

# 铝合金汽车板性能及其应用

马鸣图<sup>1</sup>, 游江海<sup>2</sup>, 路洪洲<sup>1</sup>, 王志文<sup>3</sup>

(1. 中国汽车工程研究院有限公司, 重庆 400039; 2. 西南铝业(集团)有限责任公司, 重庆 401326;

3. 中国汽车工程学会, 北京 100055)

**[摘要]** 深入讨论了预处理工艺的影响并说明了该工艺在保证铝合金汽车板使用性能的重要性。介绍了铝合金汽车板在汽车上的典型应用。基于笔者认识和目前的研究进展, 提出了汽车用铝合金汽车板的重点研发内容, 降低成本和价格, 做好应用研究是扩大铝合金汽车板在汽车上应用的重要工作。

**[关键词]** 汽车轻量化; 铝合金; 汽车板材; 力学性能; 成形性; 预处理工艺

**[中图分类号]** U270.41 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)09-0004-17

## 1 前言

自2000年以来, 中国汽车工业迅速发展, 汽车的产量迅速增加。2009年, 中国汽车产销量已达1 364万辆, 产销量均跃居世界第一。汽车保有量已超过7 000万辆, 节能减排刻不容缓。

大量的试验和理论分析已经表明, 汽车轻量化是汽车节能减排的重要手段。对乘用车每减重10%, 可节油6%~8%, 排放降低4%<sup>[1,2]</sup>, 轻量化的实施可以通过优化设计、合理选材以及先进的工艺技术实施<sup>[1]</sup>。铝合金是重要的轻量化材料, 其比重为2.78 g/cm<sup>3</sup> (仅为钢的1/3), 典型的铝质零件一次减重效果可达30%~40%, 二次减重则可进一步提高到50%<sup>[2]</sup>; 目前铝合金应用有铸件、挤压材、锻件和变形板材等。1995—2000年, 铝合金在汽车上的应用增长了80%<sup>[3]</sup>。铝合金具有高的强重比, 如要达到AA5128同样的强重比, 钢的抗拉强度应达750 MPa; 在汽车中, 采用铝零件所节省的能量是生产该零件所用原铝生产耗能的6~12倍<sup>[4]</sup>。2006年欧、美、日等国家和地区的小汽车平均用铝量已经达到127 kg/辆; 欧洲铝协预测, 2015

年前, 欧洲小汽车用铝量将增至300 kg/辆<sup>[4]</sup>。应用铝合金可以降低排放, 轿车中每使用1 kg铝, 可使轿车使用寿命期内减少20 kg尾气排放。此外, 铝合金还是绿色环保材料, 可循环回收, 对铝合金汽车零件全寿命周期的能耗和CO<sub>2</sub>排放的评估表明: 铝合金是很有发展前景的绿色汽车制造材料。

2009年的欧洲车身会议资料上报导, 一些典型车型应用变形铝合金已达25~30 kg。采用铝合金板材制作发动机罩盖就可以明显减少二次碰撞对行人的伤害, 有利于汽车碰撞对行人保护的法规的实施。文章将对汽车用变形铝合金性能及应用进行系统论述, 并提出铝合金汽车板进一步的研发方向。

## 2 铝合金汽车板的力学性能

### 2.1 准静态应变速率下的铝合金汽车板材力学性能

目前铝合金汽车板主要有两个系列: 6000系和5000系, 其典型牌号的合金成分列于表1。两个系列典型牌号的铝合金板材设计概念基本成分和性能特点列于表2<sup>[5]</sup>; 其典型牌号的准静态应变速率下的力学性列于表3<sup>[6,7]</sup>。

**[收稿日期]** 2010-2-23

**[基金项目]** 国家“八六三”项目(2007AA03z551)

**[作者简介]** 马鸣图(1942-), 男, 河南兰考县人, 中国汽车工程研究院研究员级高级工程师, 研究方向为汽车材料的研究与开发、双相钢、合金钢等; E-mail: mingtuma@126.com

表1 6000系和5000系铝合金汽车板材的主要成分

Table 1 Main composition of automobile sheet for 5000 and 6000 series

合金 牌号	主要成分/%				
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
6016	1.0 ~ 1.5	<0.50	<0.20	<0.20	0.25 ~ 0.60
6022	0.8 ~ 1.5	0.05 ~ 0.20	0.01 ~ 0.100	0.02 ~ 0.10	0.45 ~ 0.70
6111	0.7 ~ 1.1	<0.40	0.50 ~ 0.900	0.15 ~ 0.45	0.50 ~ 1.0
5022	<0.25	<0.40	0.20 ~ 0.50	<0.10	3.50 ~ 4.9
5023	<0.25	<0.40	0.20 ~ 0.50	<0.10	5.0 ~ 6.2
5182	<0.20	<0.35	<0.10	0.20 ~ 0.50	4.5 ~ 5.0

