

汽车用薄钢板工艺及特性

孟繁茂

(中信微合金化技术中心)

1 前言

环境保护要求汽车降低CO₂排放量尽可能的减小，要求减轻车体重量。在确保安全的条件下减重，必然要发展高强度钢板。车体的刚度只靠钢的强度是不行的，还需要改进车体部件结构设计，采用补强材料。乘用车四门车要求安全而且美观，因而对钢的成型性、耐撞击抗变形性、吸收撞击功能要高。众所周知，强度提高则加工困难。以上种种因素促成汽车用板材的发展，并且使其取得很大进步。

表 1 和表 2 分别列出日本 JIS 标准的冷轧带钢和热轧带钢，强度从 270MPa 到 1180MPa。大体上说汽车内外板用钢有如下几种：（1）普通低碳铝镇静钢；（2）以 Nb、Ti 为碳氮化物形成元素的细化晶粒钢和沉淀强化钢；（3）铁素体基上弥散分布的马氏体复相组织强化的双相钢；（4）利用残余奥氏体产生高延性的 TRIP 钢（相变诱导）；（5）Nb、Ti 固定超低碳（C<20ppm）的 IF 钢，是具有高 r 值的强化型 IF 钢。

表 1 冷轧带钢

TS(MPa)	JIS 标准 (川崎制钢)	注
270~	JSC270C JSC270D JSC270E JSC270F JSC270DG	超低 C+B 极好的深冲性能 极好的（点焊）抗疲劳性能
	(KTUX5)	超高 r 值 需要专用技术， α 区张润滑织构控制 $r \approx 3$
	JSC270H	
340~	JSC340W JSC340H JSC340P	超低 C+Nb，超深冲性能和烘烤硬化
	JSC370W JSC370P	
390~	JSC390W JSC390P	
440~	JSC440W JSC440P	
	(CHLY440)	双相 (α +M)，低 YR，超深冲性能
590~	JSC590R JSC590Y	双相 (α +M)，低 YR，超深冲性能
	(TRIP)	含残奥，高延性
780~	JSC780Y	
980~	JSC980Y	
1180~	JSC1180Y	强化 M 或 B，高抗弯性能

用热轧板代替冷轧板时，板厚精度和材质的均匀性是重要因素。例如评价成型性因素之一的反弹性，它受板厚度、屈服强度、抗拉强度等的影响，它们的均匀性对控制反弹性是有利的。

表 2 热轧带钢

TS (MPa)	JFS 标准 (川崎制钢)	注
270~	JSH270C JSH270D JSH270E	高精度 (厚度和形状) 新热带机 薄而宽板
	(KFN3)	
310~	JSH310W	高精度 (厚度和形状) 新热带机 薄而宽板
370~	JSH370W · J	
400~	JSH400W · J	
440~	JSH440W · J JSH440R	高烘烤硬化
	JSH440B (SAPH440BH)	
490~	JSH490W JSH490R JSH490B	
540~	JSH540W JSH540R	
	JSH540Y	薄而宽板并具极好的延性
	JSH540B	
590~	JSH590W JSH590R	
	JSH590Y	可买的薄而宽板并具极好的延性
	(RHA590DX)	TRIP 钢
	(RHA590FG)	超细组织 (超 HSLA)
780~	JSH780W JSH780R JSH780Y	
	(RHA780FG)	超细组织 (超 HSLA)
	(RHA780DH)	混合双相, 极好的延性和抗疲劳性能

表 3 列出镀锌钢带的强度级别牌号以及特性。

表 3 镀锌钢带

原板	TS(MPa)	JFS 标准 (川崎制钢)	注
冷轧	270~	JAC270C	超低 C+B 极好的深冲性能 极好的点焊缝抗疲劳性能
		JAC270D	
		JAC270E	
		JAC270F	
		JAC270G	
		JAC270H	
	(RAKTUX5)	超高 <i>r</i> 值镀锌版	

	340~	JAC340W	
		JAC340H	加 Nb 超低 C, 极好的深冲性能和 BH
		JAC340P	$r > 2.0$
	390~	JAC390W	
		JAC390P	
	440~	JAC440W	
		JAC440W (RACHLY440)	双相 (α+M), 低 YR 极好的深冲性能
		JAC590R	低 C HSLA 钢, 极好的可焊性
	590~	(RACHLY590)	双相 (α+M), 低 YR 极好的深冲性能
		780~	(RAAPFC780)
热轧	270~	JAH270C	
		JAH270D	
		JAH270E	
	370~	JAH370W · J	
	400~	JAH400W · J	
	440~	JAH440W · J	高精厚度形状 新热带机 薄而宽板
		JAH3440Y	
490~	JAH490Y		

