



国际自动机工程师学会 (SAE INTERNATIONAL) 授权出版

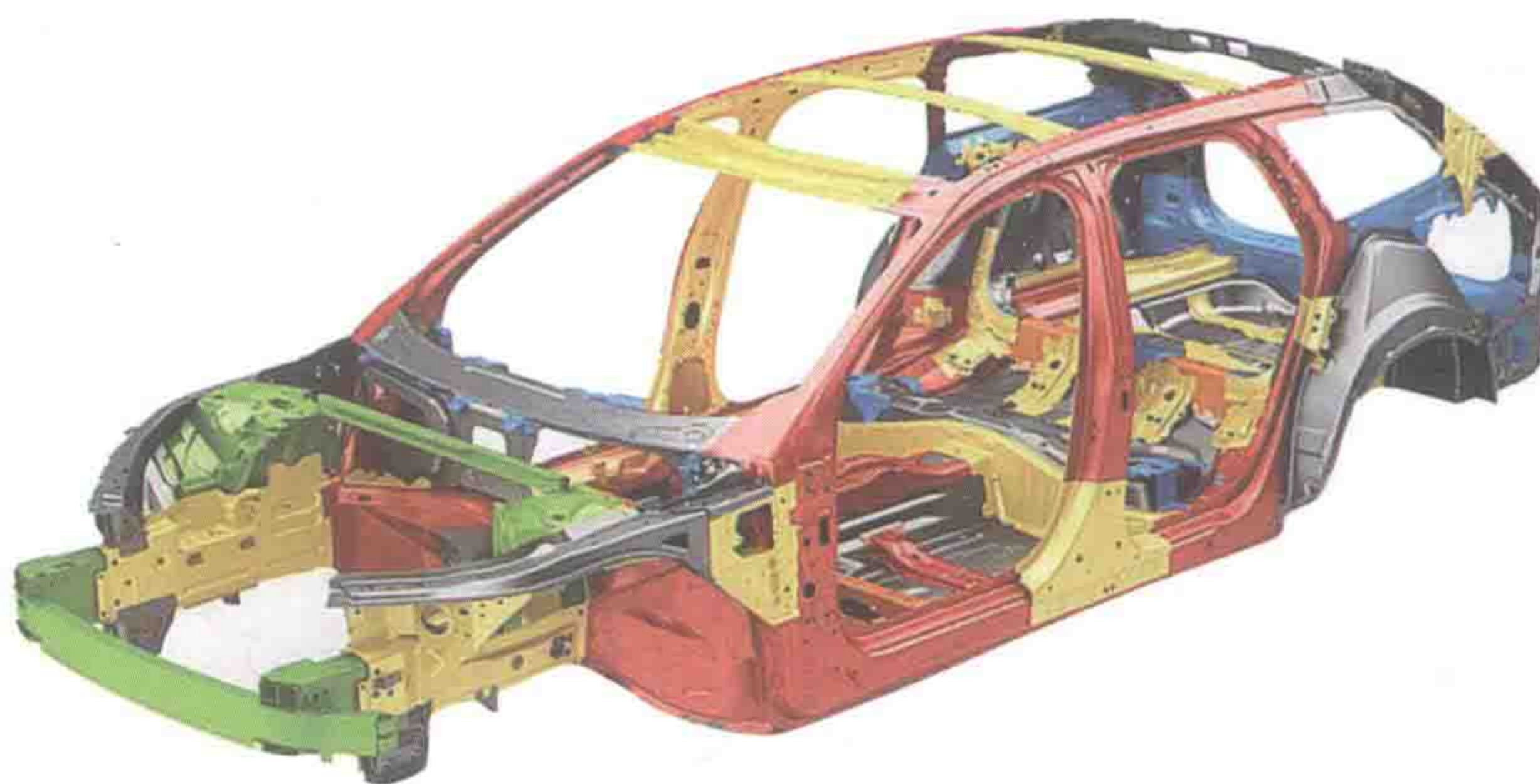


北京理工大学“985 工程”国际交流与合作专项资金资助图书

Automotive Lightweighting Using Advanced High- Strength Steels

汽车轻量化用 先进高强度钢

[美] 保罗·格克 (Paul Geck) 主编
魏巍 杨文明 译



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



Automotive Lightweighting Using Advanced High- Strength Steels

汽车轻量化用 先进高强度钢

[美] 保罗·格克 (Paul Geck) 主编
魏巍 杨文明 译

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车轻量化用先进高强度钢 / (美) 保罗·格克 (Paul Geck) 主编; 魏巍, 杨文明译. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 4

书名原文: Automotive Lightweighting Using Advanced High – Strength Steels
ISBN 978 – 7 – 5682 – 3994 – 3

I. ①汽… II. ①保… ②魏… ③杨… III. ①汽车轻量化 – 高强度钢 – 研究
IV. ①U462. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 095379 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01 – 2016 – 4545

Originally published in the English language by SAE International, Warrendale, Pennsylvania, USA, as *Automotive Lightweighting Using Advanced High-Strength Steels*. Copyright © 2014 SAE International.

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / [http://www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 11. 5

彩 插 / 12

字 数 / 198 千字

版 次 / 2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 69. 00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

早在 20 世纪 90 年代初期，笔者作为福特汽车公司的技术专家，曾参与一个技术支持小组研究解决大型车辆系统的计算机辅助工程（Computer - Aided Engineering, CAE）建模问题。起初的工作主要专注于钢铁材料，但也做过一些其他材料（比如铝和磁性材料）的研究工作。也正是在这一时期，戈尔副总统于克林顿政府早年发起了下一代车辆计划（Program for Next Generation Vehicles, PNGV），材料研究在该计划中占据很大部分，并且将铝作为未来汽车用材料这一理念摆在了首要位置。由于当时绝大多数材料被集中在车身结构上，研究宣称如果用铝替代钢，可将车身重量减少 50%。后来通用公司和福特公司制造的中型概念车证实了这种假设。

在 PNGV 早期，笔者结合自己的个人研究，认为用铝减重的断言有些夸张，但也不是不可能实现，因为那个时代的汽车还存在一些未优化的结构，而且还用有相当多的低强度钢。美国钢铁协会（American Iron and Steel Institute, AISI）则通过制造超轻钢汽车车身（Ultralight Steel Auto Body, ULSAB）来反驳 PNGV，他们的结果表明，通过广泛采用高强度钢和适应性结构，可以实现接近于 PNGV 声称的重量减轻。该计划还引入了先进的高强度钢（Advanced High - Strength Steels, AHSS），主要是双相钢，用于替代一些上一代低碳钢和常规高强度钢（Conventional High - Strength Steels, CHSS）。