表2 6000系和5000系的基本成分和特点

Table 2 Basic composition and behavior of 5000 and 6000 series

	概念成分	合金牌号	性能特点
6000系 合金	含 Cu	6111	高的烘烤硬化性对丝状腐蚀比较敏感
		6016	
	不含 Cu	6022	高的烘烤硬化性;良好的成形性;良好的腐蚀抗力
5000系 合金		6181	强度较高;良好的成形性;对晶间腐蚀较敏感;Cu能提高成形性
	高 - Mg	5182	
	中 - Mg	5754	良好的晶间腐蚀性能;良好的成形性
	低 - Mg	5052	强度较低

表3 6000系和5000系铝板典型牌号的力学性能

Table 3 Mechanical properties of typical trademark for 6000 and 5000 series

合金牌号	状态	E 值/MPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	力学性能			备注
					YTS/MPa	UTS /MPa	EL/%	
6111	T <sub>4</sub> Pd	69 000	0.3	2.89 × 10 <sup>-3</sup>	146.0	290.0	25.0	纵向
6022	T <sub>4</sub> Pd	69 000	0.3	2.86 × 10 <sup>-3</sup>	122.0	238.0	30.0	纵向
5182	O	69 000	0.3	2.84 × 10 <sup>-3</sup>	123.0	276.0	25.6	纵向
5023	O	69 000	0.3	2.85 × 10 <sup>-3</sup>	124.0	280.0	32.0	纵向

铝合金汽车板的流变曲线拉伸断裂后的试样及其和软钢的对比见图1<sup>[5]</sup>。从图1可以看出:铝合金汽车板的均匀延伸率和总延伸率均低于软钢,特别是均匀延伸和缩颈延伸均远低于软钢。

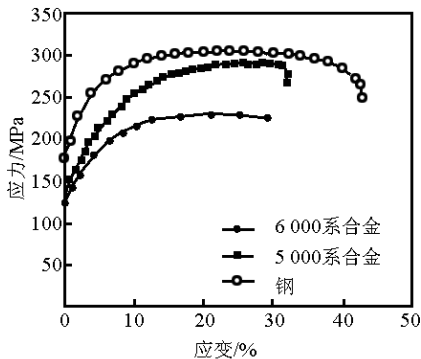


图1 铝合金和钢的拉伸曲线

Fig. 1 Tension curves of aluminum alloy and steel sheets

## 2.2 高应变速率下的铝合金板材的力学性能

材料的高应变速率下的响应特性对于冲压模拟,尤其是所制汽车构件的碰撞模拟是很重要的力学参量。铝合金的高应变速率的本构特性亦是电磁成形时应考虑的一个参量,这时应变速率已高达

3 500 s<sup>-1</sup><sup>[8]</sup>,从而可以获得比 AA5754 和 AA6111 成形极限图上的极限应变更高的成形参量<sup>[9]</sup>;这种结果与电磁成形时工具和板材的交互作用,塑性的模具稳定性以及材料的应变速率敏感性有关。因此已有一系列工作来研究铝合金汽车板材的应变速率敏感性。

通常认为,铝合金的应变速率敏感性是低的。然而,许多研究表明:室温下当应变速率高于 1 × 10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>时,Al 或铝合金的应变速率敏感性增加,纯 Al 的室温下的应变速率敏感性是适中的,流变应力和应变速率的对数呈线性关系,在应变速率高于 1 × 10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>时,应变速率敏感性增加<sup>[10,11]</sup>。然而,随着合金量增加或加工工艺的变化(如热处理和冷加工)都会降低室温下的应变速率的敏感性<sup>[10,12,13]</sup>,合金 AA6061 在峰值时效状态下有类似的结果,当 AA6061 合金在过时效状态,应变速率高于 1 × 10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>时,其应变速率敏感性有增加<sup>[14]</sup>。在 AA6082, AA7108<sup>[13]</sup> 和 AA7075<sup>[15]</sup> 合金中也观察到类似的趋势。

将不同 Mn 含量(1.8% ~ 8.4%)的高纯度 Al - Mg 合金的挤压材,加工成哑铃状试样,进行 1 × 10<sup>-4</sup> ~ 2 × 10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 应变速率下的拉伸试验,结果表

明:在应变速率高于  $1 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$  时,塑性应变为 0.2 % 的屈服强度随 Mn 含量增加而增加,但在应变速率低于  $1 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$  时,这种关系不明显;而且各种应变速率下的应力应变曲线形状无明显变化<sup>[16]</sup>。在应变速率为  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和速率  $1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$  之间纯 Al 的最大流变应力随应变速率增加而增加,而 Al-Mg 合金则随应变速率增加而下降。但在应变速率超过  $1 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$  时,除 Al-8% Mg 合金之外,全部 Al-Mg 合金的最大流变应力均随应变增加而增加。对 AA5182 的热轧板的不同应变速率下的流应力进行了检验,结果表明,在应变小于 5 % 时,流变应力随应变速率增加而增加;当变形继续增加,在应变速率在  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和  $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  时,最大流变应力随应变速率增加而降低,当应变速率高于  $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  时,则最大流变应力随速率增加又开始上升,而总延伸率则随应变速率增加而增加;在应变速率达到  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  时,总延伸率高于 40 %,而在应变速率为  $1 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$  时,大约为 30 %<sup>[17,18]</sup>。对 AA5454 的正火态和 H34 状态的应变速率敏感性试验表明:应变速率对这两个状态的 AA5454 的屈服强度影响很小,但使总延伸率明显上升<sup>[11]</sup>。这种延伸率增长与缩颈后出现的变形有关,是由延性失效机理的时间相关性所引起的。

