

超低碳高强度

烘烤

硬化钢板

关小军 著

山东科学技术出版社  
[www.lkj.com.cn](http://www.lkj.com.cn)

山东省泰山科技专著出版基金会资助出版

# 超低碳高强度烘烤硬化钢板

关小军 著

山东科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

超低碳高强度烘烤硬化钢板/关小军著. - 济南:山东  
科学技术出版社,1999.12  
ISBN 7-5331-2575-4

I.超… II.磁… III.汽车-工程材料-钢板 IV.D465.1

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第60653号

山东省泰山科技专著出版基金会资助出版

**超低碳高强度烘烤硬化钢板**

关小军 著

\*

山东科学技术出版社出版

(济南市玉函路16号 邮编250002)

山东科学技术出版社发行

(济南市玉函路16号 电话2064651)

山东人民印刷厂印刷

\*

787mm×1092mm 16开本 10.75印张 4插页 230千字

2000年5月第1版 2000年5月第1次印刷

ISBN 7-5331-2575-4

TM·41 定价35.00元

# 序

随着国民经济的不断发展,人民生活水平的不断提高,汽车已成为不可或缺的交通运输工具。特别是改革开放以来,我国汽车的生产已由生产卡车为主过渡到大量生产轿车,以满足人民生活日益提高和大量公务的需要。为此,汽车工业被确定为我国国民经济的支柱产业之一,这使我国汽车工业进入一个高速发展的阶段。

汽车主要由三个部分组成,即车体车身、动力系统和电子信息系统。从构成的成本来看,汽车所用材料占50%以上,因为材料涉及行车过程中的能耗、安全和环境污染,所以,选材在汽车工业中占有十分重要的地位。有资料表明:汽车每减重91公斤,平均每升汽油可多行驶0.43公里。为了节能,一方面要改进动力系统(如陶瓷发动机),改善车的外形(流线型)和改进路面以降低行车阻力;但是,车的轻量化却是更为重要、更为现实的一项措施,所以,世界各国都从改进汽车车体材料着手。如铝的用量从1985年到1995年美国每年以5.3%的比例在增长;在欧洲则大力提倡比铝更轻的镁合金,但都还没成为车体的最主要材料,而钢仍占主导地位。如美国汽车工业从1985年到1995年高强钢用量的增长率为11.3%,比铝用量的增长率高一倍。其主要原因,一是钢的价格较低;更重要的是钢的性能不断在改进,除了强度与刚度以外,还具有足够的成型性能。关小军教授所研制的超低碳高强度烘烤硬化(ELC-BH)钢板便是国外发展出来的第三代汽车用薄板。这种钢已在国外很多高档轿车上得到应用,在当今我国汽车工业大发展的前夜,也必将会得到广泛重视。所以,本书的出版十分及时而能充分发挥其作用。

本书除了对ELC-BH钢板的化学成分控制及生产工艺进行了深入的讨论之外,对钢的相变、再结晶与织构控制还进行了探讨,并进一步揭示了ELC-BH钢板性能随工艺条件而变化的微观机制。对汽车钢板来说,深冲性能对部件的成品率有决定性影响,关小军教授对提高深冲性能关键指标 $r$ 的工艺进行了深入研究,并有创新,成为本书特点之一。

本书不但对汽车钢板生产和车体生产工程师有指导作用,对有关研究人员和教师也有重要参考价值。

中国科学院、中国工程院院士

师昌浩

# 序

汽车的发明和发展是本世纪人类依靠科技发展经济、改善生活最显眼的成就之一。在发达国家剧烈竞争中的汽车工业不断更新材料和工艺,以求改进汽车的功能,降低其自重,减少油耗,并降低成本。制作车身外覆盖件用的薄钢板在化学组成、组织结构、生产过程等方面有过许多技术上的及原理上的进展和突破。20世纪80年代以来,主要的动向是用超低碳钢包括无间隙元素超纯钢(IF钢)取代原来的铝镇静低碳钢。最近出现的超低碳高强度烘烤硬化钢则依靠更精细地调整冶炼和加工工艺,控制专门添加的微量特殊元素(如铌或铌+钛等)的存在形态,不是在部件压制成形之前,而是在汽车生产线后段的喷漆烘烤过程中,使钢的屈服强度大幅度增高(增大数十个百分点)。这样就使生产更高性能的汽车成为可能,而且由于钢的硬化是在部件压制成形之后,所以对锻压工艺的改进(强化、复杂化)完全没有妨碍,有助于达到更高的汽车生产经济效益。烘烤硬化薄板在短短的几年中已成为国际上汽车材料研究开发的热门课题之一。