2 汽车内外板的特性及其工艺方法

2.1 成型性

钢材成型性方式大致分为深冲、卷边、形状匹配以及压延性等，每种成型性都有其相应的特性要求，它们与屈服强度，抗拉强度，延伸率， n 值， r 值的密切相关，如 r 值对深冲，卷边性有效，屈服强度对形状匹配特别有效。各种成型性和材料特性的关系如表 4。

表 4 机械性能同成型性的关系

成型性 \ 机械性能	深冲	反弹性	凸缘翻边	形状匹配
屈服强度				◎
抗拉强度				△
延伸率		◎	○	
n 值	○	○	○	○
r 值	◎	△	◎	△

(有效 ←◎○△→ 无效)

2.2 抗起皱性

对汽车外面板，成型后“起皱”是非常讨厌的。抗“起皱”成为外板的极重要特性，它与冲压件的原板厚度和屈服强度有依从关系。维持冲压件表面圆滑，钢板的高强度而壁的减薄需要高的屈强比，这样的钢板才能在冲压成型时减少起皱缺陷的发生。作

为技术措施，开发了具有应变时效硬化现象的烘烤硬化型 IF 钢，也称 BH 钢。

塑性各向异性高度发展的IF钢，经过在强度方面的研发成为BH钢。典型IF钢冲压成形性极好，但屈服强度极低，容易产生“皱纹”。BH钢采用较高温度（例 830℃），低于 A_{c3} 点，稍高于 $NbC \rightarrow Nb+C$ 溶解反应的温度进行退火使NbC部分溶解，这样的钢既具备高深冲性，又有适量的固溶C提供烘烤时效硬化。固溶C、N量太少时不足以产生应变时效硬化和烘烤硬化，太多时会降低 r 值。因此控制得当是关键。热轧母板时，NbC已完全固定了固溶C。在冷轧后连续退火时即使{111}织构组织高度发展，又有部分NbC溶解，产生一定量的残余C、N。这是 340MPa级IF兼BH性钢板的生产工艺要点。

最新研究报告采用较高 C，过量 Nb/C 比（化学比）生产高强度 IF 钢。利用过剩 Nb 强化晶界而提高钢的强韧性。

2.3 焊接性能

车体装配多采用高效率点焊，不仅要求焊缝强度而且要求不发生点内断裂。决定因素之一是按钢中 P、S、C、Si、Mn 等计算的 C_{eq} 。特别是 S，必须尽量降低。其它元素是钢成分设计实行周密调控。

极低碳的钢应用广泛，特别是 IF 钢。焊缝疲劳性能和化学成分、机械性能见表 5。

表 5 实用钢的化学成分和机械性能

钢	C	Ti	Nb	B	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)	\bar{r}
ULC(Ti-Nb-B)	0.002	0.03	0.003	0.0004	157	314	48	2.0
ULC(Ti-Nb)	0.003	0.03	0.008	—	137	294	51	1.9
ULC(Ti)	0.002	0.06	—	—	127	284	52	2.1
Low-C	0.040	—	—	—	176	304	46	1.7

Ti-Nb-B 钢的疲劳强度最好，不论是交变应力还是扭转应力都高于其它 3 种钢。其次是 Nb-Ti 钢，只加 Ti 的钢明显不好，HAZ 组织显著粗大，强度低。

电阻焊时由于 C 量高，会引起焊缝区淬硬而性能劣化。特别是 M+F 双相钢，相变产生的残余应力会降低疲劳性能。

不同厚度不同强度钢板接合的部件在冲压成形前广泛使用激光焊，它对 HAZ 影响较少，可以达到高精度。

此外，也使用机械接合法。诸多的连接法也促进了钢板的多样性的发展。

2.4 涂镀性

高强度的应用主要是为减少厚度，这意味着还要提高抗腐蚀性。在严重腐蚀的环境下，提高耐蚀性也是重要课题。极低碳钢加 P、Cu 可提高耐蚀性。更高要求的部件要使用镀锌板。镀锌板分电镀锌和合金化镀锌两种。

镀锌过程是连续的，在约 550℃ 停留一定时间，这就要求钢的性能对此不敏感才好，所以极低碳钢对此有利。另外钢中 Si、Mn 比铁容易氧化成氧化物，它有害于 Fe-Zn 反应，产生缺陷，钢中 P 推迟 Zn 的合金化，有碍镀层质量。

