

文章编号: 1006-9941(2013)04-0533-06

促进硼颗粒点火和燃烧的方法的研究进展

席剑飞, 刘建忠, 李和平, 汪 洋, 张彦威, 周俊虎, 岑可法

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 汇集、评述了促进硼颗粒点火和燃烧的方法, 包括选择合适粒径的无定形硼、提高环境温度和压力、在环境气氛中添加些氟化物和 水蒸气以及硼颗粒的包覆和添加剂的改性。解释了各种促进方法的机理。分析并提出了促进硼颗粒点火和燃烧中存在的问题及需要解决这些问题的技术途径。附参考文献 19 篇。

关键词: 物理化学; 硼; 点火; 燃烧; 促进方法; 包覆

中图分类号: TJ7; V512; O64

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.025

1 引 言

固体火箭冲压发动机有着比冲高、结构简单等优点, 这使它很适合作战术导弹的动力装置。固体火箭冲压发动机需要采用贫氧推进剂, 而硼作为固体贫氧推进剂的燃料有着独特的优势。硼的质量热值为 $58.28 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别是镁和铝的 2.3 倍和 1.9 倍, 它的体积热值为 $136.38 \text{ MJ} \cdot \text{cm}^{-3}$, 分别是镁和铝的 3.09 倍和 1.66 倍。同时硼的燃烧产物洁净, 对环境无污染。

虽然硼燃料具有许多优点, 但它作为推进剂高能组分使用时存在一些问题。由于硼自身的高熔点和 高沸点以及它表面的氧化膜 B_2O_3 的高沸点, 导致硼的点火性能差, 燃尽困难, 燃烧效率低, 使它的热值不能得到充分利用。因此, 寻找硼颗粒点火与燃烧的促进方法对于含硼推进剂以及固冲发动机的发展与应用有着重要的意义。本文综述了硼颗粒点火燃烧的促进方法及其机理, 并对存在的问题和解决的技术途径作了分析。

2 硼颗粒点火燃烧促进方法

2.1 选择合适晶型和粒度的硼

硼有晶体硼和无定形硼两种, 不同形态硼颗粒的点火燃烧特性有较大差别。工业上生产的硼颗粒粒径

范围很广, 从纳米级到厘米级不等, 粒径不同的硼颗粒的点火燃烧性能也各不相同。

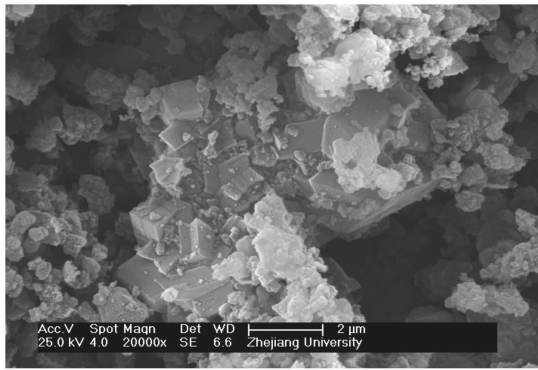
Mohan 和 Willisms^[1] 对粒径为 $62 \sim 105 \mu\text{m}$ 的晶体硼和 $150 \mu\text{m}$ 左右的无定形硼进行了激光点火燃烧实验。研究发现, 晶体硼相对于无定形硼更难点火, 晶体硼呈现出长时间的单面燃烧, 火焰传播速度较慢, 且最高燃烧温度较低。而无定形硼的燃烧则十分剧烈, 实验中无定形硼每次都能在 1 ms 之内完成燃烧, 接近爆燃的程度。Mohan 等^[1] 认为导致不同的点火燃烧现象的原因在于, 无定形硼其实是由亚微米粒径范围的小颗粒硼结块形成的。这种结构使无定形硼具有非常大的表面积, 能够有效地吸收激光的能量, 使其比晶体硼更容易点火和燃烧。笔者拍摄了无定形硼和晶体硼的扫描电镜照片, 见图 1, 从照片上可以清楚地观察到无定形硼和晶体硼微观结构的差异。