我国社会对汽车的需求急剧增长,汽车工业已成为国家基础产业之一,掌握和发展先进的汽车材料是有关科技工作者的重大任务。关小军教授20世纪90年代初就投身超低碳高强度烘烤硬化钢板的研究,作出很有价值的成果,为我国“九·五”攻关项目“轿车用钢品种及工艺研究开发”提供了重要的实验基础。本书以国际上有关的重要文献和作者本人的研究成果为依据,较系统和详细地阐述了这一新钢种的化学组成、冶金工艺、轧制和热处理(包括在汽车厂的锻压成型和烘烤)等全过程对其组织结构、从而对其使用性能的影响以及产生这些影响的机制。作者充分注意了全书内容理论与实际的联系。该书是我所见到的国内第一本这方面的专著,相信它对我国钢铁和汽车界的有关工作者有重要的实用和参考价值。

中国科学院、中国工程院院士

邵象华

# 序

在钢中加入足够量的钛或/和铌,使钢中的间隙原子碳和氮完全固定,形成碳氮化物,以致钢中无间隙原子存在,这种钢称为无间隙原子(Interstitial - Free Steel)即 IF 钢。以 IF 钢为基础发展起来的超低碳钢系列产品是继沸腾钢、铝镇静钢之后的第三代冲压用钢板,是 20 世纪最后 20 年冶金材料引人瞩目的重大突破和关注焦点,它反映和代表了 21 世纪钢铁材料纯净化、功能化的发展方向。

早在 1949 年,Comstock 就发现了生产 IF 钢的基本原理。但是,由于当时冶金技术水平的限制,低碳钢中一般含碳 0.05% 左右,固定间隙原子所需的价格昂贵的合金钛高达 0.25% ~ 0.35%,因而其发展和应用受到生产成本过高的限制。

20 世纪 60 ~ 70 年代,冶金技术取得了一系列重大进步,为 IF 钢的大发展提供了技术基础,包括转炉喷吹技术、真空脱气技术、连铸连轧技术、控轧控冷技术、连续退火技术、连续镀锌技术等。以 IF 钢为基础开发物美价廉、具有特定使用性能的超低碳钢系列得到了飞速发展,成为当今汽车用钢工业界和学术界的开发热点和研究前沿,至今方兴未艾、未雨绸缪。

20 世纪 80 年代以来,跟踪国际 IF 钢的发展动向,我国宝钢、武钢分别与北京科技大学压加系合作,在国内率先进行了 IF 钢及其系列品种的开发。10 年来,先后在实验室完成了冷轧超深冲 IF 钢板、高强深冲 IF 钢板、热镀锌 IF 钢板、超低碳高强度烘烤硬化钢板(ELC - BH 钢板)、高强深冲热镀锌 IF 钢板、热轧拉延 IF 钢板和热轧深冲 IF 钢板的开发研究。其中,冷轧超深冲 IF 钢板和热镀锌 IF 钢板已投入批量生产,在汽车生产中得到应用,受到用户的欢迎。1996 年,IF 钢系列产品开发纳入国家“九·五”科技攻关项目“轿车用钢品种开发”中,本书就是该项研究部分成果的集中反映。

本书是国内外第一部公开出版的 ELC - BH 钢板生产理论和工艺的专著。它不仅总结了作者的研究成果,系统地介绍了成分和工艺对 ELC - BH 钢板的组织结构和性能的影响机理,同时对超低碳钢系列的其它品种的生产工艺和物理冶金原理也作了相应的介绍,因此,具有重要的参考价值。

当然,对超低碳钢的研究尚处于认识不断深化、应用领域不断扩展的阶段。可以预计,对超低碳钢系列产品的生产和理论的研究必将不断深入和完善。

王先建



# 前 言

今天,汽车已经成为现代社会生活必不可少的交通工具,汽车工业生产技术及其发展水平亦成为代表一个国家总体经济实力和物质文明程度的重要标志。改革开放以来特别是 20 世纪 80 年代末期,我国已将汽车工业确定为国民经济的支柱产业,并且制定了长期的发展规划和目标。今天,我国汽车工业已进入了一个高速发展时期。

汽车工业的发展不仅对其自身,而且也对相关工业提出更高要求。薄钢板作为汽车主要用材,是影响汽车工业发展的重要因素之一,其技术性能、产品构成与质量等级直接影响着汽车的生产技术进步及其未来发展所追求的节材、节能、安全、舒适、减少环境污染等社会经济目标的实现。

