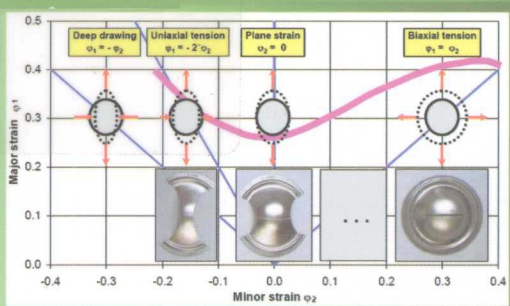


冷轧深冲钢板的 性能检测和缺陷分析

钱健清 袁新运 编著

XINGNENG

IONG GANGBANDE
AN FENXI



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

冷轧深冲钢板的 性能检测和缺陷分析

钱健清 袁新运 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2012

内 容 提 要

本书从冷轧深冲的发展概况、分类、生产流程等开始介绍,主要介绍了冲压和成型性能,包括弯曲、拉深、胀形与翻边等;薄板成型性能的检测,包括基本性能实验、模拟成型性能实验、成型极限图及其应用等;冷轧冲压板的尺寸精度和板形控制;最后对表面缺陷进行了分析。

本书可作为从事冷轧深冲钢板的使用和售后服务方面的工作者的参考书,对于冷轧带钢生产、研究领域的技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

冷轧深冲钢板的性能检测和缺陷分析/钱健清,袁新运编著. —北京:冶金工业出版社,2012.3

ISBN 978-7-5024-5843-0

I. ①冷… II. ①钱… ②袁… III. ①冷轧—钢板—性能检测 ②冷轧—钢板—冶金缺陷 IV. ①TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 016306 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 尚海霞 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 禹蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5843-0

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012 年 3 月第 1 版,2012 年 3 月第 1 次印刷

148mm×210mm;6.875 印张;204 千字;211 页

23.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

冷轧带钢，特别是冷轧宽带钢，自 20 世纪 30 年代开始应用以来，日益显示出其重要性。特别是近三十年来，随着我国汽车制造业、电子工业、家电工业、包装工业、机器创造和建筑的发展，对冷轧带钢的需求急剧增加。

在使用中，冷轧宽带钢一般还需要进行进一步的深加工（如冲压和涂镀），这样才能成为最终的零件和产品，所以成型性能和表面质量是冷轧宽带钢质量好坏极为关键的两个要素。冷轧深冲钢板具有良好的冲压成型性，是冷轧带钢中的高等级产品，其主要应用领域是汽车工业，因此很多时候称其为汽车板，它代表了用于冲压加工成型类加工的冷轧带钢水平。

具有良好成型性能的冷轧深冲钢板是现代汽车制造业、电子和家电用钢的重要原料，同时，这些领域对于冷轧带钢表面质量也同样有着很高的要求。

冷轧深冲钢板的冲压和涂镀加工不仅与其加工工艺相关，与其深冲性能和表面质量同样有非常紧密的关系。

本书根据作者及与部分合作者多年合作完成的工作，并参考近几年的大量有关文献编写而成，旨在总结国内外关于冷轧宽带钢在成型性能和表面质量分析方面的最新成果和应用经验。书中许多图表、数据不仅有来自实验室的实验结果，也有来自于生产现场的实际经验总结，相信书中内容对从事冷轧深冲钢板的使用和售后服务方面的工作者有重要的指导意义，对从事冷轧带钢生产、研究领域的技术人员也有一定的参考价值。

本书从冷轧深冲的发展概况、分类、生产流程等开始介绍，

主要介绍了冲压和成型性能,包括弯曲、拉深、胀形与翻边等;薄板成型性能的检测,包括基本性能实验、模拟成型性能实验、成型极限图及其应用等;冷轧冲压板的尺寸精度和板形控制;最后对表面缺陷进行了分析。

本书由安徽工业大学钱健清和马钢股份公司袁新运、王炜合作完成。在编著过程中得到马钢股份公司工程技术人员陈斌、刘永刚、杨少华、姚鑫、张军和章一樊等人的大力协助,安徽工业大学研究生申斌、刘珂参与部分编写工作,在此谨致衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些疏漏、不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
2012 年 1 月

