

超低碳烘烤硬化钢

烘烤硬化性能的稳定控制

■ 崔 岩 马劲红 姬爱民 张荣华 著



冶 金 工 业 出 版 社
Metallurgical Industry Press

超低碳烘烤硬化钢 烘烤硬化性能的稳定控制

崔 岩 马劲红 姬爱民 张荣华 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2014

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了化学成分和冶金生产工艺对超低碳烘烤硬化钢(简称 ULC-BH 钢)钢板组织和烘烤硬化性能的影响规律,剖析了这些影响规律之间的联系及形成机理,为生产高品质、高合格率的工业产品提供了工艺和理论依据。全书以生产工艺为参考分析材料的组织结构和性能的动态变化及其联系,力求结合实际工业化生产条件,对于不同成分体系的超低碳烘烤硬化钢的理论研究、产品开发和工艺优化具有一定的参考价值。

本书可供钢铁材料研究、生产单位的专业技术人员及高等院校相关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

超低碳烘烤硬化钢烘烤硬化性能的稳定控制/崔岩等著.
—北京:冶金工业出版社,2014.8
ISBN 978-7-5024-6682-4

I. ①超… II. ①崔… III. ①低碳钢—沉淀硬化钢—
硬化—稳定性—研究 IV. ①TG142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 177326 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 [www. cnmp. com. cn](http://www.cnmp. com. cn) 电子信箱 yjcs@cnmp. com. cn

责任编辑 常国平 美术编辑 杨 帆 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6682-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2014 年 8 月第 1 版,2014 年 8 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 5.125 印张; 150 千字; 150 页

28.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

继国务院 2009 年 1 月中旬《汽车行业调整振兴规划》的出台和逐步实施,我国汽车工业呈现出超速发展的良好态势。到 2013 年年底,我国汽车保有量达到 1.37 亿辆,未来还会继续大幅增加。汽车是能源消耗大户,约占燃油消耗的 60%,而我国在 2013 年消耗的石油量的 58.1% 依赖于进口,由此可见,汽车消耗对能源安全有重要影响。近年来,地球温室效应日益加剧,世界各国都在积极研究节能减排的相关举措。车辆交通是我国温室气体排放和雾霾的主要来源,汽车作为车辆交通的承载者,它的节能、减排、安全性能等方面日益受到普遍的关注。尤其对汽车车身部件的要求,呈现两大趋势:一是为提高撞击安全性而要求高强度化;二是为降低汽油消耗而要求轻量化。基于此,各大汽车生产商逐渐应用强度越来越高的汽车钢板。有报道认为^[1],汽车车身重量每降低 1%,可节省燃油 0.6% ~ 1.0%。另外,材料抗拉强度从约 300MPa 增加到约 900MPa,汽车车身减重率可从约 25% 提高至约 40%^[2]。通常,汽车外板及车身其他部件约占整车车重的 1/2,加上底盘约占整车车重 3/4^[3]。汽车车身主要用料为薄钢板,对车重有重要影响。微型车和轿车主要面板用料均为薄钢板,载重汽车消耗约占总消耗量 40% 的薄钢板。使用高强度汽车薄板可保证在减薄降重的基础上不损害抗凹陷性能,甚至提高汽车的耐久程度、大变形冲击强度和安全性。同样,使用超深冲性的汽车

