



## “天问一号” 着陆缓冲机构吸能材料设计分析与试验验证

罗 敏, 杨建中, 韩福生, 满剑锋

### Design and Test Verification of Energy Absorption Material in the Soft Landing Gear for Tianwen-1 Mars Probe

LUO Min, YANG Jianzhong, HAN Fusheng, and MAN Jianfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210044>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### “嫦娥4号” 自主运行任务的设计与实现

Design and Realization for Autonomous Operation of Chang' E-4 Mission

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(4): 358-363

#### 高比能量锂氟化碳电池在深空探测器上的应用试验研究

Test Research of High Specific Energy Lithium Carbon-Fluoride (Li/CF<sub>x</sub>) Batteries as Power Sources for Deep Space Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(1): 87-92

#### 深空探测跳跃式再入返回任务设计

Mission Analysis and Design of Half-Ballistic Reentry for Deep Space Exploration

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 269-275

#### 深空大载荷航天器软着陆气囊制造技术

Manufacturing Technology for Large Load Spacecraft Soft Landing Airbag

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 324-332

#### 深空探测先进电源技术综述

Advanced Power Source Technology of Deep Space Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(1): 24-34

#### 基于在轨组装维护的模块化深空探测器技术进展与应用研究

Development and Application of Modular Deep-Space Probe Based on On-Orbit Assembly and Maintenance

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(6): 595-602



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

# “天问一号”着陆缓冲机构吸能材料设计分析与试验验证

罗敏<sup>1</sup>, 杨建中<sup>1</sup>, 韩福生<sup>2</sup>, 满剑锋<sup>1</sup>

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院固体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 着陆缓冲机构是“天问一号”火星探测器在行星表面软着陆时的关键部件之一, 需要采用吸能效率高、耐高低温的能量吸收材料。介绍了火星探测器着陆缓冲机构中采用高锰奥氏体孪生诱发塑性钢(Twining Induced Plasticity, TWIP)制拉杆的能量吸收设计。给出了TWIP钢的高塑性变形微观机理和力学特性。试验结果表明, TWIP钢具备600 MPa拉伸应力和72%拉伸应变的高塑性变形能力。通过仿真分析和试验验证方法, 验证了TWIP钢制拉杆在火星探测器着陆缓冲机构中的应用效果。结果表明, 着陆缓冲机构能够在各种复杂着陆工况下保证稳定的能量吸收性能。

**关键词:** 高锰奥氏体孪生诱发塑性钢; 着陆缓冲机构; 深空探测; 设计; 能量吸收

**中图分类号:** V476.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2021)05-0472-06

**DOI:**10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210044

**引用格式:** 罗敏, 杨建中, 韩福生, 等. “天问一号”着陆缓冲机构吸能材料设计分析与试验验证[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(5): 472-477.

**Reference format:** LUO M, YANG J Z, HAN F S, et al. Design and test verification of energy absorption material in the soft landing gear for Tianwen-1 Mars probe[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(5): 472-477.

## 引言

深空探测器着陆缓冲机构主要功能是通过能量吸收元件的塑性变形, 吸收着陆时探测器在给定的初始速度下的冲击能量, 从而起到保护探测器着陆过程中设备和人员安全的作用。一般来说, 深空探测器着陆缓冲机构要求能量吸收元件具有力学特性稳定、受空间环境影响小、缓冲特性在地面可以准确测试等特点, 同时能量吸收元件还要具备质量轻、制备工艺简单、缓冲效率高等特性<sup>[1]</sup>。目前深空探测着陆缓冲机构常用的能量吸收元件包括金属膨胀管、铝蜂窝、拉杆等<sup>[2]</sup>。其中, 拉杆利用高强韧金属杆在拉伸塑性变形时高效吸收能量的原理, 具有体积小、单位重量能量吸收比高、吸能性能稳定的突出优点, 非常适合作为深空探测器着陆缓冲机构的能量吸收元件。在中国“嫦娥三号”着陆缓冲机构<sup>[3]</sup>和“天问一号”火星探测器着陆缓冲机构<sup>[4]</sup>中, 都采用了拉杆能量吸收元件以吸收探测器着陆时的冲击能量。

高锰奥氏体孪生诱发塑性钢(Twining Induced Plasticity, TWIP)具有较高的抗拉强度以及突出的塑性, 其抗拉强度显著大于共晶Pb-Sn、单晶铜合金等塑