文献<sup>[8]</sup>研究了 AA5754 和 AA5182 板材在准静态(QS— $3.310^{-3} \text{ s}^{-1}$ )和应变速率为 1, 100, 600,  $1500 \text{ s}^{-1}$  的拉伸性能,材料的板原为 1.6 mm,沿轧制方向取样,数据用 Johnson-cook 方程处理。AA5754 和 AA5182 是非热处理的加工硬化 Al-Mg 合金,主要用于车身结构件和内板,合金成份列于表 4。合金中的第二相为富 Fe 相和富 Mn 相,未变形的 AA5182 比 AA5754 中含有更高的第二相,且粒子尺寸更大。AA5754 和 AA5182 中第二相的百分数分别为 0.60 % 和 0.98 %。普通力学性能试验在电流伺服试验机上进行,而高速拉伸在 TSHB(拉伸 Hopkinson 杆)上完成。在进行拉伸试验时,标距长将明显影响总延伸值,对铝合金变速拉伸变形时,这点影响更为明显。试样选用标距部分  $12.5 \text{ mm} \times 1.75 \text{ mm}$  哑铃试样,不同应变速率下的真应力和对数应变的试验曲线见图 2,图中 QS 的应变速率为  $3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

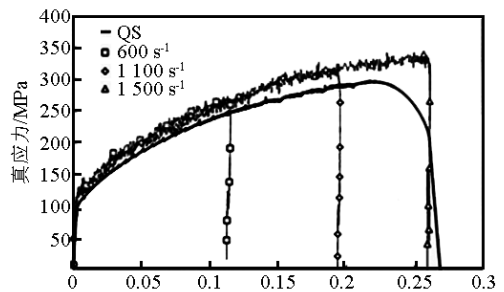
从图 2(a)可以看出:在较高的应变速率下,与准静态的应变速率下(QS)的流变应力相比有一定的增长,但在  $600 \text{ s}^{-1}$  和  $1500 \text{ s}^{-1}$  的应变速率下,流

变应力几乎在同一水平,这与文献<sup>[12,13]</sup>中的结果类同;但 AA5182 在所试验的应变速率范围内,流变应力对应变速率是不敏感的,硬化速率几乎没有变化,见图 2(b)。

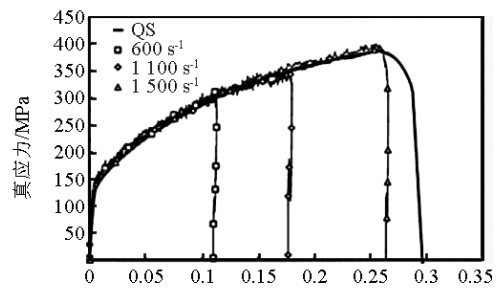
表 4 试验的 AA5754 和 AA5182 的合金成份

Table 4 Composition of AA5754 and AA5182 series alloy used in the testing

合金 牌号	合金成份/%							
	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cu	Cr	Ti
5754	3.2	0.2	0.3	0.06	-	-	-	0.01
5182	4.5	0.35	0.27	0.08	0.05	0.05	0.03	0.1



(a) AA5754



(b) AA5182

图 2 应变速率对流变应力的影响

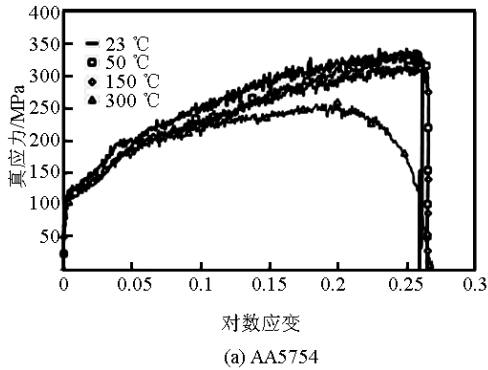
Fig. 2 Effect of strain rate on the flow stress

在应变速率为  $1500 \text{ s}^{-1}$ , 试验温度 (23, 50, 150, 300 °C) 对流变应力的影响见图 3。由图 3 可以看出,在这一应变速率下,两个合金的应力应变特性随温度的变化表现有类似趋势,即从室温到 150 °C 之间流变应力有轻微的下降,但在 300 °C,两个合金的流变应力有明显的下降,即温度升高,硬化速率下降,导致流变应力较低。

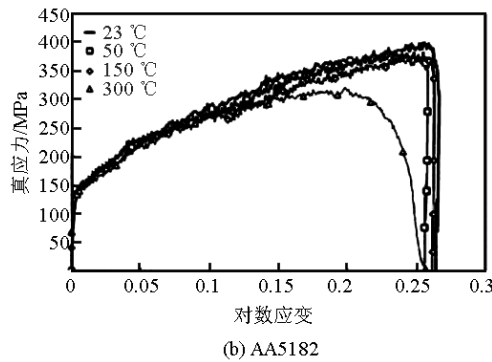
变形过程中应变对试验温度的影响可以作为一个绝热热过程来处理,实验材料的温度升高是由于塑性变形引起,塑性功部分转化为热量,其升温可由式(1)计算:

$$\Delta T = \beta \frac{1}{\rho C_p} \int_0^{\epsilon_p} \sigma d\epsilon_p \quad (1)$$

