

自立自强， 航天专家揭秘中国探火科技创新

1182 米！中国航天科技集团第五研究院“天问一号”火星探测器总设计师孙泽洲昨天告诉记者，这是迄今为止“祝融号”累计的巡视里程数。

“祝融号”是我国着陆火星的第一辆火星车，目前已圆满完成规定的 90 个火星日的巡视探测任务，这宣告我国首次探火就创下“绕、着、巡”三项任务一次完成的世界纪录。

迄今为止，火星上着陆的 10 个探测器中 9 个是

美国人研制的。而早在 10 年前，美国国会就出台了禁止与中国进行航天合作的立法。“沃尔夫条款”推出后，美方更是以法律法规的形式对中美航天合作严加限制。

这就不难理解中国探火每一步的成功都来之不易。肩负重任的中国航天科学家是如何坚持科技自立自强，战胜漫漫星途上各种挑战的呢？日前，记者就此采访了孙泽洲总设计师和他领导的研发团队。

特约撰稿 母国新 本报记者 郑蔚

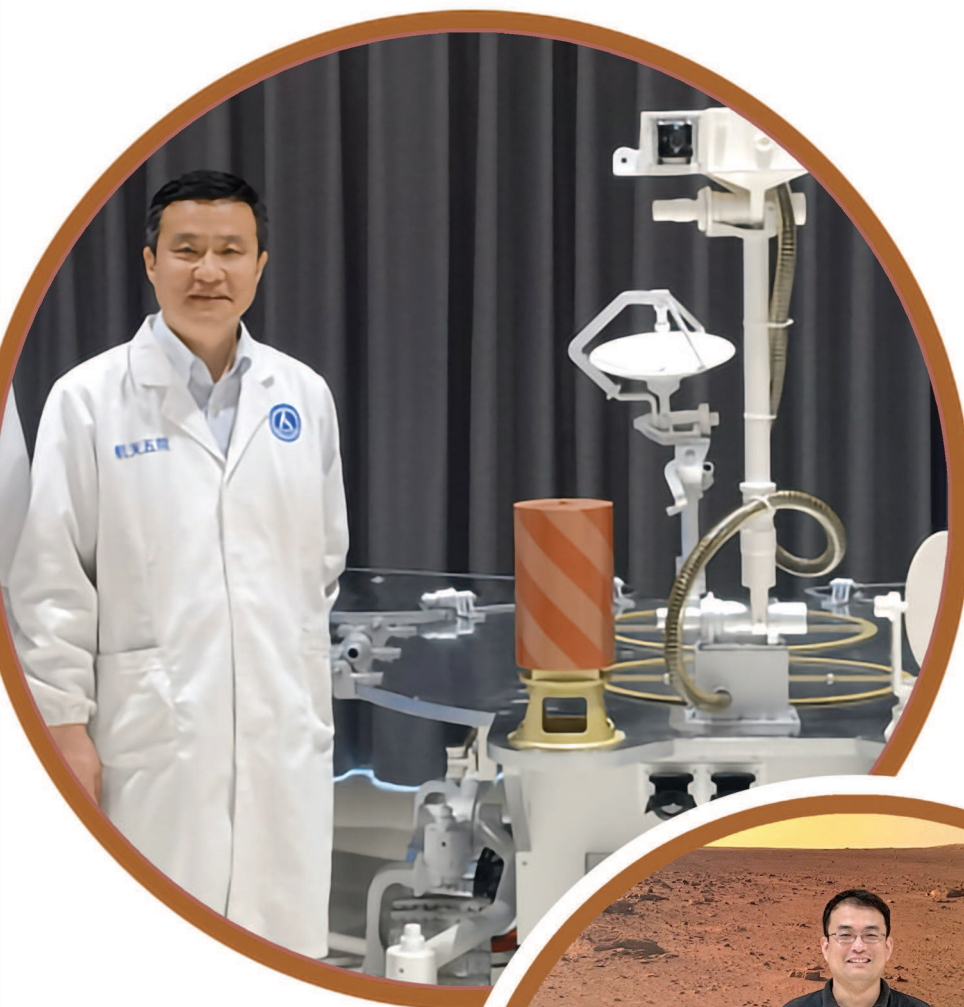
“恐怖 9 分钟”， 以 25 马赫高速进入火星大气层

“天问一号”火星探测器于 2020 年 7 月 23 日发射升空，在它长达 4.74 亿公里的探火实际飞行过程中，您什么时候最紧张？航天五院探火团队几乎所有专家的答案都是一样的：最紧张的是今年 5 月 15 日早晨七八点钟它冲进火星大气层着陆的那一刹，又叫“恐怖 9 分钟”。

