

专题报告



# 工程材料研究中 科学问题的思考

于 翹

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**[摘要]** 在不少场合下, 航天用工程材料处在极端条件下工作, 这就对材料提出许多特殊的要求, 虽然国内外有一定的研究积累, 但对更精确的模型和符合特定材料的损伤的状态方程, 有待进一步研究。如高级弹头再入时气动加热和粒子云侵蚀以及两者耦合效应引起弹头防护材料增大后退量的问题; 空中垃圾和微流星的高速碰撞对航天器的威胁; 特别是核爆和激光武器对材料的损伤和破坏, 实质上是辐射引起的热击波层裂破坏, 这些都属超高速碰撞对材料的响应问题。天线罩材料、吸波材料、红外隐身材料、电磁屏蔽材料都是具有不同波长电磁波的电磁功能材料, 它们对固体介质的穿透、吸收、反射等会产生响应, 不同的电磁功能材料, 其宏观性能的物理参量不同, 但有几个参量是通用的, 如介电常数、磁导率和损耗角正切, 搞清这些参量与材料微观结构的关系, 可以为材料设计和材料创新提供科学依据。

**[关键词]** 天线罩材料; 吸波材料; 红外隐身材料; 电磁兼容材料

## 1 航天材料研究中的特点

一项产品的研制和一项工程的建设都离不开设计、材料和工艺技术, 它们之间的关系可以概括为设计是主导、材料是基础、工艺是保证, 可见材料的重要性。工程中的关键部位和主要零组件的工作条件和环境要求, 必定对材料提出各种性能的要求; 而工程技术飞跃发展的今天, 又对工程材料提出了严峻挑战, 当然它也推动着材料科学向前发展, 特别是高技术领域中的工程技术, 如航空航天技术, 对材料首先要求减轻结构质量这一至关重要的问题外, 还可能有三个特点:

1) 在极端条件下工作。如战略导弹高级弹头的防热材料。小型化、多功能的弹头, 以高马赫数的速度再入大气层, 瞬时气动加热至上万度, 此时, 一般材料均要气化、升华, 为解决此难题, 诞生了烧蚀材料。以液氢液氧为推进剂的火箭发动机, 其真空比冲约为 440s, 是液体推进剂中能量

最高的。制造其部件、零件、管道和转动系统的密封材料, 要在  $-253^{\circ}\text{C}$  温度下工作 (液氢的沸点), 给金属材料, 高分子材料提出了新问题。又如空间垃圾和微流星, 装甲防护, 材料要受到  $3\sim 10\text{ km/s}$  的高速冲击, 材料的应变率要达到  $10^4\sim 10^8$ , 压力可能达到几万至几十万 MPa, 在这种条件下材料性能表征的物理参量、状态方程和常规环境下的不同了, 这些极端条件使材料的行为出现新的科学问题。

2) 跨学科性。在极端条件下工作的工程材料, 除保证结构材料要求外, 还突出了功能材料的要求, 特别是对光、电、磁、热等物理效应要求, 往往成为双功能或多功能一体化功能材料所必需的, 如高级弹头再入大气层, 除气动加热外, 在一定高度还有雨、雪、雾、雹等粒子云的侵蚀, 特别是烧蚀和侵蚀两种效应非线性的耦合<sup>[1]</sup>, 使弹头防热材料的后退量大大增长, 目前尚未搞清高速碰撞和热效果耦合特定复合材料损伤的物理模型。又如导

引头天线罩,有高温下工作和穿透雷达波抗热震的要求,给材料提出新裁剪的问题,而热和电磁波同时作用到固体材料上的物理模型,还在探讨。

3) 使用性能研究。在极端条件下工作的材料,除注意到材料性能、工艺技术、化学组成、结构与评价等研究外,要特殊重视使用性能研究,这一点我们在工程实践中有一个认识的过程,如液体火箭贮箱选材研究,在满足减轻结构质量的前提下,针对贮箱的工作条件进行金属热处理、成型工艺、腐蚀性实验,焊接、无损探伤、贮存实验和寿命评估等一系列使用性能研究,而其中每个单项技术都和材料科学研究四要素有密切关系<sup>[2]</sup>,反映出使用性能是材料性能表征的重要的物理参量。

不仅军品应当重视使用性能研究,民品也不能忽视。在台湾曾见到建筑业用冷却塔,是玻璃钢制品,根据冷却塔的工况进行冷却叶片转动的稳定性、温度交变、自然老化等系列严格实验,保证了产品出厂的质量,获得了商业信誉。