Macek^[2]、Li 和 Willisms^[3]、Yeh 和 Kuo^[4]、Gregory Young^[5] 等对不同粒径的硼颗粒进行了点火燃烧试验并得到相应的燃烧时间。Macek 的实验中硼颗粒粒径为 $30 \sim 100 \mu\text{m}$, 得到的燃烧时间基本符合 D^2 定律(即燃烧时间 t_b 与 D^2 成正比, D 为颗粒直径), 说明燃烧过程属于扩散控制。Li 和 Willisms 实验硼颗粒粒径为 $7 \sim 10 \mu\text{m}$, Yeh 和 Kuo 实验硼颗粒粒径为 $2 \sim 3 \mu\text{m}$, 他们得到的颗粒燃烧时间符合 D^1 定律, 燃烧受反应动力学控制。Gregory Young 实验硼颗粒粒径为 200 nm , 得到燃烧时间对粒径的关联性继续减小, 至 $t_b \sim D^{0.22}$, 这可能和硼颗粒的结团效应有关。上述结果表明, 硼颗粒的粒径越小, 燃烧时间越短, 越容易燃烧, 且粒径越大这种效果越明显。

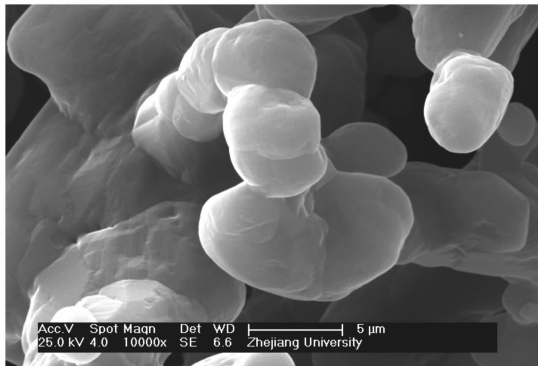
收稿日期: 2012-04-25; 修回日期: 2012-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(109203-N11119)

作者简介: 席剑飞(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为固体火箭推进剂技术。e-mail: jianfeixi@126.com



a. amorphous boron



b. crystalline boron

图1 无定形硼和晶体硼的扫描电镜照片

Fig.1 SEM photographs of amorphous boron and crystalline boron

在实际应用中,为了更好的点火和燃烧,应尽量选无定形硼。由上述 Gregory Young 等人的研究结果可知,硼颗粒粒径越大时,减小粒径对燃烧时间降低的效果越好,当硼颗粒粒径较小(小于 $1 \mu\text{m}$)时,进一步减小粒径对于燃烧时间的影响不大。故实际应用时,要综合考虑硼燃料成本(粒径越小的硼颗粒制造过程中消耗的能量越大,成本越高)和燃烧性能两方面因素,一般粒径为 $1 \mu\text{m}$ 左右的硼已能满足燃烧性能的要求。

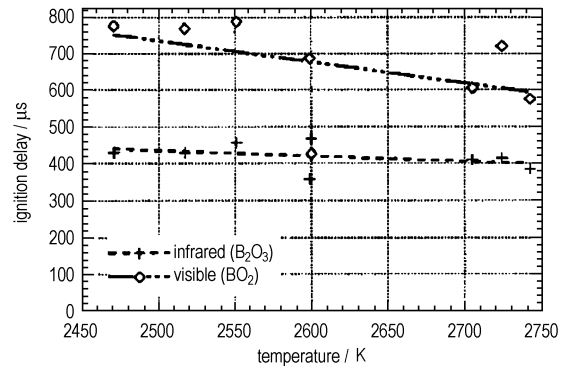
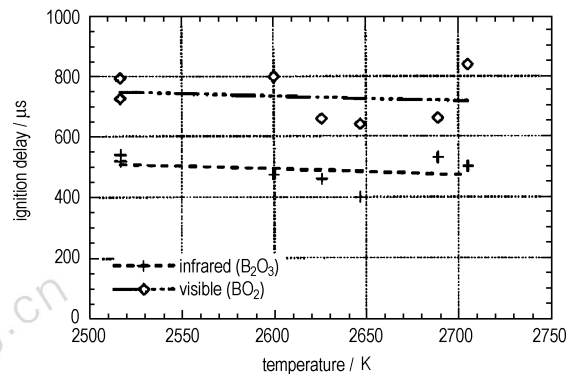
2.2 燃烧环境的优化

2.2.1 维持合适的温度和压力

由阿累尼乌斯定律(Arrhenius)定律可得,其他条件一定时,温度越高,化学反应速率越大。同时,根据质量作用定律,反应物浓度越大,化学反应速率越快。对于气相反应物来说,外界环境压力越大,浓度就越大。由此可得,增大环境温度和压力,将加快化学反应的速率。这一点对硼燃烧同样适用。