虽然在此期间企业平均燃料经济性（Corporate Average Fuel Economy, CAFE）标准要求没有变化，但国家公路交通安全管理局（National Highway Traffic and Safety Administration, NHTSA）与公路安全保障研究所（Insurance Institute of Highway Safety, IIHS）联合引入了新的安全要求及其测试方法，这成为该时期内事实上的要求标准。这一要求连同后来的美国燃料经济性规定，加上世界其他地方的高燃料价格，促使国际钢铁协会（International Iron & Steel Institute, IISI）和 PNGV 发起了许多材料倡议（比如 ULSAB - AVC 和未来钢铁车辆），这些后来也促成了布什政府期间的“自由汽车”计划。到现在，“自由汽车”计划在材料使用上也变得更加中立，并支持一定数量的钢铁研究。钢铁研究也得到了美国汽车/钢铁联合会（Auto/Steel Partnership, A/SP）以及汽车和钢铁企业内部的支持。

整个这一时期，直到笔者 2006 年年底退休之前，汽车工业的许多材料工程师仍然相信铝是未来汽车用材料，仍然认为铝的减重潜力可达 45%，尽管这与所有的钢铁研究结论相反。为此，笔者从那时起在 AHSS 的汽车工程师协会教授了一个研讨会，通过使用不同的替代材料，来展示汽车真正减轻多少重量这些真实的技术案例。但笔者相信自己所教授的课程几乎不会打动替代材料的工程师和钢铁工程师。可以证实这一点的是，在本书撰写之前（2013 年）AHSS 只占钢材使用量的 10% 以下。然而，在监管方面，汽车工业正面临着它曾面临过的巨大障碍。现在环保局（Environmental Protection Agency, EPA）要求，通过一个非常积极的燃料经济性逐步实现计划，到 2025 年所有汽车的平均能耗实现 54.5 MPG（= 23.17 km/L，MPG 表示英里/加仑）。为了达到这一要求，整个汽车工业正非常看重以铝为代表的替代材料，并正加速 AHSS 的应用。

笔者撰写本书的目的是想阐明在汽车减重领域的最新挑战，阐述替代材料在汽车中应用的真正机会，并为支持应用 AHSS 的汽车有效结构提供最新的设计指导，同时探索这种策略下的重量节约和由此获得的燃料经济性优势。通过详尽的分析，与其他替代材料进行实际比较。通过总结笔者所参与过的多个项目来展示 AHSS 技术是如何发展，并将我们带到这一领域的高山脚下，而作为汽车设计人员的我们，必须在该领域内继续攀爬。

保罗·格克

致 谢

这是一本很难写的书，因为它涵盖了几个学科（例如汽车设计工程、计算机辅助工程、车辆工程、冶金、汽车制造工程、图书编辑等）。我擅长其中一些领域，但在许多其他领域我并非专家，尤其是冶金和图书编辑方面。因此，我不得不求助于我的几位同事。首先，我必须感谢SAE的Martha Swiss和Heather Slater的鼓励和编辑技能。感谢Rich Cover帮我填补了在冶金和炼钢方面的知识空白，他也是我在SAE车辆减重培训班中先进高强度钢方面的合作指导者。我还要感谢美国钢铁协会汽车应用副会长Ron Krupitzer，是他帮忙遴选了两位汽车钢铁材料领域的专家来审核我的书稿，并指导我完成一些较难的段落。他们是Arcelor Mittal公司产品应用主管Blake Zuidema和Nucor Steel公司的汽车开发冶金学家Dean Kanelos。本书第4章和第5章的大部分内容源于Harjinder Singh的工作，他是国家公路交通安全管理局/EDAG公司轻型车辆（Light Weight Vehicle, LWV）研究和NanoSteel项目的项目主管，本书中的部分内容也是LWV的研究成果。本书第4章还从Jody Shaw 2013年的著作“Great Designs in Steel”中获得材料支持，Jody是美国钢铁公司技术营销和产品研究部主任。我还收到了来自Deanna Lorincz的多项数据支持，他是钢铁市场发展研究所的通信高级总监。最后，我要感谢NanoSteel公司的人员（包括首席营销官Ellen Bossert）为第5章提供了大量材料，这些材料也指明了先进高强度钢的未来。

目 录

介绍 / 1

I.1 范围 / 1

I.2 先进高强度钢的历史 / 2

I.3 钢铁技术研究 / 2

第1章 先进高强度钢技术 / 4

1.1 特性和冶金 / 4

1.2 促使先进高强度钢发展的源动力 / 10

1.3 先进高强度钢用量的增长 / 14

1.4 先进高强度钢的制备 / 18

1.5 先进高强度钢的涂装 / 27

1.6 参考文献 / 29

第2章 制约和推动先进高强度钢应用的因素 / 31

2.1 先进高强度钢的成形 / 31

2.2 先进高强度钢的焊接 / 45

2.3 先进高强度钢的疲劳寿命 / 50

2.4 使用高强度钢时的刚度保持 / 52

2.5 计算机辅助工程和先进高强度钢 / 54

2.6 先进高强度钢的变化性 / 55

2.7 先进高强度钢的服务和维修 / 56

2.8 参考文献 / 57

第3章 先进高强度钢的应用实例 / 59

3.1 先进高强度钢的结构使能技术 / 59

3.2 IMPACT 的应用 / 69

3.3 车身结构安全应用 / 79

3.4 汽车/钢铁联合会的车门应用 / 89

3.5 参考文献 / 97

第4章 先进高强度钢与替代材料的比较 / 98

4.1 材料比较概述 / 98

4.2 结构力学初步 / 99

4.3 基本理论的推广 / 101

4.4 先进高强度钢与铝的最新比较 / 109

4.5 先进高强度钢和替代材料的相对成本计算 / 122

4.6 参考文献 / 131

第5章 先进高强度钢的未来发展方向 / 132

5.1 压淬钢的应用 / 132

5.2 第二代先进高强度钢 / 135

5.3 第三代先进高强度钢 / 136

5.4 先进高强度钢的最终重量优势 / 142

5.5 参考文献 / 159

第6章 结论和建议 / 160

专业术语 / 164

作者简介 / 174

■ 介绍

I.1 范 围

撰写本书的目的是面向原始设备制造商 (OEM)、一级和二级汽车设计工程师,但同时也希望其中的内容对技术支持人员 [比如汽车和钢铁公司的冶金学家、测试工程师、CAE (Computer Aided Engineering, 计算机辅助工程) 工程师、材料采购人员、产品规划人员和管理人员等] 有所帮助。本书的重点将放在车身和底盘结构以及板材上,它们也是汽车系统的主要组成部分。更多的篇幅用于解决车身的问题,因为这是绝大多数先进高强度钢 (Advanced High-Strength Steels, AHSS) 的应用场合。本书的基本目的是为工程师们着手他们下一代车辆设计时提供有用的信息,以便他们在使用什么基材、如何优化这些材料以实现成本效益并在有效减重上作出明智的决定。当然,本书的重点还是钢铁材料,尤其是 AHSS,但也包含许多关于车辆不同子系统使用钢铁及其替代材料的比较信息。