性合金, 同时又具备较一般高强钢更为优异的断后伸长率(50%~110%), 因此TWIP钢兼具一定承载能力以及高效塑变吸能的综合特性<sup>[5]</sup>。利用TWIP钢制成拉杆、圆管等缓冲元件, 能够提供很高的缓冲塑性变形行程, 并在变形过程中吸收大量的能量, 非常适于作为缓冲机构的能量吸收元件<sup>[6]</sup>。

TWIP钢力学性能和TWIP钢制拉杆能量吸收元件的安装方式是影响探测器着陆缓冲机构缓冲性能的关键因素。本文给出了TWIP钢的微观组织结构和力学特性, 介绍了火星探测器着陆缓冲机构中采用的TWIP钢制拉杆的能量吸收设计, 通过火星探测器着陆缓冲机构冲击动力学分析和着陆冲击试验, 验证了多种着陆工况下TWIP钢制拉杆在着陆缓冲机构中的缓冲性能。这些研究成果对TWIP钢在后继月球科考<sup>[7]</sup>、载人登月<sup>[8]</sup>等深空探测任务中着陆缓冲的设计和应用具有重要的指导作用。

## 1 “天问一号”着陆缓冲机构吸能设计

### 1.1 拉杆能量吸收元件设计

拉杆是由金属材料经过机械加工制成两端可固

定、中间工作段直径一定的长杆，其实物如图1所示。将拉杆安装在着陆缓冲机构内，着陆时产生的冲击动能促使机构发生相对运动，使得拉杆拉伸变形，从而将冲击动能转化为拉杆塑性变形能。通过调整拉杆的直径可以调整拉杆输出载荷，从而获得着陆缓冲机构需要的缓冲力。通过调整拉杆长度，结合金属的塑性应变，可以确定拉杆拉伸行程即最大的变形量，以上两个参数决定了拉杆的吸能能力。

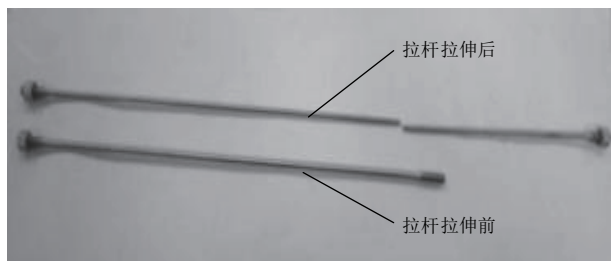


图1 拉杆拉伸变形前后实物

Fig. 1 Energy absorption pull rods (before and after deformation)

## 1.2 “天问一号”着陆缓冲机构吸能设计

“天问一号”火星探测器于2021年5月15日成功着陆火星表面，使中国成为第三个实现登陆火星的国家。火星探测器着陆缓冲机构的构型如图2所示。与“嫦娥三号”着陆缓冲机构<sup>[9]</sup>相比，由于火星具有大气层导致探测器着陆飞行过程中产生高温，火星探测器在着陆飞行过程中需要采用防热大底对着陆探测器进行热防护，从而严格限制了着陆缓冲机构的折叠包络空间<sup>[10]</sup>，因此与“嫦娥”系列着陆器的着陆缓冲机构不同，火星探测器着陆缓冲机构采用了“倒三角架”的构型，由2个多功能主缓冲器、支撑杆、足垫等组成，这种构型具有更高的折叠效率。另外，狭小的安装空间也严重限制了各个缓冲器的径向尺寸，使得单位体积吸能率低的铝蜂窝等缓冲材料无法使用，因为这些材料在达到

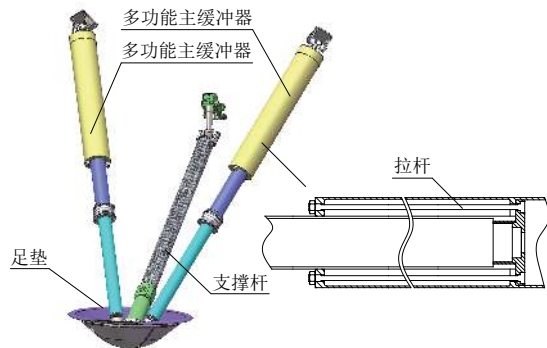


图2 “天问一号”火星探测器着陆缓冲机构和拉杆应用示意图

Fig. 2 The soft landing gears and pull rods made by TWIP steel for Tianwen-1 Mars lander

