

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX201808031

www.dxhx.pku.edu.cn

## “长征五号”独白

李欣慰, 李新阳, 李冬秋, 徐四龙\*

西安交通大学理学院化学系, 西安 710049

**摘要:** 通过长征五号运载火箭的自述, 生动地介绍了运载火箭的重要部件的化学奥秘, 使读者在轻松的氛围中感受化学的魅力。

**关键词:** 运载火箭; 高能燃料; 有机化学; 金属; 材料

**中图分类号:** G64; O6

## “Long March V” Monologue

LI Xinwei, LI Xinyang, LI Dongqiu, XU Silong \*

Department of Chemistry, School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China.

**Abstract:** Through the self-introduction of the Long March 5 carrier rocket, this paper vividly presents the chemical mystery of the important parts of the carrier rocket, thus providing readers with the charm of chemistry in a relaxing manner.

**Key Words:** Launch vehicle; High-energy fuels; Organic chemistry; Metals; Materials

大家好, 我是长征五号(CZ-5)运载火箭(图 1)。大家应该对“长征”大家庭十分熟悉吧? 我们的大哥——长征一号圆满地完成了把祖国第一颗人造卫星“东方红”一号送上太空的任务, 从此“长征”这个祖国航空航天的代名词闻名于世<sup>[1]</sup>。如今, 许多哥哥姐姐因为年龄的原因已经无法完成新的任务。但是, 祖国的航天事业岂能停歇? 所以我诞生了。很自豪地说, 我是咱祖国新一代运载火箭中第一个立项研制的型号, 我的成功首飞是我国由航天大国向航天强国迈进的重要支撑和显著标志之一。今天请允许我做自我介绍, 让大家能够“由表及里”地认识我。

作为运载火箭, 我的使命就是将人造卫星、货物、飞船和空间站等小伙伴们送入太空。我猜大家在电视等许多地方都见过我高大威武的身姿, 不妨告诉你们: 我可是个重达 700 多吨的大块头呢! 跟随我一路同行的小朋友们虽然比我瘦小, 但很多也有数十吨重, 我们加起来相当于 4 头成年蓝鲸的重量。因此, 我得到了一个绰号叫“胖五”, 然而我并不喜欢这个绰号, 因为肥胖和强壮还是有本质区别的。太空可没有地球舒适, 在前往宇宙的路上我的身体会和大气层发生剧烈的摩擦, 产生高达几千摄氏度的高温, 就好像在太阳表面飞行。在炎炎夏日 40 °C 高温时, 想必大家都不愿意出门了吧, 可以想象在太阳表面飞行是一种什么样的体验? 想知道我是如何克服如此严酷的高温环境、如何拥有如此强壮的体魄, 从而顺利将小伙伴们和我一起推上云霄进入茫茫太空吗? 这一切都依赖化学材料的神奇作用, 现在我就为大家揭晓其中的奥秘。

收稿: 2018-08-27; 录用: 2018-10-15; 网络发表: 2018-11-05

\*通讯作者, Email: silongxu@mail.xjtu.edu.cn

基金资助: 国家自然科学基金(21871218)

