

中国汽车EVI及高强度 钢氢致延迟断裂研究

中信微合金化技术中心

中国汽车工程研究院股份有限公司 编



北京理工大学出版社



中国汽车 EVI 及高强度 钢氢致延迟断裂研究

中信微合金化技术中心 编
中国汽车工程研究院股份有限公司

 **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

中国汽车 EVI 及高强度钢氢致延迟断裂研究 / 中信微合金化技术中心, 中国汽车工程研究院股份有限公司编. —北京: 北京理工大学出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-5682-5001-6

I. ①中… II. ①中…②中… III. ①汽车-金属材料-延性断裂-研究
IV. ①U465

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 282074 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) 68948351 (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 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 21.5

字 数 / 368 千字

版 次 / 2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 168.00 元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

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

《中国汽车 EVI 及高强度 钢氢致延迟断裂研究》

编 委 会

主 任：马鸣图 郭爱民

副主任：路洪洲 周 佳

主 审：路洪洲

编 委（按姓氏字母排名）：

Amado Rodrigo 蒋浩民 胡 军

刘春海 罗兴宏 缪心雷 吕 超

曲新军 师彦春 宋磊峰 王立生

王 勇 王建锋 王毛球 王文军

王智文 张永青 赵清江 赵 岩

Rodolfo Ribeiro Marcelo Scuccuglia

Felippe Barbosa

第一届中国汽车 EVI 及 高强度钢氢致延迟断裂会议 组 委 会

大会顾问：翁宇庆 付俊岩 陈一龙 Marcos Stuart

大会主席：郭爱民 马鸣图

学术委员会（按姓氏字母排名）：

Jian Bian	Yi-sheng Chen	陈云霞	
陈一龙	陈 宇	褚东宁	崔 阳
单智伟	董 瀚	郭爱民	付俊岩
韩志勇	胡 军	黄 健	惠卫军
江社明	蒋浩民	金建伟	金学军
康 明	李守华	李书瑞	李彦波
李志伟	林建平	刘 波	刘春海
刘仁东	刘献栋	刘永刚	刘正东
鲁后国	陆匠心	陆 博	路洪洲
罗兴宏	Hardy Mohrbacher	马芳武	
马鸣图	缪心雷	任 鹏	唐玉刚
田杰平	王 利	王 勇	王登峰
王建锋	王毛球	王文军	王昭东
王智文	韦 旋	韦富高	翁宇庆
熊 飞	易红亮	张 建	张永青
张 跃	赵 岩	周 佳	

第一届中国汽车 EVI 及 高强度钢氢致延迟断裂会议 组织机构

主办单位：

中信微合金化技术中心

中国汽车工程研究院股份有限公司

合办单位：

中国科学院金属研究所

宝钢股份中央研究院

宝钢汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室

鞍钢蒂森克虏伯汽车钢有限公司（TAGAL）

北京钢铁研究总院

中信戴卡股份有限公司

支持单位：

中国汽车工程学会材料分会

中国机械工程学会材料分会

通用汽车中国科学研究院

北汽集团新技术研究院

前 言

汽车轻量化和安全性等的提升，致使高强度钢和超高强度钢及先进成形技术的应用迅速增长，也要求原材料企业及零部件企业能够具有 EVI 能力并为主机厂提供解决方案。EVI，即 Early Vendor Involvement，是指上游材料和零部件供应商对下游客户的新产品开发先期介入模式，充分了解下游客户对上游产品性能的要求，从而为下游客户新产品开发提供更优的产品和个性化服务。同时，随着高强度钢的大量应用，与高强度钢应用相关的氢致断裂问题时有发生，给汽车、桥梁、轨道等其他下游行业带来安全隐患。正是在这种形式下，中信微合金化技术中心和中国汽车工程研究院决定联合组织第一届中国汽车 EVI 及高强度钢氢致延迟断裂学术会议，并邀请业内专家撰写研究报告以出版成集，旨在增进上下游企业的技术沟通和相互了解，推动汽车整车企业、零部件企业、钢厂、高等院校、研究院所之间的紧密合作，以期上下游一道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，深入认识高强度钢氢致延迟断裂的本质，进一步明确其在汽车中应用时的影响。本次会议及本书的出版得到了翁宇庆院士及业内专家学者的大力支持，同时得到了中国汽车工程学会材料分会、中国机械工程学会材料分会、通用汽车中国科学研究院、北汽集团新技术研究院等的大力支持，特代表主办单位表示感谢！