需要的缓冲力时需要较大的径向空间。基于上述原因，“天问一号”火星探测器着陆缓冲机构全部采用拉杆作为缓冲吸能元件，在多功能主缓冲器内各布置了两根拉杆。着陆时，利用主缓冲器向外滑移的相对运动，拉伸拉杆吸收纵向和水平方向的冲击载荷。与“嫦娥三号”“嫦娥四号”探测器的着陆缓冲机构相比，拉杆在“天问一号”火星探测器着陆缓冲机构中承担了主要的能量吸收功能，对拉杆稳定性和可靠性要求更高。

## 2 TWIP钢塑性变形机理和力学性能

如上所述，拉杆采用的金属材料力学性能，直接决定了拉杆缓冲吸能性能：金属材料的拉伸应力决定了单位材料的能量吸收能力；金属材料的断后伸长率，决定了拉杆的最大缓冲拉伸行程，因此，高拉伸应变和高断后伸长率有利于增强拉杆的能量吸收能力。此外，在深空探测器上使用时，空间高低温环境对材料特性具有重要影响，能够在极端高低温环境保持稳定力学性能，是拉杆材料的关键特性之一。

TWIP钢具有较高的抗拉强度以及突出的塑性，符合着陆缓冲机构的能量吸收材料需求。利用TWIP钢制成拉杆元件，能够提供很高的缓冲塑性变形行程，并在变形过程中吸收大量的能量。

### 2.1 TWIP钢高塑性微观机理

图3给出了TWIP钢在不同拉伸应变量下的微观组织。由图3(a)可以看出，TWIP钢原始组织主要由等轴奥氏体晶粒与少量退火孪晶组成。随着塑性变形的进行，晶粒逐渐沿着拉伸方向拉长，许多形变孪晶也逐渐产生，见图3(b)、图3(c)。应变继续增大时，晶粒的变形更加明显，形变孪晶密度增加，如

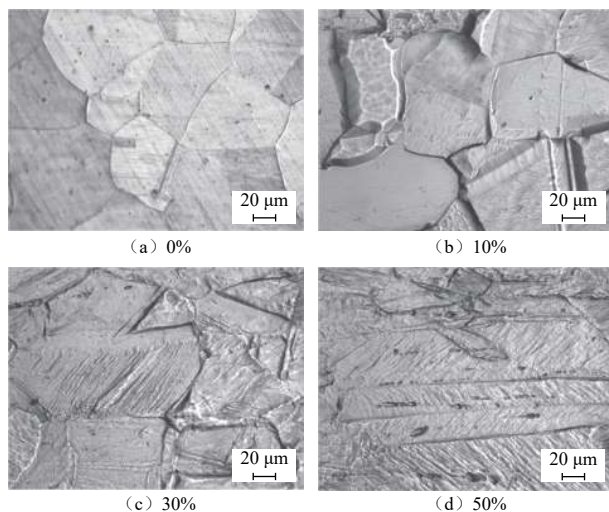


图3 TWIP钢在不同拉伸应变条件下的微观组织

Fig. 3 The micro-structure of directionally solidified twinning-induced plasticity (TWIP) steel under different strain



图3(d)所示。可以发现, TWIP钢拉伸变形时, 材料内部组织结构变化最明显的特征是: 形变孪晶的出现, 而且孪晶量随着变形的进行逐渐增多。形变孪晶一般在拉伸至5%~10%时出现, 因此塑性变形的开始阶段主要依靠滑移, 孪晶出现后, 则以孪生变形机制为主。

## 2.2 TWIP钢拉伸力学性能

图4给出了TWIP钢在室温条件下的静态拉伸应力-应变曲线。与常规碳钢或者不锈钢材料相比, 该材料在具有较高的抗拉强度的同时, 具有突出的塑性, 材料拉伸应变能够达到85%以上。这是因为TWIP钢塑性变形中, 大量形变孪晶的出现, 产生动态Hall-Petch效应, 一方面可有效提升材料强度, 同时也使应变由高应变区向低应变区转移, 宏观上显示出均匀的无颈缩伸长, 从而表现出极高的塑性。

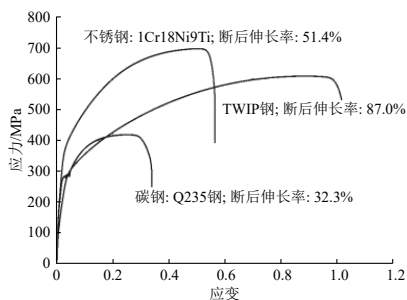


图4 TWIP钢室温拉伸应力-应变曲线

Fig. 4 Engineering stress and strain curve of TWIP steel under room temperature

## 2.3 TWIP钢高低温力学性能

TWIP钢在低温(-60℃)、室温(RT)和高温(100℃)下的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率对比如图5所示。可以看出, 随温度升高, TWIP钢材料屈服和抗拉强度有一定程度的降低, 但是在较宽的温度范围内表现出良好的塑性变形性能, 材料断后伸长率