20 世纪 80 年代以来,以无间隙原子钢(简称 IF 钢)为代表的超低碳钢板系列产品的开发和研制,代表了当今世界汽车薄钢板生产技术的主要发展方向。其中超低碳高强度烘烤硬化钢板(简称 ELC - BH 钢板)由于具有优异的成形性、高强度和高抗凹陷性相结合的综合性能而倍受汽车工业的青睐,成为制作汽车车身外覆盖件的理想用材。1989 年,我国开始对超低碳钢板进行研究,至今已有 IF 钢板、热镀锌 IF 钢板等产品投入批量生产,且正在开发研制其它一些新产品。作为主要研究人员,我不仅参与了这些研究工作,而且亲自主持了对 ELC - BH 钢板的实验研究。本书就是依据自己多年来对 ELC - BH 钢板的实验研究成果和体会而撰写的。它第一次全面、系统地介绍了化学成分和冶金生产工艺对 ELC - BH 钢板的组织结构和性能的影响规律,从系统的角度剖析这些影响规律之间的联系及其形成机理,为优化工艺以生产高质量的工业产品提供基本措施和理论依据。

全书共分八章,第一章概括介绍了汽车薄钢板特别是超低碳钢板系列产品以及 ELC - BH 钢板的组织、性能、用途和发展。第二章主要介绍了 ELC - BH 钢板的成分控制和生产工艺,讨论了不同微合金化元素和稀土元素对它的组织结构和性能的影响。第三章主要论述了热轧工艺参数对 ELC - BH 钢板热变形再结晶行为、组织结构和性能的影响规律及其形成机理,阐明了热轧工艺控制在生产过程中的重要地位及其基本原则。第四章主要论述了冷轧和退火工艺参数对 ELC - BH 钢板组织结构和性能的影响规律,既讨论了它们相互作用的综合影响,也包括了它们各自单独作用的影响,并且指出了冷轧和退火工艺控制在全部工艺控制中的关键作用及其基本原则。第五章主要论述了 ELC - BH 钢板中二相粒子 NbC 的演变规律及其形成机理,进一步揭示了不同工艺参数导致烘烤硬化性能变化的微观机制。第六章主要论述了 ELC - BH 钢板中织构随生产过程进行而变化的规律,深入探讨了再结晶织构的形成机制及其影响因素,揭示了织构在工艺条件对深冲性能影响中的本质作用,阐明了生产过程中织构控制的必要性及其基本原则。第七章主要探讨了烘烤硬化性能产生的物理机制和充分必要条件,揭示了预变形和烘烤条件对烘烤硬化性能的影响规律及其微观机理和确定原则。第八章主要介绍了一个在不影响钢板强度水平的条件下大幅度提高  $r$  值的新工艺,通过它所导致的 ELC - BH 钢板织构变化规律的

系统研究,揭示了深冲性能明显改善的根本原因,阐明了研制特超深冲性能的汽车薄钢板的技术可行性和理论可依性。

经过多年的准备、撰写、修改,本书终于与读者见面了。能为我国汽车薄钢板早日实现国产化尽一份微薄之力,这是我多年来的愿望。由于其它类型的超低碳高强度烘烤硬化钢板正在研制之中,故本书的内容仅侧重于目前已取得的关于 Nb 或 Nb + Ti 处理的超低碳高强度烘烤硬化钢板的工艺控制及其机理的研究成果,进一步充实和完善这一领域的研究,是我今后努力的方向。

本书以生产工艺为参照系剖析材料的组织结构和性能的动态变化及其联系,其中的一些规律和理论也适用于其它超低碳钢板系列产品如 IF 钢板、超低碳高强度钢板等,不仅对于 ELC - BH 钢板生产具有有益的指导作用,而且对于其它超低碳钢板系列产品的生产工艺优化、理论研究和产品开发等也有一定的参考价值。希望本书可供从事钢板生产技术工作的工程技术人员、科研人员 and 大专院校材料加工等有关专业的师生参考。鉴于作者认识水平有限,书中难免存在一些错误,恳请读者不吝赐教。

本书的出版承蒙中国科学院和工程院邵象华院士、李文采院士、师昌绪院士,钢铁研究总院陈其安教授、张成吉教授以及我的导师、北京科技大学王先进教授的大力支持和帮助;山东工业大学周家娟副教授也为本书的出版做了大量工作。对此表示最衷心的感谢。

