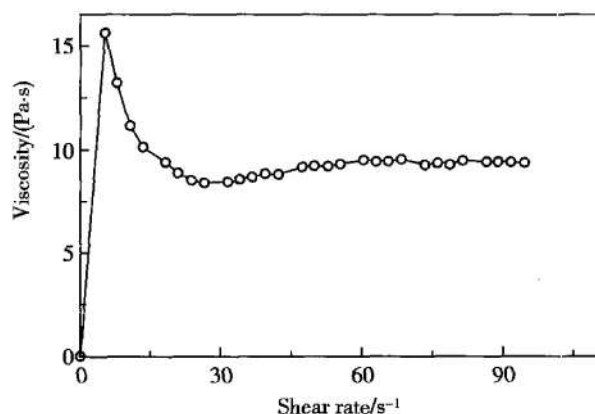


Fig. 2 Viscosity curve of propellant liner slurry

3.3 易刷性分析与评估

浆料能否顺利涂刷,即要知道用 $200 \sim 500 \text{ s}^{-1}$ 剪切速率进行涂刷需要用多大的力。对一般操作人员而言,出这么大的力是否容易,若很容易,则说涂刷容易,也即这种衬层具有易涂刷的工艺性能。

设用 2# 毛刷进行涂刷操作,涂时刷子的接触面积约为 $35 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,即等于 0.00175 m^2 ,则涂刷时所需用力多少可用下式计算:

$$F = \tau \cdot A \quad (3)$$

式中 F 为涂刷用的力, N; τ 为剪切应力, Pa; A 为面积, m^2 。

因实测的粘度曲线显示,剪切速率大于 25 s^{-1} 到 100 s^{-1} 时,浆料呈类牛顿体特性,粘度基本为一定值。设浆料直至在预估的 $200 \sim 500 \text{ s}^{-1}$ 内,仍呈类牛顿体特性,为具有与前面的剪切速率下相同的牛顿粘度。则用表1中的粘度值,就可预估实际涂覆时所需用的涂刷力的大小。

据牛顿流体方程:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

式中 η 为牛顿粘度。

根据式(4),可求得涂刷剪切速率下的剪切应力,然后代入式(3),求得涂刷时需要用的力值。再与操作人员的能力相比,就可知道这种涂刷操作的难易。根据表1中的粘度数据,可得不同时间、不同剪切速率下涂刷时,所需力的估计值,结果列于表2。

由表2可见,在最可几涂刷速度下进行实验发动机燃烧室内衬层的涂刷,所需用力在 $3 \sim 15 \text{ N}$,如用习惯的公斤力表示,则需约 $0.3 \sim 1.5$ 公斤力。这样的

用力范围,对一般的操作人员来说,是比较容易实现的。这就和该种衬层浆料的实际工艺性能,具有良好的可涂刷性相一致。

Table 2 Calculating values of swabbing forces

Time/min	$\eta/\text{Pa} \cdot \text{s}$	F , at 200 s^{-1}		F , at 500 s^{-1}	
		N	kgf	N	kgf
0	9.43	3.30	0.34	8.25	0.84
15	13.47	4.71	0.48	11.79	1.20
30	16.68	5.84	0.60	14.60	1.49

3.4 垂挂性分析与评估

衬层涂刷完毕,发动机壳体直立放置于烘箱中进行预固化。由于重力的作用,涂覆在发动机壁的浆料要受到一个向下的剪切力,用 τ_w 表示。垂挂性是衬层被涂刷完毕后所呈现的一种特性,如衬层在发动机壁上受到向下方向的剪切应力,大于浆料阻止流动的屈服值,则会发生流挂,否则反之。在发动机壁受的剪切应力 τ_w 可由下式计算:

$$\tau_w = \frac{G}{A} = \rho \cdot g \cdot \delta \quad (5)$$

式中 τ_w 为衬层在发动机壁所受的剪切应力, Pa; G 为衬层受到向下作用的力, N; A 为面积, m^2 ; ρ 为衬层密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; δ 为衬层厚度, m。

由实验部分已知,所用衬层的密度为 $1020 \text{ kg}/\text{m}^3$,厚度 0.00025 m ,重力加速度取 $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ 。代入式(5)计算,得衬层在发动机壁所受的向下剪切应力为 2.50 Pa 。

因衬层浆料涂刷后的垂挂性,是在经过剪切变形后所具有的一种特性。故将程序剪切后回复的流动曲线进行拟合,得到了涂刷后浆料的屈服值,具体结果如表1。由表1可知,衬层浆料在 30 min 内的屈服值在 $15 \sim 41 \text{ Pa}$ 间。这一数值远大于浆料在发动机壁所受的向下剪切应力 2.50 Pa ,这就说明了这种实验衬层浆料涂刷后,何以无垂挂流痕、表面平整,具有优良的抗垂挂性能的原因。