Krier^[6]等研究了晶体硼颗粒在纯氧中温度对点火特性的影响,实验压力为 0.85 MPa ,点火延迟时间

通过“光谱点火延迟”和“可见点火延迟”来表征,实验结果见图2。从图2中可以看出,随着环境温度的升高,硼颗粒点火延迟时间越来越短。对于平均粒径为 $7.2 \mu\text{m}$ 的硼颗粒,当环境温度从 2450 K 提高到 2750 K 时,“光谱点火延迟时间”从 $440 \mu\text{s}$ 降为 $400 \mu\text{s}$,“可见点火延迟时间”从 $770 \mu\text{s}$ 降为 $580 \mu\text{s}$;对于平均粒径为 $12.0 \mu\text{m}$ 的硼颗粒,当环境温度从 2500 K 提高到 2700 K 时,“光谱点火延迟时间”从 $520 \mu\text{s}$ 降为 $460 \mu\text{s}$,“可见点火延迟时间”从 $760 \mu\text{s}$ 降为 $720 \mu\text{s}$ 。

a. particles size of $7.2 \mu\text{m}$ b. particles size of $12.0 \mu\text{m}$ 图2 两种平均粒径晶体硼颗粒点火延迟时间随温度的变化关系^[6]Fig.2 The relation of ignition delay time vs temperature for crystalline boron particles with different particle size^[6]

Udal^[7]利用激波管技术研究了 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 晶体硼颗粒在不同压力下的点火特性。研究表明,随着压力升高,硼颗粒点火温度降低。 0.1 MPa 时点火温度为 1900 K , 2 MPa 时点火温度降为 1400 K 。

增加环境温度和压力可以促进硼颗粒的点火和燃烧,在实际应用中,可以从这一原理出发,寻找多种硼颗粒的点火燃烧促进方法。比如添加一些易点火、高热值的金属如 Mg 、 Ti 、 Zr 等进行引燃,利用这些金属

放出的热量使环境温度维持在较高水平。增大压力的本质是为了增大反应物的浓度,故在实际应用中应尽量减少不参加硼燃烧放热反应的物质如氮气、惰性气体的含量,这样可以相对增大反应物的浓度。

2.2.2 促进硼颗粒点火燃烧的环境气氛

硼颗粒在不同的环境气氛中呈现出不同的点火燃烧特性,氧气浓度、氧化剂种类、环境湿度等因素均对硼颗粒的点火燃烧有着不同程度的影响。

Macek^[2]将晶体硼注射到高温氧化性气氛中以观察晶体硼的点火燃烧情况,高温氧化性气氛由一氧化碳或丙烷在平焰燃烧器中掺混燃烧而得。对比各种实验工况发现,当环境中氧气摩尔分数从0.08增大到0.37时,硼颗粒点火延迟时间由3.6 ms降为2.1 ms,燃烧时间由7.4 ms降为3.3 ms。环境中增加了摩尔分数为0.19的水蒸气之后,点火延迟时间由4.8 ms降为3.8 ms,燃烧时间由5.7 ms变为6.1 ms。由此可见,增加氧气浓度会使硼的点火延迟时间和燃烧时间减小,当有水蒸气存在时,能降低点火延迟时间。

Gurevich^[8]等对硼颗粒在热气流中的点火和燃烧进行了研究。热气流发生装置为等离子体发生器,如图3所示。其中,7-10为硼颗粒注射系统。实验过程中硼颗粒通过进样管10进入反应腔与热气流发生反应。研究表明,硼颗粒的点火温度随氧含量和水蒸气含量的增加而降低。

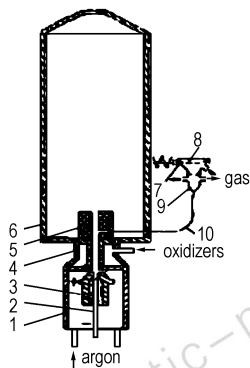


图3 等离子体点火燃烧实验装置^[8]

1—等离子体发生器,2—钨阴极,3—铜阳极,4—氧化性气流混合腔,5—气流喷嘴,6—可视化反应腔,7—送料机,8—加料斗,9—破碎腔,10—进样管

Fig.3 Experimental apparatus using plasma ignition^[8]

