

预报材料结构强度和强非均匀变形的新思路

几乎所有的工程设计都依照安全规范进行，然而安全事故仍层出不穷



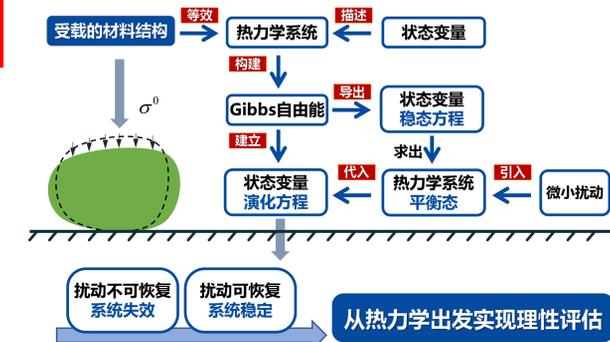
强度与变形两大固体力学核心问题均未能得到圆满解决！

- 存在问题**
- 强度预报**
 - 依赖经验的强度理论易出现强度预报失准
 - 大安全系数造成资源浪费
 - 变形预报**
 - 准确本构模型的建立极其困难
 - 基于本构方程的经典解法不能正确地预报高度非均匀变形

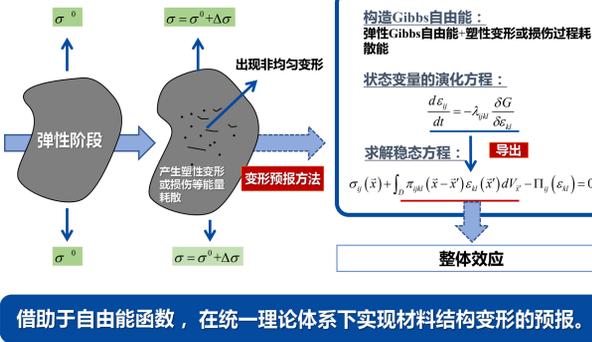
- 研究目标**
- 建立普适的理论体系，实现材料结构强度和变形局域化的准确预报，力图在固体力学两大核心问题上有所突破。
 - 致力于改善结构设计和安全评估的规范和方法，使之摆脱在工程上普遍采用的经验模型桎梏。

研究思路

不借助于经验准则，实现材料结构强度的预报



不借助本构方程，实现材料变形的预报



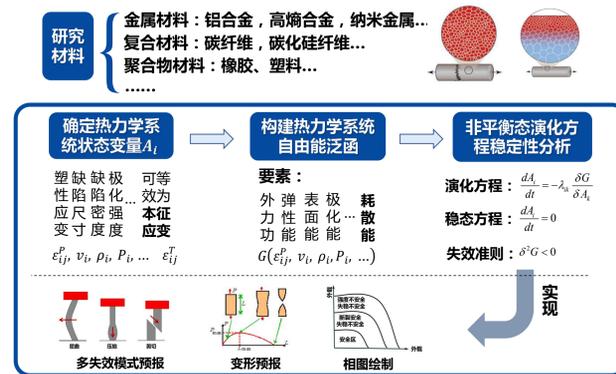
科学价值

- 致力于固体力学“两大核心问题”的研究
摒弃基于经验的强度准则以及材料的局域本构方程，有望实现对材料结构强度和变形局域化的准确预报。
- 建立多模式失效问题的普适、统一理论框架
有望准确预报材料结构失效的全过程，为工程材料结构精细化设计提供可靠的理论依据和设计基础。
- 助力国家重大工程及装置的战略发展需求
有望进入航空航天、核工程、土木建筑等领域的设计规范。