薄钢板可以用于制造复杂的冲压件，在不增加整车车重的基础上，使车型外形美观，车身内空间设计优化。

进入 21 世纪以后，以无间隙原子钢（简称 IF 钢）为代表的超低碳钢（简称 ULC 钢）在汽车面板业得到了广泛应用。其中超低碳烘烤硬化钢（简称 ULC-BH 钢）由于具有优异的成型性、高强度和高抗凹陷性能相结合的综合性能而备受汽车工业的青睐，但由于该钢种生产工艺复杂、成分控制精度要求较高，在我国许多钢厂生产时存在产品合格率偏低、烘烤硬化性能不稳定、抗自然时效性能较差等缺点，曾大量依赖进口。为了克服这些问题，作者及所在课题组开展了该领域的研究工作。作为主要研究人员，作者参与了高强度 IF 钢、超低碳烘烤硬化钢的研究课题，其中对超低碳烘烤硬化钢进行了全面综合的试验研究工作。本书就是依据作者多年对 ULC-BH 钢板的试验研究成果和体会而撰写的。它全面、系统地介绍了化学成分和冶金生产工艺对 ULC-BH 钢板的组织和烘烤硬化性能的影响规律，系统剖析了这些影响规律之间的联系及形成机理，为优化工艺以生产高品质、高合格率的工业产品提供工艺和理论依据。

全书分为 6 章。第 1 章概括介绍了 ULC-BH 钢板的发展历程，重点介绍了 ULC-BH 钢板的性能、用途、发展和烘烤硬化机理等。本章由崔岩、张荣华撰写。第 2 章主要介绍了 ULC-BH 钢板的冶金成分控制，探讨了不同微合金元素对奥氏体和铁素体相区固溶碳含量的影响。本章由崔岩、姬爱民撰写。第 3 章主要论述了化学成分、热轧、连续退火和平整工艺等对 ULC-BH 钢板烘烤硬化性能的影响。本章由崔岩撰写。第 4 章主要论述了不同钛/氮原子比的铌钛复合 ULC-BH 钢板第二相的固溶析出行为，分析了 Ti 元



素的成分波动对固溶碳含量的影响。本章由崔岩撰写。第5章进一步论述了连续退火工艺过程中碳原子的固溶析出行为和晶界偏聚行为,并探讨了连续退火工艺参数波动对有效固溶碳(影响烘烤硬化性能)含量的影响。本章由崔岩撰写。第6章主要论述了影响碳原子晶界偏聚行为的晶粒尺寸的影响因素,为工业化生产过程中通过控制成分和工艺参数稳定化控制碳原子的晶界偏聚提供参考。本章由崔岩、马劲红撰写。

本书在写作过程中得到了雍岐龙教授和王瑞珍教授的悉心指导和帮助,也得到了河北联合大学李运刚教授和冯运丽教授的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中不当之处,敬请广大读者批评指正!

作 者

2014 年 5 月

于河北联合大学



常用符号

- α_0 —— 点阵常数
 A —— 断后伸长率
 A_e —— 屈服点伸长率
 A_g —— 最大力非比例伸长率
 A_{gt} —— 最大力总伸长率
 A_1 —— 平衡状态下奥氏体向铁素体转变完成温度, $^{\circ}\text{C}$
 A_3 —— 平衡状态下奥氏体向铁素体开始转变温度, $^{\circ}\text{C}$
 A_{c_1} —— 升温时奥氏体向铁素体转变完成温度, $^{\circ}\text{C}$
 A_{c_3} —— 升温时奥氏体向铁素体开始转变温度, $^{\circ}\text{C}$
 A_{r_1} —— 冷却时奥氏体向铁素体转变完成温度, $^{\circ}\text{C}$
 A_{r_3} —— 冷却时奥氏体向铁素体开始转变温度, $^{\circ}\text{C}$
 BH_0 —— 烘烤硬化值 (无预应变), MPa
 BH_2 —— 烘烤硬化值 (2% 预应变), MPa
 c_g —— 溶质原子在晶界内的偏聚浓度
 c_0 —— 基体内溶质原子的平衡固溶浓度
 D —— 晶粒的等效直径, μm
 $D_{C-\alpha}$ —— 溶质元素 C 在铁素体基体中的扩散系数
 ΔG_l —— 偏聚自由能, kJ/mol
 h —— 晶界偏聚层厚度
 n —— 应变强化指数
 n_0 、 n_{45} 、 n_{90} —— 0、45、90 表示拉伸试样的取向与轧向之间的夹角
 $\bar{n}$ —— 应变强化指数在不同方向的平均值
 Δn —— 应变强化指数平面各相异系数
 r —— 塑性应变比
 r_0 、 r_{45} 、 r_{90} —— 0、45、90 表示拉伸试样的取向与轧向之间的夹角
 $\bar{r}$ —— 塑性应变比在不同方向的平均值



