

DOI: 10. 11973/jxgccl240092

# 论汽车材料研发和推广应用的EVI模式

马鸣图<sup>1</sup>,路洪洲<sup>2</sup>,赵岩<sup>3</sup>,冯毅<sup>1</sup>,王光耀<sup>1</sup>,李波<sup>4</sup>,袁国<sup>5</sup>,缪心雷<sup>6</sup>,蒙菁<sup>6</sup>

- (1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401121; 2. 中信金属股份有限公司, 北京 100004;  
3. 北京理工大学重庆创新中心, 重庆 401120; 4. 中新(重庆)超强材料研究院有限公司,  
重庆 401120; 5. 东北大学轧钢技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819;  
6. 鞍钢蒂森克虏伯汽车钢有限公司, 大连 116600)

**摘要:**详细论述了在汽车材料研发和推广应用中的供应商早期介入(EVI)模式。介绍了这一模式发展的背景和内涵,以及在新材料研发和推广应用中的重要作用;详细介绍了国内外一些知名公司的EVI活动及其特点、鞍钢蒂森克虏伯汽车钢有限公司在数字车身平台及其钢材解决方案方面的新近成果,以及有关企业在推广EVI活动中所取得的进展;论述了EVI模式在新开发车型中推广应用新型材料时所发挥的作用,提出了企业推广应用EVI模式应具有的条件;最后阐明了EVI模式对“双碳”战略的重要意义。

**关键词:**EVI模式;新材料研发和推广应用;标杆车;概念车

**中图分类号:**TG142.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-3738(2025)03-0001-19

## 0 引言

2003年4月日本JFE公司成立,并提出了“信守承诺和对未来新机遇永恒的追求”的发展宗旨。遵循这一宗旨,JFE公司迅速发展并开发了各类汽车先进高强度钢,如孪生诱发塑性(TWIP)钢、纳米强化高强度(NANO-HITEN)钢等,同时产量也迅速增加,凭借高质量的产品逐渐占领世界汽车板的高端市场。为强化应用技术和客户服务,JFE公司基于对用户需求的深刻理解,秉承满足用户需求为导向的先进理念,采用同时工程(simultaneous engineering, SE)的实施策略,不断与用户合作开发并应用具有竞争力的新产品,如NANO-HITEN钢以及在水淬连退生产线上开发的双相(DP)钢和多相(CP)钢。该公司还建立了世界上先进的应用研究实验室,支持用户制定新产品的应用规范,由此形成了初期的供应商早期介入(early vendor involvement, EVI)产品开发模式与钢铁新产品的销售模式,为新材料研发和推广应用的EVI模式奠定了基础<sup>[1]</sup>。

2008年,韩国POSCO公司召开了全球首届EVI论坛<sup>[2]</sup>,正式提出EVI模式。该模式就是材料企业针对用户开发新产品用材需求的早期介入模式,起源于材料生产企业的技术服务体系以及客户开发产

品所提供的用材支持系统,之后进一步发展成为通过技术合作,从对用户开发新产品(如汽车新车型)进行先期介入,进而逐步形成EVI的工作流程和模式<sup>[3]</sup>。截至2018年,POSCO公司共召开了6届全球EVI论坛,由此形成了韩国POSCO公司在各类新钢种开发、销售和技术服务方面的特有模式。

1999年,宝钢技术人员前往美国专门针对汽车的EVI模式进行考察,并首次将汽车工业新产品开发的EVI模式引入国内。2011年,宝钢于上海召开了首届宝钢EVI会议,在会上系统介绍了一系列与汽车轻量化应用相关的新产品,并与用户交流了在高强度钢应用方面的经验和案例;同时宝钢还提出了在安全和轻量化约束下追求成本最优的车型开发理念和方法,展示了宝钢的EVI合作与服务模式;2018年,陆匠心在《钢铁》期刊上发表了题为“宝钢汽车板技术服务的EVI工作模式”的文章,对宝钢在汽车板技术服务领域的EVI工作模式进行了系统总结。

中国汽车工程研究院马鸣图等相关团队一直致力于在汽车轻量化研究和先进高强度钢的应用中推广EVI模式。他们曾发表多篇论文,探讨了EVI的内涵和意义,并着重论述了在汽车轻量化中EVI模式的应用和需求,强调了应用研究在材料开发和应用全过程中的重要意义,赋予了EVI新的认识<sup>[3-6]</sup>。该团队还提出将EVI融入整车的开发流程,涵盖项目的初始方案阶段、性能确定阶段、性能分解阶段、

收稿日期: 2024-03-01; 修订日期: 2024-12-24

作者简介: 马鸣图(1942—),男,河南兰考人,教授,博士

零件功能的实现与验证阶段以及整车功能的预测、试验验证和实车应用试验结果分析等环节。EVI既是一种思维、一种理念、一种模式、一套流程,也是一种试验结果的分析和认识方法以及一种技术的展示。

目前,在国内外知名的材料生产企业中,特别是钢铁企业,EVI模式已经成为满足用户需求的集成解决方案。例如:韩国POSCO公司每两年举办一届全球EVI论坛;德国蒂森克虏伯公司通过对同一零件采用不同选材和不同工艺,对比最终的成本、轻量化效果和二氧化碳排放量等指标,为汽车零部件企业在选材方面提供更多的选择。2024年3月,德国蒂森克虏伯公司针对EVI服务中常用的制作概念车的相关问题,在重庆召开了数字车身平台及其用钢解决方案的研发成果发布会,为汽车厂和零部件厂开发新产品提供了新的思维和方便快捷的方法。Arcelor Mittal公司运用S-in motion选材方法,基于成本、效益和二氧化碳排放的全生命周期评估(life cycle assessment, LCA)分析方法以及超高强度钢零件的集成设计和制造工艺(如门环的热成形技术等),展示了不同公司EVI模式的特色。

2018年,中信微合金化技术中心和中国汽车工程研究院股份有限公司联合组织召开了中国汽车EVI暨高强度钢氢致延迟断裂国际会议。迄今为止,该会议已经成功举办3届,这对汽车EVI模式和氢脆研究起到了较强的推动作用,同时也使人们对EVI模式和氢脆具有更深入的认识。

在EVI这一模式的推动下,国内外先进高强度钢得到迅速发展。EVI在推动技术进步和新材料应用中的作用和意义已经超出EVI模式本身。在已召开的“EVI和氢脆”的国际会议相关报告和论文集、POSCO全球EVI论坛上的相关技术报告和会议资料中,以及国内外各大公司关于EVI成果的展示中,EVI的作用和意义均得到充分的展示和体现<sup>[3-6]</sup>。

为了给相关人员深刻理解EVI模式提供全面而系统的参考内容,作者全面介绍了国内外一些知名公司的EVI活动和特点,以及鞍钢蒂森克虏伯汽车钢有限公司(TAGAL)关于数字车身平台及其用钢解决方案新近发布的成果,论述了EVI模式在新开发车型中推广应用新型材料时所发挥的作用,提出了企业推广应用EVI模式应具有的条件,阐明了EVI模式对“双碳”战略的重要意义以及有关企业推广EVI活动取得的进展。

## 1 EVI的发展背景和内涵

早期EVI来源于客户的支持系统。材料生产企业为使客户高效地运用所开发的新材料,提出了一种新的销售理念:首先了解用户开发新产品对材料的需求,然后解决用户在使用新材料过程中所产生的问题。这一做法使得材料生产企业从简单的材料供应商变为解决用户各种问题的合作伙伴,将新材料的试制和开发与用户对新材料应用的需求有机结合,达到双方共赢的效果。材料生产企业需结合用户的产品开发过程,与用户合作开展分析、模拟和优化设计工作,为产品的制造提供新材料及其应用工艺技术的解决方案,这便是EVI的方案和模式。基于此,EVI活动可以分为4个阶段。第一阶段:开发用户所需要的各种材料,包括普通高强度钢以及一、二、三代先进高强度钢。第二阶段:材料企业在汽车零部件和相关产品的制造中先期介入,与用户共同对所开发的零部件进行优化设计、计算机模拟和分析;通过材料性能和零部件功能的预测和评估,提出零件用材和成形工艺的建议,以达到零部件的尺寸形状优化和轻量化的目标,同时在确保零件高性价比的前提下,保证用材和工艺均满足批量生产的要求。第三阶段:解决材料用户如何迅速地应用新产品的问题,将材料产品的开发与构件产品开发有机结合,使材料企业新产品开发的目标更明确,双方借此达成深度合作,实现创新发展。第四阶段:将材料企业由材料的供应商转变为解决问题的合作伙伴<sup>[7]</sup>。综上,EVI的内涵可以概括如下:首先,协同用户选择产品开发所需的合适材料;其次,为用户提供包括成形技术、焊接技术、涂装技术、零件评价等应用技术支持;再次,在用户产品投产后,由材料供应商为材料应用方提供商务支持,涵盖及时供货、物流成本控制、优质商务技术服务以及必要的公益支持等;最后,通过收集全球网络系统、限额投资、零件开发和产品供应等相关工业信息,密切融合材料生产企业和材料用户的关系。

目前,EVI的概念和模式已被拓展到建筑、能源、重型机械、电力和电子等领域。在这些拓展的领域内,材料和应用的集成解决方案包括各种功能材料、有色合金、特种超高强材料等的开发和应用研究,通过计算机模拟和电磁仿真等对成形、涂层、焊接、热处理等工序进行检测与评价,在材料应用时提供商业支持。



## 2 EVI模式对高强度钢发展的作用

EVI活动一般与汽车轻量化密切相关。依据拇指法则,为实现大部分汽车冲压构件的轻量化,必须应用高强度钢,而EVI活动促进了高强度钢和先进高强度钢的发展。目前已发展的和正在发展的一般高强度钢和先进高强度钢断后伸长率和抗拉强度的关系,已在文献[8-9]中明确论述。一般高强度钢包括无间隙原子钢(IF钢)、高强度无间隙原子钢(HSIF钢)、低碳钢(Mild钢)、各向同性钢(IS钢)、烘烤硬化钢(BH钢)、碳锰固溶强化钢(C-Mn钢)、高强度低合金钢(HSLA钢)等。先进高强度钢包括第一代、第二代和第三代先进高强度钢。第一代先进高强度钢的强塑积为20 000 MPa%,包括双相钢(DP钢)、复相钢(CP钢)、相变诱发塑性钢(TRIP钢)、马氏体钢(MART钢)、热冲压成形钢(HPF钢)。第二代先进高强度钢的强塑积为60 000 MPa%,包括超高强先进高强度钢(U-AHSS钢),又称孪晶诱发塑性钢。第三代先进高强度钢的强塑积为40 000 MPa%,又称新一代或特殊先进高强度钢(X-AHSS钢),主要包括中锰钢、淬火配分处理钢(Q&P钢)、淬火配分回火处理钢(Q&P.T.钢)、超级贝氏体钢(Super B钢)和 $\delta$ -TRIP钢等。其中:中锰钢通过奥氏体逆转变获得体心立方(BCC)+面心立方(FCC)组织,从而获得优异强韧性;淬火配分处理钢通过淬火配分处理获得马氏体+残余奥氏体组织,利用TRIP效应保证钢的强韧性匹配;淬火配分回火处理钢在淬火回火过程中实现配分处理,得到回火马氏体+残余奥氏体组织,通过TRIP效应改善钢的强韧性匹配;超级贝氏体钢通过贝氏体转变并控制碳扩散,使碳在贝氏体板条间富集,得到呈条状分布在贝氏体板条之间的残余奥氏体组织,通过TRIP效应提高其强韧性; $\delta$ -TRIP钢<sup>[10]</sup>则是在一般低合金钢中加入质量分数3%~4%的铝,并经临界区处理和淬火处理得到由 $\delta$ 铁素体、珠光体、残余奥氏体以及回火马氏体组成的组织,其强塑积约为30 000 MPa%。然而,由于 $\delta$ -TRIP钢在冶金工艺性能和热处理工艺性能方面仍存在一些尚需改进的问题,该钢的工业生产应用还较少。先进高强度钢在汽车轻量化领域的应用是一种经济、有效的解决方案,在全生命周期评估方面展现出显著的优势,相较于其他材料,该材料具有更低的二氧化碳排放量。