## 2 电磁波对材料的响应

在航空航天领域,伴随电子攻防对抗技术的飞速发展,对电、光、磁、热等功能材料不断提出新的要求。电磁波作用到材料后,一般公认的机理有穿透、吸收、反射和漫反射等效应,以材料的电磁特性,物理光学参量表征和评价。电磁功能材料各种高性能用途是当前亟需解决的问题。

工程上天线罩,导引头材料是雷达波的透明材料;雷达波和红外光的吸收和背景的辐射率相一致的材料统称隐身材料;电磁干扰屏蔽材料叫电磁兼容(EMC)材料。这类工程材料可以视为有联系的整体,是不同波长、不同能量的电磁波对材料的响应,而红外光隐身材料与背景环境太阳的吸收率和辐射率的对比有密切关系。各种性能电磁功能材料表征的参量有一致性的一面,但也有区别的一面,在电磁场理论指导下可以定量分析清楚。

由于武器的使用条件和工作环境的各种要求,除温度、湿度、雨蚀、热震、结构质量、贮存寿命外,在特定的频率下,天线罩材料要求雷达波穿透>85%以上,用作雷达导引头的天线罩材料要求更高,经筛选适用上述条件的毫米波段的高性能天线罩材料,有陶瓷和石英玻璃。由于雷达技术的发展,武器信号的采集、识别、跟踪、拦截等的精度和抗干扰能力的提高,雷达波向波长更短的毫米波

段发展,高频区在35 GHz以上,在该波段加上高温下工作,用传统的材料将受到限制,在70年代末80年代初,材料研究向氧化铝、二氧化硅、氮化硅和聚四氟乙烯及其复合材料方向发展。

雷达天线罩的透射性能除了与材料的介电常数 $\epsilon$ 和损耗角正切 $\tan \delta$ 有关外<sup>[3]</sup>,还是壁厚、入射频率和入射角等常数叠加的函数。复合材料中的纤维种类、尺寸、配比、排布、取向和界面效应对透射特性都有影响,现在尚给不出每项的定量关系,只能用介电常数 $\epsilon$ 、壁厚 $d$ 、波长 $\lambda$ 和入射角 $\theta$ 等主要参量来描述。材料透射电磁波的衰减用公式

$$d = N \frac{\lambda}{2} \frac{1}{2(\epsilon - \sin^2 \theta)^{1/2}}$$

表示,式中 $N$ 代表罩壁结构类别(波长倍数)。

国内外研究雷达波吸收材料的单位不少,因属军事用途,报道很少,从一般资料和专利上可以看到的吸收剂有铁氧体、羟基铁粉、纳米级粒子粉末材料,衡量吸收剂的磁电损耗的参量是磁导率 $\mu$ 和介电常数 $\epsilon$ ,假设介质1为空气即波阻抗 $Z_1 = Z_0$ ,在无反射的条件下,反射系数 $\gamma = 0$ ,即 $\mu_\gamma \approx \epsilon_\gamma$ , $\mu_\gamma$ 、 $\epsilon_\gamma$ 分别代表相对磁导率和相对介电常数,满足该方程称为阻抗匹配,但经半个多世纪的努力,人们始终未能在宽频带范围内找到保持 $\mu_\gamma \approx \epsilon_\gamma$ 的材料。为此想提高吸收率应从吸收剂、粘合剂、工艺方法和涂层结构等多方面综合考虑,除与吸收剂的 $\mu$ 、 $\epsilon$ 参量有关外,可能还和吸收剂的形状、尺寸、取向、结构形式有关,这里有不少深层次的问题需要研究,否则很难突破吸收材料的宽频、轻质、薄层、吸收高的要求。

红外探测器的高度发展,使应用于目标表面的热红外隐身材料成为地面装备隐身技术中的一个重要组成部分;地面军事设施和武器装备与背景环境不同的热辐射所产生的温差,很容易被对方红外探测器发现,它已为军事目标危及自身生存的危险特征之一,因此热红外隐身技术获得迅速的发展。

热红外探测器目标与背景之间的热辐射反差构成了目标可探测性。根据玻尔兹曼定律,目标(灰体)的热辐射强度为 $E_c = \frac{G}{\pi} \epsilon T^4$ , $G$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\epsilon$ 为目标的发射率, $T$ 为目标的表面温度。从上式可以看出,辐射强度与表面温度的4次方成正比,可见在一般情况下,隐身技术对于控制目标的表面温度和反射率非常重要,可以从屏蔽材料、温控材料,或结构设计上找点出路,但其