目 录

1 绪论	1
1.1 冷轧深冲钢板发展概况	1
1.2 冷轧深冲钢板分类和标准	2
1.3 冷轧深冲钢板简要生产流程及特点	3
1.3.1 08F 深冲钢板生产工艺流程	3
1.3.2 08AL 深冲钢板生产工艺流程	4
1.3.3 超低碳深冲钢板生产工艺流程	4
1.3.4 连铸连轧深冲钢板生产工艺流程	5
1.4 第三代深冲冷轧板 IF 钢	5
1.4.1 Ti-IF 钢	6
1.4.2 Nb-IF 钢	6
1.4.3 Ti-Nb-IF 钢	7
1.5 冷轧深冲钢板发展方向	8
2 冲压与成型性能	11
2.1 板料成型性的基本概念及其成型性能与冲压	11
2.1.1 板料成型性的基本概念	11
2.1.2 板料成型性能与冲压	12
2.2 弯曲	17
2.2.1 弯曲变形的过程和特点	17
2.2.2 弯曲变形时的应力、应变状态分析	19
2.2.3 弯曲成型的主要问题分析	21
2.3 拉深	25

2.3.1	拉深变形的过程	26
2.3.2	拉深变形的应力应变	27
2.3.3	拉深成型的主要问题	29
2.4	胀形与翻边	33
2.4.1	胀形	33
2.4.2	翻边	36
3	薄板成型性能检测	39
3.1	基本性能实验	40
3.1.1	拉伸试验	40
3.1.2	塑性应变比 r 值计算	42
3.1.3	加工硬化指数 n 值计算	44
3.2	模拟成型性能实验	45
3.2.1	胀形模拟实验	45
3.2.2	拉深模拟实验	46
3.2.3	扩孔模拟实验	49
3.2.4	综合模拟实验——福井锥形杯试验	50
3.2.5	方板对角拉伸试验	52
3.3	成型极限图及其应用	54
3.3.1	成型极限图的概念	54
3.3.2	成型极限图实验方法	56
3.3.3	成型极限图的实验过程应用	62
4	成型性能的工艺控制	64
4.1	内在因素与成型性能	64
4.1.1	成分与夹杂	64
4.1.2	组织	69
4.1.3	织构	72

4.1.4 热轧组织和第二相粒子	83
4.2 工艺控制	86
4.2.1 冶炼和连铸	86
4.2.2 热轧	94
4.2.3 冷轧	100
4.2.4 再结晶退火	102
4.2.5 平整	111
4.3 典型生产实例	119
4.3.1 冲压级冷轧板生产	119
4.3.2 IF 软钢生产	123
4.3.3 连铸连轧生产冲压级 (DQ) 深冲板	128
5 冷轧冲压板的尺寸精度和板形	133
5.1 概况	133
5.1.1 尺寸精度及标准	133
5.1.2 板形	134
5.2 尺寸精度、板形与冲压工艺	137
5.2.1 拉深与压边力	137
5.2.2 尺寸精度、板形对成型的影响	139
5.3 冷轧钢板厚度精度和板形控制	143
5.3.1 厚度精度控制	143
5.3.2 板形控制	147
6 表面缺陷分析	153
6.1 表面缺陷概况和分类	155
6.1.1 夹杂	155
6.1.2 氧化铁皮	157
6.1.3 表面机械损伤	159

6.1.4 表面涂染	160
6.2 表面质量工艺控制	161
6.2.1 冶炼、连铸与夹杂	161
6.2.2 热轧	163
6.2.3 冷轧、平整与表面质量	164
6.2.4 退火	166
6.2.5 某厂生产 O5 板热轧、冷轧和退火工艺要点	167
6.3 表面缺陷分析	169
6.3.1 复杂表面缺陷分析基本过程和手段	169
6.3.2 表面缺陷分析实例	176
6.3.3 典型表面缺陷图谱	179
参考文献	207

