

2011 钢铁共性技术协同创新中心  
工艺与装备研发平台顶层设计  
(十四)

2011 钢铁共性技术协同创新中心由北京科技大学与东北大学两所核心协同单位,以及国内主要钢铁行业科研院校、企业等共同组建。目前,该中心已正式通过国家认定。该中心由关键共性工艺与装备研发平台和重大工程高端产品开发平台组成。其中,关键共性工艺与装备研发平台由东北大学 RAL 为主体,协同东北大学材料与冶金学院、北京科技大学、中国钢研科技集团、上海大学、武汉科技大学、宝钢、鞍钢、首钢、武钢等单位组建而成。该平台的任务是研发冶、铸、轧等工序的新工艺、新技术、新装备,实现“钢铁绿色制造”。针对工艺与装备研发平台的顶层设计内容,本报特组织相关报道,以飨读者。

## 高强韧节约型不锈钢的制备工艺技术

## 1 研究背景

2014 年我国汽车产量已突破 2000 万辆,高居世界第一位。汽车普及所造成的资源和环境问题日渐彰显,实现可持续发展已成为汽车行业迫在眉睫需要解决的问题。其中,大量使用热镀锌板虽然可以保证结构件的防腐抗力,但造成了锌资源过度消耗,给汽车行业的持续发展带来了挑战。在汽车中尽可能减少热镀锌板的使用而又保证汽车板的防腐效果已成为一项刻不容缓的任务。从汽车的全生命周期角度来看,以不锈钢取代高强钢不仅可提高耐腐蚀性能,而且有利于环境保护与循环经济建设。

欧盟自 2004–2010 年间组织了十几家钢铁企业、汽车企业和研究院所开展“Next Generation Vehicle”重大专项,其中采用奥氏体及亚稳奥氏体不锈钢(铬含量为 17–19wt%,含镍量为 5–8wt%)取代先进高强钢是一项重要工作。奥氏体类不锈钢具有比高强钢更高的强度与更高的均匀延伸率,白车身全部使用奥氏体类不锈钢虽然可以更好地保证汽车安全性并实现轻量化,但也有较大的性能余量,且含镍不锈钢成本过高而对汽车成本造成冲击。因此,奥氏体类不锈钢在白车身中的应用仍停留在个别豪华品牌(如 Volvo S80)的样车上,未能在普通乘用车生产中实现商业化应用。为此,开发满足白车身不同部位性能要求且成本低廉的不锈钢品种是决定其能否在汽车制造中大规模应用的关键。“Next Generation Vehicle”重大专项的研究人员已注意到这一问题,正在探索节约型双相不锈钢(21Cr–1.0Ni–5Mn–0.15N)替代奥氏体类不锈钢的可行性。

白车身中大量结构件要求使用具有成形性能与强韧性良好组合的先进高强钢。铁素体不锈钢如 AISI 409 或 430 与冷轧先进高强钢如 DP550–780 的热镀锌板价格基本相当,如果以前者替代后者,即可提高白车身的耐腐蚀性能与回收再利用性能,又可保证汽车用钢的经济性。关键问题是,常规铁素体不锈钢的强度与先进高

强钢相比低 150–350MPa,无法实现汽车轻量化。如果在保证成形性能的基础上制备出强韧性大幅度提高的新型铁素体不锈钢,则可以用来制备白车身结构件。对于防撞件如 B 柱和保险杠等,需采用抗拉强度超过 1000MPa 的超高强钢,其总延伸率一般为 10% 以内,均匀延伸率低于 6%。马氏体不锈钢是不锈钢中强度较高的一种,但常规工艺生产的马氏体不锈钢与碳素超高强钢相比,强度偏低而延伸率偏高。通过改进成分和生产工艺,在基体显微组织中引入弥散的残余奥氏体,有可能制造出更高强韧性配合的马氏体不锈钢结构件,成为替代常规超高强钢的理想材料。