其实，从 5 月 13 日起，孙泽洲他们就有四五十个小时没有好好睡过觉，心脏绷得太紧了。最累的时候，抽空眯一会儿，不用同事叫，猛地一个激灵就自己醒了。

自探火项目 2016 年立项以来，整整 5 年多的时间，他们盼的不就是把“祝融号”驶上火面这一刻吗？

进入舱总体主任设计师董捷告诉记者，“天问一号”环绕器和着陆巡视器先执行降低近火点高度的变轨，约 3 小时后完成两器分离，着陆器经巡航飞行后以 25 马赫的高速进入火星大气层。这一 4.8 公里/秒的速度虽然低于神舟飞船返回舱再入大气层的速度，且火星大气层的密度也只有地球大气层密度的 1%，但它依然会产生高达 1000℃ 的高温。为此采用了能有效保护进入舱特殊需求的抗烧蚀材料。



▲“天问一号”火星探测器总设计师孙泽洲。

▼火星车总体主任设计师陈百超。



▲“天问一号”进入舱总体主任设计师董捷。

(均中国航天科技集团第五研究院供图)

为了确保进入舱着陆万无一失，当天飞控团队还提前 1 小时实施下降控制方案，将其从进入火星大气层前 5 小时提前为 6 小时，提前确认地面站发令的可靠性、器上的设备状态等等，为万一出现意外情况增加了应对决策的时间裕度。

为什么我们已经有了成熟的月面着陆的经验，对在火面着陆还如此审慎？

两者差别很大。首先，月球没有大气，因此着陆过程为发动机反喷和缓冲装置着陆这 2 个阶段；先通过着陆器提供的主动动力，将着陆器的速度从 1.7 公里/秒降到 1-2 米/秒，然后依靠着陆器本身的缓冲装置完成在月面着陆。

而火星有一个稀薄的大气层包裹，虽然密度只有地球的 1%，但也必须加以利用。所以着陆火星是 4 个阶段：第一阶段是气动减速，利用进入舱的气动外形进行减速。我们进入舱大底的直径为 3.4 米，是人类有史以来第二大的火星进入舱。该阶段持续时间约为 279 秒，要降低 91.8% 的降落速度，将速度从原来的 4.8 公里/秒，降到 396 米/秒；第二阶段，使用降落伞减速，这是我们首次在地外天体应用降落伞减速技术。它将着陆速度降低到 61 米/秒，在伞降的 168 秒时间中还要抛大底，既为进入舱减重，也为进入舱内的微波雷达等着陆避障设备打开“视野”，然后背罩分离；第三阶段，使用进入舱的主发动机减速，期间悬停避障，将速度降到 1.5 米/秒；最后阶段是依靠进入舱着陆缓冲装置缓冲减速。这 4 个阶段环环相扣，一个阶段完成，立即切换进入下一个阶段，

因此对每个设备的可靠性和整个系统的可靠性要求极高，只要有一个环节出现故障，就会影响下面一系列动作无法完成。

其次，在火面着陆与在月面着陆的另一个较大不同是，月球距离地球 30 万公里，信号的时延大约为 1 秒钟，因此在着陆的过程中，万一发生意外情况，我们地面飞行控制中心还是来得及干预的，所以我们准备了充分的月面着陆故障预案；但落火时，地火距离高达 3.2 亿公里，时延长达约 18 分钟，也就是说，当我们看到环绕器传回地球的信息时，事情已经在约 18 分钟前发生了，肯定“无可挽回”了，即使准备再多的故障预案都使不上。