目前,应用最广泛的是第一代先进高强度钢中的双相钢以及热冲压成形钢,第三代先进高强度钢

正在开发和完善中。文献[8,11]详细论述了材料性能与零件功能之间的关系,强调了材料性能并不等于零件的功能。事实上,工业制造所追求的是具有高功能的零件,基于这一点,对于以相变诱发塑性为基础的第三代高强度钢的开发工作,应秉持慎重的态度。这是因为钢中的残余奥氏体在未进行加工成形前对钢的强韧性匹配以及成形性是有利的,但是一旦该钢经过冷变形后,残余奥氏体就会转变为马氏体,从而使该钢中的延性相变成脆性相,这对成形后零件的强韧性匹配和抗氢脆能力产生不利影响。因此,在开发第三代高强度钢时,应结合零件的加工成形工艺及其应用场所进行慎重分析。当应用第三代高强度钢实现汽车轻量化时,更应考虑零件的刚度、压溃吸能特性、膨胀失稳抗力与零件厚度之间的关系,即当依靠提升强度对零件进行减薄来实现轻量化时,必须考虑零件减薄带来的功能变化,如刚度的降低、膨胀失稳抗力的减弱等。因此,轻量化是有限度的。在进行Benchmark工作对材料进行反求,在开展零件失效分析并提出相应预防措施,在利用加工工艺强化手段充分发挥材料潜力,在进行材料数据库的建设及应用,以及在材料生产单位开展EVI服务时,均必须考虑材料性能与零件功能的关系<sup>[11]</sup>。

基于EVI模式对热冲压成形工艺流程的分析,开发了有热镀锌层的热冲压成形板,即GA板;这类镀层板在加热时具有良好的氧化抗力,在热冲压时具有良好的减摩效果,同时赋予零件良好的耐腐蚀性能。目前,GA板已成功用于直接热成形和预热成形零件,与传统的Al-Si镀层板相比,其价格更加低廉,但是GA板在应用时应严格控制加热温度,点焊时应格外注意液态金属脆性问题。为提升超高强热成形钢的强韧性和氢致延迟断裂抗力,应用EVI模式开发了Nb-V复合微合金化热成形钢;针对零件在加热时易出现的表面氧化问题以及在使用过程中的腐蚀问题,应用EVI模式开发了抗氧化和耐环境腐蚀的热成形钢;为满足空心轻量化弹性稳定杆和扭力杆的制造需求,通过Nb-V复合沉淀强化以及对奥氏体晶粒进行细化,开发了高强度轻量化、强韧性匹配好且氢脆抗力高的弹簧钢,这种弹簧钢的开发不仅提高了弹簧的设计应力水平,实现了弹簧的轻量化,而且还延长了弹簧的使用寿命。

## 3 EVI模式对用户需求的集成解决方案

为实现EVI模式为用户服务的目标,一些现代

大型材料生产企业建立了专门的材料应用服务中心,部分生产汽车板的钢厂将其设立的相关机构命名为汽车板应用中心。宝钢的用户研究所作为中国钢铁行业最早成立并开展EVI服务的机构,与用户进行了有机融合,共同开展新钢种的应用技术研究以及零件的制造、试验检测和评价;通过将相关的应用研究成果进行系统集成,形成了一套材料用户应用新材料的集成解决方案,实现了对用户选材的集成创新支持。POSCO公司根据多年在EVI服务领域的体会,总结了在EVI活动中具有自身特色且重要的理念构成和操作方法<sup>[2]</sup>:其一是同时工程,即提出优化材料应用建议的同时,在EVI模式实施中开发所需的新型钢种;其二是价值工程(value engineering, VE),即通过运输和物流体系的改进来降低材料的供应成本;其三是价值创新(value innovation, VI),即通过材料的优选、成分微调和性能优化来降低材料的应用成本;其四是零件和用材的建议(part proposal, PP),即当车辆运行条件发生改变时,及时对零件用材进行更新和优化并提出建议。POSCO公司将这些理念进行集成,形成了一套针对用户需求的集成解决方案。

在目前国内外EVI模式的核心展示中,许多材料生产企业,特别是钢厂将新材料开发、新成形技术开发以及新设计理念和新材料应用技术融入到概念车中,借助概念车的制作过程展示这些研究成果在汽车轻量化和概念车设计中所产生的应用效果。

#### 4 新车开发中的EVI模式

各公司新车开发的EVI活动各具特色,现以两家公司为例进行说明。首先是韩国POSCO公司提出的新车开发中的EVI活动<sup>[12]</sup>,其所展示的新车开发过程以及各阶段中EVI模式的相关工作包括项目的立项及计划、项目的优化设计、车型的原型制造以及量产四个方面。在项目的立项及计划阶段,POSCO公司的EVI活动是向汽车厂提供详细的材料信息,以及新钢种应用的优势和可能;在项目的优化设计阶段,EVI活动包括提供详细的材料数据,与汽车厂共同进行成形模拟,进一步对材料进行优化选择,提供合理的材料价格信息以预测新车型的性价比,为车型开发单位提供详细的白车身相关性、试验材料的供应和支持;在车型原型制造阶段,其EVI活动是对该车型所用模具的开发进行支持,包括车型原型功能的试验和评价;在量产阶段,EVI

活动是进一步优化材料供应和材料应用工艺,以获得最好的性价比。EVI服务和解决问题的模式就是EVI程序+钢材供应,即从车型零件设计到试量产时的技术支持。

国际钢协的未来钢制汽车(future steel vehicle, FSV)项目在新车型开发的EVI活动中坚持从开发定位、概念设计到车型的详细设计、材料与工艺设计直到性能验证的全方位合作和服务<sup>[13]</sup>。开发定位包含减重目标和轻量化效果,该过程是白车身的计算机辅助工程(computer aided engineering, CAE),其工作内容包括分析和优化设计、材料工艺设计、材料选择和应用、白车身的性能测试等4个方面。减重目标和轻量化效果基于不同年代钢制汽车的总质量和钢制车身结构件的质量范围,以及二者之间的关系分析进行确定;未来钢制白车身的减重目标为35%,质量比超轻钢车身和铝合金车身轻。当减重目标被确定后,随即进入FSV白车身EVI开发流程中的概念设计阶段,该阶段包括总体方案的确定、车身尺寸的设计以及通过流场分析和风阻分析优化车身的外观造型以及通过多目标的静态拓扑优化方法对白车身的刚度和强度、白车身的模态进行分析计算并进行简化的碰撞性能模拟<sup>[13-14]</sup>。通过对整车外观造型的CAE分析,以完成车型流场风阻等造型优化设计,最终完成概念设计阶段的白车身结构优化设计方案。在概念设计阶段,还需要考虑绿色环保和未来法规的要求以及确保材料的可回收利用等要求和因素。在成本方面,要求白车身的价格能够与原来的标杆车持平或有所降低。在生产环节方面,当确保批量投产时,可按原来的生产周期和流程进行连续生产。

FSV白车身EVI开发流程中的详细设计阶段包括提出和进行多种拓扑设计方案。这一阶段将根据性能目标的要求,对多种拓扑方案进行优化和优选,同时对车辆的动态性能,包括NVH(噪声、振动和声振粗糙度)性能、动态刚度、强度、疲劳性能、碰撞时载荷传递路径等进行模拟分析,最终确定拓扑优化的设计方案<sup>[15-16]</sup>。

在FSV白车身EVI开发流程的材料工艺与设计阶段,通过深入分析每个子系统的零件功能,并将开发车型的总体减重目标与典型零件减重目标相结合,确定了白车身与标杆车相比需要减重35%或102 kg。为实现这一减重目标,制定了具体的用材方案:DP500和DP600钢的占比为11.8%,DP800钢、



DP1000钢、TRIP1000钢、TWIP1000钢、CP800钢、CP1000钢、MS1500钢的占比分别为9.5%, 10.0%, 9.5%, 2.3%, 9.5%, 9.3%, 1.3%, 再加少量高强度低合金钢和烘烤硬化钢。通过辊压成形、冲压成形、激光拼焊以及差厚板热冲压成形和激光拼焊烧硬化热冲压成形制造相关零件。在考虑白车身性能和制造工艺时,必须考虑白车身的连接方式。根据不同部位的结构特点和性能要求,对点焊连接、激光焊接连接、粘胶连接等连接方式进行优化分析和试验研究,确保合适的材料通过合适的工艺应用在合适的部位,从而实现车身的轻量化目标,并提升开发车型的整体安全性。

FSV白车身EVI开发流程中的性能验证阶段包括白车身刚度、强度和疲劳性能的测定,白车身的模态分析,前撞、后撞、侧撞、柱撞、顶部压溃、翻滚等测试。在完成所有检测项目后进行性能评定,若各项指标均符合要求,则可以进行试制和量产。

FSV项目具备以下5个特点。其一,采用先进的设计理念,在FSV设计过程中,先进的钢铁材料和应用技术与先进的设计理念相结合,形成了结构优化和用材合理的完美解决方案。为形成最佳的设计方案,在一个白车身系统中,根据不同部位的功能要求,应用多个CAE工具进行优化。其二,车身材料所应用的先进高强度钢的占比高达97%,其中千兆钢(GIGA钢)的占比大于50%,所用的钢铁材料能够满足车身用材的高强度、良好成形性能、轻量化和良好碰撞性能的要求。其三,应用先进的成形技术,包括热成形、液压成形、激光拼焊、辊压成形等,同时通过改善钢种的加工硬化特性,提高成形性能并增加碰撞安全性。其四,根据板材的规格、性能特征、成形方法以及对成形后零件功能的预测,优化产品的集成方案,同时应用成本分析软件模拟评估零件的成本和性价比以及零件全寿命周期的二氧化碳排放量。其五,开展全寿命周期的技术评估,即进行生产、使用、回收全流程的二氧化碳排放量和能耗的评估,以最大限度地减少能耗和全寿命周期的二氧化碳排放量,使其完全符合绿色环保的要求以及未来法规的规定,同时考虑材料的回收利用效益。

对于新能源汽车的轻量化,POSCO公司提出了独具特色的EVI解决方案,其第一代电动车(PBC-EV)开发过程如下:首先选定标杆车,确定参考质量和减重目标,并根据POSCO公司产品的特点,确定采用全车速下具有高安全性的全钢结构,减重目标

基于2001—2003年钢制白车身和铝制白车身的质量,并参考多材料白车身的质量以及2004—2008年前十位钢制白车身的质量综合分析而定<sup>[15]</sup>;然后确定直流电机的功率、电池包的容量和续航里程以及最高车速,并确保车辆满足8项碰撞安全法规要求。基于有关指标,确定用材方案以及加工制造工艺技术。白车身的下部空间采用空间桁架结构,上部采用单体式全承载式结构。同时,参考超轻钢汽车车身(ultra light steel auto body, ULSAB)结构,将白车身的下部桁架和电池包相融合。在整车造型方面,充分考虑空气动力学特征和风阻的灵敏性。在保证乘员仓安全的前提下,通过优化设计使乘员仓顶部空间得以最大化。前悬架采用MacPherson(麦弗逊)悬架,后悬架采用扭力梁悬架。应用来自加利福尼亚大学圣芭芭拉分校的相关软件,对车辆的碳排放情况与标杆车进行对照评估,并合理控制白车身的成本。在第一代电动车开发过程中,其特征参量均经过准确的设计计算确定。根据所选定的标杆车,确定整车的尺寸为长4.32 m、宽1.83 m、高1.55 m,参考的白车身质量为296.6 kg,而开发的白车身质量目标设定为218.1 kg,减重目标为78 kg。该车型计划配备100 kW永磁直流电机、30 kW锂离子电池包,续航里程为160 km,最高车速为150 km·h<sup>-1</sup>。在安全方面,该车型需满足8项碰撞安全法规要求,即顶部压溃(FMVSS 216&IIHS)、侧碰(FMVSS 214D&IIHS)、侧边柱碰(FMVSS 214P&EURONCAP)、正碰(USNCAP)、偏置碰(EURONCAP&IIHS)、后碰(FMVSS 301)、低速碰(RCAR&IIHS)、行人保护(EU PED-PRO Phase 2)等。该车型的用材方案为先进高强度钢占比65.0%、抗拉强度大于1 GPa的超高强度钢占比45.4%、镁板占比2.0%,按照具体材料牌号的方案为软钢占比2.5%、镁板占比2.0%、热成形钢(包括1 470 MPa和2 000 MPa级别)占比8.2%、复相钢(CP1180钢)与马氏体钢(M1470钢)的组合占比10.3%、POSCO专用马氏体成形钢占比3.9%、孪晶诱发塑性钢(TWIP980钢)占比10.4%、相变诱发塑性钢(TRIP980钢和1180钢)占比3.3%、相变诱发塑性钢(TRIP590钢)占比1.6%、双相钢(DP980钢)占比9.3%、双相钢(DP490钢, 590钢, 780钢)占比15.6%、电工钢占比0.53%、其他电工产品用钢占比32.9%。在制造工艺技术方面,冲压成形、激光拼焊、液压成形、热成形、滚压成形等多种工艺得到广泛应用。在冲压成形技术中,根据零件的性能要