Δr —— 塑性应变比平面各相异系数

R_{eL} —— 下屈服强度, MPa

$R_{p0.2}$ —— 屈服强度 (无明显屈服点), MPa

R_m —— 抗拉强度, MPa

t —— 时间, s

T —— 温度, °C 或 K

$w(C)_{\text{unstable}}$ —— 未稳定化 C 元素质量分数, %

$wt(M)$ —— M 元素的质量分数, %

x —— 扩散距离, m

目 录

1 绪论	1
1.1 汽车用薄钢板的发展	1
1.2 超低碳烘烤硬化钢板性能	4
1.2.1 基本性能	5
1.2.2 使用性能	7
1.3 烘烤硬化钢的发展和种类	11
1.4 超低碳烘烤硬化钢板的特点、应用及国内外研究现状	13
1.5 烘烤硬化现象的物理机理	15
1.5.1 碳原子钉扎位错机制	16
1.5.2 应变时效理论	17
1.6 烘烤硬化性能的内在影响因素	22
1.6.1 钢中固溶碳的影响	22
1.6.2 晶粒尺寸的影响	23
1.7 烘烤硬化钢板的生产工艺	25
1.7.1 超低碳烘烤硬化钢板的冶炼和成分控制	25
1.7.2 热轧	37
1.7.3 冷轧	39
1.7.4 连续退火	40
1.7.5 平整	41
2 热力学计算主要元素固溶量随温度的变化	43
2.1 概述	43
2.2 应用 Thermo-Calc 对 ULC-BH 钢板固溶析出行为进行 理论分析	43

2.2.1	相变温度 A_1 和 A_3 点的确定	44
2.2.2	奥氏体相区的固溶和析出行为	44
2.2.3	铁素体相区的固溶与析出热力学计算	56
3	成分和工艺参数对烘烤硬化性能的影响	66
3.1	概述	66
3.2	实验材料和方法	66
3.2.1	实验钢化学成分	66
3.2.2	实验钢生产工艺流程	68
3.2.3	ULC-BH 钢烘烤硬化值测量	71
3.2.4	测量相变点	73
3.3	实验结果和分析	74
3.3.1	成分对 BH_2 值的影响	74
3.3.2	生产工艺的影响	75
3.4	讨论	82
3.4.1	连续退火各个参数的物理过程	82
3.4.2	讨论平整工艺各个参数的物理变化过程	86
3.4.3	探讨稳定化控制烘烤硬化性能的综合步骤	88
4	超低碳烘烤硬化钢的析出行为研究	90
4.1	概述	90
4.2	实验材料和方法	91
4.3	实验结果与讨论	91
4.3.1	析出相	91
4.3.2	析出相的定量分析	96
4.3.3	热力学计算 Ti/N 原子比对 M(C,N) 相固溶析出 行为的影响	97
4.3.4	析出物的形貌和分布	100
5	连续退火过程中自由碳的行为	105
5.1	概述	105

5.2 实验材料和方法	106
5.2.1 实验材料	106
5.2.2 实验方法	106
5.2.3 退火和晶界偏聚处理	108
5.3 实验结果和讨论	109
5.3.1 退火过程中 NbC 的回溶和析出问题研究	109
5.3.2 碳原子晶界偏聚问题研究	112
5.4 讨论	115
5.4.1 NbC 回溶的物理过程	115
5.4.2 碳原子晶界偏聚问题的探讨	117
6 超低碳烘烤硬化钢晶粒尺寸控制	123
6.1 概述	123
6.2 实验材料和方法	123
6.3 实验结果与讨论	123
6.3.1 冷轧板的再结晶和晶粒长大规律	123
6.3.2 晶粒尺寸的影响因素	128
参考文献	143