式(1)中,  $\beta$ 为总的塑性功转向为热的部分, 试验得出  $\beta$ 的平均值为 0.95<sup>[19]</sup>;  $\Delta T$ 为由于塑性变形引起的温度增长量;  $C_p$ 为试验材料的热容;  $\rho$ 为材料密度;  $\sigma$ 为单轴拉伸流变应力;  $\epsilon_p$ 为轴向的塑性应变, 而积分表示全部塑性功。利用式(1)计算的 AA5754 室温变形时的温升大约为 26.5 °C, 而对于 AA5182 为 31 °C, 这样的温升对试验结果和趋势影响不大。



(a) AA5754



(b) AA5182

图3 在 1 500 s<sup>-1</sup>的应变速率下, 初始温度对流变应力的影响

Fig. 3 Effect of initial temperature on the flow stress under the strain rate 1 500 s<sup>-1</sup>

总伸长由断裂后的试样直接测定。两种板材的延伸率和应变速率的关系有类似趋势, 见表 5, 即当应变速率增加时, 总伸长率也明显增加, 而 AA5754 比 AA5182 的延伸率随应变速率增长更加明显。在恒定的应变速率 1 500 s<sup>-1</sup>下, 延伸率和温度的关系列于表 6。表 6 中数据表明, 在试验温度 150 °C 以下, 两个合金的延伸率没有明显变化, 然而, 当试验温度为 300 °C 时, 延伸率明显下降。

应变、应变速率和温度对 Von, Mises 流变应力的影响, 通常用 Johnson - cook 经验本构模型模拟<sup>[20,21]</sup>, 并可表示为:

$$\sigma = [A + B\epsilon_{p1}^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (2)$$

式(2)中  $\epsilon_{p1}$  为有效塑性应变;  $\dot{\epsilon}^* = \epsilon_{p1}/\epsilon_0$ ,  $\dot{\epsilon}^*$  为尺度塑性应变率或者是被参考塑性应变率  $\epsilon_0$  归一化的塑性应变率;  $T^*$  是由下列方程所给定的均质温度表达式:  $T^* = (T - T_{室}) / (T_{熔} - T_{室})$ ;  $A, B, C, n, m$  是拟合给定材料数据求得的常数。式(2)第一项表示了给定应变速率下的材料加工硬化特性, 第二和第三项分别表达应变速率和温度的敏感性; 应用非线性回归程序用式(2)拟合试验数据, 求得式(2)中的各常数列于表 7。

表 5 两种铝合金板材的延伸率和应变速率的关系

Table 5 The relation of elongation for two aluminum alloy sheets with strain rate

合金牌号	不同应变速率下的延伸率/%		
	QS(3.33 × 10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )	600 s <sup>-1</sup>	1 500 s <sup>-1</sup>
AA5754	30.6	38.1	43.5
AA5182	29.6	33.5	37.5

表 6 两种铝合金板材的延伸率和温度的关系

Table 6 The relation of elongation for two aluminum alloy sheets with testing temperature

合金牌号	不同温度下的延伸率/%			
	23 °C	50 °C	150 °C	300 °C
AA5754	43.5	43.5	41	29.3
AA5182	37.5	37.7	37.2	27.9

注: 应变速率为 1 500 s<sup>-1</sup>

表 7 AA5754 和 AA5182 的 Johnson - cook 方程中的参数

Table 7 Parameteis in Johnson - cook equation for AA5754 and AA5182

	回归的拟合值(95% 的置信度)				
	A	B	n	C	m
AA5754					
上限	67.456	471.242	0.424	0.003	2.519
中值限	49.492	456.715	0.371	0.002	2.381
下限	85.420	485.769	0.477	0.004	2.656
AA5182					
上限	106.737	569.120	0.485	-0.001	3.261
中值限	96.077	554.512	0.450	-0.002	3.088
下限	117.398	583.728	0.519	0	3.433

光学和 SEM 观察表明: AA5754 和 AA5182 在拉伸变形时的失效模式为延性剪切失效, 其缩颈量和损伤量随应变速率而增加, 损伤是孔洞在第二相上的萌生长大和粗化过程的结果, 在临近断口表面

的部位其塑性应变和水静压力是最高的,对断口表面初窝内的粒子检测表明:孔洞是由于第二相粒子的断裂或第二相粒子和基体交界面的脱聚而形成;能谱检测表明:第二相粒子是富 Fe 和 Mn 的金属间化合物相。应变速率对 AA5754 和 AA5182 的缩颈断口形貌和孔洞的影响见图 4, 高应变速率使断口附近的空洞率明显上升。