求,一方面可采用相同的材料,通过对零件不同部位进行不同的加热工艺或冷却工艺,使零件不同部位获得不同的强度;另一方面,也可以针对同一零件应用不同材料,通过激光拼焊连接,在相同的加热冷却工艺下使零件不同部位获得不同的强度。对AZ31B镁合金零件,宜采用温成形工艺制造。在整车造型方面,充分考虑空气动力学特征和风阻灵敏性,应用计算机模拟流体动力学以及风阻系数(0.28)的影响。通过优化设计,不仅实现了乘员仓顶部和电池包空间的最大化,同时也将电动车发动机和控制系统安置在缩短的子框架内。经过前碰、后碰、偏置碰等测试后,第一代电动车安全碰撞标准达到了五星级,并且在各种碰撞测试后电池均未发生损坏。白车身的静态弯曲刚度为 $15\,857\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,扭转刚度为 $16\,644\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ ,动态弯曲时的振动频率为 $51.2\text{ Hz}$ ,扭转振动频率为 $47.4\text{ Hz}$ 。全寿命周期二氧化碳排放量为 $12\,328\text{ kg}$ ,白车身制造成本为 $1\,018$ 美元。

在第一代电动车的开发以及所取得的成效基础上,2014年POSCO公司开发了第二代电动车。此次开发旨在进一步提高车辆的舒适性和安全性,尤其是针对四轮驱动(4WD)的高端车辆,对其悬架结构进行了优化,以提高轻量化效果和舒适性。悬架采用热处理后的超高强弹簧钢,其抗拉强度达到 $2\,000\text{ MPa}$ ,减重 $20\%$ 以上<sup>[3]</sup>。选用抗拉强度 $1\,500\text{ MPa}$ 的热成形钢和吉帕级的先进高强度钢,以及成形性良好的DP590和DP780先进高强度钢制造 $30\sim 60\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的电池包托盘;电池包壳的上盖采用深冲性能良好的软钢,以保证电池包的安全性,与铝制电池包相比,减重 $5\%$ 以上<sup>[3]</sup>。第二代电动车的碰撞安全性达到五星级,小角度碰撞也取得了较好的效果。POSCO公司开发的全钢电动车车身在轻量化、安全性方面都取得了很好的效果<sup>[15]</sup>。

此外,美国的新一代汽车合作伙伴计划(the partnership for a new generation of vehicles, PNGV)计划,欧盟的超轻汽车(super light car, SLC)计划,国际钢协的ULSAB计划、超轻钢汽车悬架(ultralight steel auto suspension, ULSAS)、超轻钢汽车覆盖件(ultralight steel auto cover, ULSAC)、超轻汽车车身-先进汽车概念(ultralight steel auto body-advanced vehicle concepts, ULSAB -AVC)等,蒂森克虏伯公司的新型全钢车身项目,Arcelor Mittal公司的车身概念项目(S-in motion),美国的关于商用车轻量化

的21世纪卡车项目,以及美国能源部指定的重型商用车轻量化目标等相关项目,都是以钢铁材料为主的汽车轻量化项目,并都取得了良好效果<sup>[14]</sup>。

## 5 国内外企业典型的EVI活动

### 5.1 韩国POSCO公司的EVI活动

韩国POSCO公司是继日本JFE公司之后较早提出EVI概念,并在国际上率先开展EVI活动的企业。在2008年于韩国松岛召开的全球首届EVI论坛上,POSCO公司的代表首先论述了EVI的模式和内涵,并将SE、VE、VI、PP作为EVI模式的核心,对EVI的模式进行了详细说明和论述<sup>[2, 16]</sup>,并以开发用户所需要的产品为主题,展示和论述了普通高强度钢、先进高强度钢以及一代、二代、三代高强度钢的性能以及相关应用前景;参会的汽车行业代表展示了轻量化发展和需求。为了做好EVI工作,POSCO公司专门成立了汽车钢应用中心,与用户共同开发新钢种的相关应用技术,满足用户对新钢种应用的需求。POSCO公司秉承用户第一的理念,分专题介绍了满足用户需求所开发的一些新产品,例如:多相烘烤硬化钢(MP-BH Steel),烘烤后该钢具有更高的屈服强度,烘烤硬化量高达 $80\text{ MPa}$ ,有效增加了零件的凹痕抗力,已应用于前挡泥板的制造;超级TRIP钢和DP钢,这两种钢利用分布于晶界的微合金化碳氮化物阻挡金属硅、锰等合金元素沿晶界扩散,控制了钢材表面的氧化物形成,改善了退火氧化物的形态,提高了钢材表面的抗氧化性能;结合汽车厂轻量化需求开发超级和特级先进高强度钢,包括马氏体TRIP钢、超级贝氏体TRIP钢、孪晶诱发塑性钢等;与意大利菲亚特公司合作开发TWIP钢,该钢被用于制作菲亚特车辆保险杠,通过改进TWIP钢的翻边延性,使其能够用于制造车轮,在应用中取得了良好效果。

为改善板材的表面性能、摩擦性能、耐腐蚀性能和涂层的均匀性,以适用于制造车身的外板结构件等,新开发的以静电气溶胶涂层固化的热浸镀锌钢板(GI coating solidified with aerosols charged with electrostatic, GI-ACE板)镀层的锌花尺寸由原来的 $1\,000\sim 2\,000\text{ }\mu\text{m}$ 细化到 $50\sim 60\text{ }\mu\text{m}$ ,改善了钢板的表面形貌、成形性能、耐腐蚀性能以及涂装后的清洁性能、光鲜性和均匀性。为改进合金化熔融镀锌钢板(GA板)的表面润滑性能,在其表面增加了润滑薄膜,改进后的摩擦因数较原GA板降低了 $20\%$ 。与

GI板相比,POSCO公司开发的锌镁(Zn-Mg)涂层的涂层结合力与焊接电极寿命相当,成形性能、表面形貌、激光焊接性和腐蚀抗力得到改善,但价格上涨15%<sup>[2]</sup>。POSCO公司还开发了用于热成形的有机纳米涂层板,该涂层为有机和无机复合纳米粒子

填充的复合物,从而改善了钢板加热时表面的抗氧化性能、热成形后零件的点焊性能以及室温的预成形性能。表1给出了POSCO公司热冲压成形钢系列烘烤前后的性能<sup>[17]</sup>,烘烤后热冲压成形钢具有更高的屈服强度。

表1 POSCO公司热冲压成形钢系列烘烤前后的性能<sup>[17]</sup>

Table 1 Performance of POSCO hot stamped steel series before and after baking<sup>[17]</sup>

牌号	烘烤前			170℃×20 min烘烤后		
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
HPF1470	1 080	1 490	7.4	1 270	1 520	7.1
HPF1800	1 240	1 830	6.8	1 440	1 770	6.2
HPF2000	1 320	2 060	5.7	1 560	1 950	5.4

2010年POSCO全球EVI论坛的主题为在汽车零件制造中如何对用户进行帮助,包括如何使用先进的激光拼焊板、液压成形技术、热冲压成形技术,以及如何用好与这些成形技术相关的新的钢种。在汽车制造中特别是高强度白车身的制造中,点焊技术是一项重要的制造技术,通常一部汽车白车身的焊点数量超过4 000个。高强度板和新的涂层技术的发展对点焊条件也提出了新的要求。按照ISO18278-2: 2016 *Resistance welding—Weldability Part 2: Evaluation procedures for weldability in spot welding*标准,对未涂层板进行点焊时的电极压力为4.5 kN,熔化时间为3 s,焊接时间为130 s,冷却时间为40 s,保持时间为300 s,电极为Cu-Cr电极,电极形式为模块式的电极系统,电极头部直径为0.8 mm,冷却剂流量为4 L·min<sup>-1</sup>,点焊板材和冲压零件的厚度在1.5~1.7 mm。当点焊抗拉强度为1 470 MPa的热成形裸板时,其点焊电流为3.0~7.7 kA。对于抗拉强度为1 470 MPa的铝硅涂层热冲压成形板,点焊电流为8.5~10.5 kA。对于抗拉强度为1 800, 2 000 MPa的热冲压成形裸板,点焊电流分别为7.5~9.0, 7.5~8.5 kA。这些数据表明对于热成形的裸板,点焊电流偏低且范围宽,而对于强度较低的铝

硅涂层板,点焊电流范围也较宽,但其数值明显提升;当裸板的强度级别提升时,点焊电流增大,但范围变窄。表2列出了不同强度热成形钢点焊后接头的拉伸剪切和十字拉伸试验结果以及相关的延性比<sup>[18]</sup>,可以看出,随着板材强度的增大,点焊后接头的强度以及延性比均下降,断裂模式均为部分交界面分离。当点焊工艺适当时,焊点的承载能力(拉伸剪切和十字拉伸)都随基体材料的强度增大而下降,延性比也基本呈现该变化趋势<sup>[18]</sup>。

2012年POSCO全球EVI论坛的主题为如何使用户快速使用新的钢铁产品,旨在将钢铁产品的开发与用户汽车产品的开发有机融合在一起,推进EVI的深度合作,并且提出“用户的成功就是我们的明天”的理念。为此,钢铁企业将新产品的性能进行全面的检测并编制相关手册,如POSCO公司编写的《Automotive Steel Data Book 2011》,同时还将钢铁材料的各类数据嵌入到知名的设计与分析软件中,这其中涵盖新材料的力学性能、成形性能、焊接工艺和性能、涂装性能(光鲜性和耐腐蚀性能)以及零件的抗疲劳性能等,并将其全面系统展示给用户,根据用户所开发的零件功能要求,为用户推荐合适的材料,共同解决用户应用新材料时所遇到的任何问题

表2 不同强度热成形钢点焊后接头的拉伸剪切和十字拉伸试验结果以及相关的延性比<sup>[18]</sup>

Table 2 Tensile shear and cross tensile test results and related ductility ratios of joints of hot formed steels with different strengths after spot welding<sup>[18]</sup>

牌号	板材状态	板材厚度/mm	电流/A	拉伸剪切		十字拉伸		延性比
				最大拉伸剪切力/kN	断裂模式	最大十字拉伸力/kN	断裂模式	
HPF1470	镀AlSi涂层	1.7	8.5	35.5		10.1		0.28
	冷轧	1.5	8.5	28.6	部分交界面	7.2	部分交界面	0.25
HPF1800	冷轧	1.5	8.5	27.3	分离	5.7	分离	0.21
HPF2000	冷轧	1.5	8.0	22.1		4.4		0.20



和细节。因此,POSCO公司的EVI就是与用户一起将相关材料制造成合适的零件,使其满足零件功能的要求,同时提供相应工艺技术和方法的合作开发经营活动。

2014年POSCO全球EVI论坛的主题为从钢材的供应商到解决问题的合作伙伴。钢材供应商及时为用户提供所需钢材以及应用技术,包括成形、涂装、焊接、零件的评价等相关技术,同时为用户提供商业支持,包括用户用材的及时交付、物流成本的控制、下游商业关系的协调以及金融支持等。钢材供应商通过营销和技术的有机融合,为用户提供解决问题的软硬件营销策略,实现双方的互利共赢。