最后,对山东科技出版社泰山科技专著基金会的资助表示最诚挚的谢意。

关小军



# 目 录

|  |       |
|--|-------|
| <b>第一章 现代汽车薄钢板发展概述</b> .....                     | (1)   |
| 第一节 汽车薄钢板 .....                                  | (1)   |
| 第二节 无间隙原子钢与超低碳钢板系列产品 .....                       | (6)   |
| 第三节 烘烤硬化钢板与超低碳高强度烘烤硬化钢板 .....                    | (10)  |
| <b>第二章 ELC - BH 钢板的生产工艺</b> .....                | (18)  |
| 第一节 钢的冶炼与成分控制 .....                              | (18)  |
| 第二节 ELC - BH 钢板的轧制生产工艺 .....                     | (30)  |
| <b>第三章 热轧工艺对 ELC - BH 钢板组织结构和性能的影响</b> .....     | (35)  |
| 第一节 热轧工艺的热模拟研究 .....                             | (35)  |
| 第二节 热轧压下率的影响 .....                               | (44)  |
| 第三节 热轧终轧温度的影响 .....                              | (47)  |
| 第四节 热轧卷取温度的影响 .....                              | (51)  |
| <b>第四章 冷轧和退火工艺对 ELC - BH 钢板组织结构及其性能的影响</b> ..... | (55)  |
| 第一节 冷轧和退火工艺参数的综合影响 .....                         | (55)  |
| 第二节 冷轧压下率的影响 .....                               | (57)  |
| 第三节 退火工艺参数的影响 .....                              | (65)  |
| 第四节 冷却方式的影响 .....                                | (68)  |
| 第五节 轧制工艺参数影响的讨论 .....                            | (71)  |
| <b>第五章 轧制过程中 ELC - BH 钢板组织结构的变化</b> .....        | (73)  |
| 第一节 不同工艺的组织结构变化 .....                            | (73)  |
| 第二节 夹杂物和二相粒子 .....                               | (80)  |
| 第三节 轧制工艺过程 NbC 粒子变化 .....                        | (83)  |
| 第四节 NbC 粒子的演变机理及其影响因素 .....                      | (86)  |
| <b>第六章 轧制过程中 ELC - BH 钢板的织构变化</b> .....          | (91)  |
| 第一节 晶粒取向与织构 .....                                | (91)  |
| 第二节 热轧、冷轧和退火织构及其联系 .....                         | (97)  |
| 第三节 板厚向各层织构分布 .....                              | (99)  |
| 第四节 ELC - BH 钢板退火期间织构演变及其形成机理的探讨 .....           | (108) |
| 第五节 织构变化的微观影响因素及其控制原理 .....                      | (115) |
| 第六节 NbC 演变和织构演变之间的联系 .....                       | (117) |
| <b>第七章 ELC - BH 钢板烘烤硬化现象的物理机制</b> .....          | (119) |
| 第一节 烘烤硬化物理机制的探讨 .....                            | (119) |
| 第二节 产生烘烤硬化性能的条件 .....                            | (123) |

---

|     |                                 |       |
|-----|---------------------------------|-------|
| 第三节 | 固溶 C 原子存在状态及其运动的微观机制·····       | (126) |
| 第八章 | 控制织构发展的新工艺·····                 | (132) |
| 第一节 | 新工艺开发及其特点·····                  | (132) |
| 第二节 | 新工艺对 ELC - BH 钢板性能和组织结构的影响····· | (133) |
| 第三节 | 新工艺条件下织构的演变·····                | (139) |
| 第四节 | 进一步改进新工艺的途径·····                | (150) |

# 第一章 现代汽车薄钢板发展概述

在我国,薄钢板(亦称带钢)指厚度在0.2~4mm板带钢,按照其钢种和性能可分成不同系列,汽车薄钢板则是其中之一,它是以冲压成形性能为主要性能的低碳或超低碳钢板。通常采用热连轧或冷连轧方式生产,宽度在600mm以上,主要用于制造汽车车身部件,产量在钢材产品中占据很大比例。

## 第一节 汽车薄钢板

### 一、汽车薄钢板的性能

今天,汽车已经成为现代社会必不可少的交通工具,它不仅为生活在现代社会的人们带来了诸多物质和文化生活上的便利,而且促进了材料、冶金等相关工业的迅速发展,汽车工业已经成为各工业发达国家经济发展的重要支柱产业。

汽车的制造与所用材料是息息相关的,汽车工业的发展也离不开新材料的开发。目前,汽车上绝大部分零、部件采用钢材制做,钢材仍然是汽车工业最重要的材料,其中汽车薄钢板约占50%以上。汽车薄钢板主要通过冲压成形和焊接成形加工成各种零部件,不仅要求具有高的强度、塑性、韧性以及良好的表面质量、尺寸精度、板形精度,而且具备优异的冲压成形性能、焊接性能、抗凹陷性能、抗冲击性能、镀层附着性能等。冷轧薄钢板较比热轧薄钢板强度高、冲压成形性能好、表面质量好、尺寸精度和板形精度高,而且又是生产镀层板的基板,因此,用途更大,在汽车薄钢板产品中占据更为重要的地位。