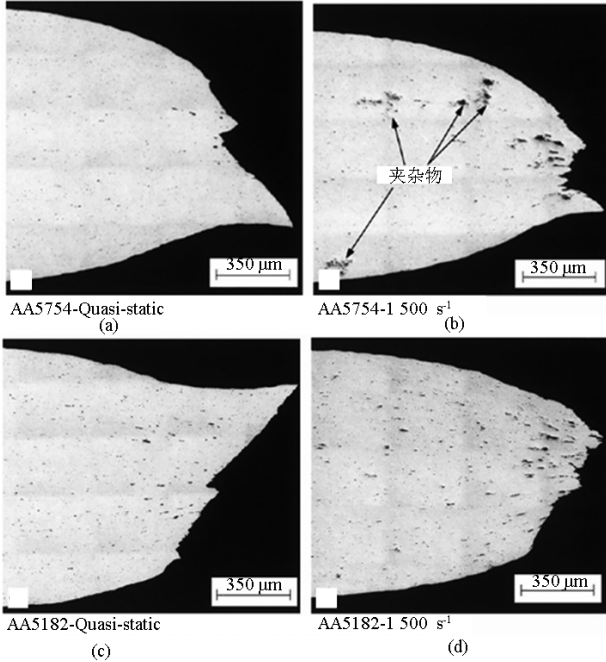


图 4 不同应变速率下的 AA5754 和 AA5182 的断口附近的夹杂物和空洞的比较

Fig. 4 Inclusion and damage in the near tension fracture of AA5754 and AA5182 under various strain rate

已经表明<sup>[8]</sup>:回归拟合参数计算的曲线和试验结果具有良好的一致性。

### 3 汽车用铝合金板材的成形性

板材的成形性是指为生产一个满意的最终产品,在冲压过程中钢板承受形状变化的能力。其成形性可以通过成形性试验进行评价,成形性试验可以分为有几何约束的成形性试验和无几何约束的成形性试验<sup>[22]</sup>。在钢铁材料中,为评价各类板材的成形性已有大量试验结果<sup>[23]</sup>,但铝合金板材的成形性试验结果的报导还较少。

#### 3.1 单轴拉伸下的铝合金汽车板的成形参量

单轴拉伸试验是评价材料成形性的最常用的试验,为提高板材的成形性,希望板材具有较低的屈强比,较高的加工硬化速率、均匀延伸率以及  $n$  值(应变硬化指数)和  $r$  值(塑性应变比);5000 系和 6000 系合金的单轴拉伸下典型的成形参量见表 8<sup>[7]</sup>。

可以看出:铝合金汽车板在同样强度下和钢铁材料相比,其均匀延伸率、 $r$  值均低于后者,但  $n$  值仍然较高,并具有较高的 FLD;因此,铝合金仍具有一定的成形性,可以冲压成汽车的外覆盖件。

#### 3.2 铝合金汽车板的成形极限曲线

成形极限曲线是表征材料在多种应力状态下的成形性的一种表征<sup>[22]</sup>;或者是汽车板材基本处于平面应力条件下,塑性失稳或断裂的最大主应变与次主应变的函数关系曲线。测量 FLC 曲线的方法是圆顶冲头延展试验<sup>[22,24,25]</sup>,几种铝合金和软钢的成形极限曲线对比见图 5<sup>[5]</sup>,其铝合金板材相应的性能见表 3 和表 8。

表 8 5000 系和 6000 系铝板典型牌号的成形性

Table 8 Formability of typical trademark for 5000 and 6000 series

合金	状态	板厚/mm	成形性参量				
			UEL/%	$n$ 值*(6%~12%)	$K$ 值*(6%~12%)	$r$ 值(6%~12%)	FLDo/%
6111	T <sub>4</sub> Pd	0.9	18.0	0.23	540.0	0.65	22.8
6022	T <sub>4</sub> Pd	0.9	19.0	0.25	525.0	0.66	23.2
5182	O	0.9	21.0	0.32	514.0	0.82	22.2
5023	O	0.9	22.0	0.31	520.0	0.85	26.5

\*: Hollornon 方程:  $\sigma = k\epsilon^n$ ; 冷弯垂直于轧向  $d=0, 180^\circ$  不裂; FLDo 为工程应变

文献[26]曾研究了不同牌号铝合金板材的软化态和硬化态的成形极限图。所用材料为3004及

5052 的 1 mm 厚的铝板,处理工艺和性能列于表 9,其相应的成形极限图见图 6。

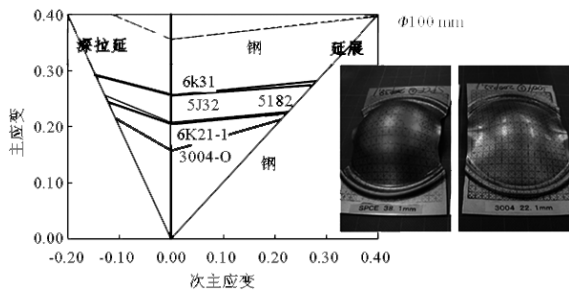


图5 铝合金板材和软钢的 FLC 曲线对比  
 Fig. 5 The comparing of FLC for aluminum alloy sheet with FLC for soft steel sheet

表9 3004 及 5052 的板材处理工艺和性能  
 Table 9 Treatment processing and properties for 3004 and 5052