2016年POSCO全球EVI论坛的主题为金融合作和建立合资企业<sup>[19]</sup>。POSCO公司为合资企业的建设提供产品开发资源、全球网络、限额投资、零件开发、零件生产工艺等工业信息,极大拉近了材料生产企业和材料研发生产单位与用户之间的关系。在该论坛上,在对道琼斯可持续发展世界指数(the Dow Jones sustainability world index, DJSI)、健康安全与社会贡献等方面与国际上知名钢铁公司进行评比后,POSCO公司位列榜首,其余参与公司依次为瑞钢钢板公司、蒂森克虏伯钢公司、现代钢铁公司、Arcelor Mittal公司。在世界钢动力对世界钢铁公司进行的世界级钢铁制造商排名中,POSCO公司仍稳居第一,其余参与排名的钢铁公司排序为新日铁住金株式会社、纽柯钢铁公司、美国钢铁动力公司、俄罗斯NLMK钢公司、俄罗斯谢维尔钢铁、美国VOEST-ALPINE国际贸易公司、巴西盖尔道钢公司、日本钢铁控股公司、日本制钢所。在技术创新、熟练生产工人、产品附加值3项上,POSCO公司仍拔得头筹,其余参与公司的排序为新日铁住金株式会社、纽柯钢铁公司、钢铁动力公司、俄罗斯NLMK钢公司。这些排名展示了POSCO公司在国际上的竞争能力、产品的可信度和技术上的先进性。在该论坛上POSCO公司对应用于汽车工业的GIGA钢性能进行了系统展示,并针对其成形、焊接、疲劳等性能方面提供了解决方案。对于新开发的高锰钢,展示了其用于制作液化天然气容器储罐的相关技术,包括设计技术、分析技术、优化设计的计算机模拟技术等。在建筑领域,展示了高强度的钢丝和棒材以及基于这些材料所制造零件的功能分析,同时展示了POSCO公司的新技术创新和新材料应用的EVI解决方案。在商业运作方面,POSCO公司提出

共同建立合资公司的倡议,旨在大幅度降低运输成本,联手开发市场,提供资金支持,实现产品的快速配送。从硬件钢铁材料供应到软件的技术问题解决和方案的制定,再到商务支持(包括及时交货、下游商务协调、资金协作、运输成本控制、建立合资公司、参与市场开拓等方面),这些合作模式和成果展示使得POSCO公司成为下游用户未来最可靠的合作伙伴,此外通过这些论坛的成功举办,也在国内外的用户中树立了良好形象。

2018年POSCO全球EVI论坛恰逢POSCO建厂50周年<sup>[20]</sup>,世界钢铁协会总干事Edwin Basson在该次会议上作了题为“钢——未来最好的材料”的主旨报告<sup>[21]</sup>,指出钢铁材料在资源利用、管理环境、低碳低能耗生产、循环再生等方面具有明显的优势,同时钢铁材料还可以在复杂的结构中作为一种框架,与所有的材料协同工作,形成复杂结构的有力支撑。不仅如此,钢铁材料的生产和应用还具有节能减排的特点,每生产1 t铝锭的碳排放量高达16.1 t,而每生产1 t钢锭的碳排放量仅为1.866 t。高强度钢和超高强度钢的应用有助于实现交通工具的轻量化,进而减少油耗,降低碳排放量。在此次论坛上,POSCO公司正式提出了GIGA钢的概念,并将其作为汽车轻量化和安全性的解决方案和用材,同时深入论述了新能源汽车轻量化用材的发展趋势。在应用超高强钢进行新能源汽车轻量化时,需要解决氢脆、液态金属脆性、冷成形时零件回弹、模具磨损等诸多技术问题。而解决上述问题,则需要主机厂、材料生产和供应企业、零件厂的合作,如此才能发挥出这一经济、环境友好的新型材料的优势。POSCO公司已成功应用GIGA钢制成了电池包壳,并在电池包中采用了高能量密度的锂、镍、钴等可以快速充电的长寿命电池材料。POSCO公司还特别强调了EVI模式的拓展应用,如将高性能的热轧板、冷轧板应用在智能化的高层建筑、桥梁、模块化装配式建筑等领域。在汽车制造领域,GIGA系列钢材应用于白车身,热成形门环,表面质量、油漆光鲜性、耐腐蚀性能要求更高的汽车外板,保险杠,轻量化的空心车身安全稳定杆,减重20%以上的悬架系统,可作为高频下低芯铁损、高强度的电机材料,轻量化的风电能源材料,氢燃料电池包材料,可加工成高强度、高延迟断裂抗力、零件性价比高、热处理工艺简单的线棒材等。



## 5.2 蒂森克虏伯公司的EVI活动

蒂森克虏伯公司为汽车行业提供技术解决方案和EVI技术服务,前后推出5款车身和平台系统,分别为1998年设计开发的ULSAB车身、2003年推出的NSB<sup>®</sup>车身、2009年的InCar<sup>®</sup>平台、2014年的InCar\*plus平台和2019年的selectrify<sup>®</sup>平台。

Incar项目<sup>[22]</sup>是蒂森克虏伯公司为汽车行业所设计的创新性研发项目。该项目以客户为导向,与汽车产业的合作伙伴共同确定研究方向,重点关注汽车的质量、成本、功能以及二氧化碳排放的可持续性改进,研发成果中包括30多项关于车身、底盘和动力系统的创新性解决方案。该项目选取的标杆车是一个要求严格的高性能车型,其整体指标代表了2009年汽车技术发展水平,部分性能和技术更处于领先地位。该项目旨在超越标杆车的相关性能和结构,而相关的创新方案均以成熟度和可行性为依据,以便快速地适应客户的个性化需求。借助第三方的数据库,项目中的各项指标,尤其是二氧化碳排放指标,可媲美当前一流技术。项目的实施集成了蒂森克虏伯公司在材料开发、工程设计、零件制造、样件试制和工装设备制造等领域的相关团队的技术优势,其合作模式也彰显了蒂森克虏伯公司在百余年的发展历史中一直与汽车领域用户所建立的合作伙伴关系。项目中所提出包括车身、底盘、动力总成等方面超过30余项的创新解决方案,均经过充分论证和时间验证,成熟度很高。对于新开发零件的

结构以及碰撞、耐久性等性能,不仅进行了虚拟模拟分析,还开展了实件测试,甚至防腐性能和涂装性能也进行了验证,因而必然会给用户带来成功的体验。汽车厂商在实现汽车减重、零件功能提升和成本下降等方面都能找到理想的方案。同时,项目通过构建二氧化碳排放评估体系,全面且系统地展示了汽车开发中的环境保护措施以及所具备的透明度。Incar EVI模式的另一突出特点在于,对同一个零件的选材、生产流程和工艺进行了多种方案的对比。以汽车的B柱为例,其在成本、质量、二氧化碳排放方面与标杆参考件的多种方案的比较结果见表3,标杆方案为DP-W<sup>®</sup>600不等厚激光拼焊冷冲压成形板。

在Incar项目的基础上,2016年蒂森克虏伯公司继续开展了Incar plus项目<sup>[22]</sup>,该项目融合了公司内部多学科专业知识,打造了多种零件,超过40个轻量化的独立解决方案,可以在不影响车辆性能的前提下实现有效减重,白车身的轻量化指数降至2.7。

## 5.3 TAGAL的EVI服务模式

TAGAL的EVI服务模式可追溯至2008年蒂森克虏伯钢铁中国应用技术组的成立。2010年,该团队整体并入TAGAL旗下。2012年,TAGAL将传统的早期技术介入(early technology involvement, ETI)和先期工艺介入(early process involvement, EPI)相结合,提出了“ETI=EVI+EPI”的特色技术服务模式。2024年,TAGAL再次将EVI模式升级,推

表3 Incar项目中不同汽车B柱解决方案的特点比较

Table 3 Comparison of characteristics of different auto B-pillar solutions in Incar project

材料	成形工艺	与标杆件相比的质 量降低率/%	与标杆件相比的 成本降低率/%	与标杆件相比的 CO <sub>2</sub> 排放降低量/ (g·km <sup>-1</sup> )	工艺特色
TPN <sup>®</sup> -W900 1.6 mm	冷冲压	19	12	0.30	冷冲压使钢具有高延伸 率和良好防腐性能
DP-K <sup>®</sup> 60/98 1.8 mm+RA- k <sup>®</sup> 40/70 1.5 mm	激光拼焊冷冲压	13	7	0.22	激光拼焊冷冲压使钢满 足冷冲压和碰撞性能
MBW <sup>®</sup> 1500 1.8 mm+ MHZ340 1.8 mm	激光拼焊等厚热成形	15	5	0.24	不等厚的激光拼焊可保 证零件精度和大批量 生产
MBW <sup>®</sup> 1500 1.2 mm+ MHZ 340 1.8 mm	不等厚激光拼焊热成形	18	5	0.30	轻量化效果好,B柱尺寸 精度高,下部延伸率高
MBW <sup>®</sup> 1500 1.7 mm	不等温热成形	17	12	0.26	不等温热成形使B柱尺 寸精度高,下部延伸率高
MBW <sup>®</sup> 1900 1.5 mm	不等温热成形	22	9	0.34	最轻的轻量化方案,吸能 较MBW <sup>®</sup> 1500高20%, 应用了新材料新工艺

出了EVI-Pro,利用腾讯云基地(Tencent cloud base, TCB)数字化平台和定制化可变车身结构数据,在客户车身开发早期提供性能优化、降本和轻量化等设计服务,有效提高了EVI工程设计精度、开发效率和服务灵活性。通过持续引入最新钢种、表面处理技术、冷/热成形工艺技术,为新能源车身及零部件提供EVI工程服务,从而推进未来车身安全、轻量化、经济性和绿色发展。

2024年的TCB数字化平台,集成了TAGAL最新产品、技术和服务的新能源汽车用钢一体化解决方案,可变全钢制车身系统以及多种成套工程技术解决方案和服务创新。TCB纯电车身系统是TAGAL在引进蒂森克虏伯公司selectrify平台基础上,紧密结合中国新能源汽车市场需求,并充分借鉴在国内多年为40余款整车车身提供EVI服务的经验,对电机、电池和底盘架构进行升级迭代,进而采用专业车身工程技术及流程打造的数字化纯电汽车平台。该数字化平台在设计上兼顾性能、质量、成本和环保指标,采用全钢制车身,通过新材料和新工艺技术的组合应用设计,实现了卓越的静态刚度(扭转刚度高达 $37\,266\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ )和动态碰撞安全性能(C-NCAP碰撞五星级);相比同级别标杆车身,该平台实现减重10%、降本15%的效果,同时还开展了零部件及整车车身LCA的碳排放评价,其中材料生产阶段碳排放降低13.5%,零件制造阶段降低0.6%,按行驶 $15\times 10^4\text{ km}$ 计,使用阶段降低85.5%,回收阶段降低0.4%。2024年3月20日,TAGAL在重庆召开了数字化车身及其用钢解决方案的成果发布会。此次发布会展示的成果摒弃了过去通过制造概念车进行EVI服务的模式,而是基于新格局、新需求、新驱动的理念,开发了数字化的白车身,并提出多种用钢解决方案,这使得EVI的服务活动内容更加丰富,用户可选择的方案更多,应用更方便,开发产品的周期更短,从而开创了一种崭新的模式;特别是发布会上展示的电动车白车身和电池包一体化的轻量化解决方案,不仅使轻量化的效果更显著,而且为客户提供更多的可选择方案,具有更好的性价比,同时进一步丰富了EVI服务的内容,提升了效率。这一系列新的思维和特点以及良好的效果使得这一新型的EVI模式有广泛的发展前景。

TAGAL的EVI服务可以根据客户的不同需求,在产品开发的阶段选择不同的技术介入,积极构建定制化的技术和服务,切实解决实际的工程问

题,其优势在于充分发挥从材料到车身的全流程技术和工艺的融合和集成能力,涵盖汽车开发的各个阶段,包括车身概念开发、车身工程设计和开发、工装制造和调试以及量产阶段。TAGAL构建了相应的技术体系,并配备针对性的服务,从而提供满足主机厂在不同阶段的EVI技术服务。

TAGAL进行EVI服务的典型案例如下。(1)高强度轻量化外板的应用。高强度轻量化外板的应用助力构件轻量化。以标杆车的发罩外板为例,其原来采用材料CR180BH、厚度0.65 mm的方案,经过TAGAL优化后其轻量化方案选用材料CR290Y490T-DP、厚度0.50 mm,实现了减重20%、降本13.8%的效果。标杆车的后门总成原用材料CR180BH、厚度0.65 mm的方案,而轻量化方案为材料CR290Y490T-DP、厚度0.50 mm,达到降本11.7%、减重18.3%的效果。(2)AS Eco热成形钢板的开发和推广应用。TAGAL的AS Eco热成形钢应用了东北大学研发的薄Al-Si镀层的专利,打破了国外专利的长期垄断局面。这种热成形钢制成的构件具有优异的韧性,并且经过多年的试验测试和试制,总结出了可供稳定生产的热成形工艺加热窗口。通过EVI模式已成功将该钢应用于汽车门环、B柱和门防撞梁,并取得了非常可观的降本效果。(3)网格型面模具技术的应用。该技术不仅可以有效防止凸模上的油污积聚,而且还可以有效减少冲压件的凹凸效果,该技术已应用在顶盖、前盖、翼子板、侧围板等网格拉延模,以及前后门外板的修边冲孔模具中。网格模具的引入使得零件返修率由10%~15%降低到2%以下,从而极大帮助了主机厂提高了生产效率,降低了生产成本。(4)TAGAL greenS低碳排放钢的应用。该钢的应用是实现汽车行业绿色发展的主要举措之一。在原材料制备阶段,采用“高炉+转炉+大废钢比”和“电弧炉+全废钢”两大工艺路径,分别实现了吨钢碳减排30%和60%以上的成效。同时,TAGAL将EVI服务与绿色低碳理念相结合,加快了汽车制造企业向绿色转型升级的步伐。