汽车薄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,主要包括冲压成形性能、抗凹陷性能、抗冲击性能、焊接性能和镀层附着性能等,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. 基本性能指标

屈服强度(可表示为 $\sigma_s$ 或YS):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;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。

$\sigma_s$ 值决定了薄钢板冲压成形中开始产生塑性变形时所需载荷。 $\sigma_s$ 值越大,所需的成形力越大。但是,它对薄钢板冲压成形性能影响不大。

拉伸强度(可表示为 $\sigma_b$ 或TS):单向拉伸试验中,薄钢板达到最大载荷时的工程应力。

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

总伸长率(可表示为  $\delta$  或 EL): 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。

均匀伸长率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,  $\delta$  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且所能承受的最大变形量越大, 它的综合冲压成形性能越好。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  $\delta$  值也不同。

屈强比(可表示为  $\sigma_s/\sigma_b$  或 YS/TS): 薄钢板屈服强度与拉伸强度之比。

$\sigma_s/\sigma_b$  值越小, 表明冲压成形的薄钢板在破坏之前可进行更大的变形和加工, 特别是拉胀成形过程。因此, 它的综合冲压成形性能越好, 成形后零件的形状固定性也越好。

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  $r = d\epsilon_w/d\epsilon_t$ , 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  $r = \epsilon_w/\epsilon_t$ 。

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( $\Delta r$ )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。

这一指标是由 Lankford 于 1950 年提出的<sup>[1]</sup>, 它反映了薄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, 可作为衡量薄板各向异性(主要是厚向异性的)一种量度。它与许多模拟成形性试验指标有很好的相关性, 是评价薄钢板冲压成形性能的重要指标, 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。 $\{111\}$  织构愈强,  $\{100\}$  织构愈弱, 则  $\bar{r}$  值愈高, 它的深冲性能即压延性能愈好。

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

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  $\sigma = k\epsilon^n$  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, 即

$$\bar{n} = (n_0 + 2n_{45} + n_{90})/4 \quad (1-3)$$

来表示。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。

$\bar{n}$  值也是衡量薄钢板在塑性变形过程中形变强化能力的一种量度,冲压件的最终强度、均匀伸长量、成形极限图、应变分布和其他许多成形变量都与它有关,它还反映了薄钢板冲压变形时应变均化的能力。

$\bar{n}$  值是评价薄钢板冲压成形性能的重要参数。 $\bar{n}$  值越高,薄钢板的冲压成形性能越好,特别是拉胀性能。 $\bar{n}$  值大小主要取决于钢质的纯净度和铁素体组织晶粒尺寸,提高钢质的纯净度和适当增大铁素体组织晶粒尺寸都可使  $\bar{n}$  值增加。

## 2. 使用性能

冲压成形性能:薄钢板适应冲压成形过程的能力,即指薄钢板在冲压成形过程中抵抗失效(如断裂、瓢曲、起皱、形状扭曲等)的能力。也可理解为薄钢板在冲压成形过程中发生破坏前可得到的最大变形程度。

具有极佳冲压成形性能的薄钢板应表现为:①具有均匀分布应变;②承受平面内压缩应力而无起皱;③可达到较高的应变而无颈缩和断裂;④承受平面内剪切应力而无断裂;⑤变形的零件由凹模出来后保持形状不变;⑥保持表面光洁且无损伤。

冲压成形性能不仅与薄钢板自身的化学成分、微观组织结构有关,而且与它在冲压过程中的变形方式、变形历史、附近材料的应变梯度以及具体的冲压生产条件如尺寸效应、边缘情况、模具参数、机床工作参数、摩擦润滑情况、工人操作等有关。

薄钢板的冲压成形性能既可由基本成形性试验所得到的材料基本性能指标值  $\bar{r}$ 、 $\bar{n}$  等评价,也可由模拟成形性试验所得到的材料某种特殊成形指标值来评价,两者之间具有很好的相关性。通常应用最广泛的是单向拉伸试验,它属于基本成形性试验;而冲杯试验、锥杯试验、液压胀形试验、杯突试验、扩孔试验、极限拱顶高度试验、成形极限图试验等都是模拟成形性试验。 $\bar{r}$  值和  $\bar{n}$  值越高,冲压成形性能越好。