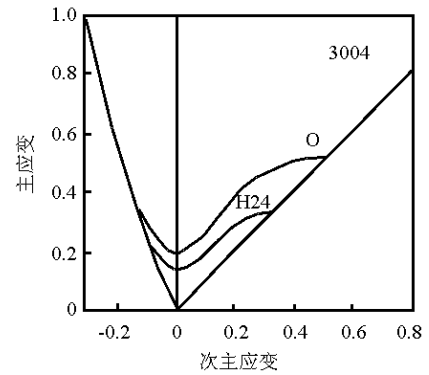
材料	样品方向/(°)	抗拉强度/(N · mm <sup>-2</sup> )	延伸率		n	r	ω <sup>2</sup>
			e <sub>u</sub> /%	e <sub>b</sub> /%			
3004-0	0	187	19	22	0.21	0.51	
	45	182	21	25	0.22	0.61	0.40
	90	181	19	24	0.21	0.50	
3004-H24	0	240	7	10	0.05	0.41	
	45	226	6	10	0.05	0.94	0.24
	90	248	7	9	0.04	0.69	
5052-0	0	211	19	21	0.24	0.60	
	45	204	22	25	0.25	0.56	0.38
	90	201	23	26	0.25	0.78	
5052-H34	0	254	7	10	0.08	0.63	
	45	242	7	10	0.09	0.58	0.21
	90	244	7	10	0.09	0.80	

$\omega^2 = (Hm/a)^2$ ; Hm—杯突高度; a—模子半径

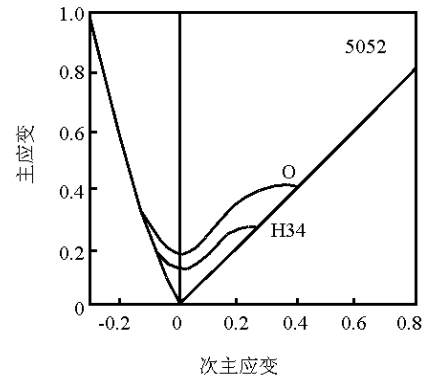
从图6可以看出:不论3系或者5系的铝合金,硬化状态的成形性均逊于软化状态的成形性,文献还研究了不同应变路径对铝合金板材成形性的影响,采用的路径见图7;图8示出了3004-0状态和5052-0状态的板材经应变路径I变形之后的成形极限图的对比;可以看出,经等双轴拉伸变形随之单轴拉伸变形的试样和单一的应变路径相比,可以提高靠近平面应变变形区的极限应变;而第二个应变路径试验结果表明:在单轴拉伸变形之后,随之双轴拉伸变形的试样和单一应变路径相比,可以提高从双轴拉伸到单面应变变形区的极限应变。

### 3.3 汽车铝合金板的深拉伸与延展性能

许多汽车零件经冲压成形,并具有较杂的几何



(a)



(b)

图6 不同处理工艺的3004和5052的成形极限图  
 Fig. 6 FLD various tech. for 3004 and 5052

形状。在冲压时,成形零件同时承受延展和深拉伸变形的综合,而表征这种成形性的试验为延展和深拉伸实验。通常软钢汽车板由于具有高的n值(0.20~0.28)、高的r值(1.5~2.4),且总延伸率大于40%,因此具有高的深冲和延展成形性<sup>[23]</sup>;而铝合金的r值通常在0.7~0.8,总延伸率只有20%~30%,因此研究铝合金深冲成形性,对汽车用铝合金开发和应用具有特殊意义。Jain等<sup>[27]</sup>研究了汽车铝合金板的深拉伸和延展成形性,所用的实验装置见图9。

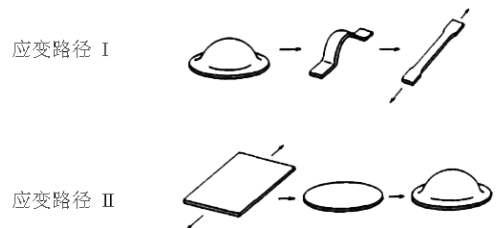


图7 两种应变路径的对比

Fig. 7 Experimental procedures for the two types of two-stage strain paths

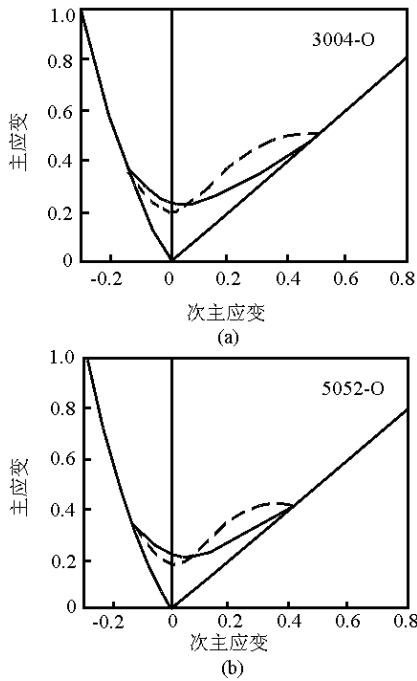
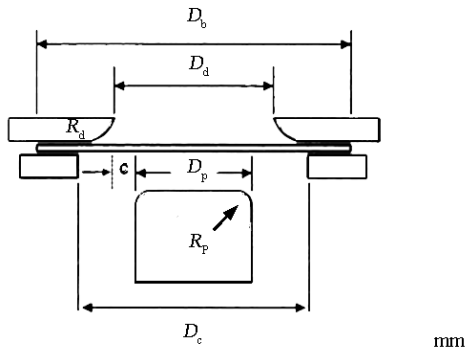