所以探火团队必须制定出万无一失的飞控方案。董捷说，在落火方案论证阶段，发现我们面临一个困难：按常规的“弹道”进入方式，由于火星大气密度低，进入舱开伞点的高度可能偏低，而降伞减速和动力减速都需要一定的高度，所以必须满足这个高度约束。为此，专家们提出了基于配平翼的“弹道-升力式”进入方案，这一新的进入方式是自主制导的控制方式，可以控制升力的方向。在气动减速阶段，进入舱外形是对称平衡的，通过预设的质心偏移，使进入舱在舱体的轴线和飞行的速度方向间产生一个夹角，使进入舱得到一个额外的气动升力。在飞行到预定的高度后，打开配平翼，通过气动力的变化使这个夹角恢复回零，为降落伞开伞提供比较好的姿态。由于配平翼设置在进入舱产生力矩最大的位置，所以它起到了“四两拨千斤”的作用，这是配平翼方案首次应用到人类航天器的在轨飞行。

如果不采用配平翼，怎么才能解决气动不平衡的问题呢？董捷说，美国人采用的办法是先后 2 次共抛掉约 150 公斤配重块。而我们进入舱没有这么多质量资源可以“浪费”，我们要把宝贵的质量资源让给进入舱携带的仪器设备。

进入舱到达预定马赫数后，立即打开为落火特制的降落伞。可别小看了火星降落伞的难度，虽说通过神舟载人飞船、嫦娥探月三期月球采样返回飞船的研发，我国已掌握了多种返回地球大气层的降落伞，但火星的大气非常稀薄，开伞的充气形状高频变化、冲击载荷大，因此进入地球大气层的降落伞型并不适用火星。欧空局与俄罗斯联合研制的 ExoMars 2022 火星探测器，就因降落伞设计缺陷导致延期发射。

为此，航天五院的专家针对进入舱落火时大阻力系数气动外形在跨超声速段固有的不稳定性，新研发了具备能在超音速时快速开伞的锯齿形前端构形、V 型双层结构加强带“盘-缝-带”伞。进入地球大气层的降落伞的打开方式是连续完成拉出引导伞、减速伞、主伞的动作；而进入舱使用的降落伞没有引导伞，必须在约 2 倍火星音速时直接打开用于减速的降落伞。考虑到伞刚打开时进入舱会出现摆动，研发团队还在地球上进行了仿真模拟试验和针对性设计，保证了器上所有设备即使在角速度达到 800°/秒的极限状态时，仍能精准无误运行。

体重 240 公斤， “祝融号”是个智慧的小个子

“对我来说，5 月 15 日早晨 7 点 58 分，这一时刻有着特殊的意义。按预设的程序，这一刻进入舱应该着陆火面。但因为信号有 18 分钟的延时，地球时间到了，遥测信号还在路上。”董捷说，“18 分钟以后，遥测信号终于回来了，我心中的那块石头落了地，但我不能欢呼，我必须先向北京航天测控中心报告。待北京中心确认后对全区广播，我们测控中心大厅里才一片欢呼。”

“天问一号”的进入舱，与我们之前登月的“嫦三”“嫦四”登月舱有什么区别呢？火星车总体主任设计师陈百超告诉记者，“天问一号”要一次性完成“绕、着、巡”的任务，因此，进入舱的质量尽可能轻一些，以尽可能地将有效载荷让给火星车和它搭载的科学载荷。因此，进入舱没有携带太阳翼。而“嫦三”“嫦四”着陆器随身携带太阳翼，它能在月面持续保持工作状态。有太阳翼的进入舱落地后，它的电力主要源于携带的电池，所以必须在几个小时内自主完成落火后的一系列工作，而不能等待建立与地球测控中心的联系后再由地面发出指令。

进入舱平安着陆火面后，最重要的就是释放火星车。但它没有自主旋转、调整方向的功能，万一落地后发现前方原定的坡道方向不合适，怎么办？研发团队让它具有坡道前后双向自主展开功能，既可向前方展开，也可向后方展开。通过进入舱对坡度的预估，选择合适的展开方向。

“祝融号”火星车是向东驶入火面的。美国“好奇号”“毅力号”都是 1 吨级以上的火星车，而“祝融号”的质量只有 240 公斤，但它是个“智慧的小个子”，在行驶和越障性能上，与别的火星车相比不相上下。美国“好奇号”它能爬坡 30°，30°的坡我们“祝融号”也能爬。