#### 5.4 国际钢协的EVI活动

国际钢协在未来钢汽车的项目中,对EVI活动进行了系统的展示,涵盖了新车制造的工艺过程以及将EVI模式融入其中的方式,即从开发计划的制定、概念设计的构思、详细设计的推进、原型试制的实施,直到小批量生产的开展以及零件功能的验



证<sup>[23]</sup>。相关内容请参阅第4节新车开发中的EVI活动。

### 5.5 Arcelor Mittal公司的EVI活动

Arcelor Mittal在EVI活动时将标杆车的收集、分析、研究和选定(Benchmark)以及展示作为重要的展示内容,该公司收集了2010年的10多种款式C级标杆车,同时展示出这些车辆的质量、价格和功能,并与同档次车的相关指标进行比较,从而提出EVI方案的参考指标。Arcelor Mittal公司将所拥有的最新生产的标杆车的Benchmark信息,与欧洲同期生产的样车基准及北美的样车基准进行对照,再参照2010年北美车型的碰撞要求和材料构成,提出用于EVI展示的C级概念车的制作方案,也就是该公司在2010年所开展的S-in motion项目。Arcelor Mittal运用了一系列的创新设计和思维对S-in motion概念车的制作实施过程进行综合优化,包括3个在全球范围内处于领先水平的前端模块设计方案、4个适用于欧洲和2个适用于北美的后部模块的解决方案、3个在欧洲和2个在北美处于领先水平的车身尾部的解决方案以及3个在全球范围处于领先水平的车门模块解决方案,使所开发的概念车减重效果最优,五星级碰撞效果最好,NVH效果达到当时Benchmark标杆车的前沿水平,从而形成S-in motion的EVI方法

论和解决方案。具体而言,针对不同零件,采用包括先进高强度钢、热冲压成形钢、激光拼焊板、管材、线棒材等在内的60种钢铁材料,使得C级概念车的白车身减少73 kg或减重19%,车辆使用时的二氧化碳当量排放量减少13.5%,同时并未增加成本。

在Arcelor Mittal的EVI方案中,凭借该公司拥有的铝硅涂层热成形钢板的专利垄断优势,展示了热冲压成形门环技术及其解决方案,并将应用范围扩大到其他零件,从而显著提高了轻量化效果、安全性和刚性。

### 5.6 中国宝钢的EVI活动

宝钢是在我国较早开展EVI活动的企业之一,在其EVI活动时通过制造白车身的方式展示出宝钢新钢种研发的最新成果和先进的工艺技术。宝钢开展的EVI活动流程呈现出全程系统化和个性化的特点,更能为用户开发新产品提供全方位的支持内容,宝钢EVI活动的流程、支持内容和项目如图1所示<sup>[3]</sup>,所制概念车的白车身的各项指标见表4,超轻型白车身概念车(BCB)与其他相关车型概念车指标的比较见表5<sup>[3]</sup>。BCB概念车曾在全国主要汽车制造企业进行巡回展示,并取得了良好的效果。宝钢曾于2011年召开了国内首届EVI会议,此后又召开多次此类会议,持续不断地为用户提供全流程系统

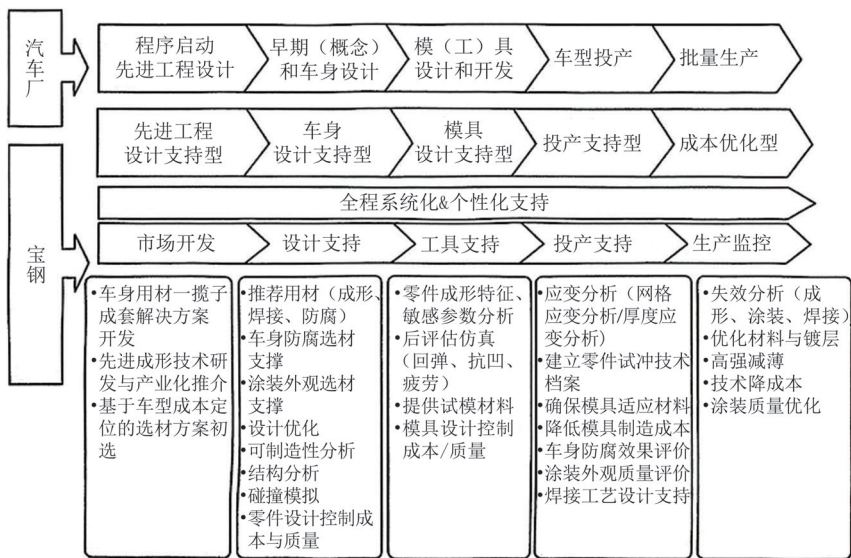


图1 宝钢EVI活动的流程、支持内容和项目示意<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Process, supporting content, and project diagram of Baosteel EVI display<sup>[3]</sup>

表4 宝钢EVI活动所展示的概念车白车身的主要指标<sup>[3]</sup>

Table 4 Main indicators of white body of concept car produced by Baosteel EVI display<sup>[3]</sup>

项目	质量/kg	高强度钢占比/%	零件数/个	轻量化系数	被动安全
目标值	300.0	70	350	3.00	五星
设计值	297.3	77	309	2.59	五星

表5 宝钢概念车BCB的质量、轻量化系数和高强度钢占比与其他车型的比较<sup>[3]</sup>

Table 5 Comparison of mass, lightweight coefficient and high strength steel proportion of Baosteel concept car BCB with other models<sup>[3]</sup>

车型	质量/kg	轻量化系数	高强度钢比例/%
BCB	297.3	2.83	76.7
BMW3*	301.3	2.66	70.0
Mondeo*	317.0	3.62	66.6
S60*	321.5	3.13	58.4
Saab 95*	395.4	4.33	62.7
E class	408.0	2.95	76.8

化的EVI模式支持。在材料技术方面,宝钢提出了选材优化技术。在工艺技术方面,结合自身钢材生产的特点,融入了各种先进的冶炼、轧制等制造技术,同时现场开展了零件制造工序优化以及成形和模具装备配置优化。在产品的设计方面,应用先进的设计软件,根据零件的工况对其进行模拟分析、优化设计,借助先进的分析软件对零件成形性和轻量化进行模拟与敏感性分析,构建了一揽子先进的高功能零件的解决方案和相关的知识储备。2015年制造的BCB概念车应用了宝钢的各种先进材料和成形技术,在实现轻量化的同时提升了白车身的相关功能,在国内取得良好的示范效果。2023年4月在EVI和氢脆国际会议召开前,宝钢和武钢联合重组的宝武在“产业合作与创新”一文中提出了宝武汽车板发展的理念,该理念强调了不仅满足用户要求,而且还不断超越用户的满意度。宝钢EVI模式已成为钢铁行业开发和应用汽车新材料的典范。在与汽车厂EVI的合作中,宝钢等材料生产企业也更加深刻理解了EVI的内涵<sup>[4]</sup>。1999年宝钢成立用户技术中心,是国内钢铁行业首个用户技术中心。多年来宝钢在成形、连接、涂装三大应用技术上取得了一系列的创新研发成果。继2015年宝钢推出了首个BCB概念车之后,2021年又推出了超轻型高安全纯电动车的白车身BCB EV,在成本可控的条件下减重16%,有力推动新能源汽车轻量化发展。宝钢还坚持EVI创造价值的理念,积极走国际化开放道路,参与国际ULSAB、FSV项目和先进高强度钢的使用指南编制,以及白车身LCA等级评估等活动,始终将“坚持用户的标准、用户的计划、用户的利益”作为宝钢的追求理念。2021年,宝钢又紧跟中央的“双碳”战略部署,及时制定宝钢产

品达到“双碳”要求的时间表,计划于2023年实现碳达峰,2025年实现碳中和,与用户共同开展汽车产品全生命周期的碳足迹评价。2023年3月27日,作为国内首个量产供货的低碳排放汽车板产品(BeyondECO<sup>®</sup>-30%) 在宝山基地1550电镀锌机组正式下线,该产品作为宝钢新能源车整体解决方案品牌SMARTeX的重要成果,以宝钢汽车板QCDDDS为品牌基因,赋能汽车用户,是低碳绿色钢生产制造的重大突破,标志着宝钢汽车板在低碳冶金研发领域取得显著成效,实现了低碳化设计、低碳化制造、低碳化产品生产及低碳化应用,同时通过EVI与“双碳”目标相结合,助力钢铁和汽车行业早日实现“双碳”战略目标。

目前,EVI模式已在我国大型钢铁企业中得到广泛应用,成为技术服务和产品推广的重要手段。这一模式不仅获得钢铁材料生产单位的有关领导与相关人员高度认可,而且也在新产品开发和技术服务中被付诸实践和应用。

### 5.7 中信金属的EVI活动

在一些应用EVI模式进行技术服务和新产品开发的企业中,中信金属的EVI工作具有一定的特色。首先,针对高强度钢和超高强度钢在汽车中应用时存在强韧性不足、氢致延迟断裂抗力偏低、成形性差、焊后韧度和耐久性不足等问题,结合该公司在微合金化元素铌对汽车用钢性能和加工工艺影响方面的初步研究成果,联合用户以EVI模式为指引开展大量研究。在此过程中,探讨了铌对汽车用钢性能影响和改善的机理,进而指导用户用好铌微合金化高强度和先进高强度钢,并将研究成果编辑成书或论文集,与用户共享。中信金属依据EVI服务相关的内容和发展过程,形成了EVI 1.0至EVI 5.0的发展历程,具体见表6<sup>[24]</sup>。

中信金属与有关科研单位联合开发了车身材料的智能选材系统,即正向选材系统<sup>[24-26]</sup>,其网页版和软件版1.0版已于2020年的EVI与氢脆大会上对外发布。该软件基于高强度材料失效断裂卡片以及汽车车身安全的环状结构,坚持将合适的材料匹配至合适部位的理念,构建了首个考虑轻量化、成本、安全、制造工艺4个维度及9个子维度的选材体系,进一步完善了常用汽车板的材料数据测试成果,为实现材料的合理选材提供了一款更加便捷有效的工具。

中信金属的EVI模式基于服务对象、研发内容、



表6 中信金属的EVI发展历程<sup>[24]</sup>

Table 6 EVI development history of CITIC metal<sup>[24]</sup>

名称	主题	时间	主要合作伙伴
EVI 1.0	铌微合金化汽车钢的开发	2001年—2011年	钢铁企业、冶金研究机构
EVI 2.0	铌微合金化汽车零部件的开发	2012年至今	零部件厂、钢厂、冶金研究、汽车研究机构
EVI 3.0	典型零件及总成铌钢轻量化解决方案	2015年至今	整车企业、汽车研究机构
EVI 4.0	汽车车身正向选材系统的构建	2016年至今	整车企业、汽车研究机构、原材料企业
EVI 5.0	铌微合金化的方案在整车上的集成应用	2017年至今	整车企业、汽车研究机构、材料研究机构

技术领域、基础研究的变化,将其应用研究分为3个阶段:第一阶段为汽车钢铁材料的开发阶段,研发出的钢铁材料包括微合金化高强度低合金钢、先进高强度钢、特殊烘烤硬化钢,以及各类专业用钢,如大梁钢、车轮钢、齿轮钢、弹簧钢、耐磨钢等;第二阶段为零件的开发阶段,所开发的零件为汽车产品中有代表性的零件,如B柱、保险杠横梁、车轮、车架、高应力轻量化少片变截面板簧、新型不锈钢的排气系统、新能源汽车用的高转速齿轮钢等;第三阶段为总成及整车的开发阶段,该阶段主要研发各类特殊用途且追求轻量化的商用车,以及和主机厂、材料生产厂联合开发的典型概念车,在此过程中构建了新型高功能零件和特殊品种整车的材料技术解决方案以及整车的集成技术解决方案,并通过中信金属与相关的合作研发团队的对外交流,将这些成果进行拓展。中信金属在整个过程中注重行业共性难题的研究及解决,如氢致延迟断裂、冲压过程剪切边缘开裂、材料关键性能-断裂卡片-碰撞安全的关系、汽车材料的低碳再生等问题,从而推动解决应用问题背后的科学问题,同时促进行业的技术进步和企业自身的发展。中信金属还通过对铌微合金化钢研究与开发项目的资金支持,推动行业共性技术的发展。同时,借助对国外新车的Benchmark和整车性能的技术研讨,及时了解国外相关技术的进展,推动行业技术进步。未来中信金属将进一步强化服务意识,深入认识EVI模式的内涵,拓展EVI模式应用的广度,逐步形成中信金属EVI模式独有的特色。

