

EVI与氢脆

郭爱民 马鸣图 徐佐 等编著

非外借

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

EVI 与氢脆 / 郭爱民等编著. -- 北京 : 北京理工大学出版社, 2023. 3

ISBN 978 - 7 - 5763 - 2223 - 1

I. ①E… II. ①郭… III. ①汽车 - 高强度钢 - 氢脆 - 研究 IV. ①U465.1

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 055244 号

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)68944723(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 廊坊市印艺阁数字科技有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 26.25

字 数 / 480 千字

版 次 / 2023 年 3 月第 1 版 2023 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 128.00 元

责任编辑 / 刘 派

文案编辑 / 侯亿丰

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

《EVI 与氢脆》

编委会

顾问：翁宇庆 毛新平 刘正东 张跃 付俊岩

编委会主任：徐佐

副主任：Julie Cairney 陆匠心 Rafael Mesquita

主编：郭爱民 马鸣图

副主编：路洪洲 陈翊昇 周佳 韩非 李军

编委(按姓氏字母排名)：

Caio Pisano Fabio D' Aiuto Rafael Mesquita 常智渊 陈翊昇

陈勇 范秀如 方刚 冯毅 郭爱民

韩非 胡晓 黄利 姜发同 李春光

李军 栗克建 梁宾 梁江涛 刘培星

卢茜倩 卢岳 路洪洲 罗爱辉 罗三峰

马成 马鸣图 师彦春 宋磊锋 孙超

王诚 王光耀 王文军 王亚男 王杨

温彤 肖锋 谢春乾 徐正萌 严超峰

阎换丽 杨峰 叶青亮 曾林杰 詹华

张军 张钧萍 张龙柱 张永青 赵林林

赵岩 周佳 周松 周银 周湛淞

主审：马鸣图 路洪洲 张钧萍

审稿(按姓氏字母排名)：

陈翊昇 方刚 冯毅 李永兵 宋燕 阎换丽

杨琴

支持单位

中信金属股份有限公司 中信微合金化技术中心

中信金属股份有限公司成立于1988年，住所为北京市朝阳区新源南路6号京城大厦1903室。公司主营业务为金属矿产方面的大宗贸易和矿业投资，品种包括铌产品、铁矿石、有色金属、钢铁等；同时，它是巴西矿冶公司、秘鲁邦巴斯铜矿、艾芬豪矿业、西部超导、中博世金等的股东；中信金属是铌微合金化技术的行业领导者，其铌产品销售占中国市场份额的80%左右，铌微合金化汽车材料的开发和应用是其核心业务，汽车团队在行业内具有较高的影响力。中信金属隶属于中国中信集团有限公司，其于1982年成立。中信集团连续13年上榜美国《财富》杂志世界500强，2021年位居第115位。

中国汽车工程研究院股份有限公司

中国汽车工程研究院股份有限公司（简称中国汽研）始于1965年3月成立的四川汽车研究所，1971年更名为重庆重型汽车研究所，系国家一类科研院所。后又多次更名，直至2001年改制为科技型全民所有制企业，更名为重庆汽车研究所。2003年，重庆汽车研究所划归国务院国资委管理；2006年，其与中国通用技术（集团）控股有限责任公司联合重组，成为其全资子公司；2010年11月，其整体变更设立为中国汽车工程研究院股份有限公司；2012年6月11日，其在中国上海证券交易所正式挂牌上市。

中国汽研积极服务国家战略和行业发展，深刻践行央企责任使命，构建起以重庆总部为核心，辐射全国主要汽车产业集群的技术服务布局，聚焦“安全”“绿色”“体验”三大技术领域，提供解决方案、软件数据、装备工具三类产品，致力成为以标准为核心，集成技术服务、数据应用、装备推广的科技平台公司。中国汽研拥有整车、零部件和材料全方位的检测、研发和装备研制能力，在汽车轻量化EVI技术和检验检测方面拥有显著的优势。

前 言

2000年以后，中国汽车已连续多年产销世界第一。近几年在疫情肆虐的形势下，汽车行业一枝独秀，产销仍然处于高位运行，引领和带动我国多个上下游行业乃至国民经济的发展，有力地支撑了广大百姓的就业和生活水平的稳定提升。汽车产业的发展带来了能耗、安全和排放等问题，汽车工业节能减排和汽车安全性提升已刻不容缓。当前，汽车轻量化仍是最直接、最有效的节能减排手段。在众多广泛应用的材料中，高强度钢和超高强度钢是最有效的轻量化材料，采用其制造汽车零件，可提升汽车的被动安全性能，兼具安全性、轻量化和高性价比，具有其他材料无法比拟和替代的综合优势，但高强度钢和超高强度钢应用时面临成形、强韧性和氢脆延迟抗力不足等问题。