抗凹陷性能:指薄钢板制做的汽车车体外覆盖件受到外载荷作用如路面上的石子、沙粒等硬物碰撞时,不产生局部变形(凹坑或塌陷)的能力。通常用凹陷深度评价。

据研究<sup>[2]</sup>,抗凹陷性能与钢板的屈服强度( $\sigma_s$ )和厚度( $t$ )之间有如下关系:

$$W = k(\sigma_s^2 \cdot t^4)/s \quad (1-4)$$

式中: $W$  为零件刚产生凹陷变形时所需的变形能, $s$  为零件的刚度, $k$  为比例常数。由此可见,零件刚度不变时,钢板的屈服强度越高,板厚越大,产生凹陷变形时所需能量越大,抗凹陷性能越好。

凹陷深度可采用专门的试验进行测定,如图 1-1 所示。将钢板冲压成形为特定形状如方形带拱顶的试样,经高温时效处理(170℃~200℃,20~30 分钟)后,测量在一定质量(20kg)和一定尺寸(半径为 10mm)的钢珠冲击下的试样凹陷深度。所测的试样凹陷深度越小,抗凹陷性能越好。

抗冲击性能:指薄钢板制做的汽车车体与外界硬物相碰撞时,不发生破裂的能力。通常用临界冲击功评价。

薄钢板的抗冲击性能与它的拉伸强度和板厚平方的乘积成正比,即

$$\alpha_k = \sigma_b \times t^2 \quad (1-5)$$

式中: $\alpha_k$  为冲击功, $\sigma_b$  为钢板的拉伸强度, $t$  为钢板板厚。可知,钢板的拉伸强度越高,板

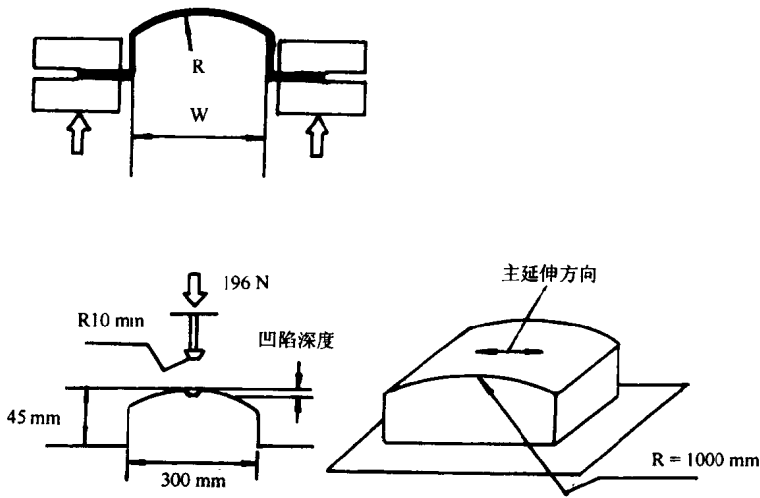


图 1—1 抗凹陷性能测试方法

凸模尺寸:  $W = 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ,  $R1000\text{mm}$ ; 板料尺寸:  $450\text{mm} \times 450\text{mm}$ ; 成形高度:  $45\text{mm}$ ; 压边力:  $100 \sim 400\text{kN}$

厚越大, 它的抗冲击性能越好。

通常采用冲击试验测定临界冲击功来评价钢板的抗冲击性能。将试样制成一定形状, 用冲头进行冲击, 改变不同的载荷和冲击距离, 获得试样压坏的临界值。临界冲击功越大, 钢板的抗冲击性能越好。

**焊接性能:** 薄钢板适应焊接的能力。

薄钢板的焊接性能取决于它所含元素的种类及其含量。其中, 碳当量的影响很大, 可作为判别焊接性能的主要标志。薄钢板的含碳量越小且钢质越纯净, 焊接性能越好。此外, 焊接性能也与薄钢板厚度、强度和焊接方法有关。板厚越小, 焊接性能越差, 只能采用点焊方法; 强度提高, 焊接条件的范围变窄。

**镀层附着性能:** 薄钢板表面与镀层之间相互结合的能力。

镀层附着性能主要与薄钢板和涂镀材料的成分以及涂镀工艺有关。钢质纯净, 基板表层晶粒的晶界过于洁净, 会引起快速合金化反应, 不利于镀层附着性能。不同的涂镀材料所对应的镀层附着性能不同, 目前普遍采用由锌和少量铝配制的涂镀材料。电镀工艺较比热镀工艺可得到好的镀层附着性能。

