

高技术前沿

高超声速飞行器如何突破“新热障”

■陈健 李金龙 本报特约记者 张照星

与烈焰共舞——

更快速度带来更大挑战

超声速飞行,会让空气发出刺耳的“尖叫”。高超声速飞行更是惊人,其速度最低门槛是5马赫,即5倍声速。然而,速度飙升的同时,带来了“热障”的困扰。

当飞行器破空疾驰时,剧烈的摩擦和挤压,将巨大的动能转化成了灼人的热能,这就是“气动加热”。普通金属在炉火中会变软、熔化甚至烧毁。在飞行器上,这种升温带来的后果更加致命:材料强度崩溃、结构扭曲变形、内部精密仪器被烤成废铁……俄罗斯“先锋”导弹某次试射过程中,因局部热应力超出材料疲劳极限,导致热防护层出现烧蚀损伤,影响了导弹结构的完整性。

高超声速飞行时,飞行器表面温度会飙升到1000~2000℃。更严峻的是,任务往往需要高超声速飞行器在这种极端高温环境下坚持数分钟甚至数小时,热量的累积效应考验着材料和结构的耐久极限。

超声速飞行产生的热量,主要来自空气与机身的摩擦。高超声速飞行则不同。当高超声速飞行器破空时,气流与飞行器表面不断纠缠,产生了3大塑造热流的关键现象:激波、边界层分离和湍流。它们如同3位手法各异的“火焰雕塑师”,共同决定了热量在飞行器身上的分布图景和灼烧强度。

当高超声速飞行器尖锐的前缘迎面撞上气流时,仿佛撞上了一堵无形的“高压气墙”,这就是激波。穿过这道激波,空气的温度、压强和密度直线飙升,将热流如高压水枪般射向飞行器表面。

在某些区域,紧贴飞行器表面的低速气流会从表面“剥离”开来,这就是边界层分离。这种剥离会完全打乱原本相对规整的热流分布,在某些地方形成意想不到的“高热孤岛”,极易引发局部过热烧蚀。

湍流更是让热流变得难以预测。它的特性极其敏感,飞行器表面一丝微小的粗糙起伏或是几何形状的微小改变,都可能让它“性情大变”,让热流预测如同雾里看花。

高超声速飞行产生的高温是全方位的,几乎覆盖了整个飞行器表面。长时间炙烤会导致飞行器整体结构软化变形,材料性能迅速退化,甚至连其内部的电子设备也会受高温影响而失灵。此时,单一部位的“耐热垫”彻底失效。随着高超声速飞行器速度极限的一再突破,一场从飞行器的整体构型、热防护系统到内部热管理的全面“防火革命”已经刻不容缓。

与气流纠缠——

多重解困需要多领域协同

在高超声速的极端熔炉里,气动加热、材料性能与结构力学这三者并非各自为战,而是深度纠缠、互为因果,形成了一个危险的“死亡三角”闭环:气动加热



热将飞行器表面烤得通红,材料在烈焰中强度下降、刚度减弱,甚至发生烧蚀或微观结构劣化。于是结构开始变形、扭曲,或产生不稳定的振动。结构的变形和热流的相互作用,会导