本书即为本次大会的优秀论文结集，同时也是近年业内汽车 EVI 技术及氢致延迟断裂技术最新进展的研究性著作。本书的深度研究报告的征集得到了汽车行业及钢铁行业上下游单位和广大科技人员的广泛响应和积极支持，包括主机厂、钢铁企业、零部件企业、科研院所的稿件，同时邀请并收到了英国、日本和新加坡的学者的稿件，在此表示诚挚的感谢。由于出版印刷周期及论文审稿等时间有限，经学术委员会专家评审，仅将会议前期征集的部分优秀论文进行结集出版，共计 36 篇，合计约 36 万字，主要涉及 EVI 模式合作、EVI 解决方案、氢致延迟断裂等内容。

由于时间较紧，疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

中信微合金化技术中心
中国汽车工程研究院股份有限公司
2017 年 10 月

目 录

EVI 技术篇

EVI 和先进高强度钢的发展	3
中信金属汽车 EVI 模式的发展脉络及展望	15
多尺度生态系统框架下的技术创新加速先进高强钢在汽车轻量化上的应用	24
白车身外覆盖件烘烤凹陷缺陷解析及应对措施	35
汽车轻量化工作的科学开展	42
基于 CAE 方法的超高强钢前围板中间横梁工艺优化	49
基于灵敏度法的汽车零部件结构轻量化设计	58
热成形钢冷弯失效分析	69
轿车运输半挂车轻量化设计及仿真分析	76
顶盖后横梁的 EVI 轻量化方案	86
Nb 微合金化对高强汽车板簧用钢组织和性能的影响	92
Mn-Ti 系和 Nb-Ti 系 700 MPa 级大梁钢的组织性能对比研究	99
超高强钢帽形梁轴向压溃试验与有限元分析	109
电阻点焊冲击测试技术发展展望	119
基于 Autoform 的高强钢汽车横梁成形工艺优化研究	129
激光拼焊技术的全景天窗加强框轻量化设计	135
超高强钢在汽车座椅骨架上的应用	141
快冷、超声处理对原位自生 TiB_2/Al 复合材料组织影响的研究	152
先进高强钢板开发和应用于矿山自卸车轻量化设计	160
汽车用 GA、Zn-Al-Mg 镀层钢板的点焊和腐蚀性能对比研究	170
弯曲汽车地板纵梁拉延件的回弹特点分析研究	177
IF 钢硬化模型及成形极限曲线试验研究	185
铌元素对双相钢 DP780 组织的影响	194
1 000 MPa 级 Nb 微合金化双相钢连续退火工艺研究	199

氢致延迟断裂技术篇

热成形钢抗氢脆性能研究	211
以原子探针技术表征钢中的氢捕捉行为	219
铌微合金化对热冲压成形钢氢致延迟断裂的影响	227
铌和塑性变形对 30MnB5 钢氢致滞后开裂性能影响	240
基于成形工艺的高强钢氢致延迟断裂敏感性评价方法研究	253
超高强汽车用钢延迟断裂性能影响因素与评价方法概述	265
Ti 和 Mo 对 22MnB5Nb 氢致滞后开裂性能的影响	273
高强钢氢致延迟断裂研究进展	285
Nb 元素对超高强热成形钢氢致开裂敏感性的影响	305
沉淀强化马氏体钢中的氢陷阱	313
高强钢氢致延迟断裂行为及其影响机理	315
发动机球墨铸铁曲轴失效分析	323



EVI技术篇



EVI 和先进高强度钢的发展

马鸣图¹ 赵 岩¹ 路洪洲² 宋磊峰¹

1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 401122

2. 中信微合金化技术中心, 北京, 100004

【摘 要】 本文概述了 EVI 的意义和发展, 介绍了世界上一些典型钢铁企业的 EVI 活动的内容, 分析了 EVI 活动和高强度钢、先进高强度钢的发展关系, 对钢铁企业进行 EVI 活动的条件提出了建议, 同时分析、认识了开展 EVI 活动的重要意义。