本书将介绍先进高强度钢的过去、现在和未来,以及诸如铝板材之类的竞争技术。书中的大多数内容涉及 AHSS 在北美 (North American, NA) 的应用,因为这是作者更熟悉的领域,虽然由于更高的燃料成本, AHSS 在日本和欧洲的应用实际上早于在北美的应用。鉴于此,笔者在本书中也囊括了一些关于世界其他地区的 AHSS 的应用和研究信息。本书中将先进高强度钢定义如下:

AHSS 是一种比大多数钢强度更高但具有比当今常规高强度钢更好可加工性的钢种, AHSS 通常为具有一定百分比马氏体 (钢相中强度最高的) 的多相钢。就本文而言,马氏体和热成形钢均被认为是 AHSS。多数情况下,我们将所有超高强度钢均视为 AHSS 的子集。

1.2 先进高强度钢的历史

目前,大多数汽车和轻型卡车整车约 70% 的重量为铁质材料,不过这也取决于具体部位。在过去的几年中,替代材料的利用率百分比已趋于稳定,因为寻找新的且成本效益高的替代材料已变得越来越困难。与此同时,新的美国安全和燃料经济法规也增大了所有 OEM 厂商的压力,这些法规要求他们采取更加积极的措施来减轻重量。这样的压力也使得汽车公司重新考虑替代材料的应用并寻找钢铁材料的剩余机会。

20 世纪 80 年代初,汽车主要 OEM 厂商们在减重技术方面表现不俗。80 年代中期,一些汽车公司开始引入高强度钢 [比如高强度低合金 (High - Strength Low - Alloy, HSLA) 和可烘烤硬化 (Bake Hardenable, BH) 钢]。例如,1986 年福特的 Taurus 具有约 80% 的低碳钢 (即屈服强度低于 180 MPa) 和 20% 的高强度钢。在 Taurus 上使用的高强度钢的屈服强度在 180 ~ 350 MPa,这种钢我们现在称为常规高强度钢 (Conventional High - Strength Steels, CHSS)。有人认为,到 20 世纪 90 年代初,至少从厚度减小的角度看,汽车已处于高强度钢的利用极限,因为进一步的厚度减小将带来车辆主要刚度的降低,并且可能难以成形或焊接。然而,20 世纪 90 年代,许多汽车公司,主要是日本和欧洲的公司,能够达到超过 20% 的高强度钢利用率,并进入 AHSS 领域。其中丰田和宝马被认为是新钢铁应用技术的领导者,日本和欧洲的高燃料价格则为这些公司专注于使用更高强度钢来减轻重量提供了动力。

由于北美新钢材供应量增加,以及新的安全和燃料经济性要求的出现,北美汽车公司在 21 世纪初引入了 AHSS。这方面的一个例子是通用汽车的 Epsilon 平台曾作为 AHSS 的早期领导者。这 10 年中,随着新法规的建立,正在出现更加积极的 AHSS 重点应用,但这也伴随着人们以类似于看待钢铁的眼光重新看待替代材料。

1.3 钢铁技术研究

20 世纪 90 年代初,来自世界各地的 35 家钢铁公司的超轻钢汽车车身 (Ultralight Steel Auto Body, ULSAB) 联盟委托保时捷工程服务公司 (Porsche Engineering Services, PES) 设计轻质钢 D 级白车身,其部分原因是为了回应 Al Gore 在下一代车辆计划 (Program for a New Generation of Vehicles, PNGV) 中对铝材的过度重视。ULSAB 项目于 1998 年完成,其中 PES 开发了一种白车身设计,其示范车身重量比原来减轻了 25% ~ 45%,具体取决于将其结果与

众多基准车辆中的哪一款进行比较。虽然这项研究有点不受限制，但今天回顾起来仍然有趣的是，当时的许多技术都找到了它们的立足之地，至少源于这些技术在世界上诞生了一些产品，这可以从 AHSS、液压成形技术和激光焊接技术被越来越多地使用中看出来。但并不是所有的技术都最终成了实践标准，即使它们中的大多数可能在方向上是正确的。

紧随初始 ULSAB 研究的是后来的 ULSAB - AVC（高级概念车）研究，其中涉及了 C 级和 PNGV 级车辆。AVC 是一个全面的车辆研究项目，在结构特征和技术延伸方面甚至比最初的 ULSAB 研究更加积极。

还有一个类似的例子是 21 世纪卡车材料和动力总成设计改进（Improved Materials & Powertrain Architectures for 21st Century Trucks, IMPACT）计划，这其中有汽车工业参与（福特），并受到美国陆军和北美钢铁供应商的资助，该计划于 2001 年完成，路易斯维尔大学和密西西比州大学作为主要参与者也参加了这一计划。该项目的目标之一是以最可承受的方式从当前的福特 F150 中减重 25%，IMPACT 的研究在车辆层面确实达到了减重 25% 的目标，同时在其白车身减重上也达到了 20%，而且在达到目标的同时只产生了约 350 美元的成本增加。更加有趣的是，在没有可变成本增加的情况下，可实现 21% 的车重减少，在减少 450 美元可变成本的情况下可实现 12.5% 的车重减少，而大部分成本降低的重量减轻是通过使用更高强度的钢来实现的。这一研究还受到重新设计的车辆需满足基准 F150 车辆属性水平的限制。

ULSAB - AVC 和 IMPACT 之后是由 WorldAutoSteel 赞助的未来钢铁车辆（Future Steels Vehicle, FSV）研究，WorldAutoSteel 是全球主要钢铁公司的联盟。这项研究比其他研究更具前瞻性，因为其车辆结构的重大转变被认为是为了适应新的动力总成结构和新的监管环境。

最近的两项研究分别受到环境保护部（Environmental Protection Agency, EPA）和国家公路交通安全管理局（National Highway Traffic and Safety Administration, NHTSA）的委托，以研究特定车辆的减重增效。EPA 研究所用车辆是 2010 年的丰田 Venza 交叉多用途车（Cross - Over Utility Vehicle, CUV），NHTSA 研究所用车辆是 2010 年的本田 Accord。EDAG 公司是 NHTSA 研究的主要承包商，也是 EPA 研究的承包商之一。NHTSA 研究可能与本书更加相关，因为它针对同一车辆的主要子系统所用的铝材和钢材进行了比较，这使得 NHTSA 研究对于在公共领域的材料研究来说有些独特。NHTSA 研究的唯一缺点是它专注于钢铁解决方案的第一代 AHSS。本书中我们会尝试将 NHTSA/EDAG 研究扩展到包括第二代和第三代 AHSS 的成果。