1 绪 论

1.1 冷轧深冲钢板发展概况

冷轧深冲钢板最大的高端用户是汽车制造业，所以冷轧深冲钢板的发展方向是以满足汽车制造业对汽车用钢不断增长的技术需求为目标。主要表现为以下几个方面：深冲性能、定型性、表面质量、耐腐蚀性和高强度。这些材料特性之间既有相互独立性，也有相互联系，如深冲性能、定型性都要求钢板有低的屈服强度，而低的屈服强度与高强度是相互矛盾的，所以冷轧深冲钢板的发展表现得十分复杂。

为了满足汽车制造业的需要，首先为了满足车身零部件形状日益复杂和冲压效率不断提高的需要，冷轧深冲钢板成型性能不断改善，从沸腾钢发展到铝镇静钢再到超低碳无间隙原子钢（IF 钢）。为满足车身制造高精度和美观的要求，冷轧深冲钢板定型性和表面质量也在改进，从普通商用板发展到 O3 板再到 O5 板。同时，为改善成型性能，屈服强度也下降到 150MPa 以下。为满足车身耐腐蚀性要求，开发了深冲镀锌和各种涂镀板。但随着近年来对低碳环保、节能减排的重视，开发高强度深冲板成为了主流，如烘烤硬化钢板（BH）、双相钢板（DP）和相变诱发塑性钢（TRIP）等。

但是，几乎所有冷轧深冲钢板都离不开一个核心指标，即成型性能，因为必须经过冲压加工，才能成为汽车零部件。所以冷轧深冲钢板发展基本以冲压性能为指标被划分了三代。

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。塑性应变比 r 值不高，仅为 1.0 ~ 1.2，深冲性能较差，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 C 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

铝进行脱氧且控制 AlN 的固溶和析出, 获得较强烈的 $\{111\}$ 织构, 深冲性能良好, r 值为 1.4 ~ 1.8。同时, 由于氮被固定成 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 FeC_3 , 所以, 经平整后性能稳定。迄今, 汽车工业所使用的各系列的冲压钢板都是由铝镇静钢衍生和发展来的。

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冷轧深冲薄钢板系列产品。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, 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。目前, 超低碳系列产品正在逐步取代第二代产品, 这使冷轧深冲薄钢板应用水平上升到一个新高度。

三代冲压用钢板典型产品的性能比较见表 1-1。

表 1-1 三代冲压用钢板典型产品的性能比较

钢 种	屈服强度 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 $\delta_{10}/\%$	塑性应变比 r 值	加工硬化指数 n 值
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 ~ 50	1.8 ~ 2.8	0.23 ~ 0.28

1.2 冷轧深冲钢板分类和标准

冷轧深冲钢板是薄钢板中的一个主要品种, 也是技术水平要求最高的产品, 它的种类多, 性能指标多, 对质量要求严格, 根据各种用途不同各有侧重。冷轧深冲钢板的分类充分体现了这一特点, 它有各种各样的分类方法, 但每一种方法往往只反映了冷轧深冲钢板的某一特点, 并不十分全面。

冷轧深冲钢板按脱氧方式分为沸腾钢、镇静钢和半镇静钢; 按涂镀方式分为热镀锌、电镀锌和有机涂层等; 按钢种与合金成分分为低碳钢、低合金高强度钢、加磷钢、超低碳钢 (ULC)、无间隙

原子钢 (IF 钢) 等; 按强度级别分为普通强度级和高强度级; 按冲压级别分为一般商品级 (CQ)、普通冲压级 (DQ)、深冲压级 (DDQ) 和超深冲压级 (EDDQ)、特超深冲压级 (S-EDDQ); 按冲压件的复杂程度分为 P 级 (普通拉延)、S 级 (深拉延)、Z 级 (最深拉延)、F 级 (复杂冲压)、HF 级 (很复杂冲压) 和 ZF 级 (最复杂冲压)。

还有一些分类方法, 如按某一性能或组织分类等。然而, 冷轧深冲钢板都离不开一个核心指标即成型性能, 所以一般情况下主要是以冲压级别分。冷轧冲压系列钢板的牌号及相应标准见表 1-2。