【关键词】 EVI 高强度钢和先进高强度钢 EVI 活动条件和要求

EVI and Development of AHSS

Ma Mingtu¹ Zhao Yan¹ Lu Hongzhou² Song Leifeng¹

1. China Automotive Engineering Research Institute CO. ,
LTD, Chongqing 401122

2. CITIC Microalloying Center, Beijing, 100004

Abstract: Significance and development of EVI are reviewed. EVI activity contents of the typical iron and steel enterprises in world are introduced. It is analysis that relationship between EVI activity and development of HSS and AHSS. The condition and requirements for iron and steel enterprises are suggested in order to carry out EVI activity. Meanwhile, The important significance for developing EVI activity was analyzed and cognized.

Keywords: EVI; HSS and AHSS; Condition and requirement of EVI activity

1 概述

EVI 英文为 Early Vendor Involvement, 原意为供应商对用户开发新产品的先期介入模式, 它来源于对材料生产企业的质量服务体系和对客户应用的支持系统, 进一步发展成为通过技术支持用户新车型的开发, 逐步形成了 EVI 的工作流程和模式^[1]。对汽车材料供应商和汽车生产单位来说, 通过技

术合作材料供应商支持汽车公司新车型的开发,这一过程首先材料供应商进行技术展示,然后进行新工艺、新技术的展示,并了解用户对新材料的需要,通过材料供应商的质量服务团队和用户研究实验室的相关活动,提出零件用材的建议、材料的成形性分析和模拟、正确的设计规定和说明,并确定新材料的开发计划,并通过不断地更新开发计划,最终通过用户工程师认可,使材料得到最终应用。目前 EVI 已形成的工程流程是参与新车型开发的材料的建议,进行零部件的优化设计和成形性的模拟分析,零部件的原型制造,再经过有关的试验和性能测试后,进行批量生产;现已成为对用户的新服务模式——EVI 的流程的材料开发和供应。因此,EVI 取得的结果就是材料供应商和用户新产品开发的双赢模式。

目前,EVI 已经发展成为在新车开发过程中,一整套的集成解决方案。汽车用户新车开发的程序通常为制订新车开发的计划,进行优化设计,典型零件的原型制造,性能检测和进行批量生产。EVI 活动介入这个过程时,包括为用户提供新车开发所需用的各类材料和先进成形工艺的相关信息,从而根据用户的设计需求,提出材料选择的方案,并对典型零件给用户提供了优化设计和分析模拟等方面的支持;在零件试制过程中,支持用户新技术的应用,包括先进的成形技术、连接试验等;在用户批量生产的过程中,给予用户产品质量的保证,并和用户加强合作,进行新产品的市场开拓和给予营销方面的支持。EVI 活动起源于汽车用钢和汽车新车型开发之间的合作关系,但目前 EVI 的概念已经拓展到工程建设、能源、重型机械、电力电子等领域。

2 EVI 活动的发展

EVI 活动先后经历了四个阶段^[2]。第一阶段是开发用户所需要的产品,包括普通高强度钢和一、二、三代先进高强度钢,即第一代先进高强度钢有双相钢、复相钢、TRIP 钢、马氏体基钢和热冲压成形钢,其强塑积为 $15\ 000 \sim 20\ 000\ \text{MPa} \cdot \%$;第二代先进高强度钢为高锰钢和不锈钢,为孪生诱发塑性钢,强塑积为 $60\ 000\ \text{MPa} \cdot \%$;第三代先进高强度钢,为马氏体级或回火马氏体级的 TRIP 钢,有 Q&P、BCC+FCC (中锰钢)、Q&PT 钢、纳米贝氏体钢、 δ -TRIP 钢,其强塑积为 $30\ 000 \sim 40\ 000\ \text{MPa} \cdot \%$,各钢类的强度和延性的关系如图 1 所示^[3];发展的第二阶段是在汽车企业零件制造中,如何对用户进行帮助,即产品开发的先期介入模式 (EVI),材料供应商对汽车企业新开发的零件提出用材的建议,并和汽车企业一起对零件进行优化设计、计算机模拟和分析,同时提出零件制造时应采用的先进的成形工艺,并通过材料