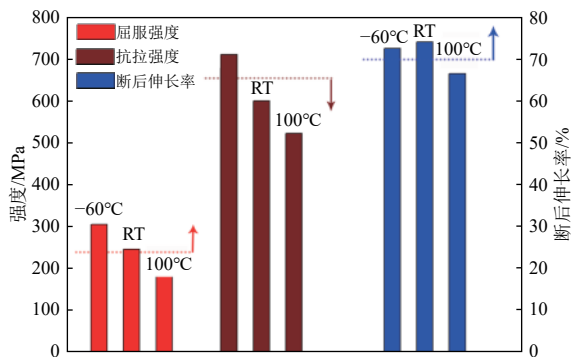


图5 TWIP钢不同温度下力学性能对比

Fig. 5 The mechanical characteristics of TWIP steel under different temperatures

均超过65%, 且受温度影响较小, 这一特性有利于保证在深空高低温条件下深空探测器着陆缓冲机构的安全裕度, 不会因为缓冲材料断裂而导致着陆缓冲机构失效。

## 3 拉杆能量吸收性能分析和试验验证

### 3.1 数值模型

图6给出了单套火星探测器着陆缓冲机构冲击动力学模型。模型中各缓冲器结构和足垫采用壳单元建模, 并采用理想铝合金弹塑性材料模拟材料特性。主缓冲器内的拉杆采用梁单元建模, 并采用图4所示的TWIP钢材料应力-应变模型。着陆器采用刚体模型并施加给定的初速度。主支柱内筒和外筒之间、足垫和着陆面之间采用库伦摩擦模型模拟接触。图6中给出了单套着陆缓冲机构缓冲前后的变形状态。着陆器以一定的初始速度下降, 推动足垫在着陆面上滑行。在滑行过程中, 主支柱受到压缩载荷作用, 使得内部的拉杆发生塑性变形。

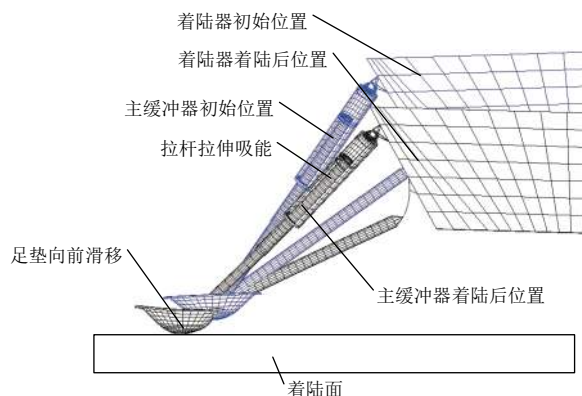


图6 着陆缓冲机构能量吸收过程

Fig. 6 Energy absorption process of soft landing gear

### 3.2 冲击试验

着陆缓冲机构冲击试验系统如图7所示。着陆缓冲机构安装在投放篮上, 投放篮配置了1/4着陆器的重量并被抬升到0.75 m高度, 用于提供预期的着陆速度及初始动能。在每个缓冲器和投放篮之间安装了力传感器, 用于测量从缓冲器输入到着陆器的载荷大小。在着陆面的下面安装了多维测力平台用于测量足垫和着陆面的接触力。拉杆的变形量可以在试验后通过几何尺寸测量得到。

### 3.3 仿真和试验结果分析

火星着陆任务设计时, 着陆缓冲机构需考虑多种复杂地形的着陆工况<sup>[11]</sup>, 因此通过设置多种不同的着陆面, 分析火星探测器着陆缓冲机构在不同地形条件下的着陆能力和缓冲效果。仿真和试验结果对比如图8所示, 设置了水平地面、斜坡、球形障碍3种典型



图 7  着陆缓冲机构冲击试验  
Fig. 7  Dropping test of soft landing gear

地形条件。仿真分析和试验的着陆缓冲机构变形姿态吻合良好。每种工况下能够观察到明显的足垫滑移和拉杆塑性变形，表明着陆缓冲机构在设定的不同工况下都能按照设计预期正常工作。