## 二、汽车薄钢板的发展

汽车薄钢板在制作汽车零件时几乎都需要冲压成形, 而冲压成形能否成功取决于它的成形性能。成形性能不仅取决于薄钢板自身的基本性能, 而且与冲压成形过程变量和设计变量有关。其中前者系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; 后者系外界成形环境影响的表现, 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形裕度, 可适应一定的外界因素变化, 增加成形裕度比调整冲压工艺能够更为有效地提高冲压成形合格率。因此, 汽车薄钢板具有优异的冲压成形性能即高的  $r$  值和  $n$  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形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 $\gamma$ 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。通过往低碳钢中加Al进行脱氧且控制AlN的固溶和析出,获得较强烈的 $\{111\}$ 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C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开发由IF钢所繁衍的超低碳系列产品的汽车薄钢板,预计不久的将来,超低碳系列产品将逐步取代第二代产品,使汽车薄钢板应用水平上升到一个新高度。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

|      | $\sigma_s$ (MPa) | $\sigma_b$ (MPa) | $\delta$ (%) | $\bar{r}$ | $\bar{n}$   |
|------|------------------|------------------|--------------|-----------|-------------|
| 沸腾钢板 | 180 ~ 190        | 290 ~ 310        | 44 ~ 48      | 1.0 ~ 1.2 | ~ 0.22      |
| 铝镇静钢 | 160 ~ 180        | 290 ~ 300        | 44 ~ 50      | 1.4 ~ 1.8 | ~ 0.22      |
| IF 钢 | 100 ~ 150        | 250 ~ 300        | 45 ~ 55      | 1.6 ~ 2.8 | 0.23 ~ 0.28 |

### 三、汽车薄钢板的分类

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形性能、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、防止噪音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注目。汽车薄钢板的研制与开发已由过去那种传统地单纯追求提高冲压成形性能而转向探寻使冲压成形性、强度、表面质量(光洁度和抗凹陷性)、隔音性、耐腐蚀性



等性能达到最佳组合。这种性能综合的发展趋势,造成了今天汽车薄钢板生产品种系列化。图 1—2 是汽车薄钢板按冲压成形性能和强度进行的分类。

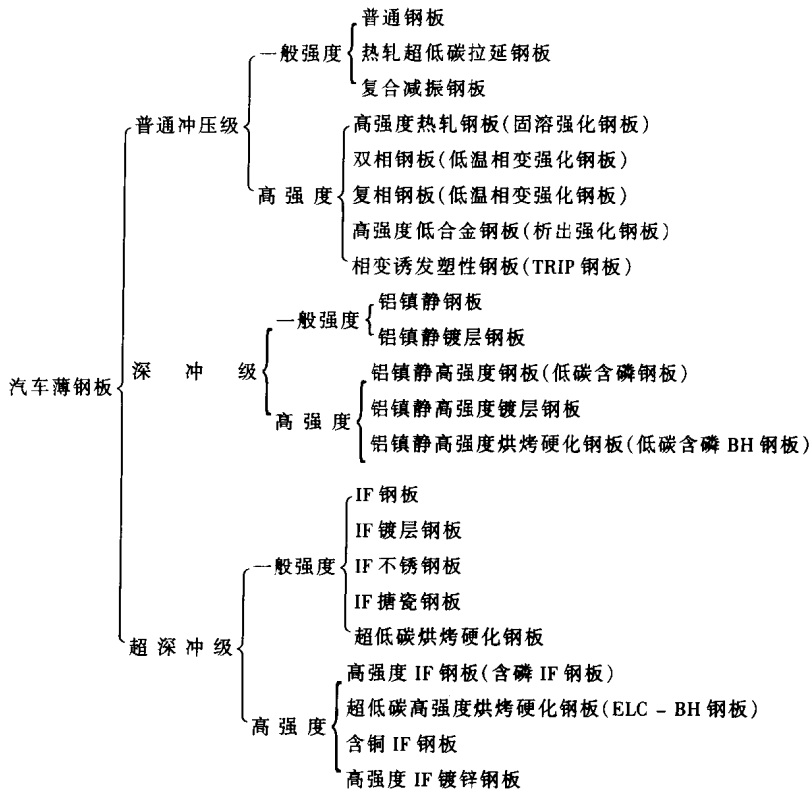


图 1—2 汽车薄钢板的品种

## 第二节 无间隙原子钢与超低碳钢板系列产品

### 一、IF 钢及其发展历史

在低碳钢中加入足够数量的 Ti 或 Nb,使得钢中 C、N 原子完全被固定成碳氮化合物 Ti(CN)或 Nb(CN)而清除间隙固溶原子,这种钢称为“无间隙原子钢”,即 Interstitial-free Steel,简称“IF 钢”。

IF 钢可依据含碳量的不同分为低碳和超低碳钢,即传统 IF 钢和现代 IF 钢,还可依据所添加的合金元素分为钛处理、铌处理和钛铌复合处理的 IF 钢。它可以采用冷轧或热轧工艺生产,一般所指的 IF 钢是通过冷轧工艺生产的。现代 IF 钢是第三代汽车薄钢板——超低碳系列产品的主要代表,也是该系列产品得以发展的基础。