性能对零部件的使用功能进行预测和评估，达到既优化设计、轻量化，又取得零件高的性价比，用材和工艺均能达到批量生产的要求；EVI发展的第三阶段是钢铁企业如何使用户快速地应用新的钢铁产品，将钢产品的开发与汽车产品的开发有机地融合在一起，这会使钢铁企业产品的目的性更强，所开发的产品可针对用户的需求，双方达到EVI的深度合作和发展共赢；第四阶段是由钢材的供应商转变为解决问题的合作伙伴。解决问题的营销模式包含以下几个方面，首先是两个大的方面，其一为硬件，提供各种合适的钢材，其二是软件，包括应用技术（成形技术、油漆技术、焊接技术、零件评价）、商业支持（即时供货、便宜的物流成本、下游商务、金融支持）。在全球各地设立研发中心，为用户进行互联网服务（成形模拟、材料建议、技术服务、用户工艺支持）。以980 MPa级别钢板为例，说明应用技术（设计、焊接）到超高强度零件在新车型上的应用；设立合资公司，浦项将提供解决问题的研发部、全球网络、限额投资，零件生产部门将提供零件的开发、零件生产和工艺、工业信息。另一种模式是高强度钢汽车零件制造的合作商业模式：浦项的剪裁配送中心+零件的供应商。这样就非常密切地融合了材料生产者或技术提供者与用户的关系。浦项这种为用户服务的营销模式，值得我们思考和借鉴。