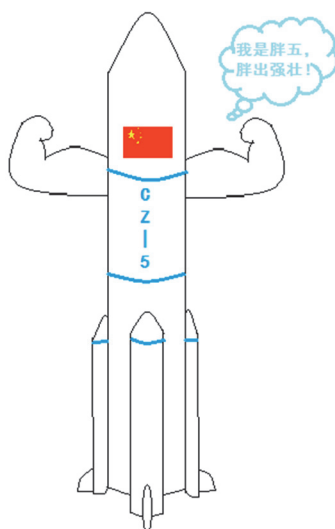


图1 长征五号示意图

我在海南文昌卫星发射中心升空后，首先会穿过地球厚厚的大气层到达太空，为了克服数千摄氏度的高温考验，战胜噪音和太阳辐射对我的伤害，我装备了史上最强盔甲——整流罩。整流罩利用其外表面流线型的设计降低阻力，并且其耐高温的特性还能有效地保护我身体里面的各种器官<sup>[2]</sup>。整流罩采用的是酚醛树脂复合材料，拥有优良的力学、耐高温、耐腐蚀以及阻燃性能，常见的如双酚 A 酚醛树脂。双酚 A 的结构如图 2 中化合物 **1** 所示，学名为 2,2-二(4-羟基苯基)丙烷，简称二酚基丙烷，是世界上使用最广泛的工业化合物之一，主要用于生产各类树脂等高分子材料。当双酚 A 和甲醛遇到一起时，在氢离子的撮合下，被活化的甲醛的羰基受到双酚 A 邻位碳原子的亲核进攻(邻位碳原子的电子云密度较高)得到中间体 **2**，然后离去一分子水形成了苯位碳正离子 **3**，此碳正离子对电子的强烈渴望使得它与另一分子双酚 A 的邻位碳原子迅速结合。甲醛分子就是这样把一个个双酚 A 分子连接起来，如此周而复始，使得一个个双酚 A 整齐排列，成为可以被委以重任的酚醛树脂材料(图 2)。为了具有更强的“超能力”，酚醛树脂还可和其他物质强强联手，形成更具特殊性能的超级材料。例如，将酚醛树脂与环氧树脂经过脱水改性，可有效提高酚醛树脂的机械性能，进一步掺入玻璃纤维或者碳纤维可得到耐腐蚀、耐高温的高强度型酚醛环氧树脂复合材料<sup>[3]</sup>。作为运载火箭，当我穿上这种最强盔甲，就可以经受得住前往太空之旅所受的高温之苦啦。

除了最强盔甲，我的皮肤是通过耐高温胶水与高强度铝合金柱状盔甲和锥形头盔相粘合的。铝的密度小( $\rho = 2.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )，熔点低( $660 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )，具有很高的塑性，易于加工制成各种型材、板材。但是纯铝的强度很低，不宜作为结构材料，不过在铝中加入各种合金元素，使合金元素在铝表面形成不同的结晶和沉淀物，形成所谓的“微米结晶相”和“亚微米或纳米弥散相”，就可将其改造成为集众多优点于一身的高强度铝合金了。例如在铝的熔炼过程中添加少许硅，就可推迟熔炼的低温回火脆性，起到固溶强化的作用。但如果加入硅的比例不适当，则可能形成不熔初生相或难熔非平衡结晶相，生成材料的强度反而不如铝本身了，或由于杂质的挤入生成空位或空洞等缺陷结构，也会降低铝材的韧性、塑性和耐疲劳性能<sup>[4]</sup>。就这样，通过不断改良熔炼工艺和合金元素配比，最终可生产出能让我进入太空所需的高强度铝合金皮肤。而且，我的酚醛树脂盔甲和铝合金皮肤是完美接合的，这是因为使用了耐高温胶粘剂。顾名思义，这种胶粘剂具有耐高温、耐辐射、绝缘性好的特点。在

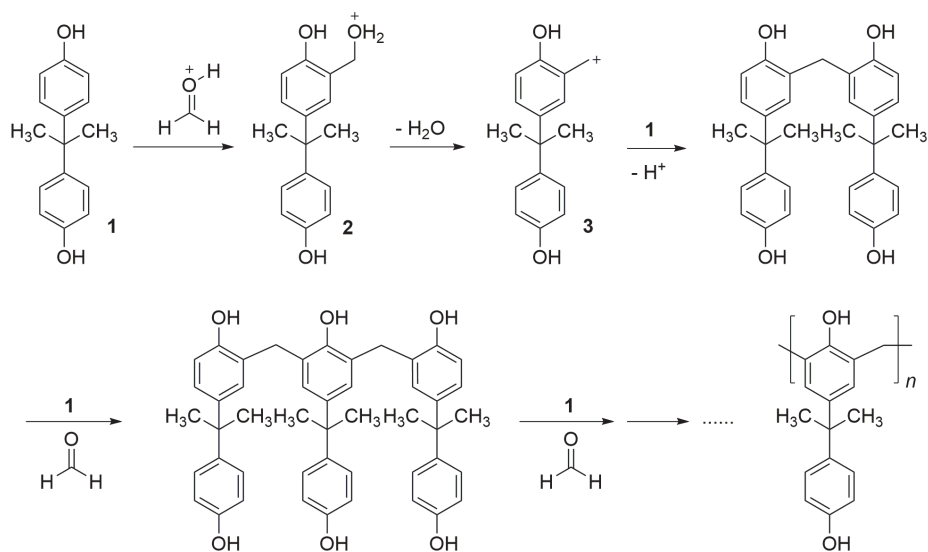


图2 双酚 A 和甲醛的聚合反应

互穿聚合物网络(IPN)问世后,相继研究出了有机硅树脂和环氧树脂形成的 IPN 树脂,并通过与活化石棉杂化等方法,可以制备出具有良好界面粘接性的耐高温胶粘剂<sup>[5]</sup>。通过这种粘合剂粘合,我的多层次组合型的太空皮肤就完工了。