### 5.8 通用汽车中国科学研究院的EVI活动

通用汽车中国科学研究院王建锋等根据多年的

实践经验,借鉴生物学中的生态系统提出了多尺度生态系统框架下的技术创新理念,旨在加速先进高强度钢在汽车轻量化上的应用;同时阐述了在汽车车身用钢研发、量产、应用过程中,汽车产业链上各环节与材料生产单位以及各个企业之间紧密的合作关系和高度的相互依赖关系。该研究院强调以市场需求引导技术创新,并以市场反馈检验技术价值,将汽车零件的轻量化追求、安全性能提升、成本合理控制以及车身流线锐度的外观设计等多方面有机融合,使材料研发单位和材料应用单位实现利益共享、风险共担,从而突破传统意义上的材料、零件、供应商、主机厂之间的简单供求模式,构建一种新型的EVI模式;同时,明确提出轻量化与超高强度钢应用密切相关,为提升零件的安全性,必须提升超高强度钢的强韧性匹配和氢致延迟断裂抗力。在汽车行业内的相关企业中,从钢厂到主机厂都是汽车产业生态系统中的重要成员和利益共同体。对于新钢种的开发和量产应用,良好的材料性能是基础,更关键的是要满足市场需求,有效解决用户的关注问题和技术商务风险点。这就要求在这一生态系统中,各成员之间相互沟通,紧密合作,通过新型EVI模式齐心协力实现新型高强度材料和先进成形工艺在汽车轻量化领域中的应用。此外,通用汽车中国科学研究院还特别注重知识产权转化和投资事宜。得益于专业投资人员的介入,对内部和外部知识产权实现有效、高效的评估。根据通用汽车的产品需求,不仅可以快速实现内部知识产权的转化,还能够引进外部知识产权的投资,进而更加深入地整合和利用上下游高品质技术资源,这也充分体现了其EVI模式的独特性。

### 5.9 鞍钢的EVI活动

鞍山钢铁公司(鞍钢)作为我国的一家大型钢铁企业,在开展EVI活动时,不仅遵循EVI活动的基本规则、内容和要求,更在满足用户需求方面展现出更深刻的理解。公司经常安排负责新产品开发的领导亲自带队走访用户和汽车企业,了解这些企业对新产品开发的需求,同时向用户介绍鞍钢新开发产品的特点,使用户了解鞍钢新产品研发和生产的相关情况,以此制定出基于用户需求的鞍钢新产品的研发计划。鞍钢在国内率先生产出大型构件热成形产品所需的热轧板,尽管目前用户数量不多,但这一举措体现了鞍钢对用户技术进步和特殊用材需求的关注和支持。鞍钢与蒂森克虏伯和金固携手组建金蒂安公司,联合开发车轮用热成形钢,并联合建立钢材

剪裁配送中心和车轮用热轧板表面处理的金属表面无酸清洁技术(echo pickled surface, EPS)生产线。这一生产线的建立解决了在不需要酸洗条件下热轧板表面质量提升的难题,使钢厂与用户之间的合作关系实现了质的飞跃,更进一步将材料研发、生产与材料应用单位有机密切地结合在一起。许多材料应用单位纷纷反馈,鞍钢的EVI服务让用户感受到了真诚、亲切、周到和温暖的体验,这可能也是鞍钢在EVI服务中的一大创新性亮点。

### 5.10 首钢的EVI活动

首钢因搬迁和厂区新建,其汽车板的开发和生产进程较宝钢和鞍钢稍晚,但首钢汽车板的开发以及EVI活动的开展同样取得了较好的成果。为了打开汽车板的应用市场,首钢采取一系列更积极的EVI活动。首先,将所试制的汽车板进行全面的性能测试;随后主动与用户联系,携手用户共同针对新产品进行应用试验。首钢在价格上给予用户更多的优惠,同时采取措施控制产品的质量并提供更多的技术服务,使汽车板在生产和应用方面取得了较快的进步。首钢加大研发队伍的建设力度,强化以科技为先导的理念,将大量人力、物力、财力投入到汽车板的研发工作和性能提升的细节方面,从而使首钢汽车板的用量逐步扩大,产量也迅速增长。首钢结合车轮钢的开发创新了一种新的EVI模式;购置了国内首个商用车车轮的双轴疲劳试验机并安置到兴民智通车轮企业中;与兴民公司共同组建汽车车轮联合研发机构,利用所购置的六分力测试系统开展车轮材料和结构的EVI活动。在实际操作中,六分力测试系统提供了精确的路谱采集功能,这为汽车及其零件在实验室内的测试提供全面的路谱信息。利用六分力测试系统所采集的车辆路面载荷可对车体模型中各个部件可承受的载荷进行计算,以预测相关部件的疲劳寿命。目前,首钢在车轮用钢的开发和销售方面取得了长足的进步,尤其是在高强度车轮用钢的销售方面,已处于国内领先地位,车轮用钢的产销占有率高达70%,这促进了中国轻量化商用车车轮的开发应用进程,更为其产品的出口创汇作出了重要贡献。而这种独特的EVI模式对首钢车轮用钢业务的持续发展发挥了促进和引导作用。

### 5.11 马钢的EVI活动

马钢始终高度重视产品开发中的EVI模式,并较早地进行了简单的概念车展示。为了积极响应

和满足汽车工业,特别是电动车轻量化发展需求,同时充分展示先进钢铁材料在汽车轻量化中的应用前景,以及阐述如何使用先进高强度钢来解决新能源电动车轻量化所面临的难题和方法,马钢于2018年联合中国汽车工程研究院、中信金属等启动了马钢电动概念车(Masteel concept electric vehicle, MCEV)开发项目。在项目实施过程中选取一款全球先进的A级电动车为标杆,并结合行业电动车的先进技术水平,开发一款基于马钢汽车用钢体系的集轻量化、高性能、高安全与经济性为一体的A级电动概念车。这款MCEV白车身质量为265 kg,与标杆车相比降低了10.9%,轻量化系数为2.62;整车在正碰、柱碰、移动障碍变形障碍测试(moving barrier deformable barrier, MPDB)的碰撞性能达到C-NCAP五星水平;在25%重叠率的偏置碰以及顶压性能测试中更是达到中保研汽车碰撞安全指数(C-IASI)优秀水平。此外,白车身(带玻璃)的扭转刚度不低于 $23\,000\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ ,弯曲刚度不小于 $15\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,白车身(带玻璃)的扭转模态不小于36 Hz,弯曲模态不小于52 Hz,各项指标均彰显出白车身较高的安全性。MCEV采用全钢车身设计理念,在材料运用上遵循“将合适的材料应用于合适的部位”原则,并进一步提升高强钢的应用比例,其白车身用高强度低合金钢占比为16.37%,普通高强度钢占比为48.08%,先进高强度钢占比为22.33%,热冲压成形钢占比为13.22%(其中含铌高强钢占比61%)。在前横梁、顶盖、中横梁、外门环、门槛梁等关键安全部件上,马钢采用了自主研发的1 500 MPa级、1 800 MPa薄镀层、高冷弯、抗延迟开裂热成形钢,轻量化效果明显<sup>[26]</sup>。马钢还结合汽车行业热成形产业的发展需求积极开发热冲压成形钢以及薄镀层的热成形钢。通过采用EVI模式,与汽车行业的科研单位和产业单位合作,共同致力于提升热冲压成形钢的强韧性和氢致延迟断裂抗力;同时巧妙地运用薄的铝硅镀层技术成功规避了Arcelor Mittal公司的专利限制,从而促进了热冲压成形产业和用钢的发展。

### 5.12 中国汽车工程研究院的EVI活动

中国汽车工程研究院在早期便与韩国POSCO公司开展技术合作,在中国汽车行业中积极推广应用EVI模式。一方面,积极配合材料生产企业开展高强度钢、先进高强度钢的各种性能以及所制零件功能的评价检测;另一方面,专注于高强度钢和先进



高强度钢断裂卡片的制作,借助EVI模式积极推动高强度钢和其他轻量化材料更广泛的应用。中国汽车工程研究院还积极倡导在材料研发中注重加强应用技术的研究,全力开展新材料的合金设计工作,深度探讨材料的强化机理以及共性应用技术研究。该院将材料开发、性能检测评价和推广应用融为一体,为中国汽车轻量化合理选材提供了指导,积极推动汽车用材强度的提升和轻量化技术的发展。近期,中国汽车工程研究院在商用车轻量化、大件热冲压成形的推广应用开展EVI模式的探索与实践,并从大件热冲压成形装备、模具、特殊用材等方面开展相关的EVI活动,从而为高强度钢和超高强度钢在这一新领域的推广应用,开拓了新的思维,提出了新的路径,为推动EVI活动在商用车领域的发展做出了新的贡献。

近年来,中国在乘用车应用高强度钢和超高强度钢实现汽车轻量化发展已经取得了很大的进展。高强度钢和先进高强度钢在中国钢铁行业已经形成完善的产品系列,并在汽车行业获得了广泛的应用。然而,商用车轻量化以及结构钢(如弹簧钢、齿轮钢、调质钢和非调质钢)在应用EVI模式进行推广应用和产品质量提升方面尚处于起步阶段,这也正是今后需要认真研究并全力开展的工作领域。

## 6 “双碳”战略背景下的EVI活动

2021年3月15日,中央提出:我国力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和,这是事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体的重大战略决策。为此,工业领域要推进绿色制造,建筑领域要提升节能标准,交通领域要加快发展绿色低碳运输方式,旨在为早日完成“双碳”战略目标提供绿色低碳且科学有效的供给体系。汽车轻量化是节能减排最直接、最有效的手段之一,超高强度钢的应用则是一种既可轻量化又可提升汽车安全性,与“双碳”战略密切相关的技术。超高强度钢在交通领域的应用将从以下三个方面为“双碳”战略提供支持:一是轻量化可以减少汽车制造用钢量,据世界钢铁协会2021年的数据统计,每少用1 t的钢材将减少2.332 t的碳排放量;二是将超高强度钢用于交通运输构件可以有效地实现轻量化目标,进而减少燃油消耗并降低二氧化碳排放量,对于乘用车,其质量每减少10%,燃油消耗可减少6%~8%,同时相应地减少碳排放,而对于商用车,每减重

1 t,燃油可节省6%~8%,同时也可以提高运输效率;三是轻量化可降低运动构件的使用负荷,从而延长构件的使用寿命,间接实现节能减排和成本节约。然而钢强度的提升造成其成形困难,而热冲压成形技术的出现既可以获得超高强度零件,又合理解决了成形困难的相关问题,特别是由中新超高强度材料研究院提出的商用车轻量化和热冲压成形的应用方案,成功将商用车轻量化提升到国际领先水平。目前,该院与新富集团携手合作,解决了大型构件的加热装备和成形所需要的大型热成形压机问题,掌握了独具特色的超大型模具的用材选择、结构设计和制造技术、大型工件的传输技术、大型构件的功能检测评价技术、大型构件的热冲压成形用钢和抗氧化技术,从而开启了大型构件热成形轻量化的新时代。例如:22.5英寸×9英寸(1英寸=25.4 mm)的热冲压成形商用车车轮减重效果接近于锻造铝合金车轮;矿用自卸车和城市渣土车用的翻斗车上装部件的减重效果达50%;仓栅式的长途运输车上装部分减重效果为20~30%。为了满足大型和超大型构件热成形的工艺要求,热冲压成形用钢需要具有高的淬透性、高的强韧性匹配、高的抗氧化性、高的耐腐蚀性、高的氢致延迟断裂抗力、高的防子弹侵彻能力以及高的性价比等,以满足商用车、船舶、高速公路护栏、集装箱、装配式建筑、军工等领域中对于热冲压成形材料和构件的特殊要求。在这些领域推广应用热冲压成形技术和超高强度零件,可以有效实现节能减排,推动国家“双碳”战略的预期实现。鉴于这类材料的用量大,在合金化设计中将采用多元少量的微合金化理念,以确保热冲压成形构件具有合理的性价比。对于大型构件的EVI和轻量化的实施工作,需要将合适的材料用到合适的地方,而且目前该工作尚处于起步阶段,需要根据零件的要求和使用功能进行轻量化的优化设计,并选用合适且先进的工艺流程。完成这一复杂的EVI工作,需要整合多专业、多种材料、多种技术的优势,通过产、学、研、用的联合体充分发挥各方的优势,才能取得如期效果。