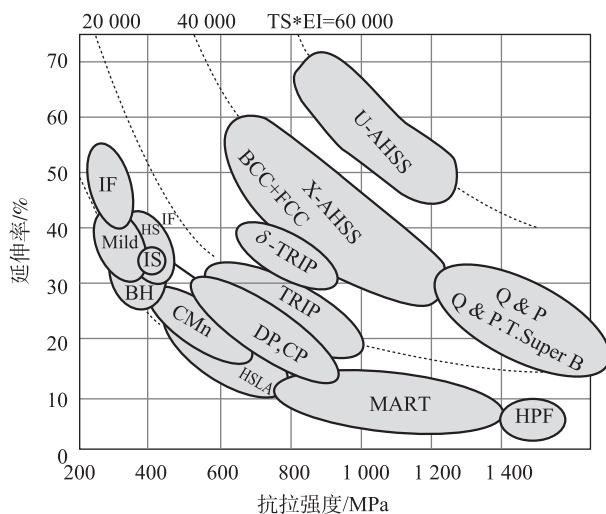


图1 典型高强度钢强度和延伸率的关系

3 在新车开发中的 EVI 活动

新车的开发流程和各阶段的 EVI 活动的示意如图2所示^[4]。

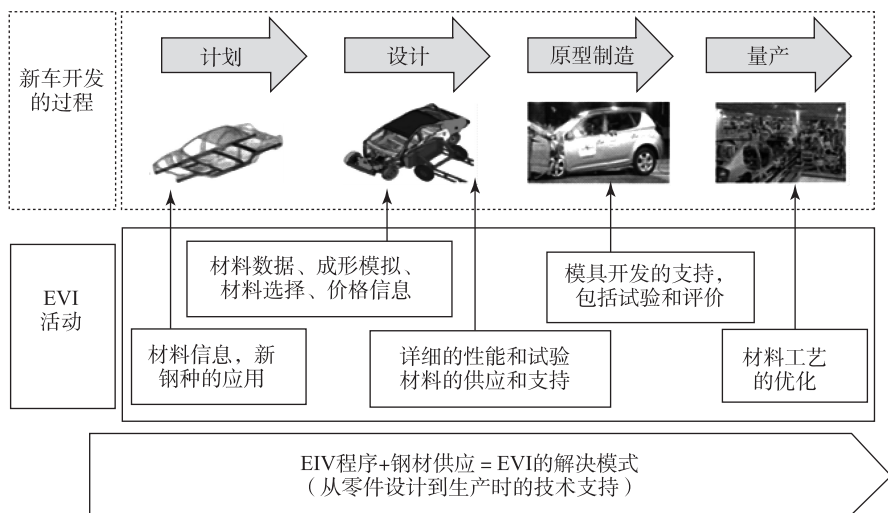


图2 新车的开发流程和各阶段的 EVI 活动的示意

图2形象地指出了用户新车开发时各个阶段材料供应商相关的 EVI 活动。浦项公司进一步将 EVI 活动组成部分细化^[1], 包括同时工程 (CE—Concurrent Engineering, 优化材料的建议和新钢类的开发)、价值工程 (VE—Value Engineering, 运输系统的改进使材料的供应成本下降)、价值创新 (VI—Value Innovation, 材料的改变减少成本)、零件和用材的建议 (PP—Part Proposal, 在车辆运行条件改变时, 及时对零件的用材提出建议)。

未来钢制车身开发的 EVI 活动的流程如下: 首先是开发计划和定位, 包括减重效果、绿色环保、满足法规要求和材料的回收利用、可持续的生产增长、成本与原标杆车相比持平或降低。然后进行概念设计, 包括确定总体方案、外观造型优化, 重点考虑风阻和流场影响, 进一步进行多目标静态拓扑优化, 包括白车身的刚度、强度、模态和简化碰撞性能, 并通过 CAE 分析, 驱动 CAD 的优化设计。在详细设计阶段, 要进行多种拓扑优化设计方案, 并根据性能的目标, 对拓扑方案进行优选, 同时对车辆的动态性能, 包括 NVH 性能、动态刚度、疲劳、传力载荷、碰撞等性能进行拓扑优化, 最终确定拓扑优化的设计方案。在材料与工艺设计阶段, 通过深入分析每个子系统的零部件, 以及和减重目标的融合, 达到或实现合适的材料、合适的工艺用在合适的地方。在性能验证阶段, 包括测定白车身的刚度、白车身的模态、白车身的强度、白车身的疲劳, 进行前撞、后撞、侧撞、柱撞、顶部压溃和翻滚等试验项目。在检测之后进行评定, 如各项指标均符合要求, 则可以进行批量试制和量产。

4 国内外典型企业的 EVI 活动

韩国浦项公司是最早提出 EVI 的概念，并开展相应的 EVI 的活动企业，从 2008 年至今，已召开过 5 次全球 EVI 论坛（POSCO Global EVI Forum），每年都有不同的主题，参加人员过千人。

2008 年的主题是开发用户需要的产品，其 EVI 的理念是用户第一。如浦项公司曾开发了多相烘烤硬化钢（MP-BH 钢）^[5]，这类钢比一般烘烤硬化钢的强度更高，抗拉强度达到 590 MPa，用于前翼子板和其他覆盖件可达到减重效果，翼子板可从 0.65 mm 减到 0.5 mm，减重率为 23%。烘烤硬化性能大于 80 MPa，从而提高了凹痕抗力，快速冷却时，可以应用氢。这类钢的性能和 DP590 的比较如图 3 所示。

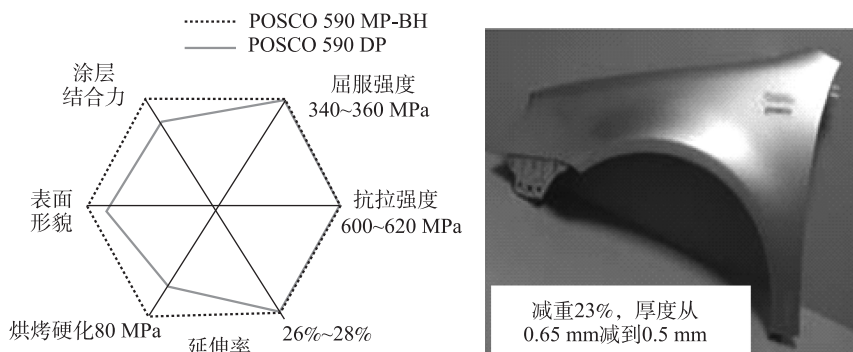


图 3 MP-BH 钢与 DP590 性能比较

为了满足用户对涂层板性能的要求，对 GI 板的涂层性能进行了改进，开发了 GI-ACE 镀层板，同时开发了耐腐蚀性更好的 Zn-Mg 涂层板，它们的性能和 GI 板的对比如图 4 所示。