1 绪 论

1.1 汽车用薄钢板的发展

汽车薄钢板在制作汽车零件时几乎都需要冲压成型，而冲压成型能否成功取决于成型性能。成型性能不仅取决于薄钢板自身的基本性能，而且与冲压成型过程变量和设计变量有关。其中，前者是汽车薄钢板自身组织结构和形状大小的表现，与冶金生产工艺密切相关；后者是外界成型环境影响的表现，与汽车厂的冲压工艺密切相关。通常，汽车薄钢板具有一定的成型裕度，可适应一定的外界因素变化，增加成型裕度比调整冲压工艺能够更有效地提高冲压成型合格率。因此，汽车薄钢板具有优异的冲压成型性能即高的 $\bar{r}$ 值和 $\bar{n}$ 值成为生产所追求的主要目标。正是通过不断改善这一性能，促进了它的发展。

实际上，汽车薄钢板的冲压成型性能特别是深冲性能与其有利织构（即 $\langle 111 \rangle$ 晶向平行于板面法向的 $\{111\}$ 织构，又称 γ 纤维织构）的强弱紧密相关。钢板中有利织构越强，即它与不利织构（即 $\langle 100 \rangle$ 晶向平行于板面法向的 $\{100\}$ 织构）的强度比 $I_{\langle 111 \rangle} / I_{\langle 100 \rangle}$ 越大，则塑性应变比 $\bar{r}$ 的数值越高，深冲性能越好。因此，开发新的汽车薄钢板的动力之一从宏观上表现为追求更优异的深冲性能即更高的 $\bar{r}$ 值，实质上是为了获得具有更强烈发展的有利织构（即 $\{111\}$ 织构）的微观组织。纵观汽车薄钢板的发展历史，它经历了从普通冲压钢板到深冲钢板、从深冲钢板到超深冲钢板三代产品的更新换代。

以普通沸腾钢为代表的第一代产品是普通冲压钢板。它具有较弱的 $\{111\}$ 织构和几乎与之强度相当的其他织构， $\bar{r}$ 值不高，仅为1.0~1.2，深冲性能差，但较各向同性无择优取向的正火钢的深冲性能好，沸腾钢中含有较多的固溶O和N，具有明显的应变时效性。

以铝镇静钢为代表的第二代产品是深冲钢板。通过向低碳钢中加



Al 进行脱氧且通过热轧卷取温度控制和退火工艺控制 AlN 的析出, 进而控制晶粒形状 (在低温卷取和罩式炉退火后获得饼形晶粒组织), 获得较强烈的 $\{111\}$ 退火织构, 深冲性能良好, $\bar{r}$ 值为 1.4 ~ 1.8。同时, 由于 N 被固定成 AlN, 在罩式退火或连续退火以及随后过时效处理中, 绝大部分间隙固溶碳原子析出成为 Fe_3C 。所以, 经平整后性能稳定。迄今, 汽车工业所使用的各种系列的冲压钢板都是由铝镇静钢衍生和发展的。

以超低碳无间隙原子钢 (IF 钢) 为代表的第三代产品是超深冲钢板。这是 20 世纪 80 年代以来所开发的以超低碳为基本成分, IF 钢为主要代表的新一代汽车薄钢板系列产品。它具有极强烈的 $\{111\}$ 织构、纯净的钢质以及较粗大的铁素体晶粒, 从而获得超深冲性, $\bar{r}$ 值可达 1.6 ~ 2.8。目前, 世界各国都在竞相研制和生产由 IF 钢所繁衍的超低碳系列产品的汽车薄钢板。

表 1-1 为三代汽车薄钢板典型产品的性能比较。

表 1-1 三代汽车薄钢板典型产品的性能比较

类 型	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$\bar{r}$	$\bar{n}$
沸腾钢	180 ~ 190	290 ~ 310	44 ~ 48	1.0 ~ 1.2	约 0.22
铝镇静钢	160 ~ 180	290 ~ 300	44 ~ 50	1.4 ~ 1.8	约 0.22
IF 钢	100 ~ 150	250 ~ 300	45 ~ 55	1.6 ~ 2.8	0.23 ~ 0.28