效果极其有限,有前途的方案还是隐身材料。

应用对象和作战环境的多样性,使热隐身材料必须满足多方面的要求。一般情况下材料应有满意的热红外反射率和控温能力、低的太阳能吸收率、均匀的表面结构,并能与其他谱段的隐身要求兼容。常见的隐身材料,其产品形式为涂料、薄膜、纳米级超微粒子,一般都采用铝粉、金属氧化物、金刚石碳膜等,实现多频谱隐身材料一体化,有不少人认为,较有希望的材料是掺杂半导体材料,这种材料的热红外隐射性能取决于材料中的载流子的密度和活性参数,可根据 Huqen-Rubens 的近似理论导出反射率  $R$  和介电常数、频率、载流子密度、迁移率、碰撞频率、磁导率、材料的折射率等参量的关系式,这只是近似的关系式,更精确的物理模型,有待人们去研究。

电磁兼容用屏蔽材料在航天领域应用和发展有特殊意义,因为产品结构紧凑,装配密度高,工作频率高而宽,工作过程受电磁干扰的威胁严重,国外曾引起灾难性故障。当人们认识到电磁兼容(EMC)的重要性后,从研究确定电磁环境对对单机产品的 EMC 要求,都有严格的规范和标准。为改善器件或屏蔽室对电磁波的屏蔽,吸收衰减性能,发展了多种性能良好的吸收材料和密封材料。屏蔽室的屏蔽效率用电磁波入射场强与透过场强之比的分贝数衡量。表征电磁屏蔽材料性能的参量,除辐射频谱、信号的波阻抗和材料的表面性能外,主要用磁导率  $\mu$  和导电率  $\epsilon$  表征。通常讲导电率越高、波阻抗越大,反射能力越强。电磁屏蔽用材料在工程上应用,有八大类涂层、电缆、密封、粘合剂、金属网或丝、衬垫材料等,在国外已有一系列商品出售。这类屏蔽材料状态方程,以 Maxwell 理论和半经验公式描述,更准确的模型尚未见报道。

上面列举的一系列电磁功能材料的不同特性,贯穿在有关材料中的共同的宏观参量是介电常数  $\epsilon$ 、磁导率  $\mu$ 、损耗角正切  $\tan \delta$ 。如果能找出材料的微观结构与这些参量的规律和定量关系,则可为解决功能材料设计提供科学依据,这是工程材料研究中很有意义的学术问题。

### 3 高速碰撞对材料的响应

下面列举的若干工程上对材料方面的要求,属于高速碰撞的力学问题<sup>[4]</sup>。

随着航天技术发展,数以千计的航天器被发

射。由废弃的火箭壳体、失效的卫星框架,形成碎裂的物体,构成大小不等的空间碎片,国外叫空间垃圾。这些碎片一般平均以 10 km/s 的相对速度互相穿越,另外加上天然的微流星,对正在空间运行和将要发射的航天器构成一种威胁。事实上,国外已经发生过数起空间垃圾撞击航天器造成巨大损伤的事例。为突破对方在空中以核爆拦截战略导弹,对弹头的防护材料要深入研究。高空核爆大概 75% 都以 X-射线能量释放,因此弹头的防护材料要有抗 X-射线破坏的能力;同样如以激光为武器拦截,弹头材料也应有防激光的能力;还有高级导弹弹头再入大气层有烧蚀和粒子云高速撞击的侵蚀问题,而二者非线性的耦合效应使弹头后退量增长,从学科的角度分析,可归纳为高速碰撞对弹头材料的响应和能量沉积问题。国外根据工程的需要大力开展这方面工作成为“热点”,70 年代以前 15 年召开过 8 次专门的学术会议,70 年代后会议由美国航空与宇宙航行学会(AIAA)组织召开,每两年一次,学术活动十分活跃。

冲击载荷下材料的变形行为,表现为变形同应力、应变率、温度、内能等变量之间的复杂关系,当高速冲击载荷  $\rho V^2/\sigma_y$  (密度乘以二次方体积与屈服强度之比)为  $10^2 \sim 10^3$  时与材料强度有关的诸效应已退到次要地位,而以体积、压缩变形和热的耦合为主要特征,其变形行为可用高压状态方程来描述。研究超高速碰撞效应包括冲击加热、材料大变形流动、穿透断裂和层裂、材料的飞溅与微喷射、相变和衰变等,这些现象是通过地面模拟设备轻气炮、电子加速器、火药炮等实验来实现的。超高速碰撞给材料学拓宽了材料研究领域,增添新的学术内容,特别是非均质各向异性的复合材料与玻璃微球充填的夹层结构的出现,会增加研究的难度,增加新的研究内容。

