

汽车底盘用超高强度钢及铸造铝合金的应用研究

李子曰¹, 薛丰盛³, 朱新德^{1,2*}, 江亚³, 武玉英^{1,2}, 唐长刚³, 糜仁泽³, 石玉勇³

1. 山东大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250061

2. 建新赵氏集团有限公司博士后工作站, 浙江 宁波 315612

3. 宁波建新底盘系统有限公司, 浙江 宁波 315821

摘 要 : 随着汽车工业的不断发展, 汽车减重与减少尾气污染将是未来大势所趋。汽车底盘作为汽车的基础部件, 对汽车性能和质量有着重要影响。以超高强度钢为代表的材料广泛应用于汽车底盘, 同时, 铸造铝合金也被广泛应用在新能源汽车底盘中, 不仅解决汽车尾气带来的环境污染问题, 也为汽车轻量化提供了新的方案。基于国内外的大量研究, 本文简要介绍了汽车底盘用超高强度钢的种类及铸造铝合金对汽车底盘轻量化的作用, 并对超高强度钢和铝合金的发展趋势进行了展望。

关 键 词 : 汽车底盘; 超高强度钢; 铝合金; 轻量化; 力学性能

Research on the Application of Ultra-High Strength Steel and Cast Aluminum Alloy in Automobile Chassis

Li Ziyue¹, Xue Fengsheng³, Zhu Xinde^{1,2*}, Jiang Ya³, Wu Yuying^{1,2}, Tang Changgang³, Mi Renze³, Shi Yuyong³

1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061

2. Jianxin Postdoctoral Workstation of Zhao Group Co., LTD. Ningbo, Zhejiang 315612

3. Ningbo Jianxin Chassis System Co., Ltd. Ningbo, Zhejiang 315821

Abstract : With the continuous development of the automobile industry, the automobile weight reduction and reduce the exhaust pollution will be the general trend of the future. As the basic part of automobile, automobile chassis has an important influence on the performance and quality of automobile. Materials represented by ultra-high strength steel are widely used in automobile chassis. At the same time, casting aluminum alloy is also widely used in the chassis of new energy vehicles, which not only solves the environmental pollution problem brought by automobile exhaust, but also provides a new solution for automobile lightweight. Based on a large number of studies at home and abroad, this paper briefly introduces the type of ultra-high strength steel and the role of cast aluminum alloy in automobile chassis, and prospects the development trend of ultra-high strength steel and aluminum alloy.

Keywords : automotive chassis; ultra-high strength steel; aluminum alloy; lightweight; mechanical properties

前言

超高强度钢是指在室温下, 一种拉伸强度高于1479 MPa、屈服强度高于1380 MPa的合金钢^[1]。采用超高强度钢可以实现车辆的轻量化, 进而改善车辆的燃油经济性并且降低碳排放量, 在提高汽车的抗碰撞能力和安全性方面具有重要意义。底盘作为车辆的关键部件, 其自重占汽车总质量的30 %以上, 其轻量化不但能减少燃油消耗, 而且能提高车辆的乘坐舒适性, 因此实现汽车底盘的轻量化是非常重要的。目前汽车轻量化设计的途径有三种: (1) 结构优化设计 (2) 有限单元分析技术 (3) 新型材料的应用^[2], 其中在新型材料的应用中, 采用轻质材料是汽车轻量化的一种重要措施, 超高强度钢与其他轻质材料相比, 焊接性能好, 弹性模量高, 刚性好, 抗冲击性能好, 性价比高, 易于购买, 耐撞击, 抗疲劳强度高^[3], 将其应用在汽车底盘中可降低汽车的整体质量。各类汽车板材抗拉强度与延伸率之间关系如图1所示。

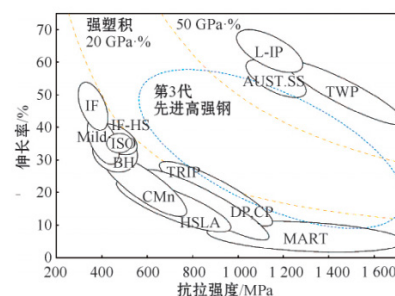


图1 各类常规与先进高强度钢强度与伸长率数据汇总^[4]