第 1 章

先进高强度钢技术

1.1 特性和冶金

本章将定义先进高强度钢 (Advanced High - Strength Steels, AHSS), 讨论 AHSS、低碳钢和常规高强度钢 (Conventional High - Strength Steels, CHSS) 之间的差异, 并综述制备 AHSS 的方法。首先, 指导性地讨论 AHSS 的特性和冶金, 为了表征钢铁和其他固态金属, 给出了材料机械加工的条状或带状样品的应力 - 应变曲线 (图 1.1)。

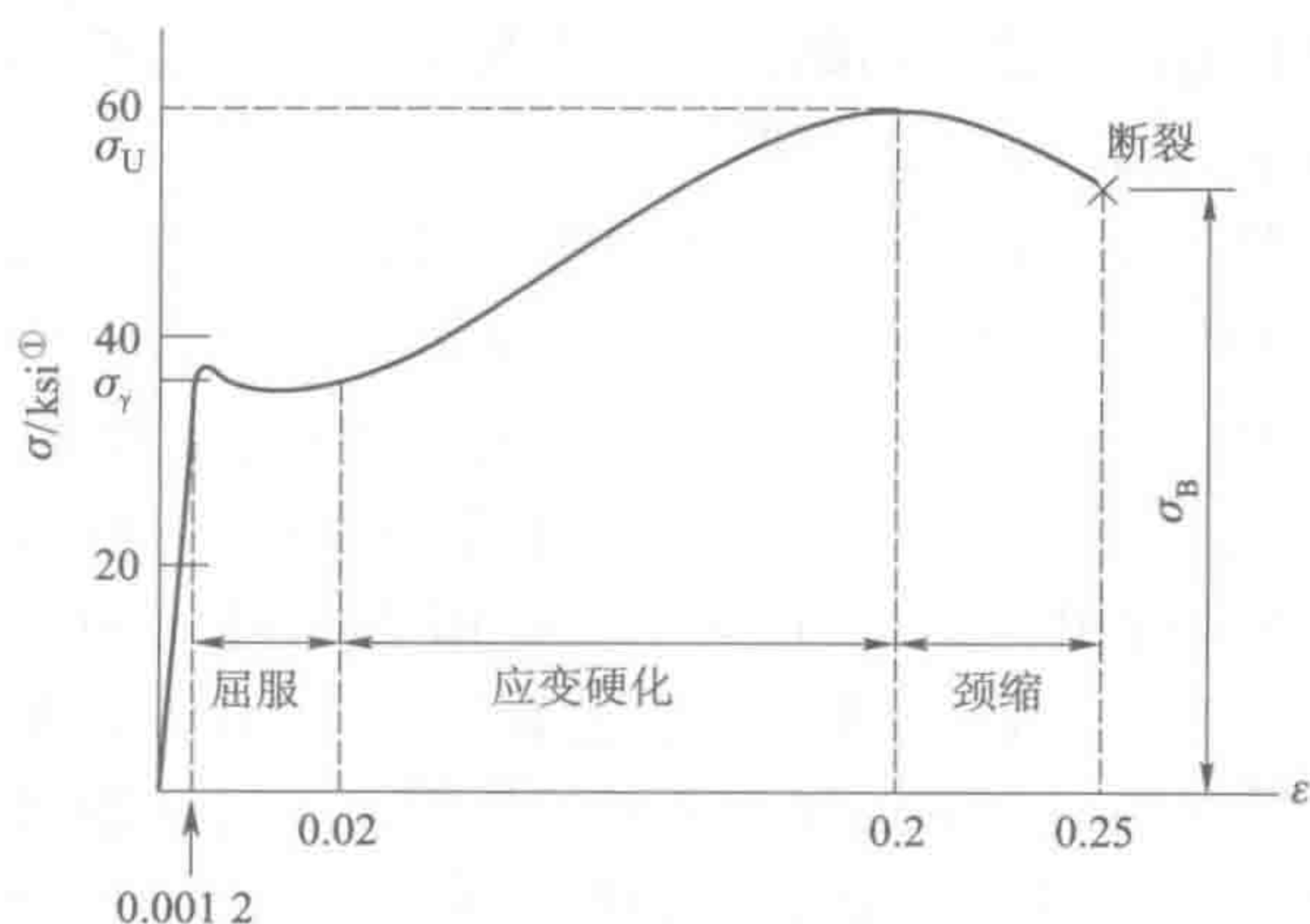


图 1.1 应力 - 应变曲线

① ksi 为应力的英制单位, 千磅力每平方英寸, 1 ksi = 6.895 MPa。

将试样放入拉伸试验机中并拉伸直至其断裂，图 1.1 给出了低碳钢的工程应力随工程应变的变化关系。工程应力定义为拉伸样品的力除以样品的原始横截面积，应变定义为样品的延伸量除以样品的原始工作长度。应力以压力为单位（即每平方单位面积的力），本书中绝大部分单位使用国际单位制，这意味着我们将使用兆帕（MPa）作为应力的单位。每平方英寸 1 000 磅（Kilopounds per Square Inch, KSI）等于 6.895 MPa。应变用百分比表示，因为它是长度尺寸除以长度尺寸。通常，应力 - 应变曲线所呈现的是实际应力随实际应变的变化，而不是工程应力随工程应变的变化。实际应力定义为样品上的力除以样品中心的瞬时横截面积，而实际应变定义为长度的变化除以测量时的瞬时长度。实际应力 - 应变曲线在低应变水平段上类似于工程应力 - 应变曲线，但是在达到最终工程拉伸应力（颈缩）后通常不会下降。对于通常的钢，应力与低应变水平（即弹性区域）的应变成正比，直到曲线达到屈服应力。此后钢铁材料表现出塑性特征，直到达到极限应力，之后工程应力由于局部颈缩而减小，直到样品断裂。发生断裂时的应变值为总伸长率。应力 - 应变曲线的另一个有用的性质是 n 值或加工硬化指数， n 值由在限定的应变范围内塑性区域中实际应力随实际应变变化曲线的斜率推导得来。通常来说，具有较高 n 值的钢比相同强度的普通钢更易成形。从应力 - 应变测试计算得到的另一个度量量为 r 值， r 值是对材料抵抗减薄的度量，它从应力 - 应变试验样品的厚度变化计算得到，较高的 r 值意味着试样在试验期间将经历较少的减薄。 r 值（与 n 值一样）也是可成形性的量度。