2.5 强化机制

(1) 固溶强化

由于合金化镀锌板对 Si、Mn、P 有上限要求，所以固溶强化 Si、Mn、P 的使用有上限限制。

(2) 析出强化

作为析出强化元素 Nb、Ti、V，它们的最佳使用量的绝对值很小，对镀锌层的质量无影响。析出强化钢的弯曲加工，卷边性都很优越，可以说是该类钢特长。

(3) 相变组织强化

所谓相变组织强化在汽车板中就是复合组织强化。母相是柔软的铁素体，硬相是马氏体或贝茵体以及残余奥氏体。

以马氏体为主的第二相，马氏体-铁素体双相钢，从微观上看马氏体是应变不均匀的起因，因而导致良好的延伸特性，特别是均匀延伸性能更好。这是双相钢的超塑性在常温下的行为。如果含有残奥会更好。会产生 PRIP 现象。马氏体的存在降低屈服强度，对弯曲半径大的成形，对形状固定有利，即反弹性小。贝茵体含量多时，局部延伸性好，对卷边性的加工有改善作用。

总之，适当控制软相基体中弥散分布的第二相、第三相，就会取得各种特性。

(4) 烤漆硬化

此即为应变时效硬化，极低碳钢对加热曲线不敏感，对烤漆硬化有利。

表 6 该出 440MPa 以内的内外板的性能。

表 6 成形用钢板样品的机械性能

		YS(MPa)	TS(MPa)	El (MPa)	r	AI (MPa)
270MPa	加 B ULC	147	284	53	2.1	—
	BH	167	294	48	2.0	40
	超高 r 值	167	294	52	2.8	—
340MPa	加 B ULC	230	371	42	2.0	—
	BH	235	371	42	2.0	40
380MPa	加 B ULC	257	403	39	1.6	—
	双相	200	420	39	1.0	60
440MPa	加 B ULC	310	445	37	1.5	—
	双相	267	442	37	-1.0	60

BH(烘烤硬化)：2%预应变 170° C×20min 时效

3、超高 r 值钢板生产技术与成形性

用以往的方法生产的用于深冲成形的冷轧板， r 值最高达到 2.4。调整成分的 Ti-Nb 复合 IF 钢冷轧退火后 {111} 再结晶组织组织发达， r 值达到 3.0。其生产工艺要点是在 γ 区下部温度初轧，在 α 区上部温度精轧，为防止垂直板面方向的不均匀变形，热轧时加强润滑，这样热轧母板的再结晶 {111} 组织组织发达。

直角筒状深冲成形高 r 值是有效。防止深冲件侧面裂纹， Δr 值越大越好。

以上主要叙述日本汽车内外板用薄钢板情况。

3.1 高强度薄钢板的特征

(1) 高强度及其强化机理

表 7 列出了 TS440MPa 级到 1180MPa 级各类钢标准牌号及强化机理。

作为高强化的强化方法有：①Si Mn P 的固溶强化；②Ti Nb 等的碳氮化物的析出强化；③细化晶粒强化；④钢中硬质相马氏体或贝茵体相变强化；⑤加工位错强化。其中铌的应用受到广泛重视，铌是沉淀强化、细化晶粒强化、相变强化高强度高韧性汽车薄板不可缺少的元素。

作为冲压成形性的典型指标之一是拉伸试验的总延伸率，它与不同强化机制的高强钢的强度之间存在关系。总体上是随强度的提高总延伸率下降。双相钢的强度高，总延伸率也高；均匀组织钢强度较低，总延伸率高。百分之几的残余贝氏体引起 PRIP 现象导致总延伸率的提高，最适于胀型成形，已得到应用。

另一个典型的加工性能指标是拉伸卷边性，它用扩孔率表示。590MPa 级钢的扩孔率 $\lambda \times TS$ 和总延伸 $El \times TS$ 之间的关系表明：不同组织的钢加工性能是不同的，细晶粒钢的加工性能最好。

(2) 组织与加工性

一般来说，同一硬度的组织（单相组织）对提高卷边性能最有效，若是双相钢，两相硬度差小的卷边性能好。相反，沉淀硬化型的双相钢中软质的铁素体相由 TiC 强化后拉伸卷边性得到提高。特别 780MPa 级析出硬化型双相钢，具有高疲劳性能、优越的卷边性和高扩孔率，用作超高强度轻量化的车轮。

局部变形和均匀变形性都优越的理想的高加工性能钢，宏观上均匀的硬化组织而微观上不均匀的硬化组织是所希望的，其硬质相（马、贝、残奥）不被析出硬化而且最好是弥散分布。利用动态再结晶获得的微细化晶粒组织，均匀延伸率不下降，卷边性能显著提高。

