

微重力环境金属燃烧试验研究进展

许培辉, 刘建忠, 苑继飞, 杨卫娟, 周俊虎
(浙江大学 热能工程研究所, 杭州 310027)

摘 要: 以自由落体、抛物线飞行和模拟微重力流场 3 种典型的微重力试验原理,综述了微重力环境下气溶胶、颗粒和棒状 3 种形态的金属材料燃烧研究,包括镁、铝、钛等。详细介绍了微重力对金属燃烧速度、火焰结构、相变过程及特有的燃烧现象等特性的影响机理,阐述了微重力环境对揭示金属燃烧固有属性的优势,综述了现有微重力试验系统的优缺点和模拟微重力流场方法的可行性。研究结果表明:由于创造微重力环境较难且成本较大,限制了金属燃烧固有属性及弱效应对其影响的研究。建议从微重力试验条件、弱效应对金属燃烧行为的影响、微重力下传热传质变化对燃烧化学反应的微观影响机理方面进一步研究。

关 键 词: 微重力; 燃烧特性; 火焰结构; 自由落体; 抛物线飞行; 微重力流场

中图分类号: V512⁺.4

文献标志码: A

Experimental research progress in combustion of metal under microgravity

XU Peihui, LIU Jianzhong, YUAN Jifei, YANG Weijuan, ZHOU Junhu

(Institute for Thermal Power Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027 China)

Abstract: The combustion characteristics of metal aerosols, particles, and rods in a microgravity environment were reviewed based on three typical microgravity experiment methods, including free fall, parabolic flight, and simulating microgravity flow field. The metals include magnesium, aluminium, titanium and so on. The influence mechanism of microgravity on metal combustion speed, flame structure, phase transition process, and unique combustion phenomena was introduced in detail. The advantages of the microgravity environment in revealing the inherent properties of metal combustion were described. The advantages and disadvantages of existing microgravity experimental system and the feasibility of simulating the microgravity flow field were summarized. Results showed that the researches on the inherent properties of metal combustion and the influence of weak effects were limited due to the costly and uncommon microgravity environment. It is suggested to further investigate the microgravity experimental methods, the influence of weak effects on the combustion characteristics of metals, and the microscopic influence mechanism of heat and mass transfer changes on combustion chemical reactions under microgravity.

Key words: microgravity; combustion characteristics; flame structure; free fall; parabolic flight; microgravity flow field

收稿日期:2020-09-09

作者简介:许培辉(1992—),男,博士生,主要从事金属燃料研究。E-mail:phxu@zju.edu.cn

通信作者:刘建忠(1965—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事金属燃料研究。E-mail:jzliu@zju.edu.cn

引用格式:许培辉,刘建忠,苑继飞,等.微重力环境金属燃烧试验研究进展[J].航空动力学报,2021,36(8):1633-1645. XU Peihui, LIU Jianzhong, YUAN Jifei, et al. Experimental research progress in combustion of metal under microgravity[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(8):1633-1645.

金属材料是推进剂中广泛应用的高能燃料,20世纪末,有学者提出镁将是火星探索的首选燃料,而太空环境将直接影响燃料的燃烧过程,因此微重力下金属的点火燃烧特性是其应用于航天推进剂的基础^[1-2]。此外,在早期航天探索中,曾发生过数次金属元件着火事故^[3],这对掌握金属材料在微重力环境下的点火燃烧特性提出了新要求。因此,为了进一步推进金属材料在航天领域的应用,了解金属在微重力环境下的点火燃烧特性具有重要意义。

研究表明,微重力与常重力燃烧的主要区别为:①流场方面,重力消失的同时消除了自然对流,使得燃烧的传质过程以扩散为主,且在常重力下被浮力诱导自然对流掩盖的弱现象,如表面张力诱导流动、低速强迫对流、相变膨胀驱动流动和液滴爆炸等,在微重力下将会突显,这有利于认识金属燃料点火燃烧的固有特性^[4-6];②传热方面,微重力下自然对流换热显著降低,使得热量损失减少,这种传热方式的变化甚至可能导致金属材料可燃性的改变^[7],模拟研究表明重力从 $1g_0$ (重力加速度)降到 $0g_0$ 时可减少38%的温度损失,使大粒径金属颗粒更容易点燃^[8];③燃烧化学反应方面,传热传质方式改变引起的温度场变化,将直接影响燃烧产物组分和形貌结构,如316不锈钢在微重力下燃烧,高温熔融物堆积导致产生挥发性燃烧产物(氧化铬),而常重力下则没有^[9];④时间尺度方面,微重力环境大大降低燃烧速度,使得燃烧时间尺度增大,有利于详细地观测燃烧全过程,而在常重力下自然对流能加快反应速率,这些观测通常较难实现^[10]。

最早的微重力燃烧研究可追溯到1957年,日本的Kumagai和Isoda^[11]在自制自由落体燃烧室中研究了液体燃料的燃烧过程,但是到了1978年,俄罗斯的Kolesnikov等^[12]才报道了微重力金属燃烧试验。目前金属在微重力环境下点火燃烧的研究仍较为匮乏,严重制约了金属材料在航天领域的研究和发展。为此,本文就现有微重力金属燃烧的3种试验手段,以及金属气溶胶、金属颗粒和金属棒这3种主要的研究对象形态,综述目前金属材料在微重力环境下点火燃烧的研究进展,为促进金属燃料在航天推进剂的应用研究提供指导。

1 微重力金属燃烧试验手段

获得微重力环境的传统方法主要包括自由落体法、抛物线运动法、在轨飞行法(即在轨航天

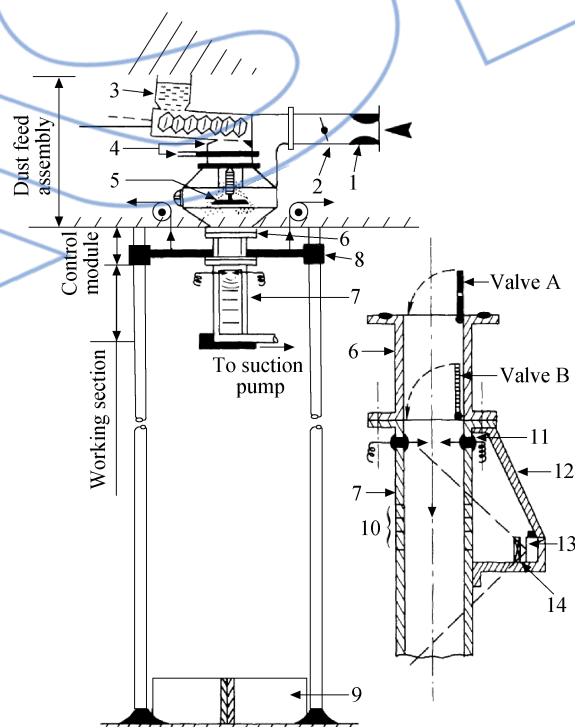
器)、以及真正的太空微重力环境,由于成本和技术原因,现有的微重力金属燃烧研究主要采用前两种方法。

1.1 自由落体法

自由落体法将试验舱从某一高度突然释放,使其做自由落体运动,从而达到舱内失重的效果,主要包括小型自由落体设备、大型落塔、上抛式落塔和热气球等,区别主要在于有效载荷、微重力水平和时间不同,现有的微重力金属燃烧研究主要采用前两种设备。

1.1.1 落塔/落井

在常重力环境下研究金属气溶胶点火燃烧特性时,一般采用射流制造气溶胶,但引入的紊流必然会干扰燃烧过程。因此,1983年Ballal^[13]较早利用自制自由落体设备获得微重力环境,以研究微米级铝或镁气溶胶的火焰传播过程。试验装置如图1所示,其关键部件为舱体内的自由落体燃烧室,有效自由落体高度为10 m,可获得1.4 s微重力时间。



- 1 Venturi air-flow meter; 2 Air-flow regulating valve;
3 Dust bin and worm conveyor assembly;
4 Swirl chamber with air supply; 5 Rotary disc for dust dispersion;
6 Control module with valves A and B;
7 Working section with ignition electrodes;
8 Guide bushes and guide rods; 9 Impact absorber;
10 Phototransistor bank; 11 Ignition electrodes;
12 Camera bracket; 13 Camera; 14 Light chopper.