图8 3004 和 5052 的应变路径 1 下的成形极限曲线  
Fig.8 FLC 3004 and 5052 determined for strain path1



模具尺寸	$D_d$	$D_p$	$D_c$	$c$	$R_p$	$R_d$
	149.86	153.83	149.99	177.8	1.92	12, 12.9, 6.3

$D_d$ —模具直径;  $D_p$ —冲头直径;  $D_c$ —压边直径;  $R_d$ —模具截面半径;  $R_p$ —冲头截面半径;  $c$ —间隙,  $(D_d - D_p) / 2$

图9 深冲和延展成形的试验装置

Fig.9 Geometric parameters of CUP tests

试验用材料为: AA5754 - 0 和 AA6111 - T4, 合金的单轴拉伸下的性能列于表 10。AA5754 含有 3 % Mg 产生固溶强化, 并产生高的应变硬化速率。AA6111 是沉淀强化的 Al - Mg - Si - Cu 合金。经铸轧后, 最后冷轧至 1.55 mm。经 530 °C 的温度固溶, 保温时间足以使 Mg, Cu, Si 固溶, 经快速淬火和几个星期的自然时效, 检测单轴拉伸性能列于表 11; 为使摩擦系数恒定, 在板材两边加上 0.127 mm 的 Teflon 塑料薄膜。试验时通过特定的断裂时的极

限载荷而估算极限拉延比 LDR (极限拉延高度与试样直径之比)。

表 10 给出了不同直径试样的冲头位移和冲头直径的关系。可以看出: 对于两个材料, 当板坯直径达到一定值后, 在深拉延时的断裂之前的载荷极限和板坯的直径无关, 利用这一极限载荷的概念, 就可以确定 LDR; 从图 10 也可看出: 板坯直径越大, 则达到极限载荷的冲头位移量越小。

利用这一极限载荷的概念, 用 3 ~ 5 个试样可以快速确定板材的 LDR 值。利用这种方法确定的不同模具剖面半径下的所得的 AA5754 - 0 和 AA6111 - T4 的 LDR 试验值列于表 11。

表 10 AA5754 - 0/AA6111 - T4 合金单轴拉伸下的性能和成形性参量

Table 10 Uniaxial tensile properties and tensile formability parameters of AA5754 - 0 and AA6111 - T4

材料	取样方向/ $^{\circ}$	拉伸性能				拉伸成形性参量	
		YS	TS	Eu	Ei	$n$	$r$
AA5754 - 0	0	105.1	229.9	18.5	22.6	0.32	0.71
	45	103.2	219.5	22.5	25.8	0.31	0.64
	90	105.6	220.2	20.5	23.9	0.31	0.78
AA6111 - T4	0	170.3	294.8	18.9	22.7	0.25	0.66
	45	163.0	289.0	21.5	23.0	0.24	0.60
	90	164.3	291.9	20.0	22.7	0.24	0.76

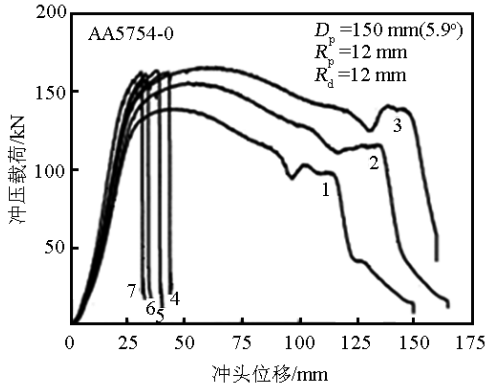
表 11 不同模具剖面半径下的 AA5754 - 0 和 AA6111 - T4 的 LDR 试验值

Table 11 Experimental LDR values for AA5754 - 0 and AA6111 - T4

工具参数 系列编号	模具剖面 半径 $R_d$ /mm	LDRs 值	
		AA5754 - 0	AA6111 - T4
1	12	2.16	2.03
2	9	2.07	1.95
3	6	2.07	1.78
4	3	1.44	< 1.44

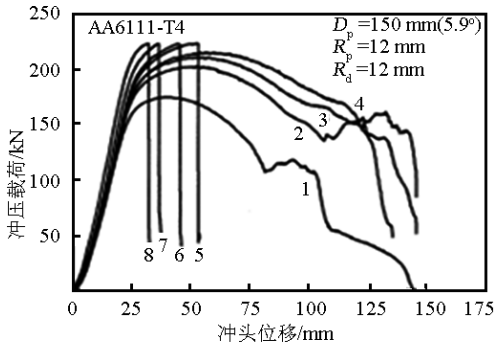
可以看出, 在同样的  $R_d$  值下, AA5754 - 0 的 LDR 值高于 A6111 - T4, 这一区别与两种材料的加工硬化、冷弯性以及不同的断裂特点有关。同时, 表 11 中数据也表明两种材料的 LDR 值均随模具的剖面半径的降低而下降, 而 AA6111 - T4 要比 AA6111 合金更为敏感。这与前者较后者的  $n$  值更低以及冷弯性能更差有关。如在板坯上彩印圆形网格, 则可以测量沿深拉延杯的表面的应变分布, 从而求出不同变形条件下的深拉延杯的剖面的应变分布, 并以