利用应变时效硬化，开发了 440MPa 级热轧板，涂漆烘烤硬化后其抗撞击性与 590MPa 钢相当。

3.2 高速变形特性与撞击功吸收特性

帽形抗冲击试验指出变形速度越高，高强度钢吸收撞击能越大。反之，撞击速度越小，低强度钢吸收撞击能量越大。拉伸试验指出变形时，钢的 TS 和 YS 都随变形速度的增高而增高。双相钢晶界和相界都是吸收功的“地方”，所以双相钢具有更好的抗撞击能力。

3.3 高强度钢的成形性

表 7 日本钢铁协会标准和川歧公司生产的各类高强度钢的强化机理

抗张强度级别		JICF 标准	川歧标准	强化机理
440	热轧	JSH440WJ	SAPH440	C、Mn 固溶强化
		JSH440B	SAPH440LC	C、Mn 固溶强化
		JSH440R	KFR440E	C、Mn 固溶强化
			SAPH440BH	C、Mn 固溶强化+应变时效
	冷轧	JSC440W	APSC440	C、Si、Mn、P 固溶强化
		JSC440P	CHR440	C、Si、Mn、P 固溶强化
			CHLY440	马氏体相变强化（双相）
	热 镀 锌	JAH440WJ	RASA440	C、Mn 固溶强化
		JAH440R	RAAPFH440	C、Mn 固溶强化

	冷 镀 锌	JAC440W	RASAP440	C、Mn、P 固溶强化
		JAC440P	RACHRX440	C、Mn、P 固溶强化
			RACHLY440	马氏体相变强化（双相）
540	热轧	JSH540W	RHA540	C、Mn 固溶强化
		JSH540B	RHA540SK	Ti 沉淀强化+马氏体相变强化
		JSH540R	RHA540F	Ti、Nb 沉淀强化
		JSH540Y	RHA540D	马氏体相变强化（双相）
590	热轧	JSH590W	RHA590	C、Mn 固溶强化
		JSH590B	RHA590JK	Ti 沉淀强化+马氏体相变强化
		JSH590R	RHA590F	Ti、Nb 沉淀强化
		JSH590Y	RHA590D	马氏体相变强化（双相）
			RHA590DX	相变强化+残奥韧化
			RHA590SH	晶粒细化强化
	冷轧	JSC590R	APFC590	Ti、Nb 沉淀强化
		JSC590Y	CHLY590	马氏体相变强化
			APFC590DX	贝氏体相变强化+残奥韧化
	热 镀 锌	JAH590R	APFC590DX	Ti、Nb 沉淀强化
		冷 镀 锌	JAC590R	
			RACHLY590	马氏体相变强化（双相）
780	热轧	JSH780R	RHA780F	Ti 沉淀强化
		JSH780Y	RHA780D	马氏体相变强化（双相）
			RHA780HP	Ti 沉淀强化+马氏体相变强化
			RHA780SH	晶粒细化强化
	冷轧	JSC780Y	CHLY780	马氏体相变强化（双相）
980	冷轧	JSC980Y	CHLY980	马氏体相变强化（双相）
		JSC1180Y	CHLY1180	马氏体相变强化（双相）

高强度钢板的冲压成形存在很多问题。由于屈服点的升高，对表面起皱、面变形等表面质量和尺寸精度带来很大的不利影响；由于延伸率的下降引起鼓胀成形性、拉伸卷边性、弯曲性能下降。因此，高强度钢板的裂纹、微小的表面性状不良、冲压件反弹、翘曲、形状固定性不良等都是高强度成形时的大问题。

关于形状稳定性（Fixabilities）预先评定是用直角圆柱形冲压件底部反弹角 α 和立壁翘曲率 ρ 表示。两者的值越大成形性越不好。它们与钢的 YS 和 TS 有关。对极低碳 IF 钢，TS 440 MPa 级固溶强化钢，TS 590 MPa 级固溶强化钢，TS 590 MPa 级双相钢，TS 780 MPa 级析出强化钢共 5 个强度水平的钢种，研究了强度和弯曲半径对成形稳定性的影响，结果显示用与弯曲半径相当的塑性变形对评价变形固定性有很好的一致性，其准确性在 0.999 以上

以上叙述了 440-1180MPa 级各种类型的汽车高强度薄钢板应用现状及抗冲击功吸收特性和冷成型的形状固定性。

以上基本概括汽车钢板应用生产现状，钢板各种特性要求各种不同的物理冶金性能。我国汽车钢板生产水平还是相对落后，需要不断研制开发出新的高强度汽车钢新产品。