另一种表征钢材材料的方法是根据它们的微结构和相对强度水平得到的，如香蕉曲线（图 1.2）。

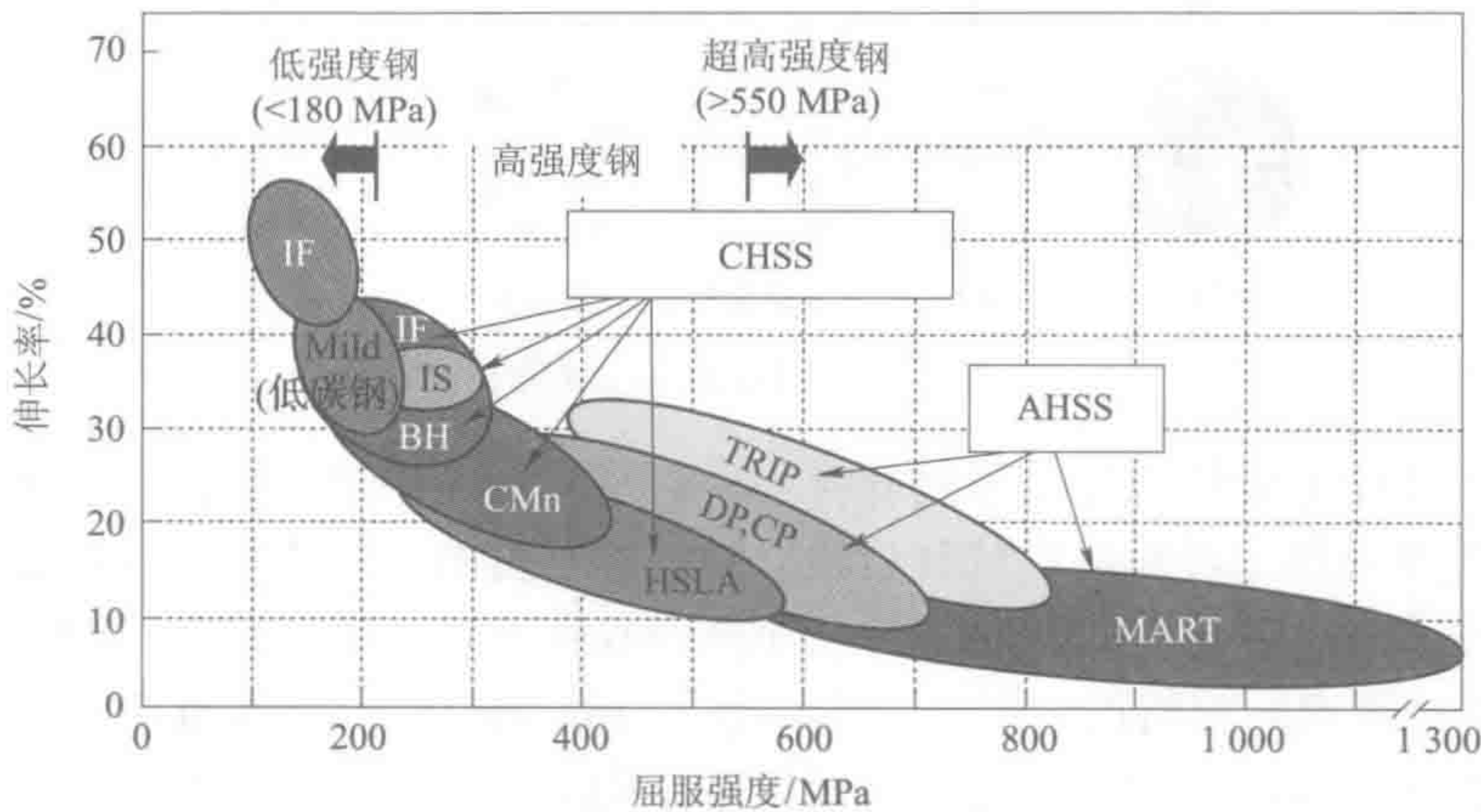


图 1.2 香蕉曲线

图 1.2 中绘制了伸长率随屈服强度的变化曲线，不同类别的钢落在图表上的不同颜色的椭圆内。例如，无间隙原子（Interstitial Free，IF）钢是韧性相当好的低强度钢，在某一类钢中，可能有几种不同的具体强度或等级，如 IF140 和 IF160 是两种不同等级的 IF 钢。低强度钢通常是具有小于 200 MPa 屈服强度和大于 30% 伸长率的钢，例如低碳钢和 IF 钢。一些具有大于 200 MPa 屈服强度的 IF 钢（例如 IF - rephos，再磷酸化的无间隙原子钢）通常被分类为 CHSS。其他类型的 CHSS 有各向同性（Isotropic，IS）钢，可烘烤硬化（Bake Hardenable，BH）钢、碳锰（Carbon Manganese，CMn）钢和高强度低合金（High - Strength Low Alloy，HSLA）钢。在相同的强度水平下，AHSS 通常具有比 CHSS 更高的强度和/或具有比 CHSS 更大的延展性。双相（Dual Phase，DP）钢、复相（Complex Phase，CP）钢、转变诱导塑性（Transformation - Induced Plasticity，TRIP）钢和马氏体（Martensitic，MART）钢都被认为是 AHSS。