1—plasma generator, 2—tungsten cathode, 3—copper anode, 4—mixer, 5—tubular ceramic nozzle, 6—metal chamber, 7—feeder, 8—hopper, 9—chamber, 10—tube

Henderson^[9]等研究了硼颗粒在氟气中的点火燃烧情况。硼和氟气在室温下就能反应并很快地自动加速到硼的熔点(2300 K)以上,反应十分剧烈。而在氧气气氛下,必须使系统达到足够高的温度才能发生点火和燃烧。氟气的化学性质十分活泼,具有很强的氧化性,同时氟气和硼的主要燃烧产物 BF_3 在室温下是气态,不存在于硼颗粒表面形成液态氧化膜而阻碍硼点火和燃烧的现象,故硼颗粒在氟气中点火和燃烧比在氧气中剧烈得多。

Krier和Pirman^[10]等研究了硼颗粒在干燥空气、含 H_2O 以及含氟环境中的点火燃烧特性。结果表明,水蒸气和六氟化硫将减小硼颗粒的点火延迟时间,而对于燃烧时间则没有影响。对于20 μm 的晶体硼颗粒, H_2O 和 SF_6 将分别使点火温度从2500 K(纯氧气氛)降低至2200 K和1900 K。

从以上描述可以看出,增大氧化剂浓度、采用氧化性更强的氧化剂可以促进硼颗粒的点火和燃烧。在环境气氛中增加某些特定气体如氟化物、氯化物等将有利于硼的点火。水蒸气能促进硼的点火是因为 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 能与硼颗粒表面的液态氧化膜 $\text{B}_2\text{O}_3(\text{l})$ 发生反应: $\text{B}_2\text{O}_3(\text{l}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \longrightarrow 2\text{HBO}_2(\text{g})$,该反应可去除硼粒子表面的氧化膜,改善硼颗粒的点火性能。Brown^[11]等研究了B/H/O/C/F体系的动力学模型,研究表明, $\text{OBF}(\text{g})$ 是主要的高温燃烧产物。由此推断,含氟的气氛有利于硼的点火可能是因为氟存在时,会发生相应的化学反应生成 $\text{OBF}(\text{g})$ 等物质,减小液态氧化膜 $\text{B}_2\text{O}_3(\text{l})$ 的阻碍点火效应。

2.3 包覆和添加剂改性

2.3.1 使用适当的添加剂

在硼颗粒中添加一定量的其他物质,如锂、镁等金属,可有效地促进硼的点火和燃烧。

Mestwerdt和Selzer^[12]研究了B/Li混合物的点火燃烧情况。实验中采用石墨电阻炉作为气体加热装置。结果发现,当B/Li混合物摩尔比为5:2时,点火温度最低,由2500 K降至800 K。

Kenro Obuch^[13]等采用电子炉研究了镁铝金属添加剂对无定形硼点火延迟时间的影响。炉内温度范围为900~1070 K,压力为大气压。研究发现,添加镁铝金属,可有效降低硼颗粒的点火温度,使硼颗粒在较低的环境温度下点燃。

除了硼颗粒表面的氧化膜阻碍硼的点火之外,影响硼燃料潜力发挥的另一个原因是:在含氢的气氛下,硼燃烧反应很容易生成 HBO_2 (偏硼酸),该物质相当稳

定,并且生成热较低,这大大降低了硼燃烧的热量释放。鉴于此,Trunov等^[14]在硼粉中添加了适量的钛粉,研究了B—Ti混合物的点火和燃烧。他们发现B—Ti混合物具有非常高的燃速,反应生成硼化物 TiB_2 ,发出大量的热。在湿空气环境下燃烧B—Ti混合物,反应产物中未检测到 HBO_2 。这一发现为解决硼在含氢气氛下燃烧热量释放不足的问题提供了一个新的思路。

文献中提到的添加剂主要是一些易燃金属或新型氧化剂,它们可以提高硼颗粒周围温度,降低硼的燃点,促进硼颗粒的点火和燃烧。但目前尚无真正起到催化作用的催化剂的报导,文献中的添加剂均参与点火燃烧过程,发生了化学反应,不属于传统意义的催化剂(提高化学反应速率,并在反应结束时恢复原来结构)。由此可见,在寻找合适的添加剂(催化剂)以促进硼颗粒点火和燃烧方面,还有许多研究工作要做。