汽车用材强度的提升,特别是高强度钢和超高强度钢的应用,除了会出现韧性不足的问题外,还会伴随氢致延迟断裂抗力的下降,也就是所谓的氢脆问题<sup>[27-28]</sup>。因此,在近年来的EVI模式中,高强度钢的氢脆问题成为一项重要的研究内容和业内关注的焦点话题<sup>[27-32]</sup>。从合金设计到生产应用,都在探讨

氢脆产生的机理,探索高强度钢氢脆抗力测试评价方法,研究提升氢脆抗力的各种方法和手段,同时综合提升材料的氢脆抗力和发生延迟断裂抗力的预测能力。

## 7 应用EVI模式的条件

在应用EVI模式时,企业必须拥有其研发的新材料,这些新材料不仅能够充分满足用户需求,还能向用户全方位展示其各类优良性能,且能够稳定地实现批量生产,同时具有完整的、符合用户需求的材料性能数据库,具体如图2所示<sup>[3]</sup>。这些性能包括基本力学性能、成形性、成形零件的功能、材料的疲劳性能、构件的疲劳性能以及零件的先进成形工艺所需的各种性能。此外,企业还应积累各类材料在不同应用场景下的实际案例,并可以向用户提供成形和碰撞性能的断裂卡片。制备断裂卡片需要开展大量的试验,是一项在多种应变模式下的材料性能测试的系统工作。这些试验包括准静态下的力学性能测试、不同应变速率下的力学性能测试(尤其是高应变速率下的力学性能测试)以及不同应力或应变状态下的力学性能测试,包括纯剪切试验、拉剪试验、中心孔试样的拉伸试验、缺口半径为10 mm和5 mm的缺口拉伸试验、双向拉伸试验、直角开槽板状拉伸试验、斜角45°圆孔开槽拉伸试验、4点弯曲试验、孔胀试验以及圆顶冲头的延展试验和杯突试验,其目

的在于满足材料成形或碰撞时计算机模拟对相关材料特征力学性能数据的需求。用于测量这些数据的试验装备应具有完善的数据记录与数据处理功能,能够对试验数据提出本构方程拟合,并得出本构方程的拟合结果,进而给出不同应变速率下材料的塑性变形硬化曲线、不同应力状态下材料的屈服面和屈服轨迹以及不同应变速率下和不同应变状态下的断裂曲线。同时,为准确描述材料的断裂行为,试验装备还应该配备极限尖冷弯应力状态下的极限应变测量装置,最终能准确给出材料在各种状态下的力学性能表征,并求出以应力三轴度为横坐标、断裂塑性应变为纵坐标的以MMC(Modified Mohr-Coulomb Model)为基础的二维失效曲线。在计算机仿真时应用这一曲线可以预测不同应力状态下试样或工件的断裂行为。有关试验方法和表征可参考《国内理化检验标准汇编》<sup>[33]</sup>以及相关文献<sup>[8]</sup>。制作断裂卡片需要大量的试验,其中部分试验方法尚未形成统一规范,有待进一步制定相关的试验标准,以使所得试验结果具有更强的可比性。目前,众多钢铁企业为推广应用所开发的先进高强度钢,都在各自进行相关断裂卡片的制作工作,其中存在不少重复性劳动。因此,相关单位有必要统一规范各类先进高强度钢的性能指标和应用规范,这将更有利于钢种的批量生产、质量管理和推广应用,同时还能节省推广应用过程中的工作量和大量断裂卡片制作的工

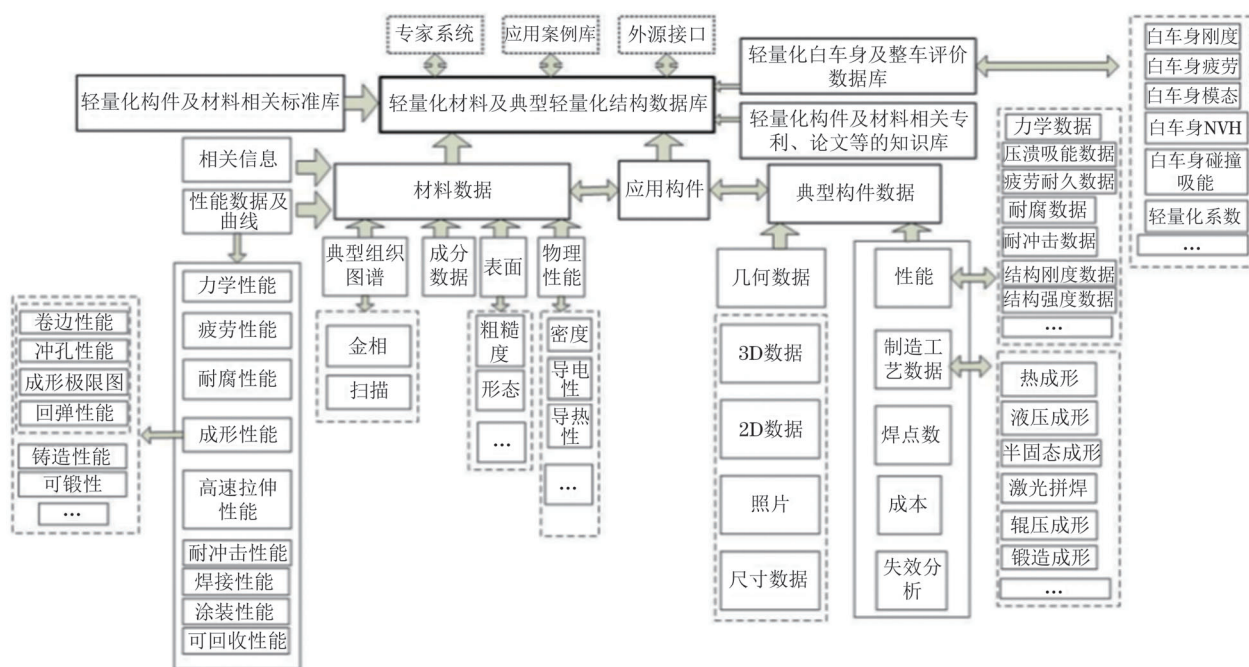


图2 结构材料性能数据库<sup>[3]</sup>

Fig. 2 Structural material performance database<sup>[3]</sup>



作量。若要推行EVI的新产品开发推广应用模式,材料企业还应在技术、人才、物力等方面具备坚实的實力。此外,材料研发企业、生产企业和材料应用企业,对于材料研发应用的全过程都应有充分的理解和认识。

对于一种新材料或者经高新技术改造后的传统材料而言,其研发工作大体分为4个方面。其一为化学成分、工艺、组织和性能的研究;其二是材料的冶金工艺性能研究和材料试制;其三为材料的应用工艺性能研究和零件试制;其四为材料所制零件的使用性能研究。这4个方面构成材料研发的全过程,缺一不可。大家必须深刻认识到材料应用企业和生产企业之间合作的重要性,牢固树立“用户第一”的思想。用户的成功,就是材料生产企业的明天。尽管这一思想看似简单,然而在实际操作中真正践行却很不容易,特别是当产品出现问题或是与生产企业利益发生冲突时,很多企业不是去认真地解决产品所出现的问题,而是选择推诿责任、避重就轻,将“用户第一”的思想抛诸脑后,对于产品出现的问题,长期搁置不理,拖延不解决。这种现象在国内市场时有发生,而这就是在推广应用材料研发的EVI模式时应当格外留意并着力避免的关键问题。

## 8 深入开展EVI活动的重要意义

EVI活动作为材料企业对下游相关企业产品开发的一种先期介入模式,充分体现了材料生产企业和应用企业之间所构建的全新关系以及共赢的合作模式。EVI活动不仅推动了材料生产企业新产品的开发,同时也促进了材料应用企业产品的技术进步和更新换代。开展EVI活动的重要意义有以下几点。其一,EVI活动引发了材料生产企业在产品销售理念和方法上的重大变化和更新,过去简单的产品推销模式已逐渐被摒弃,取而代之的技术合作模式,旨在实现产品功能的提升。POSCO公司举办的6次全球EVI论坛的主题就表明这种模式的变化,即从初期专注于开发满足用户需求的产品,逐步发展为协助用户采用先进的技术生产出高功能的零件。通过系统的应用研究,材料生产企业能够确保其新开发的产品得以在用户端迅速得到应用,实现了从简单的原材料供应商向解决材料应用中各种问题的合作伙伴的角色转变。在此过程中,双方建立了涵盖新材料开发、产品加工工艺技术研发、产业化所需资金的筹措以及最终产品共同销售等环节的亲密合作

关系。其二,EVI活动是材料生产企业实力和技术进步的展示。其三,EVI活动推动了材料企业在新材料和材料应用行业产品方面的技术进步与更新换代。其四,EVI活动体现了各种专业、各种先进技术、各种材料及应用研究成果的深度融合,最终推动制造业的技术进步和产品的提升。

## 9 结束语

早期,为推广应用材料新产品并占领中国和亚洲汽车工业快速发展而兴起的用材市场,JFE率先提出了EVI的概念。此后,上海宝钢于1999年赴美国考察EVI活动,并在此基础上,于2011年在中国召开了首届宝钢EVI大会。韩国POSCO公司于2008年在韩国首尔召开了首届全球EVI国际论坛,正式提出EVI的概念和工作模式,此后该论坛每两年召开一届,截至2018年,共成功举办了6届;这一系列活动使得EVI模式在韩国得以不断发展和完善,并在韩国及国际上产生了良好且深远的影响。随后德国蒂森克虏伯、Arcelor Mittal、国际钢协、鞍钢、马钢、中信金属、中国汽车工程研究院、通用汽车中国科学研究院等国内外知名公司和钢铁企业也相继开展了EVI活动,并用各种概念车的制作和展示介绍了各自开展EVI活动的特点。通过应用这一模式,不仅为国内外先进汽车用钢的研究、生产和应用提供了强大的助力,而且也为中国汽车用材领域的发展做出了重要贡献。2024年3月20日德国蒂森克虏伯举行了一场数字车身平台及技术解决方案的成果发布会,这一举措使得EVI服务与平台实现了重大飞跃,此次发布会省去了概念车的制作和展示环节,而以更形象的数字化制作平台展示了EVI模式在高强度钢,尤其是在电动车轻量化推广应用中所取得的相关成果,这使得EVI的技术服务和新产品的推广应用达到了全新的高度,这是一项极具方向性和价值的创新工作。

材料生产企业开展EVI活动所涉及的条件、基本要求、性能测试特点、应用成效以及开展EVI活动对国家实施“双碳”战略的重要意义,有助于深化对EVI模式的认识。目前,EVI模式已在各类新材料的研发推广应用中获得了广泛的认可和接受,并呈现出向汽车用材以外的众多领域迅速拓展的良好态势。EVI活动的开展不仅体现了材料生产企业的技术水平和研发能力,同时也体现了材料企业和制造业相结合、多种技术和多种专业相互融合来推动

产品提升和创新的先进理念。EVI活动的开展,将会给我国材料产业和制造业带来新的发展机遇和动力。为迅速推广新材料研发和EVI模式推广应用中所得的成果,必须加强新材料研发中标准化和系列化的工作,以节省材料各种性能测试的工作量和时间。

EVI进一步的发展将会加强产学研用相关单位之间的联合,发挥相关单位的优势,通过应用智能化的软件成果和丰富的数据手段,将材料的研发、材料的表征、材料的应用技术等方面的工作做得更加深入快捷,数据更加完善,并以此促进材料研发和应用水平的进一步提升,同时会有更多专业领域的研发人员参加到这一团队中来,通过多专业、多学科、多种技术的深度融合,将我国EVI的服务水平、制造业的轻量化和智能化水平提升到一个新的高度。