图1 微重力燃烧试验装置^[13]

Fig.1 Apparatus for microgravity combustion^[13]

其实,早在 20 世纪 50 年代末,美国国家航空航天局(NASA)的 Lewis 研究中心(现为 Glenn 研究中心(GRC))就建造了能产生 $0.015g_0$ 微重力的 3.8 m 自由落体设备^[6],但其有限的空间限制了燃烧诊断技术的应用,且微重力时间极短(小于 2 s),难以观测微重力下金属点火燃烧的全过程,同时由于机械摩擦和空气阻力,其微重力水平也较低(大于 $10^{-2}g_0$)。但由于这种自由落体装置简单且有效,因此被进一步发展为大型落塔或落井,以获得更高的微重力水平及时间。

20 世纪 60 年代,NASA Lewis 研究中心建造了两座微重力水平达 $10^{-5}g_0$ 的落塔,分别能维持

2.2 s 和 5.2 s^[6]。随后,其他国家也开始建造落塔,或者利用废弃矿井改造成落井。例如,1988 年,德国计划将萨尔州的废弃矿井改造成微重力时间最长的自由落体法微重力设备(Eurotube-Saar 落井),该竖井总高度为 1 200 m,可获得 14 s 的微重力环境(微重力水平为 $10^{-5}g_0$)^[14]。但很少见利用这类微重力时长 10 s 以上的落井设备研究金属燃烧的报道。国内外的部分落塔试验设备简况如表 1 所示,总体而言,落塔能产生约 10 s 以下、微重力水平为 $10^{-6}g_0\sim 10^{-3}g_0$ 的试验环境,由于其简单、有效、成本低的优点,一直是微重力金属燃烧试验的主要手段。

表 1 落塔/落井试验参数
Table 1 Experimental parameters of drop tower/shaft

落塔/落井所属机构	微重力时长 T_g/s	最大微重力水平 $(g_{\min}/g_0)$	最大减速度 $(-a_{de}/g_0)$	最大载荷 C_i/kg
日本微重力中心(JAMIC) ^[15]	10.00	10^{-5}	10	1 000
美国 NASA GRC ^[16]	2.20	10^{-3}	30	159
美国 NASA GRC ^[17]	5.18	10^{-5}	65	455
德国不来梅大学应用空间技术及微重力中心(ZARM) ^[18]	9.30	10^{-6}	50	264
德国 ZARM ^[15]	4.74	10^{-5}	35	
中国科学院工程热物理研究所 ^[19]	2.20	10^{-4}	25	50
中国科学院力学研究所 ^[20]	3.60	10^{-5}	15	30

注: $g_{\min}$ 为试验舱自由下落过程中舱内最小的重力值, a_{de} 为回收试验舱过程中舱体最大的减速度。

1.1.2 上抛式落塔

由于自由落体高度与运动时间的二次方成正比,所以无法通过增加高度来无限延长微重力时间。因此,美国 NASA 5.2 s 落塔和德国 Bremen 4.7 s 落塔曾尝试将试验舱上抛运行后自由下落的方式来增加微重力时间。我国张孝谦等^[21]利用泛能上抛技术,成功将中国科学院工程热物理研究所 25 m 落塔的微重力时间延长了一倍,且微重力水平仍保持在 $10^{-4}g_0$ 左右,其工作模式如图 2 所示(图中 a 为舱体加速度, g_0 为重力加速度),采用三端泛能换能器将内外双舱组件整体加速上抛($A\sim D$ 段),当舱体停止加速时(即 D 点)内舱与外舱分离,此时内舱开始进入微重力状态,随后舱体整体继续上升至顶点后下落,直至接近地面时开始减速回收(即 G 点),此时内舱与外舱重新接触,微重力状态结束。但这种方式还存在动力、准直度、牵引扰动等难题,且目前未见采用该方法的微重力金属燃烧研究。

总体而言,自由落体法是发展较早且较成熟的微重力试验方法,具有微重力水平高、成本低等优点,但存在微重力时间短、有限的空间和载荷能力限制燃烧诊断设备的问题,而延长其微重力时间的技术手段(如上抛运行模式)还有待进一步开发。由于其较短的微重力时间,该方法适用于燃烧时间较短的金属材料,如金属气溶胶;而对于燃烧时间较长的金属材料则需要借助其他试验手段。

1.2 抛物线运动法

研究表明,在落塔有限的微重力时间内,并不是所有的燃烧都能达到稳定状态;此外,从常重力到微重力转变的过程常伴有过渡流,这种过渡流有时会持续到试验结束^[6],这就需要更长的微重力时间以研究微重力下金属燃烧的全过程。因此,研究人员将目光投向了抛物线运动法(如美国 KC-135 飞机、法国 Zero-G A300 飞机),以获得更久的微重力环境。

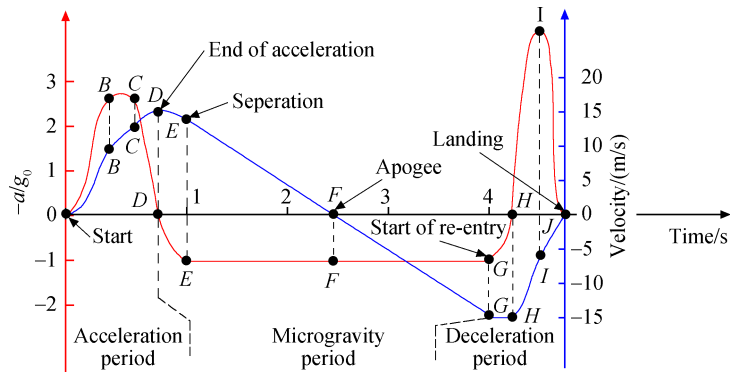


图2 上抛式落塔工作模式^[21]
Fig.2 Lift-up and then free-fall operation mode^[21]

1.2.1 抛物线飞行飞机

20 世纪 60 年代, NASA 利用抛物线飞行飞机获得了约为 20 s 的微重力环境(其单次抛物线飞行动作如图 3 所示, 图中 V 为飞机飞行速度, T_f 为飞机维持飞行动作的时长), 远大于落塔不超过 11 s 的微重力时间, 且一次飞行任务可进行 20~

60 次抛物线飞行动作, 极大延长微重力时间的同时还提高了有效载荷, 并允许试验员在微重力期间操作试验。由于大粒径金属颗粒燃烧时间较长, 且受流场的影响比金属气溶胶小, 因此常采用抛物线飞行飞机来研究微重力下大颗粒金属的点火燃烧特性。

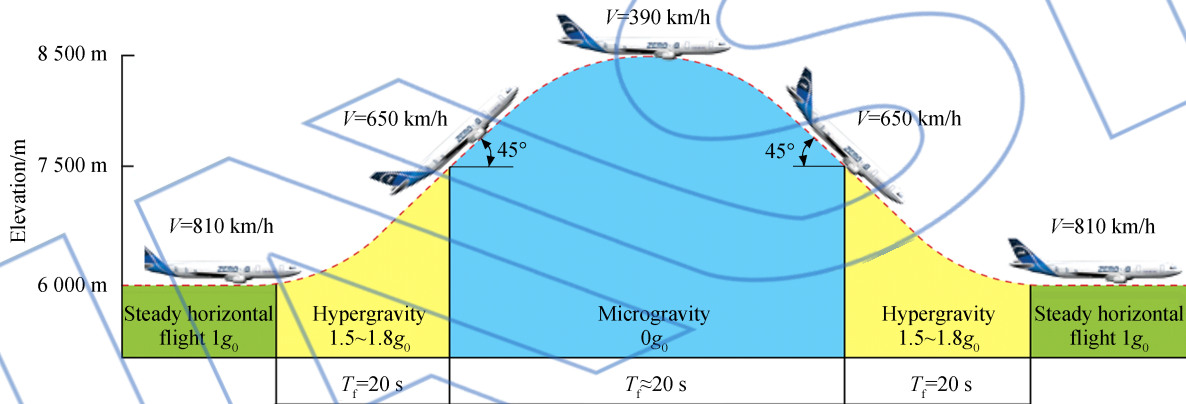


图3 抛物线飞行示意图^[18]
Fig.3 Parabolic flight manoeuvre profile schematic^[18]