2.3.2 硼颗粒的包覆

M. K. King等人^[15]研究了用LiF包覆硼粒子的工艺。包覆采用溶浸法,使LiF和四氢呋喃(THF)先溶于水,然后加入硼粒子,干燥后即得到包覆产品。当包覆比为8(100 g硼粉所用包覆剂为8 g)时,包覆后的硼粒子表现出极短的点火时间,样品储存45天后,用静态分析法进行分析,预先进行操作条件的温度校正,发现时间-点火效应明显增加。

Pace^[16]对镁作为硼粒子包覆层的研究表明,在高温下镁可以与 B_2O_3 反应生成硼单质,该反应可以降低硼粒子的点火时间,提高燃烧效率。当镁的包覆度不超过30%时,随着包覆层中镁含量的增加,硼粉的燃速也随之增加,燃速显著提高的最佳包覆度为20%。研究表明,当压力为0.35 MPa时,含包覆硼粒子的B/Mg/HTPB(8/2/90)推进剂的燃速是含未包覆硼粒子推进剂燃速的1.25倍。

Charles Dubois等^[17]制备了用高能聚合物包覆的纳米硼粒子。制备过程如下:首先采用合成法制备了表面功能化的硼粒子,接着用同样方法使硼粒子表面包覆着含羟基的聚合物,见图4,羟基用来键合二异氰酸酯。最后添加缩水甘油叠氮聚醚(GAP),发生聚亚胺酯化反应,使硼颗粒表面包覆一层高能聚合物。该高能聚合物燃烧时可在硼粒子表面释放大量热量,从而促进硼的点火。实验结果表明,高能聚合物包覆层极大地促进了硼颗粒的点火和燃烧。

高东磊采用热重-差热分析(TG-DTA)研究了包覆材料AP、LiF对硼颗粒热氧化特性的影响^[18]。并通过氧弹式量热计测试了不同粒度团聚硼的燃烧热及含

硼富燃料推进剂的爆热,研究了包覆材料AP、LiF以及团聚硼颗粒粒度与团聚硼燃烧热和推进剂爆热之间的关系。结果表明,AP有利于提高硼的氧化程度,LiF可显著降低硼的氧化温度。包覆材料可显著改善硼颗粒的燃烧性能,有利于团聚硼颗粒及推进剂能量的释放,且小粒度的团聚硼有利于硼的燃烧。

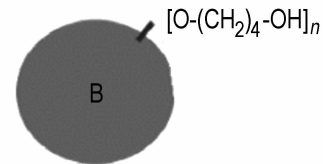


图4 羟基聚合物包覆硼示意图^[17]

Fig.4 Schematic view of butyloxy-capped boron nanoparticles^[17]

南京理工大学的王进等^[19]通过溶剂蒸发、相转移、溶剂/非溶剂等方法,用LiF、AP、纳米铝粉三种物质包覆硼微粒,制得不同的硼复合粒子及推进剂试样。采用红外光谱(IR)、扫描电镜(SEM)、DTA、TG等手段对复合粒子性能进行了表征。结果表明,硼复合粒子的表面状况有了一定的改善,硼复合粒子与AP混合物的表观分解热从 $-19.7 J \cdot g^{-1}$ 增加到 $1799.1 J \cdot g^{-1}$,热失重从52%提高到69.02%;相对于纯硼粉的推进剂,硼复合粒子的推进剂的表观分解热最高提高了12.6%。

关于硼颗粒包覆的报导较多,文献中提到了多种包覆材料。Mg、Ti、Zr等可燃金属能与硼生成金属硼化物放出热量,同时生成的硼化物的燃点较低,可降低硼的燃点,促进硼的点火和燃烧;LiF、VitonA(氟橡胶)等物质能通过化学反应除去硼粒子表面的氧化膜,改善硼粒子的点火、燃烧性能;AP、GAP、 NaN_3 等含能材料燃烧时可放出大量的热来提高硼粉表面温度,从而促进硼颗粒的点火和燃烧。通过包覆来促进硼颗粒点火燃烧的相关包覆材料和作用原理见图5。