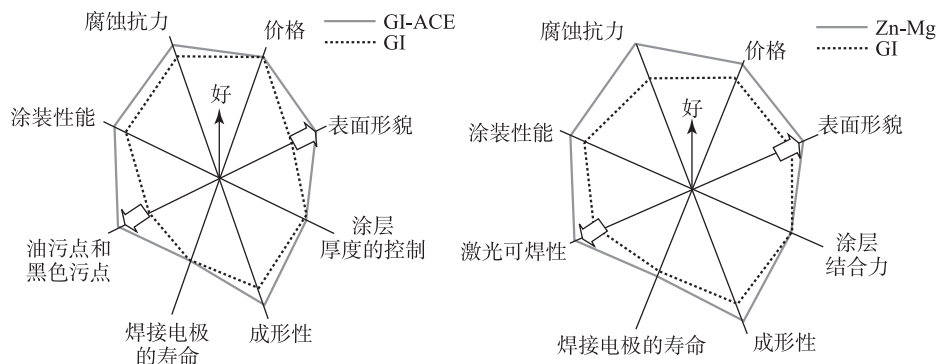


图 4 GI ACE 镀层板、Zn-Mg 涂层板与 GI 板的性能对比

为了满足热冲压成形发展的需要，浦项优化了热冲压成形板的 C、Mn 含量，得到了抗拉强度 1 470、1 800 和 2 000 MPa 的热冲压成形钢，其相关性能对比见表 1^[6]。为了解决热冲压成形钢加热时的氧化问题，浦项公司开发了室温变形性能好、抗氧化、具有薄涂层进而具有良好点焊性能的纳米热冲压涂层板；浦项和意大利的菲亚特公司合作，开发了 TWIP 钢，用于制作菲亚特车辆的保险杠；开发了良好翻边延性的 TRIP 钢，用于制造车轮，均取得了良好的效果。

表 1 浦项热冲压成形钢系列的性能

级别	HPF (900 ℃, 6 min)			HPF+BH (170 ℃, 20 min)		
	YS/MPa	TS/MPa	El/%	YS/MPa	TS/MPa	El/%
1 470	1 080	1 490	7. 4	1 270	1 520	7. 1
1 800	1 240	1 830	6. 8	1 440	1 770	6. 2
2 000	1 320	2 060	5. 7	1 560	1 950	5. 4

2010 年的主题是研究在零件制造中如何采用先进技术对用户进行帮助，开发用户满意的汽车零部件，包括热冲压成形、液压成形、辊压成形、激光拼焊板，以及提供先进的焊接技术和工艺参量等^[7]。

2012 年的主题是如何使用户快速地应用新的钢铁产品，将钢种开发与汽车产品的开发融合在一起（EVI 深度合作）。在新产品开发中，将材料的成形性、焊接性、油漆性、疲劳性能全面展示给用户^[4]。

2014 年的主题是由钢材的供应商转变为解决问题的合作伙伴，营销和技术的融合支撑解决问题的营销策略，从而使用户取得成功。完整的市场解决方案是硬件支持提供用户所需要的钢材+软件支持，包括钢材的应用技术（成形技术、焊接工艺、涂装技术、零件评价）和商用支持（快速反应的供货系统、廉价的物流成本、下游的商务活动和资金的支持），直到建立合资公司。借助于浦项的解决问题的开发部门，全球的网络和配额投资、零件的开发、零件产品的操作与生产、工艺信息等，都支持合资公司的建设和运行^[2]。

2016 年的主题是：浦项，你未来的合作伙伴。全面展示浦项公司的实力和在全球的地位，并用新能源汽车、轻量化白车身、轻量化皮卡车的研究成果展示了浦项 EVI 活动的新进展^[8]。

Thyssen 公司的 Incar 项目是该公司进行 EVI 活动的成功展示项目^[9]，该项目的一个重要特点是同一个零件给出多种解决方案的比较，展示出多种方案的成本、重量和 CO₂ 排放。该公司还提出根据用户的典型构件改进的需求，进行相关的 EVI 活动，并取得良好效果。以 B 柱为例，多种方案的比较如图 5 所示。用户可根据自身的需要，选择实施的方案。