部分抛物线飞行飞机产生的微重力环境参数如表 2 所示, 总体而言, 抛物线飞行飞机具有微重力时间较长、有效载荷大且允许人员实时操作的优点, 但最大的局限性在于微重力水平较低, 一般仅有 $10^{-2}g_0$, 最高不低于 $10^{-3}g_0$, 远不及落塔 $10^{-6}g_0$ 的微重力水平, 对于受流场影响大的燃烧过程, 这些残余重力的影响不能忽略。此外, 飞机失重前期和后期均对火焰结构和燃烧速度影响较大^[22], 这样使得稳定的微重力时间有所减少, 不足以观测某些燃烧速度较慢的金属燃烧全周期, 因此有待开发新的微重力试验方法。

1.2.2 探空火箭

探空火箭也是利用抛物线运动的原理产生微重力环境, 其工作原理如图 4(以空客国防与航天

表 2 抛物线飞行飞机的微重力环境参数

Table 2 Microgravity environmental parameters of parabolic flight

飞机型号	微重力时长 T_g/s	最大微重力水平 (g_{min}/g_0)
KC-135 ^[22]	25	10^{-2}
C-9 B ^[23]	>20	$10^{-3} \sim 10^{-2}$
DC-9 ^[24]	25~30	10^{-2}
Zero-G A300 ^[25]	22	10^{-2}
Falcon-20 ^[26]	20~25	10^{-2}

公司和瑞典航天公司的 MAXUS 探空火箭为例, 图中 T_f 为距离火箭发射后的时间)。探空火箭将

实验舱送入 100 km 高空后前锥体与发动机分离(该升空阶段共耗时约 86 s),此时实验舱由于惯性继续做减速上抛运动并开始进入微重力状态,直至达到 705 km 制高点后开始下落,当回到 100 km 高度时,微重力状态结束,该过程历时 740 s。与抛物线飞行飞机不同的是,探空火箭飞行高度一般接近地轨道甚至更高,因此可以获得长达 6~13 min 微重力水平为 $10^{-6}g_0 \sim 10^{-4}g_0$ 的微重力环境^[18-19]。自 20 世纪 50 年代以来,探空火箭一直用于科学研究,最初用于气象和高层大气研究,到了 1982,欧洲航空局开始用于微重力试验^[18],2017 年,麦吉尔大学 Palečka 等^[4]利用上述的 MAXUS-9 型探空火箭获得了长达 12 min 的微重力环境,以研究铁气溶胶的离散火焰传播机制,但目前极少见利用探空火箭研究微重力金属燃烧的报道。

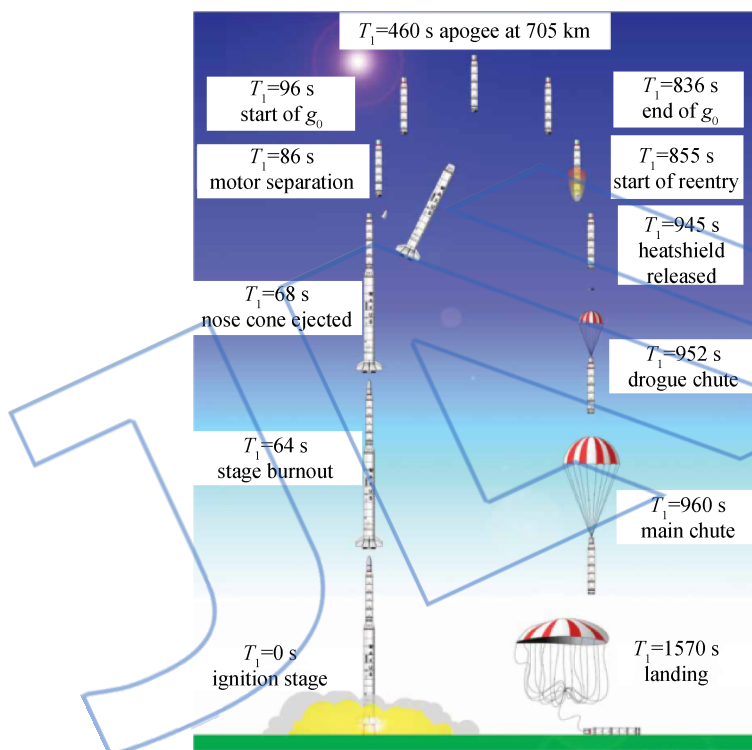


图4 MAXUS探空火箭飞行阶段示意图^[18]

Fig.4 MAXUS sounding rocket flight profile and major events schematic^[18]

总体而言,抛物线运动法能获得更久的微重力时间,有效载荷能力较大,且抛物线飞行飞机还允许试验员实时操作试验,但微重力水平比自由落体法低。目前,抛物线飞行飞机已经被广泛应用于微重力金属颗粒点火燃烧研究,但由于成本和技术原因,极少见采用探空火箭设备研究微重力金属燃烧的报道。

1.3 模拟微重力流场法

研究表明,微重力和常重力下燃烧的区别主要来源于重力导致的流场差异,重力消失首先会改变流场特性,从而影响燃烧行为。由于在地面上较难获得微重力环境,且成本较高,因此学者们尝试通过创造与微重力下相似的流场环境来模拟金属在微重力环境下的燃烧行为。

现有研究中,主要有2种方法:一是通过降低压力来减小浮力对燃烧的影响^[8,10];二是通过降低 Lewis 数和 Damköhler 数以构建低自然对流流场^[27-28]。虽然利用这种模拟微重力流场的方法研究微重力金属点火燃烧特性,能模拟出与微重力相似的某一燃烧现象,但仅是通过一些手段来降低自然对流或者浮力的影响,而重力的影响依然存在,模拟微重力流场与微重力环境对金属燃烧的影响机理不同,且目前无直接证据表明该方法具有可比性,因此具有一定局限性。但由于微重力环境的成本高昂,该方法为微重力金属燃烧的试验方法提供了一种思路,因此进一步研究模拟微重力流场影响金属燃烧的机理及其与微重力的相关性,以探索可行的微重力相似流场,将是未来的重要研究方向。

2 微重力下金属气溶胶燃烧

金属气溶胶燃烧特性的研究对于航天推进动力具有重要意义。为了避免颗粒沉降和湍流对金属气溶胶燃烧火焰传播的影响,目前学者们主要采用自由落体法获得稳定的气溶胶,微重力下金属气溶胶燃烧研究主要集中在火焰传播和结构方面^[29]。

2.1 金属气溶胶燃烧火焰传播与结构

美国新泽西理工学院的 Dreizin 团队利用 NASA 的 2.2 s 落塔,进行了大量微重力下微米级金属气溶胶燃烧的研究,主要包括镁^[30-31]、铝^[32-33]、锆^[34-35]、钛^[32]及镁铝合金^[32-33]等金属。他们观察到这些金属气溶胶燃烧火焰可分为预热区(传播速率为 0.15~3.0 m/s)和燃烧区(传播速率小于 1.0 m/s),其中预热区的宽度越来越宽,而燃烧区越来越窄,金属颗粒在这两个区的运动路径及热氧化行为决定着火焰结构和传播过程^[30-31]。

燃烧颗粒的运动方面,一方面,微重力下由于不需要通过射流分散金属颗粒,避免了湍流的影响,因此金属颗粒燃烧过程的细微运动得以突显。如微米级钛^[32]和锆^[34]颗粒在气溶胶燃烧时团聚成

大颗粒的过程,当钛颗粒间距小于 $120\text{ }\mu\text{m}$ 时, $12\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒能够捕捉周边小于 $5.5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒团聚成更大的颗粒,他们认为这是由于钛颗粒表面气质不平衡产生流向颗粒表面的定向 Stefan 流,从而诱导熔融金属颗粒在宏观上移动、碰撞而融合引起的。此外,他们还观察到钛颗粒燃烧过程中大量氧和氮溶解在熔融钛颗粒中,直至饱和后,由于氮的释放导致颗粒爆裂破碎的现象^[32]。另一方面,在微重力燃烧试验中出现了火焰过早熄灭导致反应不完全的现象,燃烧的金属颗粒由于惯性滞后于膨胀驱动的冷气体,随着氧的大量消耗而熄火,在熄火几百毫秒后,当氧气重新进入时,这些高温未燃尽的金属颗粒又重新点燃,这种现象在常重力试验中未出现^[30-31,33]。微重力下传质方式的这些改变,很大程度上还影响了燃烧反应过程。如镁气溶胶燃烧火焰速度大于 0.1 m/s 时,熔融金属氧化物由于相分离在燃烧产物表面形成氧化膜,而燃烧速度较慢时则有较多未反应的镁颗粒^[30-31]。