20 世纪 80 年代以来, 随着能源危机和环境保护问题的提出以及日趋激烈的市场竞争, 世界汽车工业朝着轻量化、低污染、经济型的趋势发展, 尤其是轿车性能更加追求高速、安全、节能、舒适、美观、耐用等。各种新型的具有优异成型性能、高强度、耐腐蚀、耐磨、减振、抗凹陷和冲击等特殊使用功能的汽车薄钢板相继开发, 除了具有超深冲性的 IF 钢的开发之外, 用于减重、节能和提高安全性的各种高强度钢板, 提高抗凹陷性能的烘烤硬化钢板, 增强耐腐蚀性能的各种新型镀层钢板, 防止噪声和振动的复合减振板, 使轿车外观更加美观的高亮度镜面板等都成为研制的热点; 特别是一些具有综合性能的汽车薄钢板如超低碳高强度烘烤硬化钢板、超深冲高强度钢板、超深冲高强度热镀锌钢板等品种的开发同样引人瞩目。薄钢板的



研制与开发已由过去传统的单纯追求提高冲压成型性能而转向探寻使冲压成型性、强度、表面质量（粗糙度和抗凹陷性）、隔音性、耐蚀性等性能达到最佳的组合。这种性能综合的发展趋势，造就了今天汽车薄钢板生产品种的系列化。

目前，汽车薄板市场的主流产品有铝镇静钢板、无间隙原子钢、高强度含 P 无间隙原子钢、超低碳烘烤硬化钢等。普通铝镇静钢板可用于一些简单的冲压件，但现代汽车工业对汽车面板深冲性能的更高要求，需要应用冲压成型性能更高的无间隙原子（IF）钢、超低碳烘烤硬化（ULC-BH）钢板。目前由于技术、设备和生产管理等存在问题，我国钢铁企业的一些高附加值薄板的产能不足，市场供需矛盾十分突出，需要从国外大量进口。为打破国内市场对进口汽车钢板的依赖，以宝钢、鞍钢、武钢、马钢等为代表的钢铁企业正在加大力度生产和研发汽车用含 P 高强度无间隙原子（IF）钢板、超低碳烘烤硬化钢板^[4,5]等。

图 1-1 所示为目前投产或研发的各类汽车用钢的屈服强度和总伸

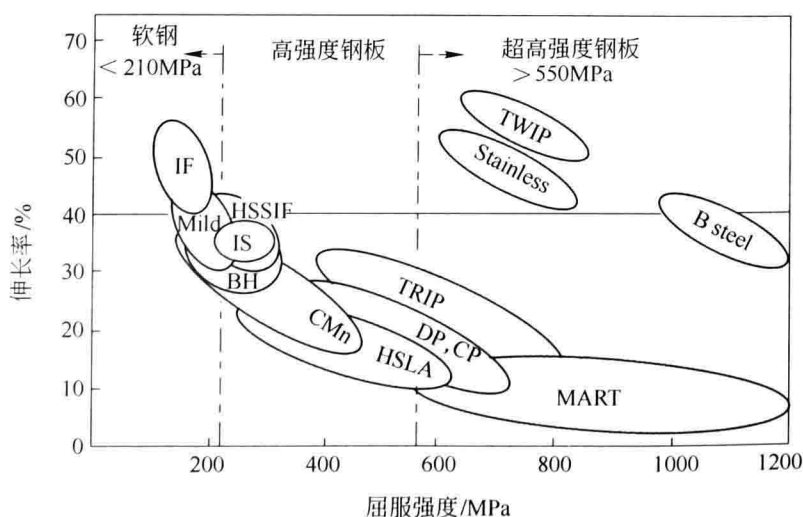


图 1-1 不同类型汽车用钢的屈服强度和总伸长率的关系

IF—无间隙原子钢；Mild—低碳铝镇静钢；HSSIF—高强度 IF 钢；BH—烘烤硬化钢；IS—各向同性钢；CMn—碳锰钢；HSLA—高强度低合金钢；DP—双相钢；CP—复相钢；TRIP—相变诱发塑性钢；MART—马氏体钢；TWIP—孪晶诱发塑性钢；Stainless—不锈钢；B steel—热冲压用钢