火面和月面看上去都是一片荒漠，但两者有很大的不同。2004 年 1 月着陆火星的美国“勇气号”，后来在火面行走时遭遇意外的“塌陷”而动弹不得，最终“熄火”。这是怎么回事？当时，航天科学家和行星地质学家对火星的认知还很有限。为什么看似较为平整的火面，会突然塌陷下去？有种推测为，远古时期火面沙土经过盐类矿物侵蚀后表层结成硬壳，导致土壤外硬里松，具有承载欺骗性，一旦火星车驶上去，硬壳破碎，火星车立即陷入了下层松软的土壤，难以自拔。后来美国“凤凰号”火星车在火面挖掘时，发现了火面确有“硬壳”存在。

针对火面土壤的这一情况，航天五院研发团队研发了基于“夹角调节+离合器”的主动悬架移动系统，它具有尺蠖运动、抬轮、蟹行等多种移动形态，即使遭遇了美国“勇气号”类似的情形，也会通过尺蠖蠕动的方式脱离险境。

此外，火星表面主要是沙石性土壤，坚硬而尖锐的岩石分布较多，容易损坏车轮。研发团队针对性地采用了铝基碳化硅一体化成型车轮，虽然质量较轻，但强度高而且耐磨，增强了“祝融号”车轮的可靠性。

火星车一般的“时速”是多少？陈百超说，如按照它将地面信息传回地球，地面为它规划行走路线，它再执行“盲走”的方式，可以达到 200 米/小时的速度；如果让它自己找路行走，可以达到 50 米/小时速度。

没有想到的是，2008 年 5 月 25 日着陆火星的“凤凰号”，仅工作了 30 多天，就因为火星的低温而“冻死”了，地火信号中断。可见火星车的保温并非易事。火星存在大气衰减，到达火星表面的太阳辐射强度仅为不到 0.3 个太阳常数，地球表面每平方米的太阳辐射常数是 1367 瓦，而火星表面仅为 589 瓦。

针对这一挑战，研发团队突破纳米气凝胶材料制备和结构-热控一体化集成工艺，采用高效太阳能利用技术，创新实施了“太阳能集热器”热控方案。传统的方式是将太阳能转化为电

能，再由电能转化为热能，这个转化过程的转换效率大约为 30%；而他们的创新让太阳的光能直接转化为热能，转换效率可达到 80% 左右，并采用了有特殊涂层的吸热板，吸热系数很高而散热系数很低。

新研发的行星际测控通信技术，是“祝融号”上的又一项科技创新。陈百超说，无线电信号衰减与距离的平方成正比。地球与月球距离 30 万公里，地球与火星最远距离是 4 亿公里，两者距离相差 1000 多倍，那信号的衰减就是 1000 的平方，也就是 100 万倍，这意味着同样的一个信号，从地球到火星的强度比从地球到月球的强度要低 100 万倍，所以必须突破数字化高灵敏度深空应答机技术，突破高灵敏度动态信号接受，我们做到了。

“天问一号”是中国首次探火，因此我们只有一个环绕器作为地火通信的中继站。环绕器沿着火星轨道飞行，每天绕火星 3 圈，只有在越过火星车顶天空的弧段才能通信。而美国目前有 3 个环绕器，足够与火面上的火星车传输信号。

为了将火星车上的探测数据更多更快地传回地球测控中心，五院研发团队创新提出了超 UHF 频段+X 频段中继多频段多体制中继方案，除了火星车上的固定天线外，加装了定向天线，指向环绕器，采用 X 频段发送更多的信息。

“出日凌”后，环绕器火星车将履行新使命

在火星轨道上运行的“天问一号”环绕器和火面上的“祝融号”还面对“火星合日”的考验。何为“火星合日”？就是太阳对火星的连线与火星对地球的连线两者之间的夹角较小，又称进日凌；夹角变大后，为出日凌，这种天文现象大约每 26 个月出现一次。日凌期间，从地球上看不到火星，因为太阳将其完全遮蔽，太阳强烈的辐射会干扰甚至切断地火之间的无线电信号。在此期间，科学家通常会暂停器地通信。

陈百超说，现在火星正逢夏季，我们还调整了火星车的朝向，让它向东，用火星车的桅杆遮挡一部分阳光，在日凌期间给火星车降温。火星夏天的气温是多少？陈百超说，火星白天的气温是 -20℃，但火星的地面温度却超过 10℃。为什么火星空气温度和地面温度的温差那么大？那是因为火星的空气密度只有地球的 1%。而地球上空气密度大，所以空气温度和地面温度的温差通常不会这么大。而到了晚上，即使是夏天火星的地面温度也会下降到 -95℃。为此，“祝融号”又做了必要的保温措施，使舱内保持安全的环境温度。