火焰传播速度方面,由于自然对流消失,换热方式以辐射换热为主,如微重力下辐射热损失会导致 $10\text{ }\mu\text{m}$ 铝气溶胶的燃烧速度降低 25% ^[13]。因此,颗粒粒径和颗粒间距通过引起辐射换热量的改变,将直接影响气溶胶的火焰传播速度。Goroshin 等^[26]和 Tang 等^[36-37]团队,以及 Lee 等^[38]团队分别利用 Falcon-20 和 KC-135 抛物线飞行飞机研究了微米级铁或铝气溶胶的定容层流燃烧,前者观察到当铁颗粒间距大于反应区时,存在新型蜂窝状火焰传播模式,如图 5,这种随机的颗粒分布情况(如颗粒间距的波动)决定着火焰传播速度和极限;后者研究表明气溶胶火焰传播速度主要取决于粉尘浓度(即颗粒间距),而非早期认为的湍流。但由于抛物线飞行飞机中的微重力环境伴有频繁的残余重力扰动,容易引起大颗粒气溶胶燃烧火焰扰动、偏移甚至熄灭^[26]。研究表明,高水平的微重力环境($10^{-6}g_0\sim 10^{-4}g_0$)能有效抑制浮力诱导流动引起的燃烧火焰前锋扰动^[39]。因此, Palečka 等^[4]利用 MAXUS-9 型探空火箭研究了 $33\text{ }\mu\text{m}$ 铁气溶胶离散火焰传播机制,表明当火焰传播由铁颗粒热扩散控制时,颗粒燃烧时间和氧浓度对火焰传播的影响极小,并用连续理论和离散火焰模型预测了火焰传播速度和颗粒浓度的关系。

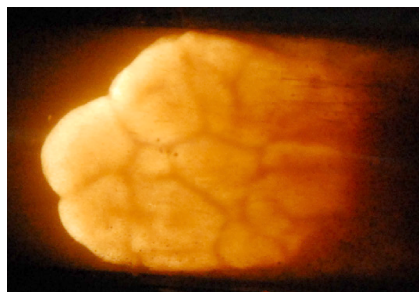


图5 微重力下 Ar/O_2 和铁($D_{10}=9.9\text{ }\mu\text{m}$, $D_{3,2}=13.7\text{ }\mu\text{m}$)的气溶胶的蜂窝状火焰结构^[26]

Fig.5 Cellular flame structure in aerosol of Ar/O_2 and iron dust ($D_{10}=9.9\text{ }\mu\text{m}$, $D_{3,2}=13.7\text{ }\mu\text{m}$) under microgravity^[26]

2.2 模拟微重力流场下金属气溶胶燃烧

在微重力条件下,由于缺乏自然对流向火焰区域输送氧化剂,火焰传播方式常表现为低流态机制。20 世纪末, Zik 和 Moses^[40-41]较早根据 Rayleigh 数(Ra , 当 Ra 低于一定值时可以忽略自然对流)在地面模拟了这种低流态火焰传播,搭建了如图 6 所示的试验装置,通过降低板间距 h 以削弱自然对流,从而获得具有较低 Ra 的流场,并观测到了火焰在低自然对流流场(如微重力流场)传播所特有的指进现象,结果表明,这种准二维流场与微重力一样能够削弱自然对流对火焰传播的影响。后来, Malchi 等^[27-28]将该方法应用在纳米铝粉火焰传播研究,同样在燃料上方 4 mm 处放置平板以减弱自然对流,在常重力下观测到了纳米铝粉低流态火焰传播过程。此外,由于纳米铝逆流火焰传播速度(V_f)远大于自然对流的给氧速度($V_{\text{ox, app}}$),即 $V_{\text{ox, app}}/V_f \leq 10^2$, 他们发现不用借助平板抑制自然流动也会出现指进现象,对此,他们采用 Lewis 数和 Damköhler 数的双重标准来解释指进现象,当 Damköhler 数小于 0.4 , 且 Lewis 数远小于 1 时(即燃料热扩散系数与氧化剂物质扩散系数之比远小于 1), 由氧化剂扩散主导的火焰传播就会转为燃料扩散主导,进而出现指进现象。显然,这种模拟微重力流场的方法条件较为苛刻,只适用于特殊情况下的金属粉。

可以看出,目前微重力下金属气溶胶燃烧的研究主要集中在环境因素对火焰传播和结构的影响,观察到了被重力掩盖的细微运动,如 Stefan 流引起的运动、氮释放导致的微爆、以及金属颗粒由于惯性滞后引起的火焰熄灭和复燃现象,并确定了粉尘浓度主导火焰传播速度的地位。但这些研究大多为现象研究,还有待进一步从理论角度深入分析其影响机理。

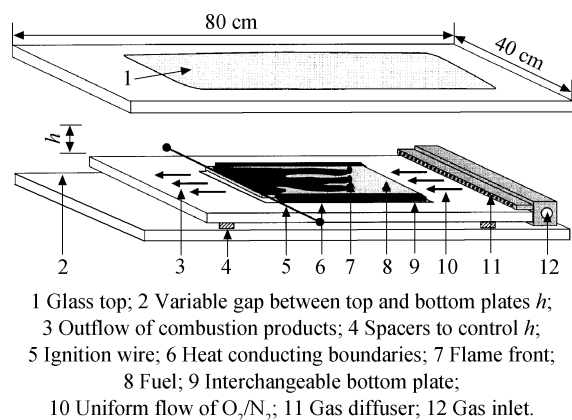


图 6 低 Ra 值流场的装置示意图^[41]
Fig.6 Schematic representation of the setup with a low Ra value schematic^[41]

3 微重力下金属颗粒燃烧

与气溶胶燃烧相似,微重力下金属颗粒燃烧也主要关注火焰结构、燃烧速率和燃烧行为,以及材料自身理化特性导致的燃烧特性差异。由于失重环境下难以固定微米级颗粒,一般采用毫米级颗粒,所以主要采用抛物线飞行飞机以满足燃烧所需的微重力时间,现有的微重力下金属颗粒燃烧试验研究主要以镁和铝为主。

3.1 金属颗粒燃烧火焰结构

20 世纪末,美国卡罗拉多大学 Abbud-Madrid 团队利用 DC-9^[42]和 KC-135 型^[2,22,43]抛物线飞行飞机获得了超过 20 s 重力水平为 0.01 g_0 的微重力环境,在常压 O_2 、 CO_2 或 CO 气氛中分别研究了重力

对不同直径(2、3、4 mm)的镁等径小圆柱体点火燃烧的影响。他们观察到镁颗粒稳定燃烧时,火焰结构为典型的微重力球型火焰,如图 7,只有残余重力和间歇性爆炸能扭曲该球形火焰结构^[2,43]。其中,间接性爆炸的形成过程是由于缺乏自然对流,金属氧化物在样本表面不断堆积形成一层氧化层,而氧化层内部不断产生金属蒸汽从而撑起氧化层,使其扩大至 2 倍原始直径后爆裂,并伴随着金属蒸汽及部分熔融金属喷出,这一过程超过 100 ms,随后重复数次氧化层形成和破裂的过程,直至熄灭^[42],如图 7。这一独特的辐射诱导金属爆炸(RIME)现象除了会破坏微重力球型火焰结构,导致火焰扰动外,甚至会使样本发生位移^[22]。此外,在 CO_2 或 CO 气氛中,产物表面还附着了一层碳化层,只有当镁蒸汽从不断增厚的包覆层喷出时,才能进一步反应燃烧^[2]。

而 Legrand 等^[20]利用 Zero-G A300 飞机研究了 1~2 mm 镁颗粒在 CO_2 气氛下的燃烧特性,同样观测到了脉动火焰,其周期与 Abbud-Madrid 团队^[42]测得的 RIME 周期相似,如图 8。但该脉冲火焰并非微重力环境下所特有,微重力和常重力环境下,均有 50% 的试验由初始稳定火焰转为脉动火焰,他们^[25]认为这种现象是由于高热损失和低热释放所致,在室温 CO_2 气氛中热释放低且热损失高所以燃烧不稳定,而在常重力高温 CO_2 气氛中则能稳定燃烧。该脉冲火焰不受重力影响的结论与 Abbud-Madrid 等^[42]观察到的特有的 RIME