核爆 X-射线对导弹弹头的破坏作用,实质上是 X-射线辐射引起的热击波层裂破坏,通过一维流体弹塑性模型理论计算,密实均质材料和多孔材料在 X-射线辐射下的动响应结果完全不同。多孔材料中产生的热击波峰值及其喷射冲量仅是密实材料的 1/4,说明多孔材料能使生成的热击波峰值和喷射的冲量都少于密实材料<sup>[5]</sup>。用电子加速器进行的核爆 X-射线辐射能量沉积表明,多孔材料的热击波层裂阈值要比密实材料高出 40% ~ 50%,在此基础提出压力  $p$ -积体  $V$ -内能  $E$  的数学模

型,能反映“多孔液体零应力效应”的规律。计算机和数值模拟技术的发展为核加固和抗激光材料研究方向理论化和可设计方面发展创造了条件。

已取得的理论计算和动态模拟实验结果基本是吻合的,但只是一维流体模型,实验结果也是初步的,很多工作需要进一步深入研究,辐射引起的力学效应,早期是热击波层裂破坏,后期会因喷射冲量引起壳体结构变形、振动及弹头偏离飞行弹道的过载。深层次破坏需要加大人力、物力和财力的投入,包括改进模拟设备,更新测试方法和装置。

#### 4 结束语

从以上列举的实例可以看出,高质量地解决这些工程材料问题,需要结合工程的实际,一方面将需求工程指标科学地转化成为对材料性能的要求,另一方面研究材料在这种条件下行为变化或某些耦合效应引起材料损伤演变的规律,这些都需要在科学的理论指导下,联系工程的实际,开展应用基础和基础理论研究,这是非常必要的。保证工程材料的高质量,不仅解决是“什么”,还要搞清“为什么”的问题,知其所以然,才能改变材料研究中仿制、试制跟踪多,独立自主创新少的毛病。

有针对性,有明确目的的工程材料研究,不仅

要站在金属、无机非金属材料、高分子三大类材料之上,而且要和其他基础学科相结合;结构材料、功能材料都要和力学、物理学结合起来,找到与其他学科的“结合点”,使新材料开发、传统材料改性研究造成新天地,研究深层次的新内容。

#### 参考文献

- [1] Hartle M S, Maknight R L, Huang H, et al. Coupled structured thermal electromagnetic analysis tailoring of graded composite structures [R]. NASA Contractor Report 189153
- [2] National Research Council. Materials science and engineering for the 1990s [M]. National Academy Press, 1990
- [3] Welsh E A. Evaluation of ablative materials for high performance radome application [C]. Proceedings of the 15th Symposium Electromagnetic Window, 1980. 179~185
- [4] Meyers M C, Murr L E. Shock waves and high strain-rate phenomena in metals, concept and applications [M]. New York: Plenum Press, 1981
- [5] Werrick L J. Shock characterization of epoxy 42 volume percent glass microballoons [M]. Sandia National Lab. Albuquerque NM 87185. 1991, 3~21

## Thoughts on Scientific Issues in Engineering Material Research

Yu Qiao

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**[Abstract]** On a lot of occasions in aerospace engineering, materials work in extreme situations. Specific characteristics of materials are therefore required. Although some achievements have been accumulated in material research at home and abroad, deeper investigations are still needed on a more precise model and state equation corresponding to the damage of a specific material. These will include the aerodynamic heating of the advanced warhead reentering the atmosphere and the erosion of the space articles as well as the increase of the retreat value of the protection material caused by the coupling effect of both, the threat to space vehicles caused by high speed collision of space junk and micrometeors, and, in particular the damage and destruction caused by nuclear explosion and laser weapon which in fact is and the delamination caused by thermal shock waves of actual radiation. All of these belong to the response of materials to high speed collision.

Electromagnetic materials such as radome material, infrared stealth material and EM shielding material are all EM functioning materials with EM wave of different lengths. As solid substances, they will respond to penetration, absorb and reflection. Different EM functioning materials possess different macroproperties of physical parameters. However, several parameters are general, such as dielectric constant, permeability and tangent of loss angle. Clear understanding of the relations among these parameters and the microstructures of materials will provide a scientific basis for materials design and innovation.

**[Key words]** material for radome; wave absorbing material; infrared stealth material; EMC material