不锈钢替代碳素先进高强钢,可减少因大量使用热镀锌板而造成的资源与环境负担,在汽车全生命周期中实现成本降低、性能提高、环境友好。本项工作以探索开发高强高韧低成本不锈钢的原型品种和新的制备技术为目标,探索在白车身领域替代传统高强钢的新方向。

## 2 高强韧节约型不锈钢研究进展

在国家自然科学基金重点项目等的支撑下,RAL 系统地研究了高强韧铁素体不锈钢的制备工艺。铁素体不锈钢的抗拉强度一般仅为 450MPa 左右,虽然超细晶组织可使其强度有大幅度提升,但会导致屈服比升高而恶化成形性能。最近,Mola 和 De Cooman 开发出了 AISI430 的“淬火—配分”(Q&P)热处理工艺。与常规成品板相比,采用 Q&P 工艺处理的成品板在拉伸过程中无屈服平台,抗拉强度可以达到

750MPa,延伸率为 20%。因此,采用 Q&P 技术可使普通 430 铁素体不锈钢达到 DP750 的力学性能水平。RAL 的研究人员针对 409L 铁素体不锈钢的 Q&P 热处理工艺进行了初步探索。图 1(a)和(b)分别示出的是经 Q&P 处理后试样的应力—应变曲线与电化学极化曲线。可以看出,合理的 Q&P 工艺不仅可以使 409L 的各项力学性能指标基本满足 DP550 的要求,而且因碳化物析出受到抑制而使点蚀电位由 0.10V 提高至 0.15V。

马氏体不锈钢是高载荷腐蚀环境下的首选钢种,多应用于刀具及汽轮机叶片等。常规工艺条件下,经“淬火—回火”热处理获得“回火马氏体+碳化物”的显微组织以保证其强度指标,但其强韧性一般均低于同强度级别的高强度低合金钢。最新研究表明,在显微组织中引入残留奥氏体取代合金碳化物,不仅可以大幅提高马氏体不锈钢的强韧性,而且可提高耐腐蚀性能,但淬火组织中残余奥氏体量较低且稳定性一般较差。日本与韩国等国的研究人员分别对 AISI 410 和 AISI 420 进行了 Q&P 热处理实验。结果发现,AISI 410 钢的抗拉强度可达到 1200MPa,延伸率在 15% 以上,AISI 420 钢的抗拉强度可以达到 1500MPa,延伸率在 12% 以上,均高于当前使用的超高强钢。东北大学钢铁共性技术协同创新中心的研究人员对 20Cr13 钢的 Q&P 热处理工艺进行了前期探索。结果表明,可以获得具有 17vol.%“残余奥氏体+马氏体”的显微组织,与常规“淬火+回火”工艺相比,在保证抗拉强度在 1400MPa

的基础上,延伸率由 11% 提高至 14%,强塑积由 15983MPa% 提高至 20594MPa%。然而,即使采用 Q&P 工艺,马氏体板条中也会析出针状  $\text{Fe}_3\text{C}$  型碳化物而降低冲击韧性。因此,抑制碳化物析出成为 Q&P 型马氏体不锈钢能否成功实施的关键。

以节约型不锈钢替代传统高强热镀锌板,在汽车全生命周期中可节约成本、提高性能并实现环境友好,达到这一目标的关键在于实现节约型不锈钢的高强、高韧化。同时,为适应这些新型不锈钢的大规模生产,必须对传统不锈钢生产技术进行改造和创新。

本项工作的目标是,通过探究节约型不锈钢形变热处理过程中的组织演变及合金元素的互扩散行为,明确其增强增韧机理,开发出适应节约型、高性能不锈钢生产的原型工业化技术,从而更经济、更高效地生产出高韧性、高强度、更耐蚀的不锈钢,使其力学性能达到或超过常规汽车用先进高强钢的水平。计划开发的白车身用不锈钢的各项性能指标与常规先进高强钢的比较如图 2 所示。