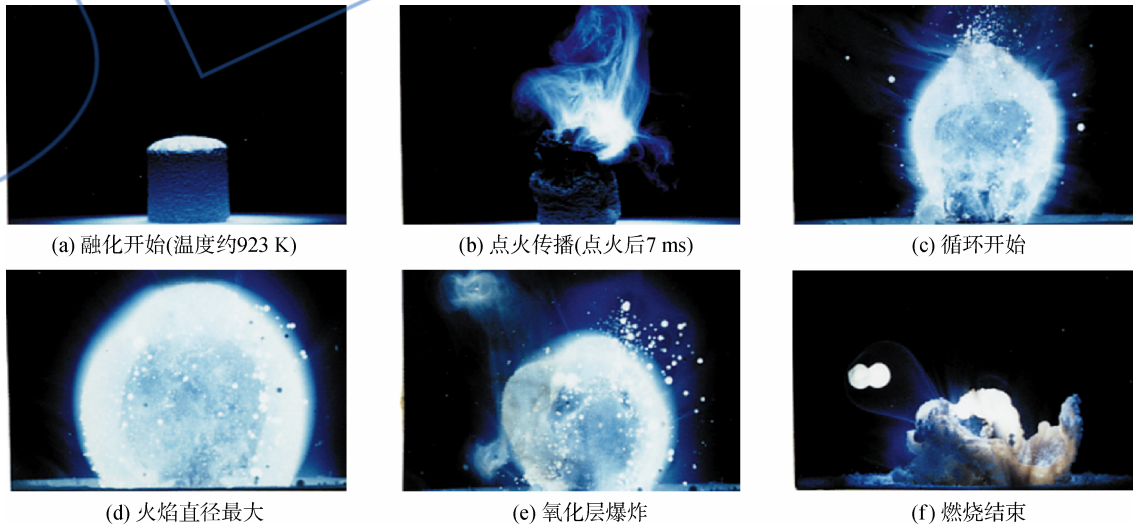
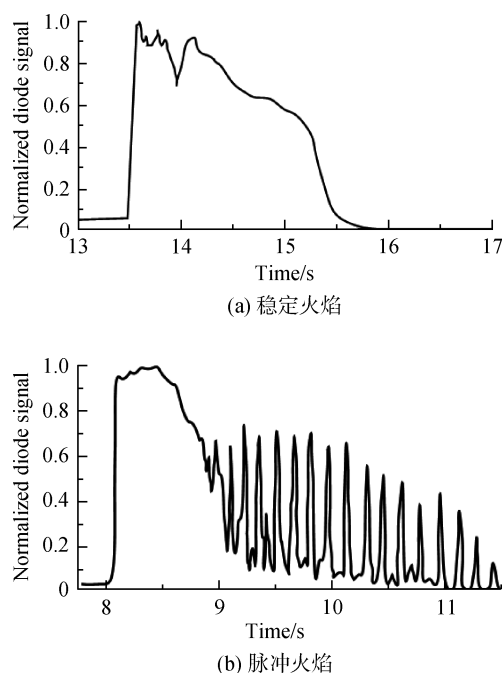
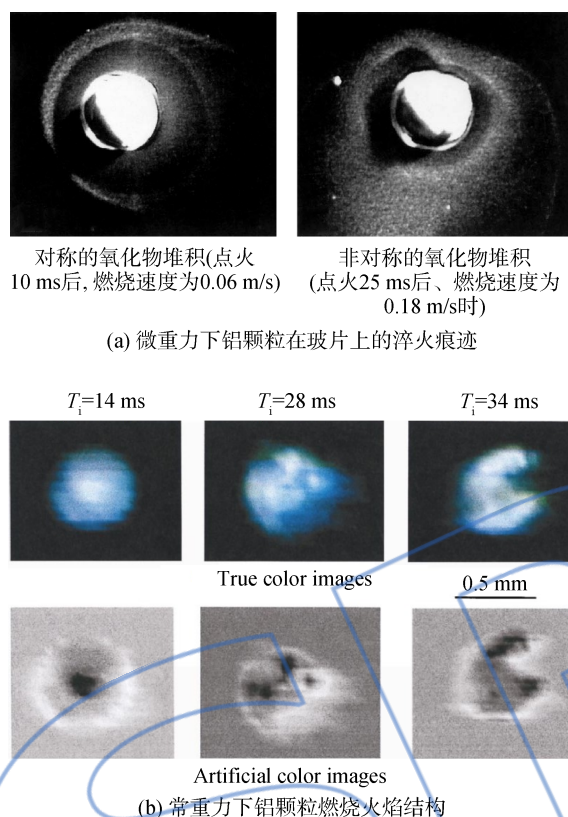
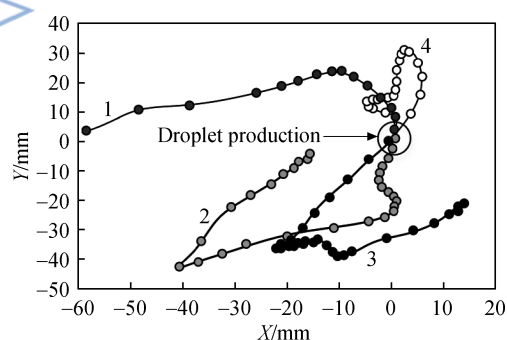


图 7 微重力 0.1 MPa 纯 O_2 下镁块的加热、点火、燃烧和辐射诱导金属爆炸(RIME)过程^[42]
Fig.7 Sequence of high-speed photographs of the heating, ignition, combustion events, and radiation-induced metal explosion (RIME) of bulk Mg specimens in pure O_2 at 0.1 MPa under microgravity conditions^[42]

图8 微重力下1.5 mm镁颗粒燃烧的光发射强度^[25]Fig.8 Light emission intensity profiles during combustion of 1.5 mm Mg particles in microgravity^[25]

现象有所差异,可能是由于点火源不同所致,前者采用热阻丝点燃,而后者采用氙灯持续加热环境温度。正如 Abbud-Madrid等^[2,22]测得镁在微重力下CO或CO₂中燃烧火焰较微弱,当氙灯关掉之后,火焰不能自持燃烧而熄灭。

早期普遍认为,对流和浮力扰动是导致铝颗粒球型扩散火焰转为非对称火焰燃烧的主要原因,但 Dreizin^[24]在微重力和常重力下均观测到了铝颗粒燃烧由对称球型火焰变为非对称火焰的过程,如图9(图中 T_i 为距离点火后的时间),且在相似的时间发生转变,因此认为铝颗粒燃烧火焰的非对称性是其固有属性(可能与燃烧的铝颗粒内部产生Al-O中间产物有关),而不是自然对流的结果,这与 Legrand等^[25]观察到的镁颗粒燃烧脉冲火焰不受重力影响的结论相似。此外,这种非对称性燃烧导致了铝颗粒无规则运动,如图10(图中X、Y分别为二维平面坐标轴;路线1~3为微重力下的颗粒运动轨迹,路线4为常重力下的颗粒运动轨迹,圆圈为颗粒的初始位置,轨迹每个点的时间间隔为8 ms),铝颗粒在微重力和常重力下燃烧的运动轨迹无显著区别,均存在速度突变。Dreizin^[44]进一步解释了相变对燃烧行为的影响,认为氧溶解在燃烧颗粒内部并发生共晶、偏晶和包晶的相变反应,从而影响燃烧行为,进而导致爆

图9 微重力和常重力下250 μm铝颗粒燃烧球型火焰转为非球型火焰的过程^[24]Fig.9 Evolution of 250 μm diameter aluminium particles flame structure upon transition from the spherically symmetric to non-symmetric combustion regime under microgravity or normal gravity^[24]图10 DC-9飞机上250 μm铝颗粒燃烧的运动轨迹^[24]Fig.10 Trajectories of 250 μm diameter aluminium particles produced and burned onboard the DC-9 aeroplane^[24]

炸、非对称火焰和温度骤变的现象,但尚未在低氧气氛下试验验证该推测。

为了在微重力环境下固定金属颗粒的位置以便更好地观察燃烧行为,学者曾采用声悬浮、电磁悬浮等技术作为重力补偿的方法^[45]。其中声悬浮是常用的无容器技术,但燃烧过程中的相变容易