3.5 流平性分析与评估

流平性是指衬层浆料涂刷后表面流动淌平的能力,流平性与浆料的粘度有关。粘度大,淌平的速度慢,所需淌平的时间长,如在这一时间内,浆料由于固化,流动性发生严重变化,则就不易流平,否则反之。

由图2已知,剪切速率在大于 25 s^{-1} 后,浆料呈类牛顿体特性。则涂刷完毕,外力去除后,浆料将在残

余应力下,以牛顿流体特征进行回复流动,当回复力逐渐趋于零时,呈高的屈服值,浆料静止。涂刷完毕,浆料的回复流动速度,即是流平速度。近似流平速度 V 可用式(6)估计:

$$V = \dot{\gamma} \cdot \delta / 2 = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2}{2\eta_N} \quad (6)$$

此外,涂刷完毕浆料表面的不平整,假定主要是由刷子毛的拖拉所致。经测定刷毛直径一般为 0.1mm,所以估计流平时间,就是估计浆料回复流动 0.1mm 距离所用的时间,可用下式计算:

$$t = L / V \quad (7)$$

式中 t 为流平时间, s; L 为距离, m; V 为流平速度, m/s。

浆料不同时间的流动速度和流平时间的估计结果列于表 3。由表 3 可知,如涂刷工艺在 30min 内完成,估计可在 5s 时间内流平。如由于手工涂刷工艺的随意性,涂刷后的表面不平整度要增加十倍,则也可在 50s 以内流平。经在 30 min 内对浆料流变性的测定结果表明,浆料的流动性在 1min 内,是不会发生严重恶化的,这就说明了实验发动机用的衬层浆料,在流变特性上确实具有良好的可流平性,致使涂刷后的表面平整。

Table 3 Calculating velocity and time of flow level

Time/min	$\eta_N / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$V / (\text{mm/s})$	Leving time/s
0	9.43	0.033	3.0
15	13.47	0.023	4.3
30	16.68	0.019	5.3

(上接第 572 页)

参考文献:

- [1] 陈 沛, 赵凤起. 国外对高能量密度材料 CL-20 在固体推进剂中的应用研究[J]. 飞航导弹, 2002, (2): 57~ 60.
- [2] 赵凤起, 郝仲璋. 纳米材料在火炸药中的应用与发展[C]. 新概念武器研讨会论文集, 2003.
- [3] 王文俊, 张占权. 21 世纪初固体推进剂技术展望[J]. 推进技术, 2000, 21(6). (WANG Weir jun, ZHANG Zharr quan. Prospect for solid propellant technologies at the beginning of the

4 结 论

经对实验发动机燃烧室手工涂刷衬层, 实际涂刷工艺过程的流变分析, 和对具有很好涂刷性的实验衬层浆料的流变特性测定, 研究分析了这种衬层浆料为什么具有优良工艺性能的原因。结果表明: 用涂刷力、屈服值和流平时间作为表示这种手工涂刷的易刷性、垂挂性、流平性的相应表征参数, 理论分析和实际工艺性能结果十分吻合。这种经流变分析判断手工涂刷衬层浆料涂覆工艺性能的尝试, 对分析、判断和控制其它各种涂覆工艺的工艺性能, 也有十分有益的启示。

致谢: 尹华丽同志提出了本研究的要求, 并提供了实验用样品, 在此谨致谢忱。

参考文献:

- [1] Fluke G R. Propellants manufacture hazards and testing[M]. American Chemical Society, Washington, 1969: 165~ 187.
- [2] 范同起, 陈继周. 复合固体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1994: 414.
- [3] 赵凤起, 徐胜清, 翟振宏. 不同氧化剂处理的碳纤维对硅橡胶涂覆层材料性能的影响研究[J]. 推进技术, 1998, 19(5). (ZHAO Feng qi, XU Sheng-qing, ZHAI Zheir hong. Effects of carbon fiber treated with different liquid oxidizers on the properties of silicone rubber for inhibition[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19(5).)

(编辑: 梅 瑛)

21st century[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(6).

- [4] 胡焕性. 3, 4-二硝基呋喃基氧化呋喃炸药[P]. 中国专利: 02101092. 7, 2002.
- [5] 王亲会. DNTF 基熔铸炸药的性能研究[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 57~ 59.
- [6] 推进剂能量计算方法[S]. GJB/Z84- 96.

(编辑: 梅 瑛)