为了更好地理解 AHSS 是如何制备的，及其与 AHSS 在物理性质上的不同，有必要研究 AHSS 的微观结构（图 1.3）。

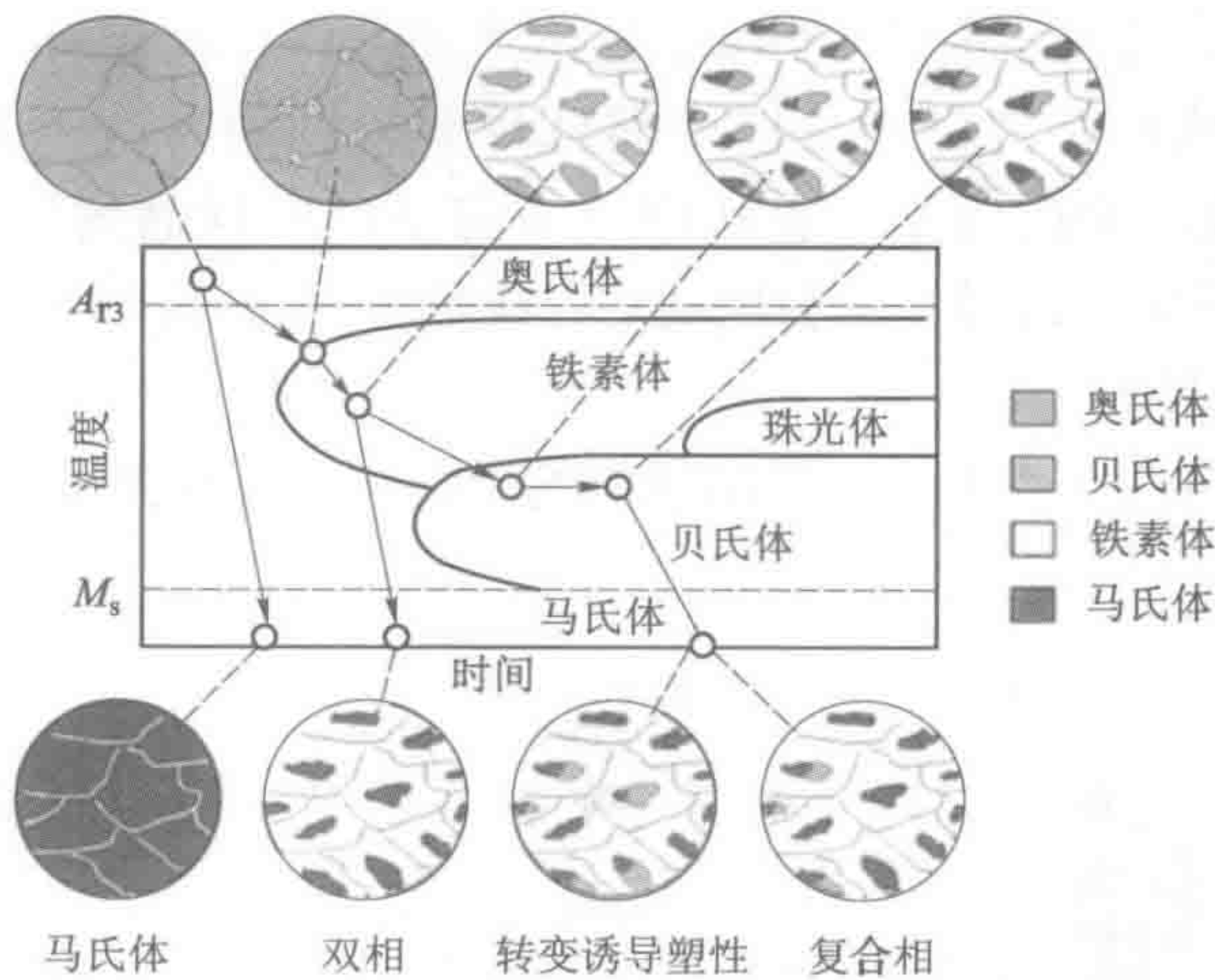


图 1.3 AHSS 的微观结构

图 1.3 中心处的矩形是碳钢的时间 - 温度转变（TTT）图，生产钢时用的合金会改变该图上叶瓣的形状和位置。每一种独特的化学物质都有自己独特的 TTT 曲线。图中左上角的点表示已经加热到或高于其奥氏体温度（约 700 ℃ 或 1 300 ℉）的钢的起始点，钢在冷轧后退火（即加热到奥氏体范围）以恢复到其原始性质，样品冷却的速度将决定微观结构的外观。图中的凸角决定了试样冷却后，哪些相（即奥氏体、铁素体、珠光体、贝氏体或马氏体）将继续存

在于试样中。如果其冷却速度非常缓慢，它将具有铁素体结构，这是一种延性较好的低强度相，而且大多数钢（低碳钢）都具有铁素体结构。而如果非常快速地冷却，那么奥氏体将直接转变为马氏体，马氏体的强度最高，但也是最脆的相。钢铁材料微观结构通常是各种相的组合，不过这取决于冷却速率。例如，作为铁素体和马氏体的组合的双相钢是 AHSS 中最常见的，它具有位于铁素体和马氏体之间的强度和延展性。虽然奥氏体是不稳定的延性相，它在室温下会转化为其他相，但是对其进行合金化可以制备其中具有残余奥氏体的钢。TRIP 中有一些残余奥氏体，它们在加工硬化时转化为马氏体，这使得 TRIP 具有比相同强度的 DP 钢种更好的延展性和更高的加工硬化率。复相钢也是一种 AHSS，它是几个相的组合。

除了几种常见类型的 AHSS 外，还有新一代的 AHSS，它们还未被用于汽车结构中，但是随着重量减少对于满足燃料经济性目标越来越有必要，它们很可能在将来被使用。这就是第二代和第三代 AHSS，图 1.4 所示为香蕉图中添加的气球形状。