导致悬浮不稳定,且声场会影响液滴蒸发,如 Ermoline 等^[46]研究表明,在微重力下声悬浮装置反射声场的不对称性不能有效地使样品保持水平稳定。而磁悬浮技术的外磁场可能扭曲分子电子轨道,从而改变颗粒碰撞概率,影响反应速率及物理行为^[45]。因此,无容器悬浮技术目前尚不能有效辅助微重力金属燃烧研究。

3.2 金属颗粒燃烧速率

微重力下,缺乏自然对流导致氧供给量少,且燃烧产物易附着在燃烧金属表面,使得镁燃烧时间显著延长,如4 mm 镁等径圆柱体在微重力纯氧下的平均燃烧时间为3.9 s 高于常重力下的2.2 s^[42];在微重力CO₂下燃烧时间为常重力CO₂下的2倍、常重力O₂下的5倍^[2]。然而,Dreizin^[24]利用DC-9飞机获得25~30 s微重力环境,研究了0.1~0.5 mm 铝颗粒在微重力下的燃烧行为,结果表明,微重力下铝颗粒燃烧时间和温度与常重力下相似,这与微重力会显著降低镁颗粒燃烧速度的结论不同^[2,42]。但由于两种样本粒径差异较大,导致燃烧时间尺度不同,且样本种类也不同,因此两者的可比性需要进一步研究。

常重力下,压力引起的流场变化对金属颗粒燃烧速度影响显著,如铝颗粒在1.0~5.0 MPa O₂/Ar气氛中的燃烧速度在0.2~0.4 mm²/s 范围内变化^[47]。为研究压力的变化在微重力下是否具有同样影响,Zenin 等^[47-48]利用自制自由落体平台获得了0.65 s微重力环境,研究0.1~7.0 MPa下185~600 μm 镁铝合金或铝颗粒在不同气氛中的燃烧特性,结果表明,微重力下,不同粒径镁铝合金和铝颗粒的燃烧时间与压力无显著的相关性,而是取决于初始直径。其中铝在O₂/N₂(体积分数之比为2:8)或CO₂气氛中的燃烧时间(T)与初始粒径(D)为 $KD^{1.5}$ 关系(其中 K 为常量),而在O₂/Ar(体积分数之比为2:8)气氛中为 KD^2 关系,其指数的差异是由于燃烧产物形成的氧化层厚度不同所致。

同样的,微重力下镁燃烧仍然为典型的扩散控制燃烧反应,其燃烧时间与粒径依旧符合 D^2 关系^[2],如图11所示。该结论与Legrand等^[25]采用热阻丝为点火源测得的试验结果保持一致,虽然微重力燃烧试验和扩散控制反应理论计算结果均表明自然对流通通过强化氧输送,能显著提高镁颗粒燃烧速率,但重力并未改变0.05~2.00 mm 镁颗粒在CO₂气氛中的燃烧机理。

为了进一步研究包覆改性对微重力下铝颗粒燃烧的影响,Dreizin 等^[32]研究表明,微重力下镁铝合金的火焰传播速度为0.5 m/s,大于铝的0.15~0.20 m/s,其具有更高的反应活性和燃尽率,该结论与常重力下一致。美国普渡大学的 Andrzejak 等^[23,49-50]利用NASA C-9B飞机(20~25 s, $10^{-3}g_0 \sim 10^{-2}g_0$),研究了用铁(质量分数 $w(\text{Fe})$ 分别为5%、25%、56%)或镍(质量分数 $w(\text{Ni})$ 分别为6%、29%、58%)包覆铝颗粒(包覆后粒径约2.5 mm)在微重力下惰性气氛中(Ar或CO₂)的点火燃烧特性。结果表明,由于微重力下无自然对流,较低的传质速率减缓了燃烧速率,如微重力下Al-Fe融合较为滞后,且该影响随粒径越大越显著^[23]。但熔融金属内部仍然能够混合均匀,从而维持颗粒燃烧,他们认为这主要是扩散作用所致。

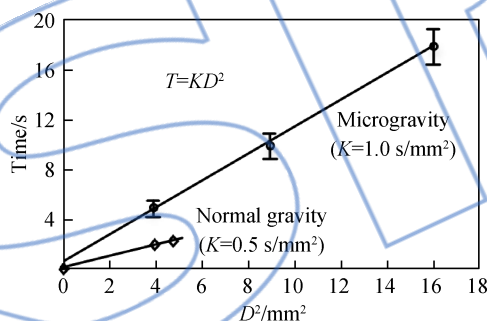


图11 微重力和常重力下镁颗粒在常压CO₂中的燃烧时间与颗粒直径关系^[2]

Fig.11 Burning time vs. initial sample diameter of Mg samples burning in CO₂ at 1 atmospheric pressure in microgravity and normal gravity^[2]

此外,研究表明某些燃烧特性并不受重力的影响。一方面,常重力和微重力下包覆铁的铝颗粒(Al@Fe)在1 523 K淬熄的燃烧产物无明显差异。另一方面,重力对点火温度的影响较小^[50],如表3所示,微重力对包覆镍的铝颗粒(Al@Ni)点火温度几乎没有影响,仅使Al@Fe颗粒的点火温度降低约373 K。该结论与Abbud-Madrid等^[42]微重力燃烧试验得到的浮力对镁和钛颗粒点火温度影响不大的结论相似。

3.3 模拟微重力流场下金属颗粒燃烧

20世纪末,美国密歇根大学Faeth团队^[51]根据Grashof数提出用压力的平方和重力(p^2g)评估射流燃烧过程中的浮力水平,即在常重力下可通过减小压强来降低浮力对扩散火焰结构的影响。基于上述的浮力评估方程,当压强增加时,流场中浮力水平以二次方速度增长,此时需要更高水平

表 3 微重力和常重力下 Al@Ni 和 Al@Fe 颗粒的点火温度^[49]Table 3 Ignition temperatures of Al@Ni and Al@Fe particles in the normal gravity or microgravity environment^[49] K

环境气氛	微重力			常重力		
	w(Ni)=29%	w(Ni)=58%	w(Fe)=56%	w(Ni)=29%	w(Ni)=58%	w(Fe)=56%
Ar	1 582±38	1 605±21	1 577±33	1 586±41	1 613±37	1 715±9
CO ₂	1 600±196	1 629±72	1 590±30	1 600±18	1 596±20	1 685±12

的微重力环境才能消除浮力对于流场和点火燃烧的影响。随后,科罗拉多大学 Feiereisen 等^[8]探讨了重力($0\sim 10g_0$)和压力($0.01\sim 1.00$ MPa)对纯氧下金属圆柱体(直径为 6 mm,高为 5 mm)传热模式的影响,计算结果表明,重力或压力的增加,均能有效增加对流换热热量,最终趋近某一极限值;并且,重力、气压分别为 $1g_0$ 、0.01 MPa 和 $0.01g_0$ 、0.1 MPa 两种条件下的温度场相似,因此他们认为 p^2g 可用于评估特定环境下(g 为环境重力,且 $g < 2.0g_0$; p 为环境压力,且 $p < 0.3$ MPa)的浮力水平,通过降低环境压力,能够在地面模拟微重力下的流场环境。相似的,Abbud-Madrid 等^[10]试验研究了 4 mm 钛和镁等径小圆柱分别在常重力低压($1g_0$ 、0.01 MPa)和微重力常压($0.01g_0$ 、0.1 MPa)纯氧气氛中的燃烧行为,结果表明,两个工况下的火焰传播速率相近,且进一步降低重力水平或压力均能降低钛表面火焰传播速度;但由于钛为非均相燃烧,而镁为均相燃烧,在 0.01 MPa 下镁无法稳定燃烧,因此 p^2g 评估浮力的应用范围还需进一步研究。

目前,微重力下金属颗粒燃烧的研究同样集中在火焰结构、燃烧速率和燃烧行为方面,但研究材料的种类相对单一,主要为镁和铝。除了观察到 RIME 这一特殊的现象外,还发现了一些不受重力影响的金属燃烧固有属性,如相变引起的铝颗粒非对称燃烧火焰、脉冲火焰、燃烧速度与粒径的关系、点火温度受重力影响不大。但还存在一些不同观点,包括 RIME 与脉动火焰的影响关系、以及微重力使镁燃烧速度降低但对铝影响不大等,还有待进一步研究。