到目前为止,针对高强韧节约型不锈钢还缺乏系统的基础研究,其关键生产工艺技术还有待开发和创造。因此,这项研究工作将在国际不锈钢领域率先突破节约型不锈钢在汽车车体结构件制备方面的应用,进一步充实不锈钢生产的物理冶金学原理,对促进我国不锈钢工业生产技术发展、扩展不锈钢的工业应用范围具有强烈的现实意义。

目前,RAL 正与我国钢铁企业密切合作开展高强韧节约型不锈钢产业化技术研究。通

过在实验室条件下系统开展节约型不锈钢“化学成分—工艺—组织性能”演变及控制技术研究,开发出了 Q&P 关键单件设备和核心控制系统,形成了具有我国自主知识产权的高强韧节约型不锈钢成套工艺与装备技术,为在国际上率先实现高强韧节约型不锈钢的工业化生产提供重要支撑。已取得的主要研究成果包括:

1) 通过探究形变热处理过程中的组织演变规律及合金元素互扩散行为,明确了节约型不锈钢的强韧化机理。图 3(a) 示出 410S 由 1000℃ 淬火至 150–330℃ 和 430 由 1000℃ 淬火至 80–240℃,两者均于 500℃ 配分 1min 后,研究淬火温度对残余奥氏体含量的影响。当淬火温度在两个钢种的  $(M_s+M_f)/2$  附近时,残余奥氏体含量最多;当淬火温度由此值向  $M_s$  或  $M_f$  变动时,残余奥氏体含量均逐渐减少。因此,410S 和 430 的淬火温度分别选取接近各自  $(M_s+M_f)/2$  的 250℃ 和 160℃。这种影响规律也表明淬火—回火工艺很难获得残余奥氏体组织。

2) 研制成功节约型复相化高强韧不锈钢的新的轧制、冷却以及“热成型+Q&P”等形成性一体化制备技术,开发出力学性能超过常规先进高强钢的节约型复相化高强不锈钢原型产品。

3) 开发出具有铁素体化学成分、可替代 DP590、DP780 的节约型复相化高强不锈钢和具有马氏体不锈钢成分、强度可达 1200–1600MPa、塑性可达 20% 以上的节约型复相化超高强不锈钢。这些复相化高强和超高强不锈钢可以代替传统先进高强钢热镀锌板产品,而原料与生产成本甚至低于传统先进高强钢。

4) 研究工作使不锈钢的品种结构有了新的突破,形成了复相化高强与超高强不锈钢的新品种体系,打破了节约型不锈钢在交通运输、承力结构甚至军工等重要领域应用的瓶颈问题,可为国民经济发展提供物美价廉的高性能不锈钢产品。

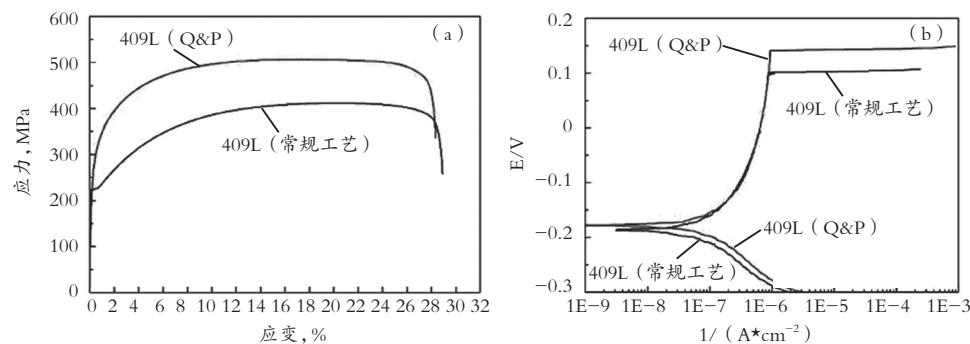


图 1 409L 铁素体不锈钢经 Q&P 热处理后的力学性能



## 上接 B04 版

## 3 拟开发的关键技术

## 3.1 铁素体不锈钢增强增韧机理研究与制备技术开发

1) 铁素体不锈钢的成分设计与硬质相(马氏体或马氏体+残留奥氏体)的体积分数变化规律研究;