EVI模式是促进新材料、新工艺在汽车工业上应用，解决高强度钢和超高强度钢零件在设计、制造和应用过程中的各种问题，并提升汽车安全性能的一种新的有效模式。针对高强度钢和超高强度钢的EVI模式于2008年由POSCO在韩国松岛召开的首届全球EVI论坛率先提出。该论坛两年一届，至今已召开了6届全球EVI论坛。EVI模式已深入人心，每届会议参会人数均超过千人。

近年来，国内也有一些企业将这一模式用于新产品的开发。在这种形势下，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国内外、上下游单位于2017年和2019年联合召开了两届EVI和高强度钢氢致延迟断裂国际会议，并出版了论文集两册。原计划在2021年召开第三届EVI和高强度钢氢致延迟断裂国际会议，由于疫情的影响而推迟至2023年4月19日—21日在重庆召开。

在总结前两次会议的基础上，本书编写突出了如下特点：

一是邀请了业内资深专家，编写行业发展报告8篇，论述EVI、氢脆、钢制轻量化概念车、断裂失效卡片及解决方案、轻量化车轮行业发展及特种车轻量化进展等行业报告，以及国内知名钢铁企业（如宝钢）的EVI发展

模式，阐述具体的 EVI 方法、新的创新思维和对 EVI 新的认识，如宝钢提出：“将遵循不断超越用户满意的理念”。

二是在 EVI 综合评述方面，由参加 6 届 POSCO 全球 EVI 论坛的我国汽车 EVI 模式倡导者系统评述了 6 届全球 EVI 论坛的主题和特色，详细介绍了 2018 年 POSCO 全球论坛会议的特点及国际钢协的执行总裁所做的《钢——未来最好的材料》等报告的精彩内容，介绍了 EVI 国内外的最近进展。多篇关于氢脆的论述涵盖了国内外该领域的最新研究进展，使读者对该领域有更深入和全面的了解。

三是对人们日益关注的安全问题，本论文集征集了断裂方面的文章形成专题，对材料的断裂失效理论模型、表征技术、测试方法和评价参量方面的研究进行了总结。结合材料强韧性的提升和微观组织的调控，对氢脆的评价方法和控制技术进行了专题介绍，使读者了解该领域的实验方法、结果和最新进展。

本次论文集主要包括三大主题，即 EVI 及其解决方案、氢脆及其机理研究和材料失效断裂及表征技术。对材料断裂方面的多维度、多尺度，从微观到宏观，从材料到零件，从单轴拉伸到多轴应力，再到整车上的应用，展示出我国近三年来 EVI 方面研究所取得的最新成果，论述了高强度钢的应用对我国汽车轻量化零部件安全性的提升所发挥的重要作用，对国内广大读者正确认识汽车用钢的发展方向、汽车零件的选材以及材料性能和零部件功能，以及对整车安全性的影响提供了新的视角和依据。

经过 90 余名国内外知名专家组成的学术委员会认真评审，收入论文集的论文共计 38 篇，22 万字左右。本文集是业内各企业、科研院所、高校等企事业单位、广大科技人员共同努力的结晶。在此向支持本次会议召开、分享研究成果、积极投送论文、参与会议的相关工作的各位同行和专家表示诚挚的谢意。由于编辑出版时间有限，文集中难免存在一些疏漏之处，敬请读者不吝指正。

马鸣图 郭爱民
2022 年 11 月

目 录

EVI 和高强度钢氢致延迟断裂国际会议的综合评述	(1)
高强度钢和超高强度钢的氢脆研究进展	(18)
宝钢超轻型高安全纯电动白车身 (BCB EV) 开发	(54)
专题报告: 国内外汽车用钢 EVI 最新发展现状介绍	(65)
专题报告: 高强度汽车钢氢致延迟断裂	(83)
汽车用金属板材成形及服役断裂失效行为预测概述	(137)
汽车轻量化车轮行业发展及路线图	(154)
含铌钢在特种车轻量化上的应用现状及进展研究	(181)
30CrMo 钢制轻量化乘用车稳定杆开发	(202)
1 000 MPa 级冷轧双相钢氢致延迟开裂性能研究	(204)
CR1500HF 镀锌热成形钢点焊接头性能研究	(206)
CSP 工艺对热成形钢氢致延迟开裂性能影响	(208)
超高强度钢冷成形开裂分析理论的现状与发展	(210)
基于密度泛函理论的低合金高强度钢设计	(212)
金属板材高精度断裂卡片研发及应用	(214)
铌元素对典型双相钢冲压和扩孔性能的影响研究	(216)
汽车 EVI 技术进展	(218)
汽车车身用铝合金板材的研究现状	(220)
汽车用先进高强度钢显微组织表征和第一性原理研究	(222)
热成形钢极限冷弯性能与零件碰撞断裂指数关系研究	(224)
预应变和烘烤对 QP980 冷轧板材组织与力学性能的影响	(226)
2 GPa 级热成型钢应变率敏感性及其本构模型建立	(228)
1 500 MPa 级短流程热成形钢开发	(235)
Fe - 11Mn - 2Al - 0. 2C 中锰钢动态变形行为	(242)
H220YD + ZM 镀锌钢板电阻点焊工艺研究	(254)
“门锁加强板”零件冲压开裂原因分析及优化改进	(264)