4 微重力下金属棒燃烧

航天探索中存在金属燃烧发生火灾的风险,因此微重力下火焰在金属表面传播的研究意义重大。Steinberg 等^[7,52]利用 NASA 的 2.2 s 落塔研究了在 $0.1\sim 6.9$ MPa 氧气下金属材料的燃烧特性,其中金属材料包括:316 不锈钢、镍 200、蒙耐尔 K-

500、镁、铁和铜等直径为 $1\sim 3.2$ mm 的金属棒,以及片状和网状 316 不锈钢。

结果表明,首先,微重力下和常重力下,棒径降低和氧压增加均会导致熔融界面后退速率(可视为燃烧速度)增加,但在微重力下直径为 1 mm 的金属棒熔融界面移动速率比常重力下快 2~3 倍,而直径为 2、3 mm 的金属棒快 1.5~2 倍。这是由于微重力下熔融球中反应物堆积(不会像常重力下分离),降低了热量的损失,如图 12 所示(图中 T_i 为距离点火后的时间)。因此,这种熔融球的堆积极大增强了样品的可燃性和燃尽率,如在常重力 68.9 MPa 氧分压下,铜、镍 200、蒙耐尔 K-500 均不可燃烧,而在微重力 6.9 MPa 氧压下则可燃。其次,熔融金属内部仍然能够混合均匀,从

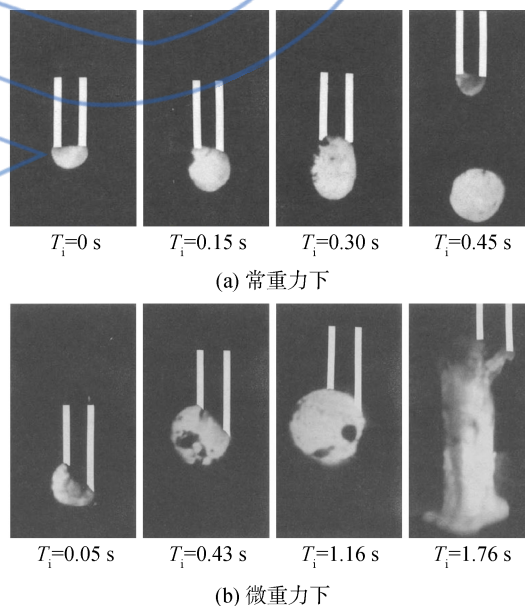


图 12 常重力和微重力下直径为 3.2 mm 的铁棒在 6.9 MPa 氧分压下燃烧形成的熔融球的产生与脱落过程 (白线为铁棒的边界)^[52]

Fig.12 Growth and detachment of molten ball formed on burning iron rod (3.2 mm in diameter) at 6.9 MPa oxygen pressure under normal gravity and microgravity (white lines were added to photographs to show the boundaries of the rod)^[52]

而维持颗粒燃烧,这与 Andrzejak 等^[23]的结论一致,但前者认为这是表面张力诱导熔池内循环所致,而后者认为要是扩散作用的结果。再次,一些容易被重力影响的弱作用力在微重力环境下得以显现,例如微重力下毛细血管效应在导热和传质起到了一定作用,且不存在熔融金属分离带走热量的情况,所以 316 不锈钢网可以燃烧,而常重力下受浮力的影响则不能燃烧。最后,Steinberg 等^[52]和 Wilson 等^[9]进一步分析了氧化物在反应区堆积导致了温度和传质的变化对燃烧产物的影响,他们发现微重力下 316 不锈钢会产生挥发性燃烧产物(氧化铬),而常重力下则没有,这可能是由于其燃烧可达的最高温度不同所致。

研究表明,重力的消失可能直接改变材料的燃烧性能,但微重力下棒状或其他形状的金属材料燃烧的研究极少,不足以满足航天金属材料火灾预防研究需求。现有研究中还有诸多机理尚未探明,如微重力下熔融金属混合理理;并且材料的理化特性对于火焰在金属表面的传播影响极大,因此迫切需要进一步研究。

5 结论与展望

微重力下金属燃烧特性的研究不仅有利于推动金属材料在推进剂中的应用,还有助于预防航天金属火灾。因此,本文针对微重力试验手段,以及金属材料的气溶胶、颗粒、棒状 3 种状态,综述了金属材料在微重力环境下点火燃烧的试验研究进展。

现有研究中,主要利用自由落体、抛物线运动和模拟微重力流场这 3 种原理获得微重力试验条件,其中落塔和抛物线飞行飞机是目前主要的两个研究手段,前者微重力水平高但微重力时间短,而后者则相反。

微重力下,无浮力诱导自然对流的流场变化改变了传热传质方式,从而影响金属燃烧特性和火焰传播过程。现有研究主要关注微重力下金属材料燃烧的火焰结构、火焰传播和燃烧行为,观察到了被重力掩盖的细微运动和材料固有属性,如 Stefan 流引起的运动、氮释放导致的微爆、金属颗粒惯性滞后引起的火焰熄灭和复燃现象、相变引起的铝颗粒非对称性火焰(早期认为是重力存在下,对流和浮力扰动所致)、以及弱作用力对燃烧的影响,因此微重力环境有利于揭示金属燃烧的固有属性。但这些研究更多还停留在现象研究,

尚未深入到机理,并且还存在一些分歧,如 RIME 与脉动火焰的影响关系、微重力下熔融金属混合理理、以及微重力使镁燃烧速度降低但对铝影响不大等,还有待进一步研究。

为促进金属材料在航天探索中的应用,应该重点进行如下研究:

1) 微重力试验条件方面,从改进现有微重力设备(如上抛式落塔)和采用微重力设备(如探空火箭、在轨航天器等)2 个途径,为微重力金属燃烧研究提供试验基础;并进一步研究模拟微重力流场影响金属燃烧的机理及其与微重力的相关性,以探索可行的微重力相似流场。

2) 深入研究被重力掩盖的弱效应对金属燃烧行为的影响,包括热扩散、表面张力、相变过程等弱作用力对火焰传播、结构、燃烧行为、以及传热传质的影响,从而揭示金属燃烧的固有特性。

3) 从微观机理的角度,进一步研究微重力下传热传质的改变对燃烧化学反应的影响,深入研究低传质速率和无对流传热下对化学反应动力学过程的影响。

参考文献:

- [1] SUNDARAM D, YANG V, YETTER R A. Metal-based nanoenergetic materials: synthesis, properties, and applications[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, 61(1):293-365.
- [2] ABBUD-MADRID A, MODAK A, BRANCH M C, et al. Combustion of magnesium with carbon dioxide and carbon monoxide at low gravity[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(4):852-859.
- [3] CATALDO C E. Lox/Gox related failures during space shuttle main engine development[R]. NASA TM-82424, 1981.
- [4] PALEČKA J, SNIATOWSKY J, GOROSHIN S, et al. A new kind of flame: observation of the discrete flame propagation regime in iron particle suspensions in microgravity[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 209(11):180-186.
- [5] SACKSTEDER K R. Facilities for microgravity combustion research[R]. NASA TM-102014 IAF-88-355, 1988.
- [6] SHARP L M, DIETRICH D L, MOTIL B J. Microgravity fluids and combustion research at NASA Glenn Research Center[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 26(2):439-450.
- [7] STEINBERG T A, WILSON D B, BENZ F J. Microgravity and normal gravity combustion of metals and alloys in high pressure oxygen[C]// *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres*. Philadelphia, US: American Society for Testing and Materials, 1993:133-145.
- [8] FEIEREISEN T J, BRANCH M C, ABBUD-MADRID A, et al. Gravity and pressure effects on the steady-state temperature of heated metal specimens in a pure oxygen atmosphere