2) 高强度铁素体不锈钢中硬质第二相的形成条件及其体积分数随热轧、冷轧及热处理工艺参数变化规律的研究;

3) Q&P 热处理参数对残留奥氏体含量及稳定性影响规律研究;

4) 形变孪晶产生机理及对裂纹形成与走向的影响规律研究;

5) 铁素体不锈钢晶格摩擦力随钢中间隙原子含量、不同微合金元素析出相的尺寸与结构的变化规律研究;

6) 钢中特殊晶界结构如重位点阵晶界数量随加工工艺变化规律研究;

7) 铁素体不锈钢强韧性变化规律及相关机理研究。

## 3.2 超高强马氏体不锈钢初化机理研究

1) 超高强马氏体不锈钢中合金元素对“奥氏体马氏体”转变的温度和动力学影响规律研究;

2) 马氏体不锈钢中碳氮化物析出行为与控制方法研究;

3) “马氏体+奥氏体”两相组织中的相比例和配分工艺参数对碳在两相间的再分配和碳化物形核、长大的影响规律研究;

4) 非碳化物形成元素如 Si 和 Al 等单独或复合添加对碳化物析出动力学的影响规律研究。

## 3.3 节约型双相不锈钢组织演变与脆性析出行为研究

1) 经济性双相不锈钢在热轧、冷却、冷轧及热处理过程中的组织演变规律研究;

2) 热变形对钢中奥氏体/铁素体相界面结构和合金元素互扩散行为影响规律与机理研究;

3) 超快速冷却对合金元素互扩散以及合金元素晶界偏聚行为影响规律和机理研究;

4) 第二相析出动力学规律及影响因素研究,包括:应变储能对第二相析出序列与动力学的影响,以及连续冷却对析出行为的影响等。

## 3.4 新型不锈钢使用性能检测及原型制备技术开发

1) 成形性能、强度及低温韧性检测及其随工艺参数变化规律研究;

2) 新型不锈钢耐蚀性测试及其随工艺参数变化规律研究;

3) 高强高韧铁素体不锈钢热处理工艺技术开发;

4) 超高强马氏体不锈钢的“HPF+Q&P”一体化技术原理研究与原型技术开发;

5) 高强韧经济性双相不锈钢的控轧控冷在线热处理技术开发。

## 4 拟解决的关键问题

铁素体不锈钢和马氏体不锈钢能否分别替代碳素先进高强钢和超高强钢的关键在于能否改善其强韧性。因此,通过成分设计和工艺创新,改变单一相结构的显微组织状态、调控晶界结构、控制钢中间隙原子存在形态及析出相结构与尺寸等是提高强韧性的最优途径。为充分发挥节约型双相不锈钢的性能优势,关键问题是如何有效控制奥氏体和铁素体两相的相比例并抑制脆性第二相析出。

## 5 拟采用的研究技术路线

坚持实验室装备研制与工艺开发为工业产线设计、中试/产业化生产服务的方针,贯彻“产学研”相结合的基本原则。首先,采用 ThermoCalc 或其他热力学计算软件,对不同合金元素含量对钢中各相相比例变化的影响规律进行计算分析,确定合金化设计的基本方向;其次,采用实验室真空感应炉进行新钢种的冶炼,研究钢中各相的相比例与合金成分的对对应关系,确定最佳化学成分。然后,开发实验室中试热处理和热压成型等装备,开展近工业规模节约型不锈钢 Q&P 热处理和热压成型实验。最后,与工业化退火生产线相结合,开发适用于节约型不锈钢的热处理工艺制度,实现节约型高强韧不锈钢的工业化生