同样作为轻质材料的铝合金也具有强度高的特性，新能源汽车底盘常用铸造铝合金主要有 Al-Si 系合金和 Al-Mg-Si 系合金将其应用在汽车底盘中，能很大程度地减少汽车自重，减重效果好，且不易腐蚀，回收难度低，利用率高，具有绿色环保的优势。

本文对当前应用在汽车底盘上的高强低合金钢（HSLA）、相变诱发塑性钢（TRIP）、铁素体贝氏体高强度钢（FB）的组织性能、生产工艺技术方面以及新能源汽车铝合金轻量化发展现状进行了综述。

一、超高强度钢

（一）高强度低合金钢（HSLA）

高强度低合金钢因其优越性能和低成本，在汽车底盘用钢中应用广泛。其主要成分为析出强化铁素体，含少量珠光体和贝氏体。与双相钢相比，高强度低合金钢的精冲性能更佳，这得益于其极少的硬质相。低碳和低合金含量使其具备更高的延展性、韧性和可焊性。此外，低合金含量和无需成形后热处理的特点，使其成为汽车底盘应用的理想选择。使用这种钢材可直接提升汽车部件的强度并实现轻量化。目前，热轧 Docol 高强度低合金钢已在底盘制造中得到应用。

双相高强度低合金钢的塑性和延展性优于传统高强度低合金钢，但两者的拉伸强度相近。为降低碳含量并提升焊接性和强度，钢中添加了合金元素 Cu，形成 Cu 沉淀相。Cu 析出相可显著提高钢材强度，从而替代碳素强化，使钢材在保持高强度的同时，无需预热或仅需低温预热即可焊接，降低了生产成本并改善了焊接性能。此外，Cu 的加入增强了钢材的耐蚀性^[6]。居殿春等人研究了硼元素对高强度低合金钢机械性能的影响，发现固溶硼能有效控制 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变，抑制珠光体形成，增加贝氏体含量并细化亚结构，从而提升强度并保持低温韧性^[6]。杨红来等人开发的细晶粒低合金高强钢 HC420LA，具有良好的成形性和焊接性，适用于汽车底盘^[7]。李堃等人进一步优化了 HC420LA 的生产工艺，通过调整 C、Si、Mn 和 Nb 的含量、降低退火温度以及提高冷轧压下率来增强其强度^[8]。目前，我国通过引入先进生产工艺，改进了微合金钢的冶炼、控轧和控冷技术，钢铁企业和科研机构也在不断研发优质钢种。

（二）相变诱发塑性钢（TRIP）

TRIP 钢由铁素体、贝氏体和残余奥氏体组成，其高强度和高延伸率源于三种组织的合理配比及相变诱发原理。TRIP 钢兼具高强度、高塑性和优异的抗腐蚀性能，因此广泛应用于底盘设计。叶平等利用 600 MPa 级 TRIP 钢研制车架横梁件，通过结构分析和 CAE 仿真模拟，预计可将钢板厚度减至 1.9 mm 以下，同时显著提升横梁件的耐疲劳性和耐腐蚀性^[9]。化学成分对 TRIP 钢的性能起到了关键作用，李志峰等人认为残余奥氏体量是否稳定受热处理温度及其含碳量的影响^[10]，碳元素控制在 0.10 % ~ 0.20 % 之间可平衡奥氏体的稳定性。硅是影响 TRIP 效应的关键元素，李壮等人研究发现，硅倾向于存在于铁素体中，提高碳的化学位，从而增加残余奥氏体的碳含量和稳定性，同时提升机械稳定性^[11]。史文等人进一步研究表明，随着两相区退火温度升高，残余奥氏体量及其碳含量增加，屈服强度和拉伸强度也随

之提高^[12]。锰作为 TRIP 钢中的重要组分，可以增大奥氏体相区，降低 Ac3、Acl 的相变点及马氏体转变温度，获得适当的奥氏体结构，在 1 %Mn 的作用下，Ms 点可下降 30 °C^[13-14]。添加 Mn 元素可显著改善 TRIP 钢中的奥氏体稳定性及残留奥氏体含量，是影响 TRIP 钢综合性能的关键因素。采用合适的热工艺也可使 TRIP 钢获得更优的性能。

