

固体火箭发动机药柱结构完整性评估技术研究进展

第二部分 李林根

推进剂及粘接界面失效研究

2.1 推进剂失效研究

推进剂失效准则的研究目标是为固体火箭发动机在其全生命周期内的药柱结构完整性提供科学评判标准。通常，研究通过拉伸、压缩等力学性能试验，获取推进剂的最大抗拉强度和最大延伸率等关键参数，从而建立失效准则。这些准则包括最大应力准则、最大应变准则、最大剪应力准则、von Mises准则以及双剪统一强度准则。

常用失效准则：

- 最大应力/应变准则：**因其计算简单，常作为推进剂失效分析的基础。在固化降温和工作内压下，通常以伸长率为准则；在加速度载荷下，则以强度为准则。
- 最大剪应力准则：**能够很好地解释屈服现象，但忽略了中间主应力的影响。
- von Mises准则：**尽管未考虑静水压力的影响，但实际高静水压力会增加材料的屈服和压缩强度。
- 双剪统一强度理论：**兼顾了拉压不对称效应、静水应力、正应力和中间主应力效应，提供了更全面的分析方法。

最新研究与应用：

- 近年来，基于双轴拉伸试验，研究进一步探讨了不同温度和加载速率对推进剂力学性能的影响，并在此基础上构建了修正的强度准则。Wang等人通过双剪统一强度理论分析了围压对推进剂力学性能的影响，提出了更精确的失效分析方法。

研究现状与挑战：

推进剂失效准则的研究已取得一定成果，但在复杂外界载荷下的失效行为仍需进一步探讨。现有准则主要基于宏观断裂现象，较少考虑微观损伤。未来的研究方向是从微观层面入手，建立更加准确的推进剂损伤失效准则，进一步提高药柱结构完整性评估的精度。

2.2 推进剂/衬层界面失效研究

推进剂与衬层之间的粘接界面失效是影响火箭发动机药柱结构完整性的关键问题。研究工作涵盖了粘接界面的力学性能及其失效模式，分为宏观和细观两个层面展开。

1. 宏观失效模式：

- **界面失效：**推进剂内部固体填充颗粒与基体粘接界面的“脱湿”损伤是界面失效的主要原因。
- **内聚失效：**最常见的失效模式，发生在推进剂内部。可通过温度-应变率失效包络推导界面失效包络。
- **混合失效：**在长期贮存过程中，组分迁移等复杂因素导致界面失效与内聚失效的复合破坏。

2. 细观失效机理：

- 粘接界面在外载荷作用下的细观结构变化是研究的重点。利用现代先进的观测技术，研究揭示了推进剂及粘接界面的微观损伤演化。
- 实验表明，界面强度与加载角度密切相关：在单轴拉伸下，界面强度最大；在纯剪切加载下，界面表现出最大的延伸率。

当前研究中的挑战与发展方向：

推进剂/衬层界面失效机理的研究尚无成熟的失效准则，通常采用推进剂失效准则来分析界面失效。然而，研究发现，粘接界面的失效行为在复杂应力状态下与推进剂内部的失效模式存在显著差异。为更全面地理解界面失效机理，需要进一步优化实验方法和仿真工具，特别是在复杂外载荷条件下。

进一步的研究表明，推进剂/衬层界面失效的典型机理与模式总结为：

- **“脱湿”损伤**是推进剂内部固体填充颗粒与基体粘接界面失效的根本原因，且粘接强度与外界条件息息相关。
- **界面与混合破坏模式**在长期贮存过程中尤为显著，表现出因组分迁移引发的异质性破坏。

此外，影响复合固体推进剂等效松弛模量的关键微观参数包括力学属性、颗粒含量、界面脱湿、加载速率和温度等。这些因素对推进剂的等效松弛模量产生显著影响。深入研究这些微观参数的变化将有助于更好地理解和预测推进剂的力学性能，从而优化材料配方和结构设计，并为建立更加精确的本构模型奠定基础。

固体推进剂及粘接界面失效研究为固体火箭发动机装药设计提供了理论基础，同时指出了未来的研究方向。我们期待，随着数值仿真技术与试验手段的进一步发展，能够建立更为全面和精准的失效准则，为火箭发动机的长期稳定性提供保障。