长率的关系^[5]，可见大部分钢伸长率随屈服强度的升高而下降。

由于软 IF 钢中间隙原子 C、N 固溶含量几乎消失为零，没有屈服点延伸现象，因此间隙原子对伸长率和 r 值的损害降到最低，满足冲压成型的要求，但由于较低的屈服强度和较差的抗凹陷性能，使其难以达到减薄降重的目的。

应用较多的高强度无间隙原子（HSSIF）钢，主要通过在不间隙原子钢中添加 P、Mn、Si 等固溶强化元素来提高强度，因此其兼具高强度和深冲性能，可以加工成复杂形状的零件并提高汽车的抗凹陷性、减轻汽车重量，符合汽车安全、减重、节能环保的要求。但是含 P 固溶强化高强钢，其抗拉强度可以达到 440MPa 级别，虽可满足一部分汽车面板零件的冲压成型要求，但由于 P 原子的晶界偏聚现象易产生二次冷加工脆性使其难以满足复杂形状冲压件的生产要求。

超低碳烘烤硬化（ULC-BH）钢板具有传统软 IF 钢优异的冲压成型要求，经烘烤处理以后具有高强度钢较好的抗凹陷性能。钢板冲压成汽车外板零件后位错密度提高，在 150 ~ 200℃ 烤漆处理过程中，基体内的自由碳原子迅速扩散并偏聚到高密度位错处钉扎位错形成 Cottrell 气团，屈服强度增加 30 ~ 50MPa。应用超低碳烘烤硬化钢板作为汽车面板材料，可以在不牺牲冲压成型性能和抗凹陷性能的基础上使汽车板比普通 IF 钢减薄 20% ~ 30%，同时可以避免高强度无间隙原子钢中 P 原子的晶界偏聚对韧性的损害，是相对较理想的汽车面板材料。但超低碳烘烤硬化钢板在国内生产中存在着许多问题，特别是产品合格率低、烘烤硬化性能不稳定是最为突出的问题。

1.2 超低碳烘烤硬化钢板的性能

超低碳烘烤硬化（ULC-BH）钢板的性能分为基本性能和使用性能两部分。基本性能是指未经深加工的汽车薄钢板所表现的材料性能，主要包括强度、塑性和韧性，一般通过单向拉伸试验所得到的性能指标加以评定。使用性能是指在深加工过程中或者深加工完成后汽车薄钢板所表现的不同于其基本性能的材料性能，主要包括冲压成型性能、抗凹陷性能、抗冲击性能、焊接性能和镀锌附着性能等，往往由专门的试验进行测定。基本性能和使用性能之间存在密切的联系。



1.2.1 基本性能

ULC-BH 钢板的基本性能有：

(1) 屈服强度（可表示为 σ_s 、 YS 、 R_{eL} 或 $R_{p0.2}$ ）：单向拉伸试验中，薄钢板首先表现出可测的永久塑性变形时的工程应力。对于具有不连续屈服现象即出现屈服点的材料，一般取最小下屈服点所对应的应力作为屈服强度（ R_{eL} ）；对于连续屈服即无明显屈服点的材料，通常用 0.2% 永久伸长变形时所对应的应力作为屈服强度（ $R_{p0.2}$ ）。