（三）铁素体 - 贝氏体高强度钢（FB）

热轧铁素体 - 贝氏体高强度钢（FB）由非常细小的铁素体和贝氏体晶粒组成。铁素体具有很高的伸长率性能，贝氏体则提升边缘拉伸性。它们的相间硬度差异最小，使 FB 钢的高扩孔率（HHE）性能与拉伸翻边性能得以提升，这两者都是局部成形性的主要衡量指标。与强度相似的高强度低合金（HSLA）钢相比，铁素体 - 贝氏体钢具有更高的总伸长率和更高的加工硬化指数（n 值）^[15]。热轧铁素体 - 贝氏体高强度钢的高局部成形性使其非常适合翻孔成型，且具有高扩孔率、抗拉强度和抗疲劳性能，适用于承受交变载荷的汽车零部件。福特标准 WSS-M1A368-HRFB450 铁素体贝氏体可用于制造汽车底盘中的支撑架、悬挂臂等部件，能够承受较大的载荷和冲击。合金成分对 FB 钢性能有较大影响。热轧过程中，硅的固溶和细晶强化效应明显，其加入提高了屈服强度，减小了两相间硬度差异，从而提升了扩孔率^[16]。Nb 元素的增多，不仅使钢的微观结构得到细化，而且其沉淀相增强了基体组织的强度，减小了铁素体与贝氏体之间的强度差异^[17]。合适的冷却过程可以保证 FB 钢的最优性能。随空冷时间的延长，铁素体体积含量增大，钢的强度降低，延伸率和孔隙率增大；在 150 °C /s 的冷速率下，由于马氏体的相变引起扩孔性显著降低；在 450 °C 的卷制条件下，中间空冷时间 6—9 秒，冷却速率 50 °C /s，可以得到具有良好扩孔性的热轧高扩孔钢^[18]。

二、新能源汽车底盘铝合金轻量化发展现状

（一）铝合金的特性

铝合金是以铝为基体，加入铜、镁、锌和硅等元素制成的轻金属材料。其密度为 2.63-2.85 g/cm³，质量仅为钢的 30%，强度高（ σ_b 为 110-650 兆帕），比刚度接近高合金钢。具有良好的铸造性、塑性加工性、导电性、导热性、耐腐蚀性和可焊性。由于其密度低，碰撞时变形较小，吸收碰撞能量的能力优于钢，从而显著提高了汽车安全性。此外由于铝合金的可回收性高，因此在使用过程中一旦发生损坏或失效后还可以进行回收循环利用，属于绿色环保材料^[19]。

（二）铝合金在新能源汽车底盘中的应用

新能源汽车的传动系统与传统燃油汽车不同，不再依靠发动机进行传动，而是由单电机传动、主电机、轮毂电机传动、双电机双轴传动等3种方案进行传动^[20]。为减轻重量，新能源汽车底盘设计中常用铝合金替代钢材。控制臂、制动钳和转向节等底盘安全件对性能要求较高，因此在轻量化设计中，不仅要减轻重量，还需确保零部件功能，保障整车的主、被动安全。目前，发达国家材料学专家正深入研究合金性能，尝试将 T6 铝合金转化为 RRA 状态，以提高其耐腐蚀性、抗拉强度和峰值硬度^[21]。在汽车用铝材中，铸造铝件占八成左右。ZL120、ZL119、YL118 广泛应用于新能源汽车底盘中。美国福特汽车公司、路虎、凯迪拉克等汽车品牌都广泛使用铝合金应用在底盘零件中^[22]。

三、未来发展方向探讨

（一）超高强度钢与铸造铝合金发展趋势

随着汽车行业的快速发展，超高强度钢在汽车领域的广泛应用已成为必然趋势，其需求量持续增长。人们对超高强度钢的耐疲劳性、耐腐蚀性和塑性韧性提出了更高要求。由于钢铁材料的合金体系复杂、工艺繁琐且组织性能多样，高通量计算与设计研究有助于推动特殊钢的更新换代。在传统淬火-碳配分工艺基础

上改进的淬火-碳配分-回火工艺，可显著提升钢材的强韧性能，为超高强度钢的研发提供支持。

铝合金冶炼过程能耗大、设备需求多，导致价格远高于钢铁。要扩大铝合金的应用范围，需加大研发投入，优化合金性能并控制成本，以提升市场竞争力，从而实现车辆轻量化目标。目前，国内车身用铝合金板材的研究主要基于现有牌号，尚未开发出具有自主知识产权的新型变形铝合金。与欧美日等国际先进企业相比，我国在铝合金研究方面存在明显差距。因此，应加快铝合金研发进程，优化加工技术，改进铸造和热处理工艺，尽快开发出安全可靠、实用性强的自主知识产权铝合金板材。