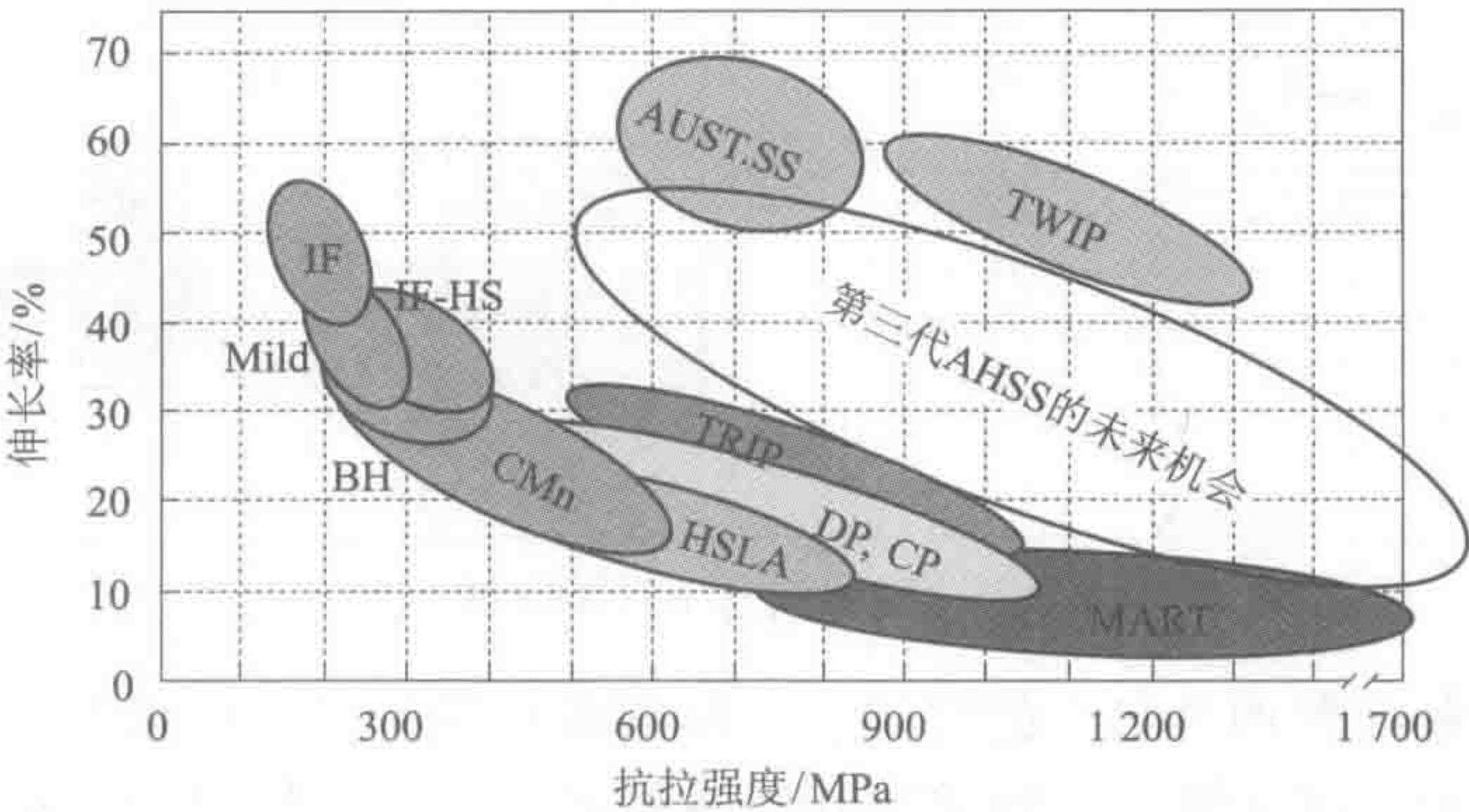


图 1.4 广义香蕉曲线

孪生诱导塑性（Twinning – Induced – Plasticity, TWIP）钢和奥氏体不锈钢被认为是第二代 AHSS，它们具有比低碳钢更高的延展性，但在强度上能够达到超高强度 AHSS 的强度水平。这些钢中存在大量的合金，导致其成本相对较高，这也是为什么它们还没有进入汽车结构应用中的原因，但奥氏体不锈钢经常被用于其他对成本要求较低の場合中。其实我们更关心第三代 AHSS，它具有 AHSS 的高强度并大大提高了延展性，而且其预期成本在第一代和第二代 AHSS 之间。这些钢至今还没有用于汽车制造中，但钢铁行业正在努力创造属于这一类别的钢种。钢铁生产企业希望将来具有这些性能的钢的成本约为铝的一半，这将消除使用非钢替代材料对人们的诱惑。本书将主要讨论第一代

AHSS，因为第二代和第三代 AHSS 还没有在市场上得到充分利用，但随后我们将尝试量化第三代 AHSS 的附加好处。

为了更好地了解 AHSS 的性能，我们将 AHSS 钢与 CHSS 进行了比较，它们具有相似的强度水平。图 1.5 中比较了具有相同屈服强度的 DP 钢和 HSLA CHSS。