表 1-2 冷轧冲压系列钢板的牌号及相应标准

序号	类 别	牌 号	产品标准	备 注
1	一般商品级 (CQ)	Q195 ~ Q235、08Al	GB/T716—1991、 GB13237—1991	水箱外壳、制桶、钢 制家具等一般成型加工 用
		DC01 (St12)	DIN EN10130—1991	
		SPCC	JIS G3141—1996	
2	普通冲压级 (DQ)	08AL	GB13237—1991	汽车门、窗、挡泥 板、马达、外壳等冲压 成型加工用
		DC03 (St13)	DIN EN10130—1991	
		SPCD	JIS G3141—1996	
3	深 冲 压 级 (DDQ)	03AL	GB5213—2001	汽车前车灯、油箱、 汽车门、窗等深冲成型 加工用
		DC04 (St14)	DIN EN10130—1991	
		SPCE	JIS G3141—1996	
4	超深冲压级 (EDDQ)	DC05 (St15) SPCEN	DIN EN10130—1991	油箱、汽车前灯、复 杂的车底板等成型加工 用
5	特超深冲压 级(S-EDDQ)	DC06 (St16) SPCEN	DIN EN10130—1991	

1.3 冷轧深冲钢板简要生产流程及特点

冷轧深冲钢板生产主要有以下工艺流程。

1.3.1 08F 深冲钢板生产工艺流程

08F 深冲钢板生产工艺流程如图 1-1 所示。

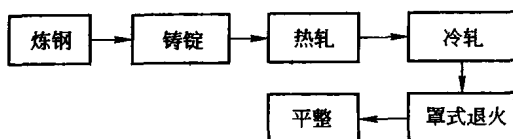


图 1-1 08F 深冲钢板生产工艺流程

该工艺流程是第一代深冲钢板 08F 的生产工艺流程，充分利用了沸腾钢塑性好的特点，采用了罩式退火。其特点是生产设备简单，投资少，对炼钢的要求不高（碳的质量分数不超过 0.08% 即可），但深冲性能较低，最高只能生产深冲压级（DDQ）深冲钢板，由于采用了罩式退火，表面质量难以提高。

1.3.2 08AL 深冲钢板生产工艺流程

08AL 深冲钢板生产工艺流程如图 1-2 所示。

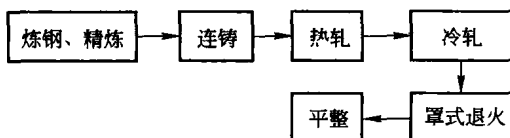


图 1-2 08AL 深冲钢板生产工艺流程

该工艺流程是第二代深冲钢板 08AL 的生产工艺流程，由于采用了连铸技术，产品的生产成本大幅下降，但连铸无法生产沸腾钢，对炼钢的要求提高了（实际碳的质量分数不超过 0.06%），必须采用精炼工艺，仍采用罩式退火。其特点是生产能力提高，成本较低，产品的深冲性能较好，可生产深冲压级（DDQ）产品。

1.3.3 超低碳深冲钢板生产工艺流程

超低碳深冲钢板生产工艺流程如图 1-3 所示。

该工艺流程是第三代深冲钢板超低碳深冲钢板的生产工艺流程，由于采用了精炼工艺加真空脱气技术，炼钢的水平大幅度提高（实际碳的质量分数不超过 0.01%），钢的洁净度得到了充分的保证，退

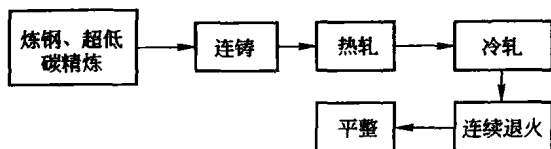


图 1-3 超低碳深冲钢板生产工艺流程

火采用效率高、能保证表面质量的连续退火。其特点是产品的深冲性能好，可生产超深冲压级（EDDQ）和特超深冲压级（S-EDDQ）产品，而且表面质量有了质的提高，可用来生产对表面质量要求极高的轿车外板。