第二相析出物特征对 2 GPa 热成形钢氢致延迟开裂的影响	(273)
基体组织结构对热成形钢氢致裂纹影响	(286)
基于结构应力的点焊疲劳卡片研究	(294)
基于可靠性提升的乘用车玻璃升降系统典型故障分析预防	(302)
金属材料高周疲劳试验方法综述	(311)
抗氢脆高强度钢化学成分设计的第一性原理研究	(320)
铝元素对中锰钢包辛格效应的影响研究	(332)
某转向器摇臂轴失效分析	(352)
中锰 TRIP 钢氢致开裂性能研究现状与进展	(359)
自卸车翻转轴结构静动态多目标可靠性拓扑优化	(377)
热成形钢高温成形性能评价	(393)
某汽车后盖外板冲压成形性敏感参数分析与优化	(401)

EVI 和高强度钢氢致延迟断裂国际会议的综合评述

马鸣图¹，李靖伟²，李波²，万鑫铭¹

- (1. 中国汽车工程研究院股份有限公司，重庆 401121；
2. 中新（重庆）超高强度材料研究院有限公司，重庆 401326)

摘要：本文综合评述了 EVI 和氢脆相关国际会议的内容以及发展概况。首先，评述了前两届 EVI 和氢脆国际会议召开的盛况和重点报告的内容，以及在该领域的研发进展，详细论述了全球 EVI 论坛中 6 届国际会议的主题和 EVI 模式促进先进汽车用钢发展与应用的重要作用，以及 EVI 在促进中国先进汽车用钢的发展和行业进步所取得的进展，同时对 EVI 模式的未来发展进行了展望。其次，论述了在“双碳”背景下，近年来高强度钢和超高强度钢对汽车工业节能减排、材料和零件延寿，将会发挥巨大的作用。最后，文章介绍了本届会议的特点和亮点。

0 前言

从 2017 年至今，“EVI 及高强度钢氢致延迟断裂会议”已经成功举办了两届^[1,2]。该会议推进了我国汽车产品结构调整、品质升级，缩短了新产品的开发周期，提高了产品竞争力，促进材料研发创新链和产业链的有机融合，深入探讨了高强度钢氢致延迟断裂及其对汽车钢应用过程中的影响。对推动汽车整车企业、零部件企业、钢厂、高等院校、科研院所之间的政、产、学、研、用的紧密合作做出了重大的贡献，对我国高强度钢和超高强度钢材料的发展与应用具有重要而深远的意义。汽车工业发展的总体趋势是电动化、智能化和轻量化，即安全、环保、节能是当前全球汽车产业发展的主题。安全和轻量化是汽车工业发展的永恒主题。在这一大的趋势和背景下，高强度钢和超高强度钢在汽车车身结构件上的应用，必然会越来越多。迄今为止，钢铁材料既可以提升汽车安全性和轻量化水平，又是性价比高的、可循环再生利用的、其他材料无法替代的材料。

十余年来，各主机厂、关键零部件厂以及材料供应商都致力于高强轻量化材料、零件以及新结构和新工艺的研发与应用。汽车轻量化的实施是一个系统工程，涉及多学科、多专业、多技术的优势集成，即设计、材料、先进成形技术和先进评价技术等方面的有机融合。同时，轻量化发展需要深入

领会和理解材料性能与零部件功能之间关系的创新理念，将合适的材料用到合适的地方，共同努力打造一个良性可循环的产业生态圈和环境，并形成可以展现和交流的专业技术平台。基于以上行业发展的趋势，以及高强度钢和超高强度钢在工程运用中出现的一系列问题（如成形困难、强韧性不足、氢致延迟断裂敏感性高等），需要组织和搭建一个很好的平台，增进上下游企业的技术沟通和相互了解，强化材料制造业、汽车整车企业、零部件企业、原材料企业、高等院校、科研院所之间的紧密合作，共同推进我国汽车产品结构调整、品质提升和竞争力的提高，缩短新产品的开发周期。