#### 参考文献:

- [1] JFE Steel Corporation. FAPA/Mazda/CAF/JMC-JFE business JFE will come up to your expectation[R]. Chongqing: CAERI, 2006.
- [2] BAIK S C. POSCO EVI partnership[R]. Songdo, Korea: POSCO Global EVI Forum, 2008.
- [3] 马鸣图,赵岩,路洪洲,等. EVI和先进高强度钢的发展[C]//中国汽车EVI及高强度钢致氢致延迟断裂研究. 北京:北京理工大学出版社, 2018: 3-14.  
MA M T, ZHAO Y, LU H Z, et al. EVI and advanced high strength steel of development[C]//Research on Hydrogen Induced Delayed Fracture of Chinese Automotive EVI and High Strength Steel. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018: 3-14.
- [4] 郭爱民,马鸣图. EVI与氢脆[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2023.  
GUO A M, MA M T. EVI and hydrogen embrittlement [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2023.
- [5] 马鸣图. 高强度钢的发展和EVI活动[R]. 成都:中国金属学会, 2018.  
MA M T. Development of high strength steels and EVI activities[R]. Chengdu: The Chinese Society for Metals, 2018.
- [6] POSCO Technical Research Lab. Automotive steel data book 2011 [M]. Incheon, Korea: POSCO, 2011.
- [7] OHJOON K. From steel supplier to solution partner [R]. Incheon, Korea: POSCO Global EVI Forum, 2014.
- [8] 马鸣图,王国栋,王登峰,等. 汽车轻量化导论[M]. 北京:化学工业出版社, 2020.
- MA M T, WANG G D, WANG D F. Introduction to automotive lightweight[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.
- [9] 马鸣图,吴娥梅. 高强度钢在汽车轻量化和安全器件上的应用[J]. 新材料产业, 2014(7): 15-19.  
MA M T, WU E M. Application of high strength steel in automobile lightweight and safety devices[J]. Advanced Materials Industry, 2014(7): 15-19.
- [10] 易红亮,陈蓬,王国栋,等.  $\delta$ -TRIP钢的物理和力学冶金[J]. 中国工程科学, 2014, 16(2): 18-30.  
YI H L, CHEN P, WANG G D, et al.  $\delta$ -TRIP steel: Physical and mechanical metallurgy[J]. Chinese Engineering Science, 2014, 16(2): 18-30.
- [11] 马鸣图. 论材料性能与零件功能的关系[J]. 热处理, 2014, 29(2): 1-13.  
MA M T. The relation of material property to part function[J]. Heat Treatment, 2014, 29(2): 1-13.
- [12] OHJOON K. New product development and EVI activity at POSCO[R]. Incheon, Korea: POSCO, 2012.
- [13] SHAW J, KURIYAMA Y, LAMBRIKS M. Achieving a lightweight and steel-intensive body structure for alternative powertrains[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA, United States: SAE International, 2011.
- [14] 王登峰. 中国汽车轻量化发展: 战略与路径[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2015: 14-47.  
WANG D F. China automotive lightweight development [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015: 14-47.
- [15] POSCO Steel Solution Center. Development of POSCO body concept for electric vehicle: PBC-EV[R]. Songdo, Korea: Global EVI Forum, 2014.
- [16] PARK S H, KIM G S, LEE H W. 浦项的先进高强度钢开发的EVI活动[C]//2009年汽车用钢生产及应用技术国际研讨会论文集. 北京:冶金工业出版社, 2009: 123-127.  
PARK S H, KIM G S, LEE H W. POSCO's advanced high-strength steel development EVI activities[C]//Proceedings of the 2009 International Symposium on Production and Application Technology of Automotive Steel. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2009: 123-127.
- [17] POSCO. Automotive steel data book[M]. [S.l.]: [s.n.], 2018: 109-116.
- [18] LEE K Y. Introduction to development and application of automotive steels of POSCO[R]. Songdo, Korea: Global EVI Forum, 2014.



- [19] OHJOON K. Your partner to the future[R]. Incheon, Korea; POSCO, 2016.
- [20] CHOI J W. Welcome message[C]//POSCO Global EVI Forum 2018. Songdo Convensia, Korea: POSCO, 2018: 4-5.
- [21] BASSON E. Steel: The best material in the future[C]//POSCO Global EVI Forum 2018. Songdo Convensia, Korea; POSCO, 2018: 12-13.
- [22] JARONI U, KROOS K. InCar项目所有解决方案的概况: 车身、动力总成和底盘[R]. [2023-03-01]. <https://www.thyssenkrupp.com.cn/cn/news/press-release/incar-plus>.  
JARONI U, KROOS K. Overview of all InCar project solutions: Body, powertrain and chassis[R]. [2023-03-01]. <https://www.thyssenkrupp.com.cn/cn/news/press-release/incar-plus>.
- [23] 高永生, 杨兵. 未来钢质汽车轻量化的有效途径[J]. 汽车工艺与材料, 2012(1): 5-11.  
GAO Y S, YANG B. Effective ways to lighten the weight of steel cars in the future[J]. Automobile Technology & Material, 2012(1): 5-11.
- [24] 路洪洲, 郭爱民. 中信金属汽车EVI模式的发展脉络及展望[C]//中国汽车EVI及高强度钢致氢致延迟断裂研究. 北京: 北京理工大学出版社, 2018: 15-23.  
LU H Z, GUO A M. The development and prospect of CITIC metal automotive EVI model[C]//Research on Hydrogen Induced Delayed Fracture of Chinese Automotive EVI and High Strength Steel. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018: 15-23.
- [25] 路洪洲, 肖锋, 魏星, 等. 汽车车身正向选材的逻辑与实践[C]//中国汽车EVI及高强度钢致氢致延迟断裂研究进展. 北京: 北京理工大学出版社, 2019: 19-33.  
LU H Z, XIAO F, WEI X, et al. Logic and practice of material intelligent selection system for automotive car body[C]//Research Progress on Hydrogen Induced Delayed Fracture of Automotive EVI and High-strength Steel. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2019: 19-33.
- [26] 冯毅, 张德良, 高翔, 等. 面向新能源时代的汽车用钢EVI工程技术发展[J]. 汽车工艺与材料, 2023(9): 8-15.  
FENG Y, ZHANG D L, GAO X, et al. Development of EVI engineering technologies for automotive steel in the new energy era[J]. Automobile Technology & Material, 2023(9): 8-15.
- [27] MA M T, LI K J, SI Y, et al. Hydrogen embrittlement of advanced high-strength steel for automobile application: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2023, 36(7): 1144-1158.
- [28] 马鸣图, 刘邦佑, 陈翊昇, 等. 热成形钢及热冲压零件的氢致延迟断裂[J]. 汽车工艺与材料, 2021(4): 1-11.  
MA M T, LIU B Y, CHEN Y S, et al. Hydrogen-induced delayed fracture of hot-formed steel and hot-stamped parts[J]. Automobile Technology & Material, 2021(4): 1-11.
- [29] 张永健, 惠卫军, 董瀚. 一种低碳Mn-B系超高强度钢板热成形后的氢致延迟断裂行为[J]. 金属学报, 2013, 49(10): 1153-1159.  
ZHANG Y J, HUI W J, DONG H. Hydrogen induced delayed fracture behavior of a low-carbon Mn-B type ultra-high strength steel sheet after hot stamping[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(10): 1153-1159.
- [30] 中国汽车工程学会. 超高强度汽车钢板氢致延迟断裂敏感性U形恒弯曲载荷试验方法: T/CSAE 155—2020 [S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2022.  
China Society of Automotive Engineering. U-shaped constant bending load test method for hydrogen induced delayed fracture sensitivity of ultra high strength automobile steel plate: T/CSAE 155—2020 [S]. Beijing: China Society of Automotive Engineering, 2022.
- [31] 司宇, 唐远寿, 周新, 等. 高强度钢马氏体钢中微合金元素对氢致延迟开裂的研究进展[J]. 汽车工艺与材料, 2022(6): 16-26.  
SI Y, TANG Y S, ZHOU X, et al. Research progress of microalloy elements on hydrogen-induced delayed cracking in high strength martensitic steels[J]. Automobile Technology & Materials, 2022(6): 16-26.
- [32] MA M T, FENG Y, LI K J, et al. Hydrogen-induced delayed fracture resistance of hot stamping steel for different strength grades[C]//Proceeding of the 5th International Conference of Advanced High Strength Steel and Press Hardening. [S.l.]: [s.n.], 2020: 1-7.
- [33] 机械电子工业部标准化研究所, 机械电子工业部上海材料研究所. 国内理化检验标准汇编[M]. 上海: 上海市新闻出版局, 1991.  
Standardization Institute, Ministry of Mechanical and Electronics Industry, Shanghai Institute of Materials. Compilation of domestic physicochemical test standards [M]. Shanghai: Shanghai Press and Publication Bureau, 1991.

(下转第48页)

## Effects of Interpass Temperature and Post-Weld Heat Treatment Cooling Rate on Impact Toughness and Corrosion Resistance of P91 Steel Weld Metal

XU Xiaolong<sup>1</sup>, LI Wenqing<sup>2</sup>, LIU Zishen<sup>2</sup>, YANG Fei<sup>1</sup>, MAO Xinggui<sup>1</sup>, JIANG Yong<sup>1</sup>

(1. Atlantic China Welding Consumables, INC, Zigong 643000, China; 2. The State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** P91 steel was subjected to 8-layer 16-pass submerged arc welding at different interpass temperatures (250, 300 °C), and the weld metal was post-weld heated at 760 °C for 2 h at cooling rates of 55 °C · h<sup>-1</sup> and about 20 °C · h<sup>-1</sup> (furnace cooling). The effects of interpass temperature and post-weld heat treatment cooling rate on the impact toughness and corrosion resistance of weld metal were studied. The results show that when the interpass temperature was 250 °C, with post-weld heat treatment cooling rate increasing from about 20 °C · h<sup>-1</sup> to 55 °C · h<sup>-1</sup>, the carbide content and its aggregation degree at grain boundaries of the weld metal decreased, the impact absorbed energy obviously increased by about 68%, and its fluctuation degree obviously decreased; the free-corrosion potential increased, and the free-corrosion current density decreased. When the post-welding heat treatment cooling rate was about 20 °C · h<sup>-1</sup>, with the interpass temperature increasing from 250 °C to 300 °C, the carbide content and its aggregation degree decreased, the impact absorbed energy slightly increased, and its fluctuation degree slightly decreased; the free-corrosion potential increased, and the free-corrosion current density decreased. Within the range of test parameters, the interpass temperature and the post-weld heat treatment cooling rate of submerged arc welding of P91 steel should be controlled at 250 °C, 55 °C · h<sup>-1</sup>, respectively; at this time the weld metal had the largest impact absorbed energy and free-corrosion potential and the smallest fluctuation of impact absorbed energy and free-corrosion current density, and the impact toughness and corrosion resistance were the best.

**Key words:** P91 heat resistant steel; submerged arc welding; post-weld heat treatment; impact toughness; carbide; corrosion resistance

(上接第 19 页)

## View of EVI Mode in Automotive Material Research & Development and Promoting Application

MA Mingtu<sup>1</sup>, LU Hongzhou<sup>2</sup>, ZHAO Yan<sup>3</sup>, FENG Yi<sup>1</sup>, WANG Guangyao<sup>1</sup>, LI Bo<sup>4</sup>,  
YUAN Guo<sup>5</sup>, MIAO Xinlei<sup>6</sup>, MENG Jing<sup>6</sup>

(1. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401121, China; 2. CITIC Metals Co., Ltd., Beijing 100004, China; 3. Chongqing Innovation Center of Beijing Institute of Technology, Chongqing 401120, China; 4. Sino-US (Chongqing) Super High Strength Material Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401120, China; 5. State Key Laboratory of Steel Rolling Technology and Continuous Rolling Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 6. Ansteel ThyssenKrupp Automotive Steel Co., Ltd., Dalian 116600, China)

**Abstract:** Early vendor involvement (EVI) mode in the research & development and promoting application of automotive materials is discussed in detail. The background and connotation of the development of this mode and the important role in the research & development and application of new materials are introduced. The EVI activities and characteristics of some well-known companies at home and abroad are introduced in detail, as well as the recent achievements of TAGAL in the digital body platform and its steel solutions are introduced. The progress of EVI promotion activities by relevant enterprises is introduced. The role of EVI mode in the application of new materials in newly developed vehicle models is discussed, and the conditions for enterprises to promote the application of EVI mode are put forward. Finally, the significance of EVI model to dual-carbon strategy is expounded.

**Key words:** EVI mode; research & development and application of new material; benchmarking car; concept car