着陆冲击载荷峰值、拉杆拉伸长度在每次试验后进行了测量，并与仿真分析结果进行了对比，如表1所示。所有的仿真结果都与试验结果较为一致，说明仿真模型能够有效地预测着陆缓冲机构的性能。着陆冲击载荷峰值随着拉杆变形长度增大而增加，这与TWIP钢拉伸应力应变关系相吻合。拉杆的最大拉伸变形试验实测为85.0 mm，仿真分析为79 mm，都小于拉杆最大允许拉伸长度120 mm。这说明着陆缓冲机构具有足够的能量吸收能力。在着陆缓冲机构的作用下，输入着陆舱的冲击响应载荷受到了限制，低于着陆舱结构能够承受的冲击载荷极限。综合来看，TWIP钢拉杆能够有效地吸收着陆器的冲击动能，在允许的缓冲行程范围内限制输入着陆舱结构的冲击载荷，保证着陆安全。

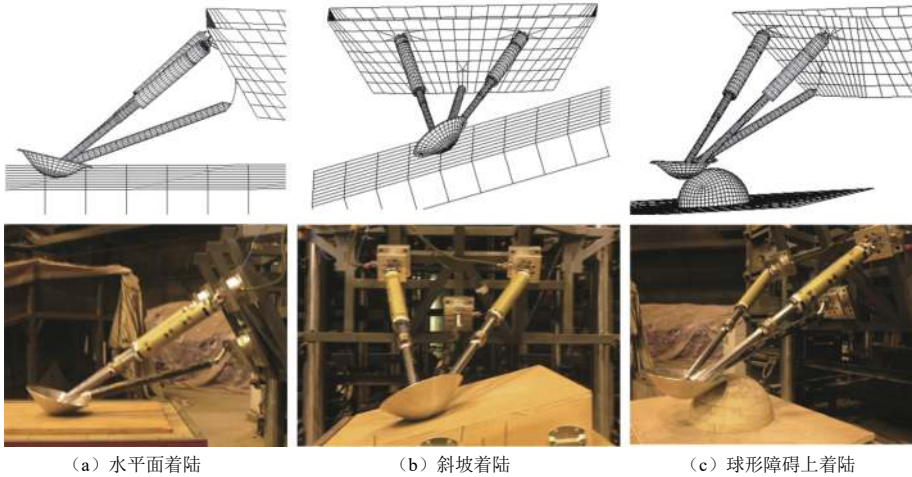


图 8  着陆缓冲机构在不同条件下的变形响应  
Fig. 8  Deformation response of the landing gear under different conditions

表 1  试验和仿真对比

Table 1  Comparison of simulation and testing results

参数	水平面		斜坡		球形障碍	
	仿真值	试验值	仿真值	试验值	仿真值	试验值
左主支柱拉杆拉伸长度/mm	71.1	73.0	79.8	85.0	52.1	40.0
右主支柱拉杆拉伸长度/mm	71.1	68.0	39.3	22.0	46.6	44.0
足垫接触力峰值/kN	24.1	26.6	22.8	21.2	24.2	26.4
左主支柱冲击载荷峰值/kN	17.3	19.2	18.7	19.7	14.5	16.1
右主支柱冲击载荷峰值/kN	17.3	18.7	15.4	15.0	14.2	16.8
辅助支柱冲击载荷峰值/kN	18.8	24.5	19.7	19.7	12.5	16.4

## 4 结 论

本文介绍了“天问一号”火星探测器着陆缓冲机构中采用的TWIP钢制拉杆吸能的设计原理。给出了TWIP钢微观组织、高塑性变形机理及其在不同温度条件下的力学性能, 研究结果表明:

1) TWIP钢与常规金属材料相比, 极限拉伸应力可达600 MPa, 断后伸长率可达72%以上, 并且在极端高低温条件下都能保持优良的塑性变形能力, 能够很好地适应深空探测器着陆缓冲机构对拉杆能量吸收稳定性和材料延伸率、环境适应性的苛刻要求。

2) 着陆冲击动力学仿真和着陆冲击试验结果表明, 应用基于TWIP钢材料的拉杆作为缓冲元件, “天问一号”火星探测器着陆缓冲机构能够在各种复杂着陆工况下有效地吸收冲击能量并且保持载荷输出的稳定性。