这样一个平台就是 EVI 的模式。在 EVI 这种框架下，上下游企业协同联合，从材料的加工成形历史到材料和零部件生产历史和使用历史，深入认识和改进材料的强韧性对零件功能的影响，以及高强度钢产生氢致延迟断裂的物理本质与材料的生产加工成形和使用的历史关系，共同提出和制定材料强韧性的评价方法，氢致延迟和断裂的物理本质以及评价表征方法，逐步形成多方协调一致的高强度钢和超高强度钢的强韧性匹配标准、氢致延迟断裂的共同认识以及性能提升的改进方法和手段。EVI 和氢致延迟断裂国际会议正是秉承上述理念，集国内外材料生产和应用企业的专家技术人员，在这一平台中进行技术交流，展示材料生产企业的实力和技术的进步，从简单的材料生产和销售企业转变为与终端用户合作并提供最终产品性能的提升的技术服务商，共同推动材料生产企业新产品的开发以及材料应用企业产品的技术开发和产品的更新换代，将各个专业、各种先进技术、各种先进材料以及应用研究成果高度融合，从而推动制造业的进步和产品的提升。

这就是举办 EVI 和氢致延迟断裂国际会议的初衷，而这正是高强度钢和超高强度钢在汽车轻量化应用中的关键问题所在。

1 历届会议概括

2017 年 12 月 14 日，第一届中国汽车 EVI 及高强度钢氢致延迟断裂会议在北京圆满举办，会议出版的论文集共收集论文 36 篇，将近 37 万字，其中 EVI 方面的内容有 24 篇，氢脆方面的内容 12 篇。在论文集中，马鸣图等人关于 EVI 的综述性论述首次全面系统地论述了 EVI 的新材料开发和应用模式的产生过程、EVI 的内含、发展过程以及国内外典型企业开展的 EVI 活动所取得的新的进展，EVI 对新材料开发和应用的促进作用，并提出了材料生产企业开展 EVI 活动的条件和开展 EVI 活动的意义，对人们深入认识 EVI 活动有较大的促进作用^[3]；中信金属的路洪洲等人^[4]以 Nb 钢汽车板的销售为例，深入探讨了 EVI 活动的发展脉络，发挥 Nb 在汽车板中的重要意义，并展示了这

一工作的未来规划，给人们认识 EVI 活动有很多启迪；王建峰等人^[5]在“多尺度生态框架下的技术创新加速先进高强度钢在汽车轻量化上的应用”一文中从生态的角度探讨了技术创新和新材料产业化的过程，并提出材料的选择、制造工艺、结构设计三者有机融合才可以得出高功能高性价比的零部件，失去任何一个方面就会失去平衡，同时针对下一代汽车高强度钢的开发提出“以需求引导技术创新，用市场检验技术价值”，并综合评价了冷成形和热成形的发展方向和挑战。

在 EVI 的文章中有不少结合零部件的开发进行了论述，对我国汽车轻量化发展都起到了促进的作用。已故的陈一龙^[6]主任在“汽车轻量化的科学工作开展”一文中，对轻量化的开展有一些新的思路和思考。到 2018 年，中国汽车轻量化经历了概念认知、新材料开发、材料/结构优化与工艺相结合，以及建立系统解决方案等不同的发展阶段，那么当前中国汽车轻量化的核心工作是什么呢？从当前的实际情况来看，过去 10 年我国轻量化工作取得了很大进步，无论是设计、材料，还是制造技术，都有明显进步。最重要的是，轻量化的理念在认识上有了质的飞跃。10 年前，国内汽车设计流程中未考虑轻量化的因素，之后把轻量化纳入设计和考核指标，现在各企业均把轻量化列为战略发展目标，进而成为汽车产业的三大发展方向（电动化、智能化、轻量化）之一，为我国汽车轻量化技术的发展开辟了广阔空间。但是，对轻量化的认识问题、轻量化的指标问题、轻量化的成本问题等是轻量化工作能否持续发展和进行迫切需要解决的问题。针对这些问题，陈一龙在文章中提出的行业层面需要解决的问题和思路，以及行业层面需要深入认识的共性技术问题，同时提出要加强汽车零部件企业的建设，列举了原材料企业 EVI 能力的建设和典型案例，并再次强调了开展商用车研发工作的重要性，文中有些观点至今对轻量化工作仍具有指导意义和参考价值。文中结合零部件轻量化所开展的相关 EVI 工作，对深入认识 EVI 的含义和工作的重要性以及在零件整车轻量化中的用材工艺的提升都是很有参考价值的。

在氢致延迟断裂的论述和案例文章中，既有关于用三维原子探针技术表征钢中氢的捕捉行为的最新研究进展^[7]，也有关于高强度钢氢致延迟断裂研究的系统综述^[8-10]，同时也有高强度钢和超高强度钢氢致延迟断裂发生的案例分析，并提出改进高强度钢氢致延迟断裂抗力的手段和方法。近年来，高强度钢在汽车中的应用迅速增长。在汽车轻量化快速发展和保证汽车安全的前提下，氢脆问题已经引起人们的广泛兴趣和重视并开始了相关研究，以这一主题召开国际会议、出版系统性的论述文章正合时宜，会议和论文集引起与会代表和行业中的专业人士高度评价。