四、结语

综上所述，随着科技水平的不断提高和汽车行业的不断进步，对车辆底盘材料的要求不断提高。汽车轻量化可以促进汽车性能的提升，更好地进行生态环境保护，响应国家号召。超高强度钢与铸造铝合金在未来汽车制造行业的发展中将会发挥越来越重要的作用，有助于提高我国汽车工业的国际竞争力。本文通过对汽车底盘用超高强度钢性能、工艺及新能源汽车铝合金轻量化发展现状进行论述，希望未来科技工作者能研发出更多、性能更优的汽车底盘用材，帮助我国汽车制造技术迈入新的台阶！

参考文献

- [1] 牛艳娥, 赵茆沛, 李宁等. 国内外超高强度钢的研究现状及应用 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(07): 274-279.
- [2] 李云. 汽车车身轻量化设计方法探析 [J]. 科技资讯, 2018, 16 (17): 79-80.
- [3] 贺敬舒. 高强度低合金钢弯曲性能及耐磨性能研究 [D]. 郑州大学, 2022.
- [4] 赵征志, 陈伟健, 高鹏飞等. 先进高强度汽车用钢研究进展及展望 [J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(12): 1059-1076.
- [5] 张中武. 高强度低合金钢 (HSLA) 的研究进展 [J]. 中国材料进展, 2016, 35(02): 141-151.
- [6] 居殿春, 刘家琪, 卢军辉等. 固溶硼对高强度低合金钢机械性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(03): 38-41.
- [7] 杨红来, 杨源华, 张亚君. 低合金高强度冷轧产品 HC420LA 的研制与开发 [J]. 江西冶金, 2020, 40(03): 18-22.
- [8] 李莹, 厚健龙, 向华等. 低合金冷轧高强度 HC420LA 生产工艺优化 [J]. 河南冶金, 2021, 29(05): 28-30.
- [9] 叶平, 张梅, 苏钰等. TRIP 钢在汽车底盘结构件中的应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2006, (09): 23-25+27.
- [10] 李志峰, 符仁钰, 马娟等. 热处理工艺对高强度 TRIP 钢组织与性能的影响 [J]. 上海金属, 2011, 33(06): 10-14+27.
- [11] 李壮, 王铁利, 曹仁焕等. 硅、锰合金元素含量对 TRIP 结构钢力学性能的影响 [J]. 东北大学学报, 1999, (03): 79-82.
- [12] 史文, 李麟, 符仁钰. 两相区退火对不同硅含量 TRIP 钢残留奥氏体和力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2003, (03): 10-14.
- [13] 马鸣图. 双相钢-物理和力学冶金 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 64.
- [14] 方鸿生, 冯春, 郑燕康等. 新型 Mn 系空冷贝氏体钢的创制与发展 [J]. 热处理, 2008, (03): 2-19.
- [15] 王刚, 叶盛薇, 孙自来等. 热轧酸洗高扩孔性铁素体贝氏体钢板的应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2014, (08): 60-63+67.
- [16] 郭子峰, 张衍, 李秋寒等. Si 对 580 MPa 级热轧高扩孔钢组织性能及表面质量的影响 [J]. 上海金属, 2020, 42 (01): 45-49+54.
- [17] 董毅, 韩斌, 时晓光等. Si 和 Nb 对高强热轧高扩孔钢组织和性能的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2016, 24 (02): 53-57.
- [18] 王孟, 刘斌, 刘永前等. 冷却工艺对热轧高扩孔钢组织与性能的影响 [J]. 钢铁研究, 2016, 44 (04): 30-33.
- [19] 杨甄鑫, 廖抒华. 轻质合金在汽车轻量化中的应用 [J]. 汽车零部件, 2021, (01): 107-113.
- [20] 叶正挺. 新能源汽车铝合金轻量化及其连接技术发展现状 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13 (20): 155-158.
- [21] 陈璋文. 汽车底盘常用金属材料机械性能分析 [J]. 时代汽车, 2022, (11): 150-151.
- [22] 侯世忠. 汽车用铝合金的研究与应用 [J]. 铝加工, 2019, (06): 8-13.