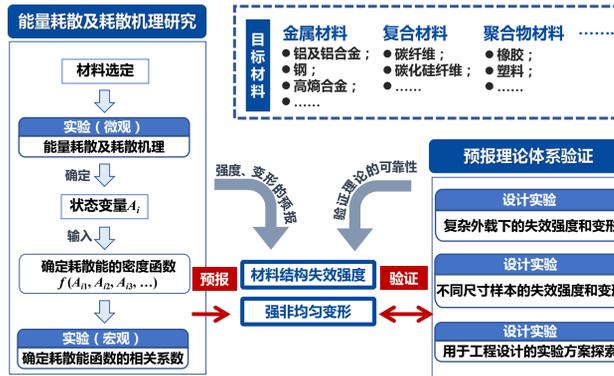


研究内容

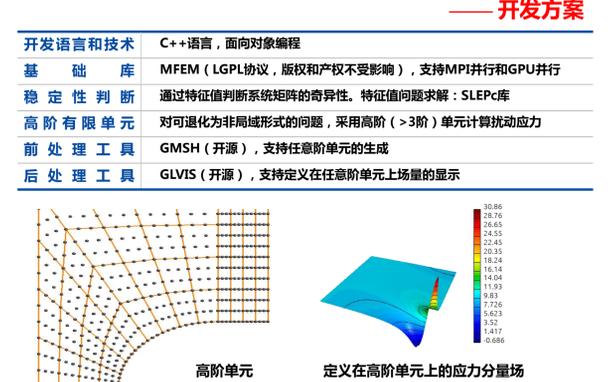
(一) 构建预报材料结构失效的统一连续介质热力学理论



(二) 材料失效和变形预报理论实验验证



(三) 基于连续介质热力学理论体系的数值软件设计和开发



部分研究成果

(1) 构建连续介质热力学普适理论框架初探

(a) 基于非平衡态热力学探究材料结构失效的本质

采用局部应力最大准则与全局能量准则预报脆性材料单晶缺陷长度变化的强度对比。全局能量准则与实验结果相符合。

材料的强度依赖于材料样本的整体性能，并非是材料的本征属性。

Wang, B. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020; 63(12), 124611.

(b) 基于非平衡态热力学研究材料理想强度

多种典型材料的理想强度 复杂加载材料理想强度

采用该理论体系，结合第一性原理仿真，成功预报了多种材料在复杂加载条件下的理想强度。

Chen, JP, Liu, WG, Wang, B. *Extreme Mechanics Letters*, 2021; 44: 101233.
Liu, Z, Wang, B. *AIP Advances*, 2021, 11(9): 095111.

(c) 韧性金属的强度预报

将体系塑性失配应变变化为本征应变，导出了塑性应变的演化方程：

$$\frac{d\epsilon_{ij}}{dt} = \lambda_{ij} \left[\sigma_{ij} - C_{ijkl} \epsilon_{kl} + \int_{V'} G_{ijkl}(\mathbf{x}-\mathbf{x}') \epsilon_{kl}(\mathbf{x}') dV' \right]$$

利用单轴拉伸试验拟合耗散能系数，得到了保持条件下体系的强度曲线。

在位移加载条件下，该理论得到的镁合金强度值与已发表的实验结果相吻合。

Wang, B. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 2021; 88(2), 021008.

(二) 连续介质热力学理论可靠性的初步实验验证

单轴拉伸 等双轴拉伸

实现了双轴加载下材料真实强度的测量

316L不锈钢的耗散能展开系数

Specimen number	A	B	C	D
1	261.0	478.2	-278.4	-117.2
2	263.5	482.1	-284.5	-111.8
3	256.7	493.5	-291.6	-114.9

利用简单试验拟合的参数，本理论成功预测了双轴拉伸强度，且与实验值高度吻合。

Hu, YY, Chen, JP, Wang, B. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022; 65(4), 244611.

(三) 已完成的论文

- Wang, B. "A General Thermodynamic Theory for Predicting the Failure Property of Material Structures with Complex Loadings," *Engineering Fracture Mechanics*, 2021; 254, 107936.
- Wang, B. "The intrinsic nature of materials failure and the global non-equilibrium energy criterion," *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020; 63(12), 124611.
- Chen, JP, Liu, W, Wang, B. "Prediction of theoretical strength of diamond under complex loadings," *Extreme Mechanics Letters*, 2021; 44: 101233.
- Liu, Z, and Wang, B. "Prediction on the theoretical strength of diamond, c-BN, Cu and CeO₂," *AIP Advances*, 2021, 11(9): 095111.
- Wang, B. "Material Strength: A Rational Nonequilibrium Energy Model for Complex Loadings," *Journal of Applied Mechanics*, 2021; 88(2), 021008-1—021008-7.
- Zhou, J, Wang, B. "Erratum: 'Material Strength: A Rational Nonequilibrium Energy Model for Complex Loadings' [ASME J. Appl. Mech., 88(2), p. 021008; DOI: 10.1115/1.4048988]," *Journal of Applied Mechanics*, 2021; 88(10).
- Liu, Z, Wang, B, Claudio C. "Mechanical and electronic properties of CeO₂ under uniaxial tensile loading: A DFT study," *Materialia*, 2021 15: 101050.
- Liu, Z, Wang, B. "Comparative study on the strain-dependent mechanical and electronic properties of Nb₃Al and Nb₃Sn," *Materials Research Express* 2021, 8: 086001.
- Hu, YY, Chen, JP and Wang, B. "Global nonequilibrium energy criterion for predicting strength of 316L stainless steel under complex loadings: theoretical modeling and experimental validation," *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 65(4):1-10.
- Zhu, Y, Wand, B. "A Thermodynamic Criterion for Material Failure", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, (in review).



研究得到国家自然科学基金委的持续支持
国家自然科学基金原创探索计划项目 (2022.01—2024.12) :
预报材料结构强度和变形局域化新思路 (项目编号10021501)

研究团队

负责人：王彪
成员：李润霞、张纯再、陈家鹏、刘钊、周洁、付茂青、胡琰莹、黄照文、温冬辉