3) 在轨飞行验证表明, TWIP钢制拉杆保证了“天问一号”等深空探测器的成功着陆。

## 参 考 文 献

- [1] 杨建中. 航天器着陆缓冲机构[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015.  
YANG J Z. Landing gear of spacecraft[M]. Beijing: China Astroautic Publishing Limited, 2015.
- [2] 曾福明, 杨建中, 姜汉文, 等. 月球及行星探测器软着陆缓冲器技术综述[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第一届学术会议. 哈尔滨: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会, 2005.  
ZENG F M, YANG J Z, LOU H W. Review of soft landing technology for lunar and planetary probes[C]//1st Academic Conference of Committee of Deep Space Exploration Technology Chinese Society of Astronautics. 1st academic conference. Harbin: Committee of Deep Space Exploration Technology Chinese Society of Astronautics, 2005.
- [3] 曾福明, 杨建中, 满剑锋, 等. 月球着陆器着陆缓冲机构设计方法研究[J]. 航天器工程, 2011, 20(2): 46-51.  
ZENG F M, YANG J Z, MAN J F, et al. Study on design method of landing gear for lunar lander[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(2): 46-51.
- [4] ZHENG G, NIE H, LUO M, et al. Parametric design and analysis on the landing gear of a planet lander using the response surface method[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 148: 225-234.
- [5] WANG D, WANG K, LUO M, et al. Microstructure evolution and strain hardening behavior during plastic deformation of directionally solidified twinning-induced plasticity steel[J]. *Materials and Design*, 2015, 66: 627-634.
- [6] LU G, YU T X. Energy absorption of structures and materials[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2003.
- [7] 杨建中, 吴琼, 于登云, 等. 无人月球科考站构建于运行关键技术初探[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(2): 111-117.  
YANG J Z, Wu Q, YU D Y, et al. Preliminary study on key technologies for construction and operation of robotics lunar scientific base[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(2): 111-117.
- [8] 王永滨, 蒋万松, 王磊, 等. 载人登月舱月面着陆缓冲装置设计与研制[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(3): 262-267.  
WANG Y B, JIANG W S, WANG L. Design and development of landing gear technology for manned lunar landing[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(3): 262-267.
- [9] 杨建中, 满剑锋, 曾福明, 等. “嫦娥三号”着陆缓冲机构的研究成果及其应用[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(6): 20-27.  
YANG J Z, MAN J F, ZENG F M, et al. Achievements and applications of landing gear for Chang'e-3 lander[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(6): 20-27.
- [10] 饶炜, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星着陆探测任务关键环节技术途径分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(2): 121-128.  
RAO W, SUN Z Z, MENG L Z, et al. Analysis and design for the Mars entry[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(2): 121-128.
- [11] 王越, 王彪, 王迅, 等. 火星探测任务着陆区选址和地质分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 371-383.  
WANG Y, WANG B, WANG X, et al. Analysis and selection of landing areas for Mars mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(4): 371-383.

作者简介:

罗敏(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 航天器冲击与振动。

通讯地址: 北京市海淀区5142信箱365分箱(100094)

电话: (010)68117338

E-mail: 46397861@qq.com

# Design and Test Verification of Energy Absorption Material in the Soft Landing Gear for Tianwen-1 Mars Probe

LUO Min<sup>1</sup>, YANG Jianzhong<sup>1</sup>, HAN Fusheng<sup>2</sup>, MAN Jianfeng<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. Institute of Solid State Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230021, China)

**Abstract:** The landing gear is a key component for soft-landing on Mars, which should use high energy-absorption and excellent thermal stability material to absorb the impact energy of Mars probe. The energy absorption pull rods made by directionally solidified twinning-induced plasticity (TWIP) were utilized for the soft landing gears of Mars lander. The mechanical behavior and microstructure evolution of TWIP steel were investigated. The results show that TWIP steel can sustain the high plasticity of 600 MPa ultimate true stress and 72% true strain. The landing dynamic simulation and experiment results of soft-landing gear drop testes demonstrate that that Mars landing system is able to adapt to the complex topography conditions because of the high energy absorption ability of pull rods.

**Keywords:** austenitic twinning-induced plasticity steel with high manganese content; landing gear; deep space exploration; design; energy absorption

## Highlights:

- Energy absorption pull rods made by TWIP steel were applied in the landing gear of “Tianwen-1” Mars probes.
- The mechanical behavior and microstructure evolution of TWIP steel were tested.
- 600 MPa ultimate engineering stress and 72% engineering strain of TWIP steel were obtained.
- Mars landing system is able to adapt to the complex topography conditions.

[责任编辑：宋宏，英文审校：刘勇]