- [C]//Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres. Philadelphia, US: American Society for Testing and Materials, 1993:196-210.
- [9] WILSON D B, STEINBERG T A, DEWIT J R. The presence of excess oxygen in burning metallic materials[C]//Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres. West Conshohocken, US: American Society for Testing and Materials, 2000:145-162.
- [10] ABBUD-MADRID A, MCKNIGHT C, BRANCH M C, et al. Buoyancy and pressure effects on bulk metal-oxygen reactions[C]//Proceedings of 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998:570-576.
- [11] KUMAGAI S, ISODA H. Combustion of fuel droplets in a falling chamber[J]. Symposium (International) on Combustion, 1957, 6(1):726-731.
- [12] KOLESNIKOV V J, KUSNEZOV G P, LEPUNSKII O I. Some observations on aluminium particle combustion at zero gravity[J]. Fizika Gorenia i Vzryva, 1978, 16(5):146-148.
- [13] BALLAL D R. Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1983, 385(1788):21-51.
- [14] PROTSCH R W. Eurotube-Saar: A European drop shaft facility[J]. Advances in Space Research, 1991, 11(7):119-121.
- [15] 刘春辉. 微重力落塔试验设备[J]. 强度与环境, 1993, 20(4):41-52.
- LIU Chunhui. Microgravity drop tower facilities[J]. Structure and Environment Engineering, 1993, 20(4):41-52. (in Chinese)
- [16] NASA. 2.2 second drop tower[EB/OL]. [2020-05-10]. <https://www1.grc.nasa.gov/facilities/drop/>.
- [17] NASA. Zero gravity research facility[EB/OL]. [2020-05-10]. <https://www1.grc.nasa.gov/facilities/zero-g>.
- [18] REITER T. ESA users guide to low gravity platforms[M]. Paris: Directorate of Human Spaceflight and Operations, European Space Agency, 2014.
- [19] 张孝谦, 韦明呈. 微重力燃烧研究用落塔[J]. 工程热物理学报, 1995, 16(4):503-506.
- ZHANG Xiaoqian, WEI Mingcheng. Microgravity drop tower[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1995, 16(4):503-506. (in Chinese)
- [20] 中国科学院力学研究所. 微重力落塔[EB/OL]. [2020-05-10]. http://www.imech.ac.cn/zcxt/kyzb/tszb/201212/t20121221_3726953.html.
- [21] 张孝谦, 韦明呈, 张培元, 等. 微重力燃烧实验落塔技术改进[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(4):519-523.
- ZHANG Xiaoqian, WEI Mingcheng, ZHANG Peiyuan, et al. A lift-up and free-fall experiment technique for studying microgravity combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1998, 19(4):519-523. (in Chinese)
- [22] ABBUD-MADRID A, OMALY P, BRANCH M C, et al. Combustion of metals in reduced-gravity and extraterrestrial environments[C]//Proceedings of 5th International Microgravity Combustion Workshop. Cleveland, US: National Aeronautics and Space Administration, 1999:211-214.
- [23] ANDRZEJAK T A, SHAFIROVICH E, VAMA A. Ignition of aluminum particles coated by nickel or iron studies under normal and reduced gravity conditions[C]//Proceedings of 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Cincinnati, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007:1-16.
- [24] DREIZIN E L. Experimental study of aluminum particle flame evolution in normal and micro-gravity[J]. Combustion and Flame, 1999, 116(3):323-333.
- [25] LEGRAND B, CHAUVEAU C, SHAFIROVICH E, et al. Combustion of magnesium particles in carbon dioxide under microgravity conditions[J]. Journal de Physique, 2001, 11(6):311-314.
- [26] GOROSHIN S, TANG F D, HIGGINS A J, et al. Laminar dust flames in a reduced-gravity environment[J]. Acta Astronautica, 2011, 68(7/8):656-666.
- [27] MALCHI J Y, YETTER R A, SON S F, et al. Nano-aluminum flame spread with fingering combustion instabilities[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2):2617-2624.
- [28] MALCHI J Y, PROSSER J, YETTER R A, et al. Realizing microgravity flame spread characteristics at 1 g over a bed of nano-aluminum powder[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2):2437-2444.
- [29] PU Y, PODFILIPSKI J, JAROSINSKI J. Constant volume combustion of aluminum and cornstarch dust in microgravity[J]. Combustion Science and Technology, 1998, 135(1):255-267.
- [30] DREIZIN E L, HOFFMANN V K. Constant pressure combustion of aerosol of coarse magnesium particles in microgravity[J]. Combustion and Flame, 1999, 118(1/2):262-280.
- [31] DREIZIN E L, HOFFMANN V K. Experiments on magnesium aerosol combustion in microgravity[J]. Combustion and Flame, 2000, 122(1):20-29.
- [32] DREIZIN E L, SHOSHIN Y L, MURDY R S, et al. Reaction mechanisms and particle interaction in burning two-phase systems[R]. NASA/CP-2001-210826, 2001.
- [33] DREIZIN E L, SHOSHIN Y L, MURDY R S, et al. Constant pressure flames of aluminum and aluminum-magnesium mechanical alloy aerosols in microgravity[J]. Combustion and Flame, 2002, 130(4):381-385.
- [34] DREIZIN E L, HOFFMANN V K, VICENZI E P. High-temperature phases in ternary Zr-O-N systems[J]. Journal of Materials Research, 1999, 14(10):3840-3842.
- [35] DREIZIN E L, BERMAN C H, HOFFMANN V K, et al. Combustion of aerosolized metal particles in microgravity[C]//Proceedings of 5th International Microgravity Combustion Workshop. Cleveland, US: National Aeronautics and Space Administration, 1999:215-218.
- [36] TANG F D, GOROSHIN S, HIGGINS A J, et al. Flame

- propagation and quenching in iron dust clouds[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2):1905-1912.
- [37] TANG F D, GOROSHIN S, HIGGINS A J. Modes of particle combustion in iron dust flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2):1975-1982.
- [38] LEE J, PERALDI O, KNYSTAUTAS R. Microgravity combustion of dust suspension[C]//Proceedings of 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993:714-720.
- [39] RONNEY P D. Premixed-gas flames, microgravity combustion: fire in free fall[M]. London: Academic Press, 2002.
- [40] ZIK O, MOSES E. Fingering instability in combustion: An extended view[J]. Physical Review: E, 1999, 60(1):518-531.
- [41] ZIK O, MOSES E. Fingering instability in solid fuel combustion: The characteristic scales of the developed state[J]. Symposium (International) on Combustion, 1998, 27(2):2815-2820.
- [42] ABBUD-MADRID A, BRANCH M C, DAILY J W. Ignition and combustion of bulk titanium and magnesium at normal and reduced gravity[J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(2):1929-1936.
- [43] ABBUD-MADRID A, STROUD C, OMALY P, et al. Combustion of bulk magnesium in carbon dioxide under reduced-gravity conditions[C]//Proceedings of 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999:695-703.
- [44] DREIZIN E L. Effect of phase changes on metal-particle combustion processes[J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2003, 39(6):681-693.
- [45] CHECHULIN V L. About the effect of magnetic field on the quality of combustion of liquid organic fuel[J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2009, 82(4):748-750.
- [46] ERMOLINE A, SCHOENITZ M, HOFFMANN V K, et al. Experimental technique for studying high-temperature phases in reactive molten metal based systems[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(12):5177-5185.
- [47] ZENIN A, KUZNETSOV G, KOLESNIKOV V. Combustion of aluminum-magnesium alloy particles under microgravity conditions[J]. Russian Journal of Physical Chemistry: B, 2011, 5(1):84-96.
- [48] ZENIN A, KUSNEZOV G, KOLESNIKOV V. Physics of aluminum particle combustion at zero-gravity[C]//Proceedings of 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999:696-701.
- [49] ANDRZEJAK T A, SHAFIRVOICH E, VARMA A. Ignition of iron-coated and nickel-coated aluminum particles under normal- and reduced-gravity conditions[J]. Journal of Propulsion and Power, 2008, 24(4):805-813.
- [50] ANDRZEJAK T A. Experimental studies on the ignition of single Ni/Al, Fe/Al, and Ti particles[D]. West Lafayette, US: Purdue University, 2007.
- [51] MORTAZAVI S, SUNDERLAND P B, JURNG J, et al. Structure and soot properties of non-buoyant laminar round-jet diffusion flames[C]//Proceedings of 2nd International Microgravity Combustion Workshop. Cleveland, US: National Aeronautics and Space Administration, 1993:107-113.
- [52] STEINBERG T A, WILSON D B, BENZ F. The burning of metals and alloys in microgravity[J]. Combustion and Flame, 1992, 88(3/4):309-320.

(编辑:张 雪)