在第一届会议的基础上，第二届中国汽车 EVI 及高强度钢氢致延迟断裂会议于 2019 年 8 月 29 日在重庆举办，会议征集论文（按出版文集计算）共计 31 篇，分为 EVI 技术篇和氢致延迟断裂技术篇，合计 36.5 万字，涉及 EVI 模式合作、EVI 解决方案、氢致延迟断裂机理等内容。两次会议都得到行业领导专家的支持和肯定，在行业中也引发了强烈的关注和反响。

第二届会议关于 EVI 的论述中^[11]，对 EVI 的内涵、EVI 的意义、EVI 在行业中特别是在汽车轻量化中行业对 EVI 的需求有了新的认识，同时提出将 EVI 融入整车的开发流程，并详细论述了整车开发的不同流程，包括初始方案阶段、性能确定阶段、性能分解阶段、零件功能的实现与验证以及整车功能的预测，实验验证和使用试验的结果分析都融入了 EVI 的概念；对应用 EVI 的整车方案的开发路线也有了新的认识，对 EVI 的不同阶段进行了分级，并举例对整车的新型结构和整机的开发过程以及所提出的一些理念进行了验证，进一步融合了“将适合的材料用在适合的地方”，采用先进的工艺与材料及零部件的功能有机融合，取得高性价比的零件、白车身直至优异的整车功能。对 EVI 模式的服务逐步形成新的技术体系和规范，并建立起从材料性能到零件功能的数据库，以及各总成的完整的解决方案，最后将 EVI 模式融入整车的开发。在另外一篇文章中，基于对 EVI 模式的理解和适时需求，对材料性能和零部件功能关系的深刻理解，以及白车身中影响整车安全、刚度、耐久、性能等环状结构的分解与认识，定义了典型零件成形中的应变状态和成形模式^[12]。在《汽车车身正向选材的逻辑和实践》一文中提出了汽车轻量化零件新的选材方法，应用这种选材方法，可以高效地确定先进材料在典型零件或在相关零件中应用的潜力，快速锁定应用先进高强度钢的零件减重降本潜力，并可有效地降低零件的选材周期。文中还举例介绍了正向选材的这一系统的实际应用方法，为汽车车身的优化设计提供了有力的合理选材的工具。

韩国浦项公司介绍了电动车的轻量化解决方案^[13]。该方案是从电动车白车身的结构优化设计开始，充分发挥韩国浦项多年来在 GIGA 钢（千兆钢）开发的优势，并通过应用先进的成形技术，充分发挥先进高强度钢在电动车白车身开发中的应用潜力，完成了 GIGA 钢的电动车白车身的轻量化项目，减重率高达 25%。文中详细介绍了轻量化的悬架系统，由 GIGA 钢制造的轻量化的电池包壳，PBC - EV、PSC - EV 以及 PBP - EV 3 种典型的电动车的轻量化构件，以及电池包千兆钢为主的 C 级电动车的车身、底盘悬架轻量化概念总成结构。在电动车上的应用表明了先进高强度的 GIGA 钢可以长期作为各类汽车的高强度轻量化材料。论文集中的 EVI 部分其他文章还详细介绍了其他

高强度钢开发的成果和典型性能；一些文章中还对高速拉伸的材料在高应变速率下的流变特性的本构方程开发和拟合进行了介绍，表明为满足 EVI 的需求，材料性能的测试技术和数据测试技术都有新的提升。

在氢致延迟断裂的文章中，不同作者从不同的试验方法评价了不同钢种氢致延迟断裂抗力^[14,15]，针对不同的微观尺度探讨了不同钢种成分的纳米的第二相析出、晶粒大小、板条宽度和板条束的宽度对材料氢致延迟断裂抗力的影响，特别是对铌钒复合微合金化提升热成形材料的延迟断裂抗力的作用和效果进行了检测，充分肯定铌钒复合微合金化热成形钢的效果。

冯毅等人^[16]的文章基于大量的实验结果和大量的文献综合评述，对氢致延迟断裂的机理进行了探讨，对超高强度钢延迟抗力的提升和改进具有参考价值，也为高强度轻量化的汽车安全件的可靠性提升的选材提供了依据。

第二届 EVI 和氢致延迟断裂国际会议另一特点是参加人员更加广泛，国外来宾进一步增多，如本次会议上来自日本住友金属的中里福和教授、韩国浦项的钢解决方案研究室 Yong - Gyun Jung 等 7 位专家以及德国蒂森公司、美国通用上海研究院、澳大利亚悉尼大学、昆士兰大学、新加坡亚太地区钢铁技术咨询公司、加拿大麦格纳公司等。国内主要的钢厂（如宝钢、鞍钢、首钢、本钢、马钢等）、主要汽车厂（如长安、奇瑞、通用、北汽等）以及高校科研单位（如北京科技大学、安徽工业大学、中汽院、中信金属等）也积极参加。因此，这些外宾的到来和国内单位的参会也彰显了这一会议的国际性和大家对这一主题的兴趣和关心。

