中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 5 期: 1428 ~ 1429
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

精选文章导读

2 GPa超高强钢构件马氏体-下贝氏体复相热冲压强韧化机理

宋燕利[1], 李晔[1], 路珏[1], 华林[1,2*], 顾艳峰[1], 杨怡宽[1]

1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070
2. 武汉理工大学材料复合材料新技术全国重点实验室, 武汉 430070
* E-mail: hualin@whut.edu.cn

1 研究背景

超高强钢热冲压是冲压-热处理一体化的汽车轻量化核心技术, 可实现高强度、高刚度、抗冲击的板类构件先进成形制造, 其工艺流程为: 将钢板加热至完全奥氏体化进行模具冲压成形, 然后在模内保压淬火, 最终获得全马氏体组织构件, 抗拉强度达1.5 GPa以上, 延伸率约5%. 随着热冲压构件强度的提升, 延伸率和韧性急剧下降, 严重制约了2 GPa级超高强钢构件的应用[1].

超高强钢热冲压构件强韧性调控主要依赖于微合金化和成形工艺等措施. 微合金化通过添加Nb、Mo、V、Ti、Cr等合金元素调控微观组织, 可在一定程度上改善超高强钢强韧性[2], 但会导致材料成本的显著增加, 同时还可能会对构件后续焊接产生不利影响[3]. 成形工艺调控是通过改变热冲压条件, 优化微观组织状态[4], 但现有工艺在提升韧性的同时通常会导致强度一定程度的下降. 到目前为止, 有关超高强钢强韧性调控几乎都是微合金化方法, 而通过成形工艺调控实现强度和韧性双增的相关研究鲜有报道, 迫切需要开展新型高强韧热冲压工艺技术基础研究.

2 本文工作

本文针对热冲压超高强度钢构件强韧性难以协同调控国际性难题, 创新性地提出了马氏体-下贝氏体复相热冲压新工艺(图1(a)), 通过“高温成形-中温缓冷-低温急冷”的热力耦合调控相变路径, 成功将传统单一马氏体组织转变为马氏体-下贝氏体复相组织, 实现了强度和韧性双增, 突破了强韧性“倒置”关系(图1(e)). 研究发现, 在马氏体-下贝氏体复相热冲压工艺条件下, 先形成的下贝氏体能够约束马氏体生长空间, 将其板条宽度细化至亚微米尺度, 并实现残余奥氏体稳定化与纳米碳化物弥散析出(图1(b)和(c)), 使复相组织保持超高强度的同时, 显著提升材料的韧性. 研究揭示了热冲压工艺条件-复相组织状态-机械性能的关联机制, 建立了马氏体-下贝氏体复相热冲压组织与力学性能之间的映射关系(图1(d)), 破解了热冲压构件超高强度与优异韧性难以兼顾的技术难题, 为新能源汽车轻量化制造提供了科学依据和技术方法.

3 本文结论

本文提出了超高强钢马氏体-下贝氏体复相热冲压新工艺, 揭示了马氏体-下贝氏体复相组织热冲压过

英文全文见: Song Y L, Li Y, Lu J, et al. Strengthening and toughening mechanisms of martensite-bainite microstructure in 2 GPa ultra-high strength steel during hot stamping. Sci China Tech Sci, 2025, 68: 1520201, https://doi.org/10.1007/s11431-024-2901-8

© 2026《中国科学》杂志社

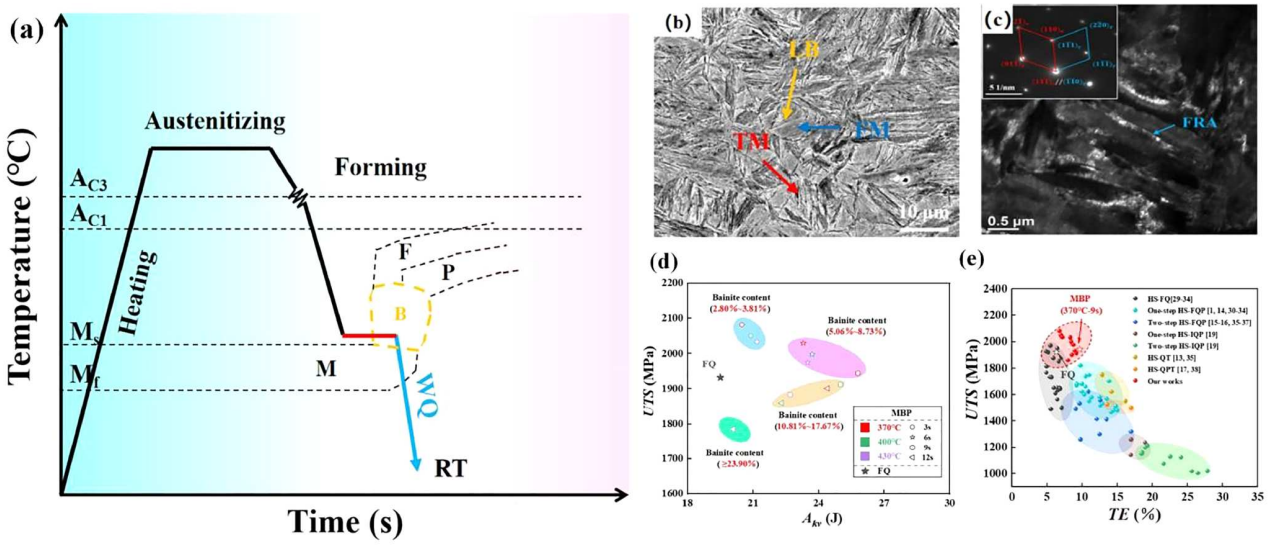


图1　(网络版彩图) (a) 马氏体-下贝氏体复相热冲压工艺路线; (b) 马氏体-下贝氏体复相组织的SEM显微组织; (c) TEM下的薄膜状残余奥氏体形态; (d) 工艺条件、复相组织与机械性能间的关联机制模型; (e) 同类材料不同工艺的力学性能对比

Figure 1　(Color online) (a) The details of martensite-low bainite complex-phase hot stamping; (b) SEM microstructure of the martensite-low bainite complex phase; (c) TEM microstructure of film-like retained austenite; (d) relationships among the process conditions, microstructure, and mechanical properties; (e) comparison of mechanical properties with those of other processes for similar materials.

程中的演变规律和机制, 建立了马氏体-下贝氏体复相热冲压组织与力学性能之间的映射关系. 研究结果表明, 当下贝氏体体积分数处于3%~18%区间时, 材料可获得良好的强韧性匹配, 抗拉强度达1.9~2.1 GPa, 延伸率达7%~10%; 相较于传统热冲压, 马氏体-下贝氏体复相热冲压工艺能够实现强度与韧性的协同提升.

参考文献

1　Lu J, Song Y, Hua L, et al. Influence of thermal deformation conditions on the microstructure and mechanical properties of boron steel. Mater Sci Eng-A, 2017, 701: 328–337

2　Linke B M, Gerber T, Hatscher A, et al. Impact of Si on microstructure and mechanical properties of 22MnB5 hot stamping steel treated by quenching & partitioning (Q&P). Metall Mater Trans A, 2018, 49: 54–65

3　Ju Y, Li C, Yang X, et al. Recent progress on additive manufacturing of steel-based functionally graded materials. Mater Today Commun, 2024, 40: 109953

4　Wei X, Chai Z, Lu Q, et al. Cr-alloyed novel press-hardening steel with superior combination of strength and ductility. Mater Sci Eng-A, 2021, 819: 141461