早在 1949 年,Comstock 就发现了加 Ti 生产 IF 钢的基本原理<sup>[3]</sup>。但是,由于当时冶炼的低碳钢中 C 和 N 的含量较高(约为 0.05% C,0.03% N),以致需加入的 Ti 量较高,而 Ti 的价格昂贵,导致生产成本太高。因此,这一发现未能用于实际生产。

直到 20 世纪 60 年代后期,由于真空脱气技术在炼钢生产中的应用,钢中的 C 和 N 含量大幅度降低,其中, C 含量  $\leq 0.01\%$ ,降低 IF 钢生产成本才成为可能。日本等国相继生产出加 Ti 的 IF 钢商品板<sup>[4,5]</sup>。与此同时,人们发现在低碳钢中加 Nb 也能生产 IF 钢<sup>[6,7]</sup>。

20 世纪 70 年代初,连续退火机组的出现进一步促进了 IF 钢发展。由于连续退火机组上难以生产高  $r$  值的铝镇静钢板,而生产的 IF 钢却具有优异的深冲性能。因此,连续退火机组成为生产 IF 钢的专用设备,加 Ti、加 Nb、复合添加 Ti 和 Nb 的 IF 钢都已开发。尽管生产成本较前降低很多,然而同当时汽车制造主要使用的铝镇静钢板相比仍然较高,IF 钢使用范围仅限于汽车上的少数难冲零件,用量较少,还不能取代铝镇静钢而大量生产。

1979 年,世界上第一台热镀锌机组的问世为 IF 钢的发展带来了又一次机会。由于该机组的连续退火工序没有过时效处理,且 IF 钢特有的无时效性恰好弥补了这一缺陷,因此,IF 钢成为生产热镀锌深冲钢板的基板,它的产量有了较大提高。

进入 20 世纪 80 年代,冶金生产技术的进步为 IF 钢的飞速发展奠定了基础。底吹转炉和改进的 RH 真空脱气处理设备的应用可以经济地生产 C 含量  $\leq 0.003\%$  和 N 含量  $\leq 0.003\%$  的超低碳钢,使得现代 IF 钢的生产实现商品化,它的产量逐年提高。同时,在现代 IF 钢的基础上超低碳钢板系列的一些其他产品亦得到开发。

随着 20 世纪 90 年代真空脱气处理技术的进步,已经可以生产 C 含量  $\leq 0.002\%$  的超低碳钢,各种新型的超低碳钢板系列产品不断研制成功,IF 钢的生产达到一定规模,1993 年世界 IF 钢的产量已超过 1000 万吨。预计到 2000 年,钢的纯度提高技术的进一步发展将使得生产含碳量为  $0.0004\%$  的特超低碳钢成为可能,届时汽车薄钢板又将进入一个新的发展阶段。今天,以现代 IF 钢为代表的第三代汽车薄钢板——超低碳钢板系列产品的开发已经成为世界汽车薄钢板生产和科研领域的前沿课题,并且将促进冶金工业和汽车工业总体技术水平的全面进步。

## 二、IF 钢的基本特征

IF 钢具有优异的冲压成形性能特别是深冲性能 ( $r > 1.6$ ,  $\bar{n} > 0.23$ ) 和非时效性 ( $\Delta I = 0$ ),而且强度低、塑性好,广泛用于汽车上一些形状复杂的难冲件的成形。

IF 钢的性能特征取决于它的组织结构特征,即大多数的粗大、等轴的和无间隙原子的铁素体晶粒沿  $\{111\}$  取向排列和较粗大的二相粒子在铁素体中稀疏分布。

IF 钢的超低碳、微合金化和钢质纯净的成分特征是获得它的组织和性能特征的物质基础,相应的冶炼、浇注和轧制工艺的合理控制是实现这些组织和性能特征的必要手段。

IF 钢的轧制工艺特点近似概括为:“二低二高”或“三低一高”快速大压下的热轧工艺,即低温加热(约  $105^\circ\text{C}$ )、低温开轧、高温(略高于  $A_3$ ) 快速大压下终轧、高温卷取( $> 680^\circ\text{C}$ )或低温卷取( $< 680^\circ\text{C}$ ,仅对钛处理 IF 钢而言);大压下率的冷轧工艺;温度尽可能高的高温再结晶退火及适量的平整轧制。

IF 钢的性能缺陷为:强度低、抗凹陷性和冲击性差、耐腐蚀性能弱。这在一定程度上限制了它的应用范围。为了弥补这一点,在汲取它的性能优点的基础上发展了其他超低碳钢板系列产品。