2 国内外 EVI 模式发展现状

EVI 是“Early Vendor Involvement”3 个英文单词的首字母缩写形式，指的是材料制造商介入下游用户产品的早期研发阶段，充分了解用户对原材料性能的要求，从而为客户提供更高性能的材料和个性化的服务。EVI 早期来源于材料生产企业对用户质量服务的体系，包括从解决用户使用过程中的质量问题到对用户的技术支持。20 世纪 90 年代末，由于汽车轻量化节能减排的需要，汽车厂新研发车型需要应用高强度钢，但高强度钢的应用遭遇成形限制。因此，强度高、成形性好的先进高强度钢应运而生，其中早期产生的高强度钢是双相钢，随后又产生一代、二代先进高强度钢。为将这些先进高强度钢用于用户的产品，EVI 模式应运而生。通过技术合作，为用户车型开发提供新钢种应用的技术支持，包括车型的设计、计算机模拟、零件的原型制造直到批量生产。此时，EVI 已成为新钢种生产企业或新车型开发应用企业共赢的桥梁。EVI 为钢厂的先进高强度钢开发了市场，又为用户的轻量化提

供了合适的材料和解决方案。经过几年的运作，浦项（POSCO）将这一模式已经总结成一套成熟的经验和完整的运作方式。以此为基础，2008年在韩国仁川松岛召开了首届全球 EVI 论坛，其名称为 POSCO Global EVI Forum 2008，也是国际上首次关于 EVI 的国际会议，参会人数近千人。在会议上，POSCO 公司的代表展示了一代、二代、三代高强度钢和先进高强度钢的发展及相关的性能和应用前景，参加会议的汽车厂的代表展示了轻量化的需求，而 EVI 正好是二者的桥梁。POSCO 公司的代表详细论述了 EVI 的模式和内涵^[17]，在会上 BAIK S C 用 CE（并行工程）（包括优化材料建议和新钢类的开发）、VE（价值工程）（包括通过改进钢材的运输系统降低钢材价格）、VI（价值创新）（包括通过材料应用的变化降低钢材价格）、PP（零件建议）（包括基于汽车使用和生产中的变化给予材料的合理建议）作为 EVI 模式的核心。POSCO 公司为实施 EVI 专门成立了汽车钢应用中心（ASAC - Automotive Steel Application Center），与用户共同开发新钢应用的相关技术。

在 2016 年的第一届汽车用钢和第三届高锰钢国际会议上，MAM 从 EVI 的概念开始就 EVI 的引入与高强度钢和先进高强度钢的开发和应用、EVI 对用户的集成解决方案、新车型开发中的 EVI 活动、未来车的开发和工艺流程、国内外典型企业的 EVI 活动、对材料企业开展 EVI 活动的具体要求、EVI 活动的本质意义等方面进行了详细的论述。2008—2018 年，POSCO 公司每两年就举行一次 EVI 活动，前后共举行 6 届全球 EVI 论坛。2008 年的主题是“开发用户所需的产品”，详细介绍了 POSCO 高强度钢和先进高强度钢所取得的最新进展；2010 年的主题是“如何帮助用户在高性能零件制造中采用先进的成形技术”，包括激光拼焊板、热冲压成形、液压成形等开展的 EVI 活动；2012 年的主题是“如何让用户快速应用新的钢铁产品，并将钢种开发与汽车产品的开发有机地融合在一起，进行 EVI 的深度合作”；2014 年的主题是“从钢材的开发到解决问题的合作伙伴，钢厂和汽车厂有机融合在一起，共同开发产品，共同销售产品”；2016 年的主题是“展示 POSCO 的实力和国际地位”，POSCO 总裁权伍俊介绍了 POSCO 在社会维度的排名，其比较的内容包括（按百分数计进行比较）道格琼斯可持续性发展指数、社会维度、人力资源和社会贡献等。在与 Tata steel、中国钢铁、Autokupumo 比较中，POSCO 排第一。通过碳信息披露项目，由全球可持续发展机构进行评比，参与的钢厂有 POSCO、SSAB、Thyessen Krupp、Hyundai Steel 以及 Arcelor Mittal，POSCO 仍排第一；通过世界钢动力进行评估，参与的钢厂有新日铁、钢铁动力、丹钢、谢韦尔钢铁公司、奥钢联、巴西盖尔道、日本钢铁控股公司、日本制钢所，世界钢厂的排名中 POSCO 排第一；在进行技术革新、熟练的生产工