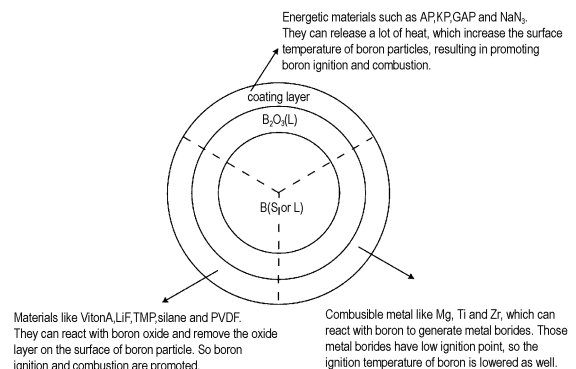


图5 各种包覆材料及作用原理

Fig.5 A variety of coating materials and the corresponding action principle

包覆材料的种类和含量以及包覆工艺是硼颗粒包覆研究中需要重点关注的方面。包覆材料的选择应满足能显著改善硼颗粒的点火和燃烧性能,与推进剂体系有良好的相容性等条件。包覆材料的含量要适中,对于不能燃烧或燃烧热较小的包覆材料,应尽量减少它的用量,一般不超过包覆硼总量的10%。不同的包覆材料对应的包覆工艺也有所差异,应通过实验,不断改进包覆工艺,使包覆材料均匀、牢固地包覆在硼颗粒表面。

3 存在的问题及解决的技术途径

目前硼颗粒燃烧时所用的添加剂为钛、氟化锂、高氯酸钾、硅烷、镁铝合金、叠氮化钠等,这些添加剂均参与了反应并最终生成其他物质,并非传统意义上的催化剂。而其他一些固体燃烧如煤的催化燃烧就有所不同,煤燃烧所用的催化剂主要是金属化合物,它们在反应前后催化剂结构不发生永久性改变。因此在以后的工作可以尝试一些传统的催化剂如稀土元素等对硼颗粒点火燃烧的促进效果。

硼颗粒表面包覆是改善硼点火燃烧性能比较好的一种方法。但在实际研究中发现,将包覆材料完全均匀地包覆在硼粒子表面很难实现,同时还要考虑包覆材料、包覆量等多种因素对硼点火燃烧性能的影响。如要获得最优的包覆效果,就必需对包覆过程中不同的影响因素进行详细研究,同时结合多种现代精密仪器进行表征,使包覆材料对硼颗粒点火燃烧的促进作用达到最大。

硼颗粒的点火燃烧情况比较复杂,涉及到燃烧、传热、流体扩散、均相反应、多相反应等多种过程,目前还没有对硼颗粒点火燃烧形成准确、全面的认识,缺乏对硼点火燃烧各个基元反应、关键控制步骤的深刻描述。因此从理论上寻找并形成硼颗粒点火燃烧促进方法比较困难。为了解决这一难题,可以实践和理论相结合,一方面通过改变外界环境、增加添加剂和进行表面包覆等实验手段来寻求促进硼颗粒点火燃烧的有效方法。另一方面可应用 FactSage 化学热力学软件和 Chemkin 化学动力学软件等进行硼颗粒与包覆材料在各种温度压力条件下的反应计算分析,结合硼样品在加压热天平上反应得到的热重曲线,研究硼样品燃烧反应热力学及动力学,分析总结多种途径的基元化学反应机理、热力学平衡条件和动力学速度等,从理论上分析竞争反应机制。

4 结束语

本文综述了硼颗粒点火燃烧的一些促进方法,包括硼自身理化特性的改善、燃烧环境的优化、包覆和添加剂改性等。在实际应用中,应尽量选择合适粒径的无定形硼,并增大环境的温度和压力。要提供促进硼颗粒点火燃烧的环境气氛,增大氧化剂浓度,增加水蒸气等有助于点火的气体。同时可以添加一些 Mg、Al 等金属以及用 AP、LiF 等材料包覆硼颗粒,采用多种途径共同促进硼颗粒的点火和燃烧。

硼颗粒点火燃烧促进方法的研究最终是为含硼固体推进剂和固冲发动机的发展服务的,故在实验中要考虑到固体推进剂的制作工艺和燃烧性能两方面综合的要求。有时候促进硼颗粒点火和燃烧的添加剂可能与推进剂体系不相容或对固体推进剂的燃烧和压强指数有不利影响。所以在研究过程中应综合考虑各种因素,结合硼的制造工艺、硼的包覆与添加剂、固体火箭冲压发动机的结构优化等方面的研究来解决硼颗粒在固冲发动机推进剂中高效燃烧的问题。