重要特征——双相钢

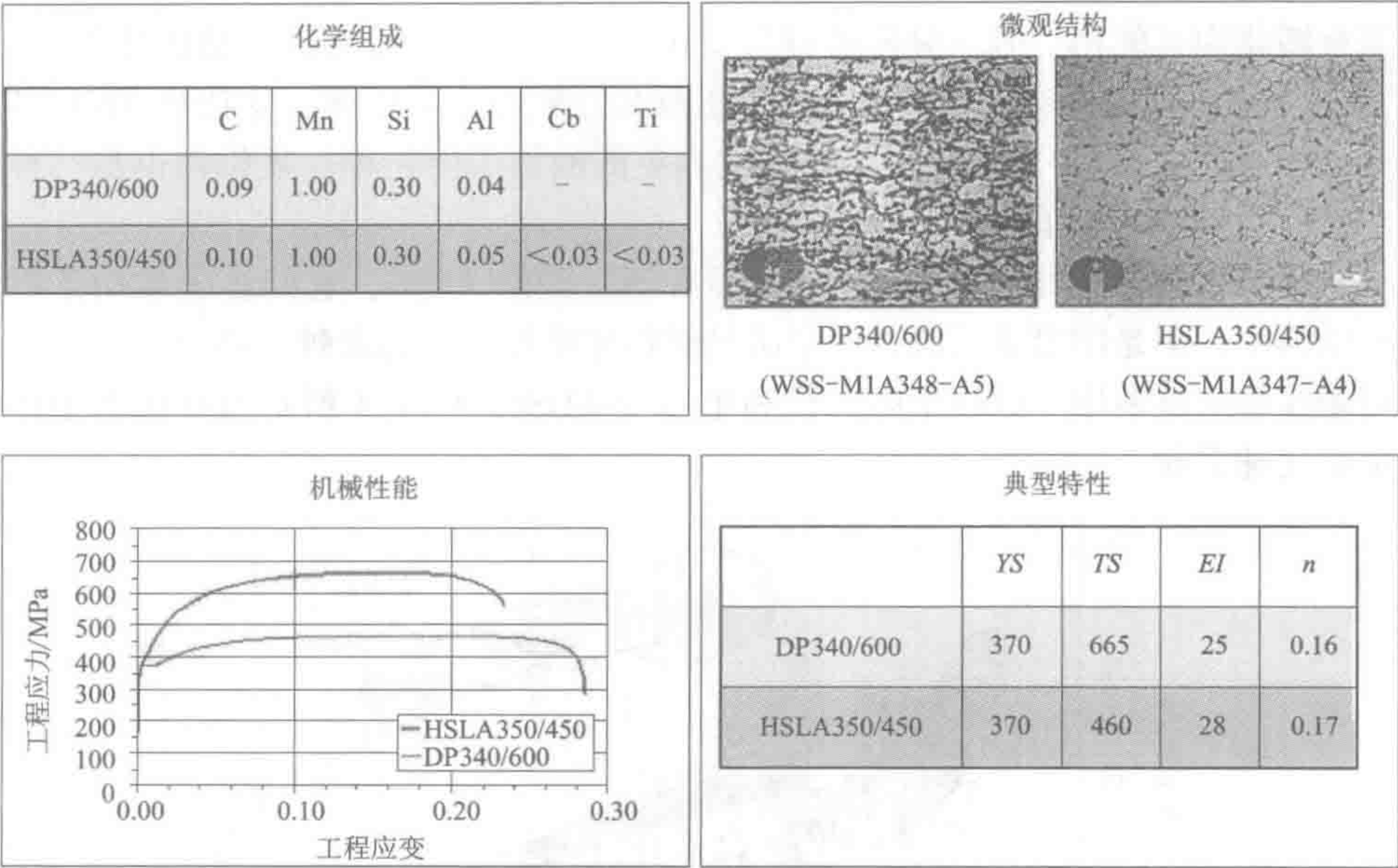


图 1.5 双相钢与 HSLA 钢的对比

为了避免在钢种命名上的混淆，这里需要指明的是，如果某一钢种被命名为 DP340/600，那么第一个数字指其屈服强度，第二个数字指其极限拉伸强度（“拉伸强度”）。然而，对于 AHSS，通常仅根据其拉伸强度（即DP600）来指定钢种。大多数钢铁制造商所生产的 DP600 的最小抗拉强度为590 MPa，稍小于其标称值 600 MPa。因此，当谈到 DP590 或 DP600 时，它们实际上指的是相同等级的钢。对于 CHSS，如果使用单个数字来表示，则该数字通常是指屈服强度。比如 HSLA350/450 通常表示为 HSLA350，指其最小屈服强度为 350 MPa。AHSS 钢种由其拉伸强度表示的主要原因是它们被日本汽车公司首次采用，当时其钢种都由其拉伸强度来表示。虽然分别使用两种不同的方法来表示 AHSS 和 CHSS 通常会带来困惑，但是这有助于我们基于屈服强度来选择 CHSS，主要基于拉伸强度来选择 AHSS。

在图 1.5 中，右上角显示的微结构是这些钢种在显微镜下的实际形貌，两种钢的化学性质或所添加的合金元素几乎相同，它们的典型屈服强度（即 370 MPa）相同，这里不要与最小屈服强度或标称屈服强度混淆。HSLA 钢的伸长率和 n 值略高，最大的差别在于 DP 钢具有高得多的拉伸强度，这是由其改进的化学性质和钢退火时的不同冷却速率造成的。由于两种钢的屈服强度、伸长率和 n 值接近，可以预测两种钢的成形性是类似的。另一个可能有用的是 HSLA350 与 TRIP600 之间的比较（图 1.6）。

重要特征——TRIP

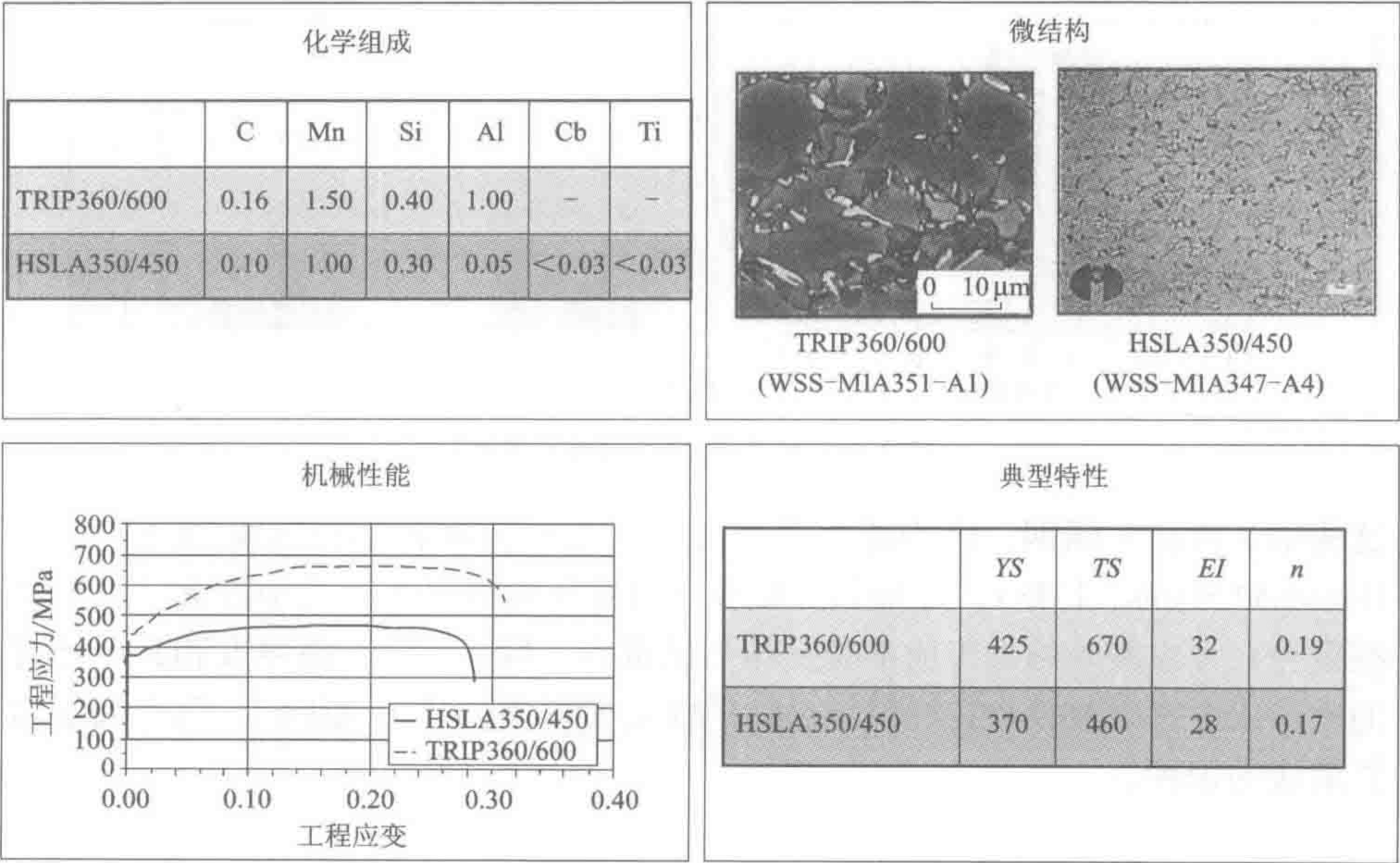


图 1.6 TRIP 钢与 HSLA 钢的比较

进行 TRIP 钢比较的原因是 TRIP600 具有类似于 HSLA350 的屈服强度。在这种情况下，TRIP600 的伸长率和 n 值高于 HSLA350，这表明 TRIP600 的成形性应优于 HSLA350 和 DP600。然而，TRIP 钢的屈服强度较高，这表明它在成形时有更多的回弹可能。关于回弹，我们将在下一章讨论。另外需要注意的是，TRIP 钢的化学组成更丰富，因此，可以预计 TRIP 钢比 HSLA 钢和 DP 钢更加昂贵。最后，我们将马氏体钢与 HSLA 钢进行比较（图 1.7）

从图 1.7 中可以看出，除了高碳水平，马氏体钢在化学组成上并不那么丰富。马氏体钢最显著的特征是其高强度水平，兼具屈服和拉伸特性。当然，高屈服强度、低伸长率和不存在的 n 值意味着它很难成形，这也是为什么马氏体钢通常是轧制成形（将在后面讨论）的原因。马氏体钢的一种变体是热成形钢，