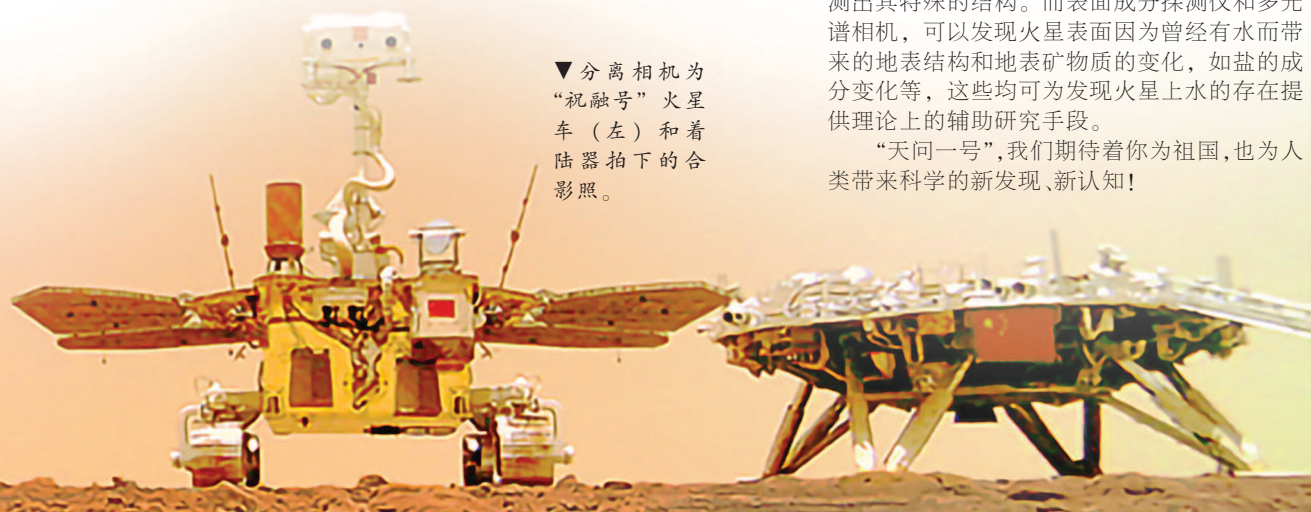
虽是日凌期间，“祝融号”暂不执行火面巡视及科考任务，孙泽洲率领的五院探火团队仍为环绕器和火星车出日凌后继续执行探测任务而精心优化设计方案。

孙泽洲说，“天问一号”火星探测任务围绕“火星表面土壤特征与水冰分布”等五大科学目标，开展环绕探测和巡视探测，实现深空探测技术的跨越和科学的新发现。环绕器未来还将进行环火遥感探测，它将进入优化设计的遥感使命轨道，保证兼顾对火星的遥感成像和对火星车的中继通信这双重要求，采用中分相机取得整个火面的全覆盖遥感图像。

虽然火星车的工程目标和设计寿命已经完成了，但它还有新的使命：寻找火星上曾经有过液态水的痕迹。陈百超说，美国科学家曾宣布“凤凰号”发现火星上存在水冰。“凤凰号”的落点是火星的北极地区，属低温弱光照地区，理论上确有这种可能。但“祝融号”的着陆点是火星北纬 24°，这一纬度相当于地球上的福建厦门和云南玉溪，且火星大气稀薄，即使那里曾经有过水，也一定蒸发掉了，要在地表发现水冰的可能性几乎没有。

但“祝融号”上配置次表层探测雷达可进行火星浅表层结构探测，如果在火星地下不太深的地方曾经有过“地下水”“地下河”，均可以探测出其特殊的结构。而表面成分探测仪和多光谱相机，可以发现火星表面因为曾经有水而带来的地表结构和地表矿物质的变化，如盐的成分变化等，这些均可作为发现火星上水的存在提供理论上的辅助研究手段。

“天问一号”，我们期待着为祖国，也为人类带来科学的新发现、新认知！



▼分离相机为“祝融号”火星车（左）和着陆器拍下的合影照。