参考文献:

- [1] Mohan G, Williams F A. Ignition and combustion of boron in O_2 -inert atmospheres[J]. *Aiaa Journal*, 1972, 10(6): 776-783.
- [2] Macek A, Semple J. Combustion of boron particles at atmospheric pressure[J]. *Combustion Science and Technology*, 1969, 1(3): 181-191.
- [3] Li S C, Williams F A. Ignition and combustion of boron particles[J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 1993, 1(6): 248-271.
- [4] Yeh C L, Kuo K K. Ignition and combustion of boron particles[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 22(6): 511-541.
- [5] Young G, Sullivan K, Zachariah M R, et al. Combustion characteristics of boron nanoparticles[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(2): 322-333.
- [6] Krier H, Burton R L, Spalding M J, et al. Ignition dynamics of boron particles in a shock tube[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, 14(2): 166-172.
- [7] Uda R T. A shock-tube study of the ignition limit of boron particles[D]. G. A. /M. E. Thesis, Air Force Institute of Technology, 1968.
- [8] Gurevich M A, Kiryanov I M, Ozerov E S. Combustion of individual boron particles[J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1969, 5(2): 150.
- [9] Henderson U V Jr, Woods H P, Genevieve P. The combustion of elemental boron with fluorine[J]. *Aiaa Journal*, 1963.
- [10] Krier H, Burton R L, Pirman S R. Shock initiation of crystalline boron in oxygen and fluorine compounds[R]. Annual Technical Report. 1994, Department of Mechanical & Industrial Engineering of UIUC. 1-137.

- [11] Brown R C, Kolb C E, Yetter R A, et al. Kinetic modeling and sensitivity analysis for B/H/O/C/F combustion systems [J]. *Combustion and Flame*, 1995, 101(3): 221–238.
- [12] Mestwerdt R, Selzer H. Experimental investigation of boron-lithium combustion[J]. *Aiaa Journal*, 1976, 14(1): 100–102.
- [13] Foelsche R O, Burton R L, Krier H. Boron particle ignition and combustion at 30-150 ATM[J]. *Combustion and Flame*, 1999 (117): 32–58.
- [14] Trunov M A, Hoffmann V K, Schoenitz M, et al. Combustion of boron-titanium nanocomposite powders in different environments [C] // Proc. of 42nd AIAA/ASEM/SAE/ASSEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, CA, July 8–9, 2006.
- [15] King M K, Komar J, Fry R S. Fuel-rich solid propellant boron combustion[R]. Annual rept. 1 Apr 83–21 Mar 1984.
- [16] Pace K K, Jarymowycz T A, Yang V. Effect of magnesium-coated boron particles on burning characteristics of solid fuels in high speed crossflows[J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 1993(6): 332–347.
- [17] Lima R J P, Dubois C, Mader O, Stowe R, et al. Boron nanoparticle-rich fuels for gas generators and propellants[J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 2010, 9(5): 437–446.
- [18] 高东磊. 含硼富燃料推进剂一次燃烧性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学航天与材料工程学院, 2009.
GAO Dong-lei. Study on primary combustion characteristics of boron-based fuel-rich propellant[D]. Changsha: School of Aerospace Engineering and Materials of National University of Defense Technology, 2009.
- [19] 王进, 李凤生, 宋洪昌, 杨毅, 姜炜. 硼复合粒子的制备及其性能表征[J]. 含能材料, 2005, 13(5): 291–294.
WANG Jin, LI Feng-sheng, SONG Hong-chang, et al. Preparation & characterization of boron composite particles[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)* 2005, 13(5): 291–294.

Progress in Methods of Promoting the Ignition and Combustion of Boron Particles

XI Jian-fei, LIU Jian-zhong, LI He-ping, WANG Yang, ZHANG Yan-wei, ZHOU Jun-hu, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The methods of promoting the ignition and combustion of boron particles were summarized and reviewed, including selection of amorphous boron with appropriate particle size, improvement of the environment temperature and pressure, addition of some substances such as fluoride and water vapor in the atmosphere, coating of boron particles and modification of additives. The mechanisms of various promotion method were explained. The present problems and technical approach needed of solving these problems in promoting the ignition and combustion of boron particles were analyzed and presented with 19 references.

Key words: physical chemistry; boron; ignition; combustion; promotion methods; coating

CLC number: TJ7; V512; O64

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.025