R_{eL} 值决定了薄钢板冲压成型中开始产生塑性变形时所需载荷。 R_{eL} 值越大，所需的成型力越大。但是它对薄钢板冲压成型性能影响不大。

(2) 拉伸强度（可表示为 σ_b 、 TS 、 R_m ）：单向拉伸试验中，薄钢板达到最大载荷时的工程应力。

R_m 值决定了薄钢板冲压成型时所能施加的最大载荷。 R_m 值越大，冲压成型时零件危险截面的承载能力越高，其对应的变形程度越大。在薄钢板与冲压成型性能有关的其他性能基本相同前提下，薄钢板的 R_m 值大，则它的冲压成型性能好。

(3) 总伸长率（可表示为 δ 、 EL 或 A ）：单向拉伸试验中，薄钢板在拉力作用下由均匀变形发展为集中性变形直至断裂，断裂前两种变形之间的转变点所对应的变形量称作均匀伸长率，断裂时所对应的变形量称作总伸长率。

(4) 最大力伸长率：分为最大力总伸长率 A_{gt} 和最大力非比例伸长率 A_g ，反映了薄钢板在冲压变形中开始发生颈缩时的变形量。此时变形发生在颈缩区局部，最初为分散颈缩，随后发展为集中颈缩，直至材料发生断裂。因此， A 值越大，均匀伸长率也越大，薄钢板冲压变形时发生颈缩越晚其所能承受的最大变形量越大，它的综合冲压成型性能越好。同一薄钢板在拉伸试验时，试样标距选取的不同则所得到的 A 值也不同。

(5) 屈强比（可表示为 σ_s/σ_b 、 YS/TS 或者 R_{eL}/R_m ）：薄钢板屈服强度与拉伸强度之比。

R_{eL}/R_m 值越小，表明冲压成型的薄钢板在破坏之前可进行更大的



变形和加工，特别是拉胀成型过程。因此，它的综合冲压成型性能越好，成型后零件的形状固定性也越好。

(6) 塑性应变比（可表示为 r ）：单向拉伸试验中，薄钢板宽向应变和厚向应变的增量比，即 $r = d\varepsilon_w / d\varepsilon_t$ ，由于这一比值随变形变化不大，故通常采用全量应变比来表示，即 $r = \varepsilon_w / \varepsilon_t$ 。

对于薄钢板，通常其 r 值随试样取向不同而变化，故定义它的平均值 ($\bar{r}$) 及平面各向异性系数 (Δr) 为：

$$\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4 \quad (1-1)$$

$$\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90}) / 2 \quad (1-2)$$

式中，下标 0、45、90 表示单向拉伸试样的取向与薄钢板轧制方向的夹角。

这一指标反映了薄钢板承受载荷时抵抗厚向变形的能力，即 r 值越大，薄钢板抵抗厚向变形的能力越强，可作为衡量薄钢板各向异性（主要是厚向异性的）一种量度。它与许多模拟成型性试验指标有很好的相关性，是评价薄钢板冲压成型性能的重要指标，特别是深冲性能（也称作拉深性能或压延性能）。

$\bar{r}$ 值的大小主要与薄钢板组织中晶粒的择优取向即织构有关，也就是说与薄钢板的生产和深加工工艺有关。 $\{111\}$ 织构越强， $\{100\}$ 织构越弱，则 $\bar{r}$ 值越高，它的深冲性能即压延性能越好。

Δr 值反映了板面上各方向 r 值变化的程度，它与压延成型时凸耳的大小具有密切相关性。 Δr 值大，则凸耳大；反之相反。 $\Delta r < 0$ ，拉深件凸耳在 0° 或 90° 方向； $\Delta r > 0$ ，拉深件凸耳在 45° 方向。

(7) 应变强化指数（可表示为 n ）：单向拉伸试验中，薄钢板应力-应变本构关系近似表达式 $\sigma = k\varepsilon^n$ 中的幂指数。 n 值在数量上等于或近似等于试样刚开始出现颈缩时的真实应变。

n 值随试样在薄钢板上取向的不同而变化，通常用它的平均值来表示，即：

$$\bar{n} = (n_0 + 2n_{45} + n_{90}) \quad (1-3)$$

式中，下标 0、45、90 表示单向拉伸试样的取向与薄钢板轧制方向的夹角。