人、产品附加值 3 项评比中，参与的钢厂有 POSCO、新日铁、纽克、钢铁动力、丹钢等国际性的钢公司，POSCO 也排名第一。展示这些国际上的竞争力，表明了 POSCO 产品的可信度和技术上的先进性。进一步通过技术方面的解决方案，主要包括 4 类：解决应用于汽车的 GIGA 钢（尤其是带涂层）的焊接性能；对新开发的高锰钢，进行零件设计及前瞻性应用研究，如针对用于 LNG（液化天然气储罐）进行优化设计和模拟；在建筑方面展示了高强度丝棒材的应用；对于一些高性能钢的应用，展示了零部件的功能分析。通过上述分享依次展示 POSCO 新技术创新和新材料应用的 EVI 解决方案。在商业方面的解决方案包括共同建立合资公司，节约运输费用，联手开发市场，进行资金支持，产品的迅速配送等。在应用技术方面从成形技术、涂层技术、焊接技术、零件的功能评价等方面和用户进行合作。由此可见，POSCO 进行的是全方位的解决方案，从硬件到软件，从技术到商业支持，POSCO 的 EVI 工作做到了极致。

在 POSCO Global EVI Forum 2018 国际会议上，POSCO 新任总裁 Choi Jeong - woo（崔政宇）作为大会主席致欢迎词。2018 年正值 POSCO 建成 50 周年，崔总裁在欢迎词中讲到“2018 年 POSCO 钢铁已经走过了 50 年的里程，在过去的 50 年中，POSCO 的客户都与 POSCO 一起前进，50 年前，我们在 Yeongil 海湾的空地上建立了 POSCO 钢厂，以无私的精神奉献于韩国的经济发展，虽然我们是一个从一无资金、二无技术和经验仓促组建的公司，但是我们成功地战胜了许多挑战，并成为具有尖端技术的世界领先的钢铁制造者。因此，今天 POSCO 站在这里，特别感谢客户无私的支持和奉献。下一个 50 年，POSCO 将秉承用户的成功就是我们的明天，在与用户共同成长的同时，POSCO 将成为你真诚的合作伙伴，我们将通过开发和创新，给用户最好的产品和满足用户需求的精细的解决方案。我们秉持与客户、供应商和合作伙伴一起创造价值，共同建设一个更美好的社会。基于创造、信任和创造力的企业文化三大支柱，将 POSCO 打造成百年老店。我们邀请在座的各位，与 POSCO 一起开拓前进的新征程”。在开幕式上，世界钢铁协会总干事 Edwin Basson 做了题为“钢——未来最好的材料”的主旨报告。这与钢铁材料的特殊性能有密切关系：一是钢铁材料在生产中可以有效地利用资源，即高效生产；二是在生产中可以进一步管理环境低碳低能生产；三是钢铁材料可以循环再生利用；四是可以再制造并最终参与材料的再循环。此外，钢铁材料作为未来的基础材料，还有一种已被广泛运用、但未被承认的性能，那就是钢铁材料可在复杂结构中作为一种框架而成为这种结构稳定在一起的一种结构和力量，钢铁材料几乎可与所有的材料共同工作。目前所提出的，零能量的

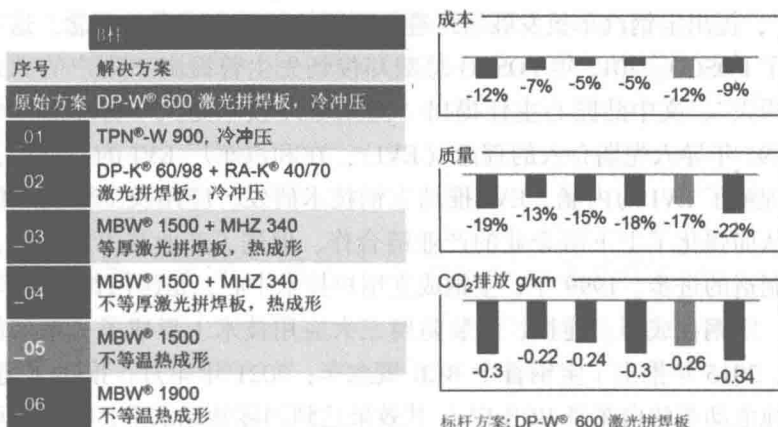
建筑就取决于钢材的这一性能。在汽车分会场的报告中, POSCO 提出了 GIGA 钢的概念, 以它作为汽车轻量化和安全性的解决方案和用材, 并对新能源汽车用材的发展趋势进行了论述。当应用超高强度钢实现新能源汽车轻量化时, 要解决用户应用技术方面的问题, 包括氢脆抑制、液态金属脆性的抑制、冷成形时零件的回弹和模具的磨损等。在解决这些问题时, 强调主机厂、材料商、零部件厂的共同合作, 才可以用好这一经济环境友好型的材料, 会议还就电动车的材料进行了论述和交流。POSCO 的电动车材料有些已超出钢铁材料范畴, 如包裹高能量密度的电池包, 用 POSCO GIGA 钢制成的电池包以及 POSCO 高能量密度的 Li、Ni、Co 电池材料, 快充长寿电池材料等。在这次会议上, POSCO 还特别强调了 EVI 的拓展应用, 如热轧板、冷轧板在智能化的高层建筑、桥梁、模块化装配式建筑上的应用, GIGA 钢系列汽车用钢 (包括白车身、门环, 新型的 1180 冲压 B 柱), 表面质量更高的车身外板, 更经济更实用的保险杠, 轻量化安全的车身稳定杆, 以及高耐腐蚀的 ZnMgAl 涂层, 减重 20% 以上的 POSCO 悬架系统等。新兴的电动车材料, 包括在高频情况下, 低芯损失和高强度的电磁材料, 轻量化的风电能源材料, 氢燃料电池包材料, 以及各种钢丝和线棒材。这类线棒材具有高强度、高延迟断裂抗力, 零件的性价比高, 热处理简单。同时, 其特别提出洁净的高强度钢, 同时也展示了锌镍涂层代替不锈钢在家电中的运用。