产。图 4 示出的是本项目的整体研究方案和技术路线。

## 6 研究计划

◆ 2014 年:节约型不锈钢显微组织和化学成分设计;完成实验用钢熔炼并进行必要的热加工和热处理;研究铁素体不锈钢中硬质第二相的形成条件及其体积分数随热轧、冷轧及热处理工艺参数变化规律;研究热变形对马氏体不锈钢中“奥氏体马氏体”转变的温度和动力学影响规律;研究双相不锈钢在热轧、冷却、冷轧及热处理过程中的组织演变规律研究;组织与不锈钢企业的学术交流。

◆ 2015 年:完成铁素体不锈钢形变孪晶产生机理及对裂纹形成与走向的影响规律的研究;完成铁素体不锈钢晶界结构随加工工艺变化规律的研究与 CSL 晶界控制工艺技术开发;完成马氏体不锈钢中合金元素对“奥氏体马氏体”转变的温度和动力学影响规律的研究;完成 Q&P 热处理工艺参数(淬火温度、配分温度与时间)对马氏体不锈钢显微组织演变和碳化物析出影响规律的研究。

◆ 2016 年:完成配分热处理参数对铁素体不锈钢中马氏体及残留奥氏体体积分数、奥氏体含碳量和稳定性影响规

律的研究;完成非碳化物形成元素 Si、Al、Ni 单独或复合添加对马氏体不锈钢中碳化物析出动力学影响规律的研究;完成快速加热和快速冷却对双相不锈钢中合金元素互扩散以及合金元素晶界偏聚行为影响规律和机理的研究;组织与国内及欧洲汽车生产企业和研究院所的学术交流,探讨不锈钢在汽车制造中的应用前景。

◆ 2017 年:完成铁素体不锈钢中微合金化元素(Nb、Ti、V 等)在热轧、冷轧及热处理工艺过程中的溶解析出行为及其对组织演变影响效果的研究;完成双相不锈钢中第二相析出动力学规律及其影响因素的研究,确定应变储能对第二相析出序列与动力学的影响、连续冷却条件下的析出行为并确定第二相析出的临界冷却速度;组织与不锈钢企业及汽车企业的学术交流,深入探讨白车身用不锈钢的发展方向和应

用前景。

◆ 2018 年:完成铁素体不锈钢的成形性能、强度及低温韧性、耐蚀性随工艺参数变化规律的研究;完成“HPF+Q&P”工艺参数对马氏体不锈钢的强度、延伸率、冲击韧性及耐腐蚀性能的影响规律的研究,建立成分—工艺—组织—性能对应关系,阐明强韧

化机理;完成高温轧制工艺、超快速冷却和在线加热制度对双相不锈钢的组织演变及第二相析出行为影响规律的研究;实现节约型高强韧不锈钢在汽车和制品等领域的工业化应用。

## 7 预期效果

1) 高强高韧铁素体不锈钢:明确析出相、晶格摩擦力及形变孪晶对韧性的综合影响规律及详细机理;明确铁素体不锈钢中碳、氮间隙元素的分配行为及对强度的影响规律和机理。开发出旨在综合控制钢中析出相、晶格摩擦力、形变孪晶及再结晶组织均匀性的热轧和 Q&P 热处理工艺技术。

2) 超高强韧性化马氏体不锈钢:明确热变形对合金元素互扩散行为和扩散型相变进程的影响规律与机理以及组织性能对应关系。开发出将“HPF+Q&P”相结合的新的热成型工艺技术,实现超高强韧性化马氏体不锈钢的成形性一体化控制。

3) 开发出高强韧节约型不锈钢系列产品并系统评价使用性能,在国际上率先突破不锈钢在白车身及其他方面大规模应用的限制瓶颈,进一步充实不锈钢生产的物理冶金学理论并促进我国不锈钢生产技术的发展,为我国循环经济建设作出贡献。