1.3.4 连铸连轧深冲钢板生产工艺流程

连铸连轧深冲钢板生产工艺流程如图 1-4 所示。

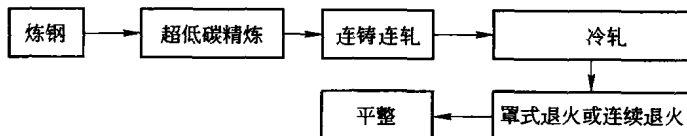


图 1-4 连铸连轧深冲钢板生产工艺流程

该工艺流程是连铸连轧深冲钢板的生产工艺流程，由于采用了连铸连轧技术，能耗、成本和投资大幅度下降。对钢质的要求也很高（实际碳的质量分数不超过 0.03%），钢的洁净度要得到充分的保证，退火采用罩式退火，目前该工艺流程仍处于探索研究阶段，有许多机理和问题尚未搞清，该流程生产的深冲钢板可达深冲压级（DDQ）。

1.4 第三代深冲冷轧板 IF 钢

用 BOF 吹炼 + RH 真空处理等冶炼技术，降低钢中的碳的质量分数（0.01% 以下），加入 Ti、Nb 元素固定 C、N 元素，可得到无间隙原子的纯铁素体基体组织，即无间隙原子钢，简称 IF（interstitial free）钢。

IF 钢具有最大的加工硬化指数 n 、塑性应变比 r 值及较低的屈强比, 从而使其具备最优异的深冲性能; 同时, 其基本性能比第一代、第二代冲压用钢有明显提高。

IF 钢退火组织为等轴铁素体, 随其晶粒尺寸增大, r 、 n 值提高。但过于粗大的晶粒, 会造成冲压件表面质量变差, 并损害产品的强度和低温韧性。实践证明, 铁素体晶粒尺寸应不高于 ASTM 的 6 级。

IF 钢基本可分三类, 它们是 Ti-IF 钢、Nb-IF 钢和 Ti-Nb-IF 钢, 它们的力学性能比较如下。

1.4.1 Ti-IF 钢

Ti-IF 钢的强度较低, 伸长率、 n 值和 r 值较高。强度较低是由于其细小的析出粒子密度较低的缘故, 降低钛的质量分数则会略微提高强度水平。纯 Ti-IF 钢的不利方面在于其 45° 方向的 r 值较低, 导致各向异性, 不适合做桶柱状加工件。图 1-5 所示为 Ti-IF 钢纵、斜、横三个方向的力学性能。

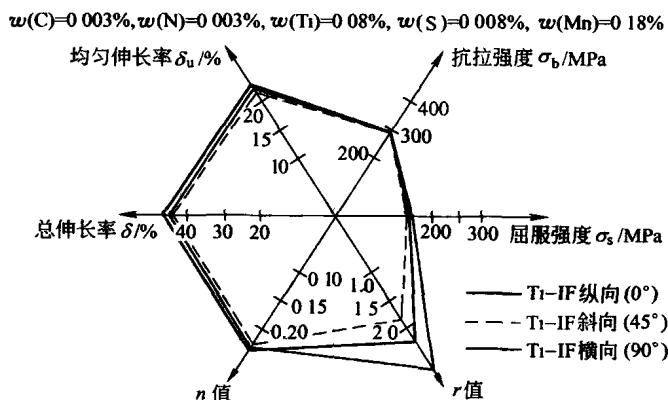


图 1-5 Ti-IF 钢纵、斜、横三个方向的力学性能

1.4.2 Nb-IF 钢

纯 Nb-IF 钢强度会显著提高。其纵向 r 值的降低和斜向 r 值的提高很明显。因此, 其平均塑性应变比 r 值高, 同时 Δr 值几乎为 0。

与 Ti-IF 钢相比, Nb-IF 钢的碳的质量分数对力学性能的影响要大得多。图 1-6 所示为典型成分 Ti-IF 钢和 Nb-IF 钢横向试样力学性能的比较。