在这次全球 EVI 论坛上, 还展示了大量的实物零件和成品, 以说明韩国 POSCO EVI 技术在各个钢铁运用领域的特点, 给人以强烈的视觉冲击。

国际钢协在未来钢车身的项目 (FSV) 中, 对 EVI 活动也进行了系统的展示^[18,19], 包括开发的位置、概念设计、详细设计、材料和功能性的设计以及功能的验证, 使白车身的质量减轻 35% 即 102 kg。在连接工艺中, 采用了点焊、激光焊等连接方法。在功能评价中, 进行了美国 N-UCAP 的前撞、欧洲 E-NCAP 的前偏置碰、美国 FMVSS 的后撞、2HS 的侧撞、FMVSS-214 柱撞、FMVSS-216 背顶压溃, 都取得了较好的效果。

蒂森公司的 Incar 项目^[19,20]也是国外企业进行 EVI 项目的一个典型案例。该项目的特点是同一个典型零件给出多种解决方案, 同时还进行轻量化效果和二氧化碳的评估。以 B 柱为例, 原方案零件采用 DP[®]-W 600 激光拼焊板冷冲压制备, 以这一方案作为比较的基础, 提出了 6 种方案, 比较了成本、质量、二氧化碳排放, 相关结果如图 1 所示。

ArcelorMittal 在进行 EVI 活动时, 以概念车展示作为一种模式。在制作这一标杆车时, 选定了欧洲、北美的 C 级车作为标杆车, 制作的概念车称为 S-in motion^[19,21]。其轻量化的解决方案包括: 采用先进高强度钢、热冲压成

图1 B柱的EVI(成本、质量、CO₂排放)方案对比

形钢, 激光焊接板、管材、长材, 使白车身和底盘质量减少 73 kg (减重率 19%); 车辆使用时产生的二氧化碳排放量减少 13.5%, 不增加成本也并不影响车辆的安全性; 和标杆车相比, 试用阶段的温室气体排放可减少 CO₂ 排放 6.3 g/km。该公司 EVI 的另一特点是, 大量应用热冲压成形零件, 白车身上应用的零件高达 29 个, 同时应用了刚度和轻量化效果更好的激光拼焊门环。

在国内企业中, 宝钢是开展 EVI 工作较早的企业。2011 年, 召开了首次国内 EVI 会议, 此后召开多次 EVI 会议, 对用户提供更全流程的系统化和个性化的支持。在材料技术方面, 提出选材优化技术; 在工艺技术方面, 进行现场工序优化、成形优化和配料优化, 并采用各种先进的制造技术; 在设计技术方面, 采用文件设计技术、零件 CAD 技术和对成形轻量化优化的 CAD 分析技术, 进行敏感分析和成形分析, 并提出了一揽子先进高功能零件的解决方案和储备知识, 以及协同开发技术。2015 年开始制造宝钢的 BCB 型概念车, 用于 EVI 服务和展示, 选用的标杆车为一款国际上比较好的 B 级车, 白车身的设计质量为 273 kg, 高强度钢设计比例达到 77.3%, 零件个数为 309 个, 轻量化系数实测为 2.7, 被动安全的碰撞为五星级, 白车身的保护得分为 23.98, 满足五星级碰撞要求, 实测白车身质量为 284.1 kg, 车身减重率 11%。其在实现轻量化的同时, 提升了白车身的相关性能, 在全国取得良好的示范效果。

3 EVI 发展的预期

在第三届中国汽车 EVI 及高强度钢氢致延迟断裂会议召开前夕, 曾对宝钢的汽车用钢、国家重点实验室主任陆匠心进行了采访, 他详细论述了宝钢 EVI 的进展, 主题为“产业合作与创新纪实——宝武 EVI: 提供用户满意的解