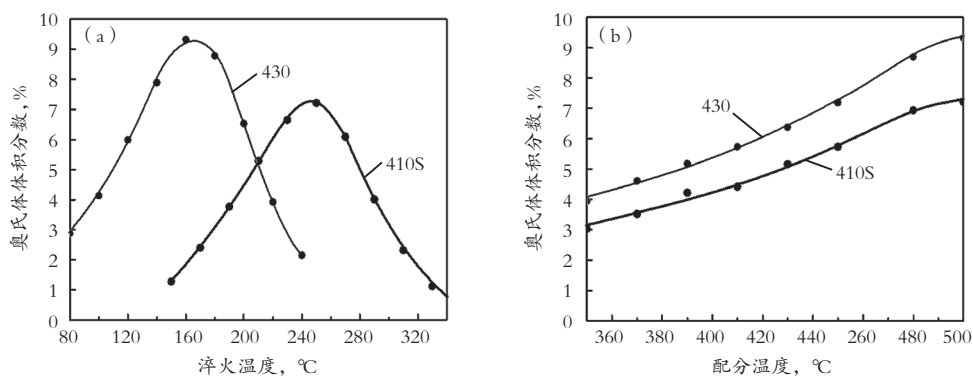


图3 (a) 淬火温度和(b) 配分温度对冷轧板经淬火—配分处理后残余奥氏体含量的影响

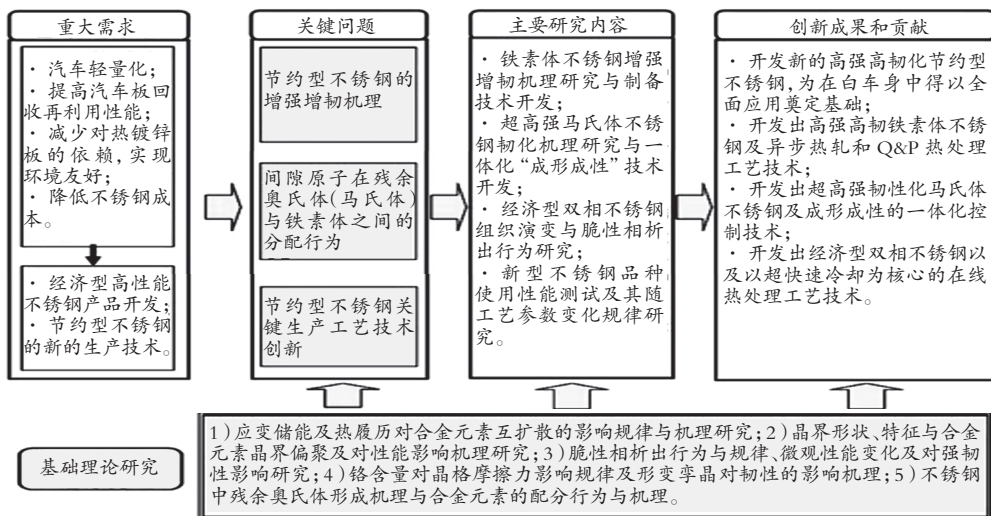


图4 本项目的整体研究方案和技术路线

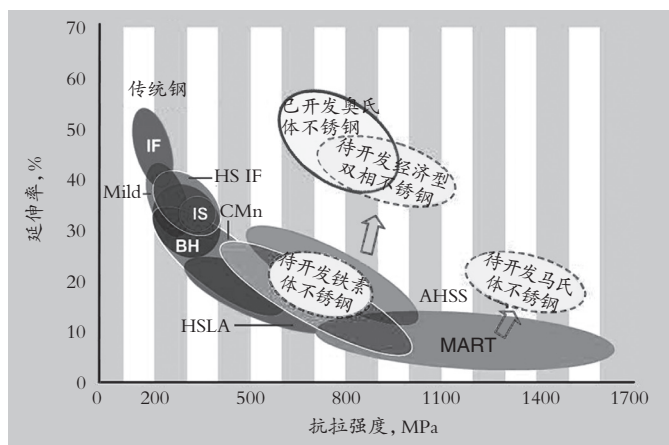


图2 待开发节约型不锈钢的强度和延伸率指标与传统先进高强钢同类指标的比较



东北大学  
Northeastern University



RAL