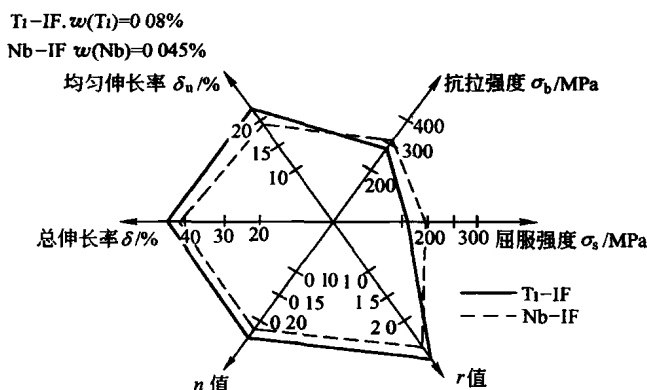


图 1-6 典型成分 Ti-IF 钢和 Nb-IF 钢横向试样力学性能的比较

1.4.3 Ti-Nb-IF 钢

Ti-Nb-IF 钢可获得纯钛和纯 Nb-IF 钢的综合性能 (见图 1-7)。其强度水平几乎与纯 Ti-IF 钢一样低, 同时 Δr 值显著降低。Ti-Nb-IF 钢特别适合生产镀锌产品。

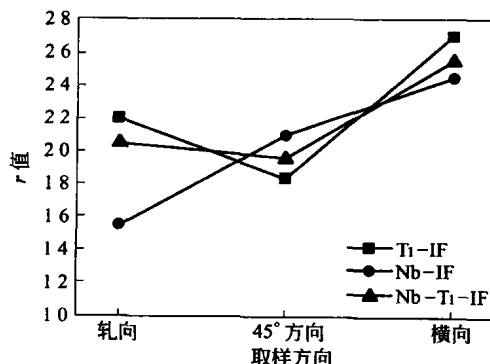


图 1-7 三种 IF 钢 r 值比较

1.5 冷轧深冲钢板发展方向

目前, 冷轧深冲钢板最大的高端用户仍然是汽车业, 而现代汽车业存在的问题主要集中在燃油消耗和尾气排放上, 这就要考虑车身降重。由于过去对轿车的舒适性和安全性关注过多, 使汽车自重有所增加。降低车身自重成为当今汽车发展的主要方向之一。

为满足降低车身自重这一需求, 开发高强度深冲钢板成为冷轧深冲钢板的发展方向。由于高强钢成型性能改进, 其具有较宽的力学性能与工艺性能范围, 这为汽车降低自重提供了可能。

冷轧高强度钢板主要用于车体内外板, 板厚范围通常为 0.5 ~ 1.2mm, 强度级别为 340MPa 以上。其强化机制主要为固溶强化、析出强化、固溶 + 析出强化、相变强化和析出 + 相变强化。

目前已经和正在开发的冷轧高强度钢板的强化机制、主要添加元素、强度级别和成型特性见表 1-3。

表 1-3 冷轧高强度钢板的强化机制及钢板特性

强化机制	主要添加元素	强度级别 (抗拉强度) σ_b /MPa	冲压成型特性	
			一般特性	具体特性
固溶强化 (低碳系列)	P - Mn, Si - Mn, P	340 ~ 400	一般加工用	拉延成型性良好, 有烘烤硬化 (BH) 性
固溶强化 (超低碳系列)	P - Mn, P - Si, Mn - P - Ti, Ti, Nb	340 ~ 590	深冲用	深冲性优良, 有烘烤硬化 (BH) 性
析出强化	Mn, Nb, Si - Mn - Nb	390 ~ 590	一般加工用	焊接性能良好
固溶 + 析出强化	Mn - Ti, Si - Mn - P - Nb, Ti, Cu	490 ~ 590	一般加工用	适应于弯曲加工, 高 r 值
相变强化 (马氏体系) (M + B)	Mn - Si, Mn - Si - P, Mn, Si - Mn - Nb	390 ~ 1470	低屈服比型	适应于高拉延加工, 有烘烤硬化 (BH) 性