其次是我的肌肉——推进模块。他们分别是芯一级、芯二级、3.35 米直径助推器和 2.25 米直径助推器<sup>[6]</sup>。正是这四个模块团结一致共同发力才将我们一起送入太空。告诉你们一个秘密哦,肌肉拥有如此巨大的力量与我摄入的食物有关。

不同的肌肉需要不同的食物滋养,所以我变成了一个地地道道的吃货!我的发动机中芯一级(两台 YF-77 氢氧发动机)和芯二级(两台 YF-75D 氢氧发动机)采用液氢/液氧助推剂,而另外两个助推器(两台 YF-100 液氧煤油发动机)采用液氧/煤油助推剂<sup>[7]</sup>。先谈谈我最爱吃的液氢/液氧助推剂吧。液氢是无色无味的食物,液氧则是浅蓝色,不要看它们清清淡淡的,看起来好像没有食欲,它们可是“高能大补”的食物,而且排出物只有水,相比于传统助推剂偏二甲肼((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NNH<sub>2</sub>)的剧毒,它们可是绿色无公害食品。除了无污染、能量高的优点外,液氢有较高的比冲(即单位质量推进剂产生的冲量)和再生冷却能力,这些都是其他食物不能比的。液氧/煤油助推剂则是烃类助推剂的优秀代表。烃是由碳氢两种元素构成的化合物,充分消化后排出物为二氧化碳和水。值得注意的是,这里说的煤油可不是普通煤油,而是高能合成煤油(syntin 煤油),是一种新型火箭煤油,化学式为 C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>。与传统航天煤油相比,它的冰点低于-70℃,很好地满足了我太空中低温工作的需求。此外它的动力黏度小、安全性高、材料相容性好、储存时性能稳定,传热性能也与传统煤油相当,可以说是完美地替代了传统火箭煤油<sup>[8]</sup>。不好意思的是,我吃货的本性给建造我的叔叔阿姨带来了技术上的难关。我最喜爱的液氢常温下为气体,沸点为-252.89℃,要获得液氢并保存非常困难。而且氢气的密度很小,当其被液化时,体积仍然非常大,只能保存在很大的储存箱中,这也是为什么叔叔阿姨给我起了“胖五”这个外号的原因。希望不久的将来,在叔叔阿姨们的研究下,让爱美的我减肥成功。

不仅仅我的肌肉、食物和皮肤,我身体的其他部分也都是化学材料。例如壳体(即我的骨骼),它是由超高强度钢制作而成的,从这种钢的名字上就可以感受到它是多么的坚不可摧。这些钢材中包括硅-锰系、铬-锰系超高强度钢,18% Ni 马氏体时效钢等<sup>[9]</sup>。这些名字高大上的钢材,通过改变钢材中的含碳量,调整 Si、Mn、Cr、Ni、Co 等元素的含量就可以拥有抗腐蚀、高断裂韧性这些超能力了。有了强劲的骨骼,我就不再畏惧太空了。然而,所有这些重要材料都无法直接从大自然中获取,它们是无数科学家长期研究、刻苦钻研的成果,在这里要感谢那么多辛苦工作的科学工作者们。

从强壮的“肌肉”到坚硬的“骨骼”，从美味的“食物”到耐高温的“皮肤”，我的身体处处皆化学。在未来，我的弟弟妹妹们一定会拥有更加强壮的体魄，飞向更远的星际，去探索更多未知的奥秘。亲爱的朋友们，我要去执行任务了，期待再次跟大家分享我的化学奥秘。

#### 参 考 文 献

- [1] 健芬, 胡晓东. 航天, **1993**, 475 (4), 11.
- [2] 朱春艳, 臧旭, 张锦, 刘松, 狄文斌. 动力学与控制学报, **2017**, 15 (6), 544.
- [3] 石鲜明, 吴瑶曼, 余云照. 高分子通报, **1998**, No. 4, 57.
- [4] 张新明, 邓运来, 张勇. 金属学报, **2015**, 3 (51), 261.
- [5] 魏晓莹, 王汝敏, 闫超, 程雷. 中国胶粘剂, **2010**, 19 (5), 54.
- [6] 李东, 王钰, 何巍, 李平岐, 牟宇. 导弹与航天运载技术, **2017**, No. 3, 1.
- [7] 李文龙, 李平, 邹宇. 宇航学报, **2015**, 36 (3), 243.
- [8] 李东, 王珏, 李平岐, 牟宇, 李国爱. 国际太空, **2016**, No. 11, 2.
- [9] 王鲁. 宇航材料工艺, **1984**, No. 6, 1.