主应变和次应变为坐标画出这种变形条件下的成形极限曲线。同时,也可用有限元分析对其深冲和延展成形性进行预测。



板坯直径: 1—292.1 mm; 2—311.2 mm; 3—323.9 mm; 4—330.2 mm; 5—338.6 mm; 6—355.6 mm; 7—374.7 mm

(a) AA5754-0



板坯直径: 1—279.4 mm; 2—304.8 mm; 3—311.2 mm; 4—317.5 mm; 5—323.9 mm; 6—330.2 mm; 7—349.3 mm; 8—368.3 mm

(b) AA6111-T4

图 10 不同板坯直径的冲头载荷和冲头位移的关系

Fig. 10 Punch load versus punch displacement curves at various blank diameters for tests

### 3.4 铝合金汽车板材的延展弯曲成形性

试验是模拟板材在延展或拉伸作用下的弯曲的成形性。这种成形性通常采用由 Demeki<sup>[28]</sup>提出的角度延展弯曲或半球延展弯曲的试验方法进行;以测定  $R/t$  或  $t/R$  条件的冲头半径 ( $R$ ) 和板材厚度 ( $t$ ) 以及板材失效时延展弯曲高度 ( $H$ ) 之间的关系曲线。延展弯曲成形性所用夹具及样品见图 11<sup>[23, 29, 32]</sup>; 该类型夹具曾用具测量各类先进高强度钢的角度弯曲成形性<sup>[23]</sup>, 所得的试验结果将有助于板材零件的设计和冲压工艺的制定。

测量延展弯曲成形性的铝合金面板的性能见表 12<sup>[24]</sup>。板材厚为 0.81 ~ 2.54 mm, 203.2 mm 的方板

或长方形板, 半球延展弯曲采用试样为 203.2 mm 的方板或长方形板。半球冲头半径为 50.8, 19, 12.7, 9.5, 6.4, 3.2 mm。角度延展弯曲试验, 采用压头半径 1.6, 3.2, 6.4, 9.5 mm, 在失效开始时的相对应的最大载荷下的延展高度作为失效判据。

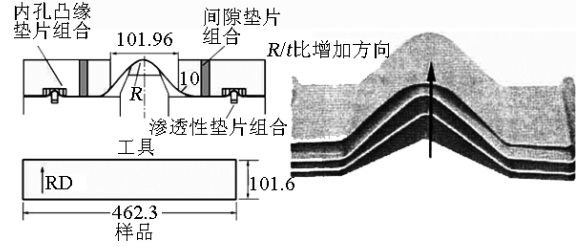


图 11 延展弯曲成形试样和装置示意图(单位:mm)

Fig. 11 Tool and sample geometric parameters of stretch - bend test (Unit: mm)

几种试验材料的半球延展弯曲成形性的试验结果见图 12, 图 12 中示出了弯曲半径和板材厚度的影响。横坐标的  $R/t$  强调了在弯曲进行时的延展性能, 而如以  $t/R$  做横坐标作图, 则强调了在延展进行时的弯曲性能; 图 13 给出了板厚与两种冲头直径的角度弯曲时极限高度的关系。

表 12 用于延展弯曲试验的汽车铝合金板材性能

Table 12 Properties of aluminum alloy sheet, used in the stretch - bend test

合金、处理	来源	Ts/MPa	Ys/MPa	标距试样的伸长/%	n	r
2036 - T4	A, R	338	193	24	0.23	0.75
5182 - 0	R	276	131	25	0.33	0.80
6009 - T4	A	228	124	25	0.23	0.70
6010 - T4	A	290	172	24	0.22	0.70

注: 2036 - T4, A 的提供板材厚度: 0.81, 0.91, 1.02, 1.80 mm

2036 - T4, R 的提供的板材厚度: 1.14, 2.54 mm

可以看出: 几种试验条件下的 5182 - 0 和 6009 - T4 的延展弯曲成形性均优于 2036 - T4 和 6010 - T4, 对比 AK 钢和 DP - 90T 以及 HSLA (F50) 钢的数据<sup>[23]</sup>, 铝合金 AA/5182 - 0 和 6009 - T4 的延展弯曲成形性略逊于 HSLA - F50 和 DP - 90T, 但远低于低碳软钢 AK 钢。所展示的一些成形性, 可以作为铝合金延展弯曲成形时的设计参考。

### 3.5 铝合金汽车板的回弹

由于铝合金板材的初始加工硬化性能高于软钢, 因此其冷弯时的回弹也大于软钢。一些铝合金牌号的回弹和软钢板的对比见图 14 (a); 其回弹角的试验装置和测量方法见图 14 (b)。不同的弯曲半



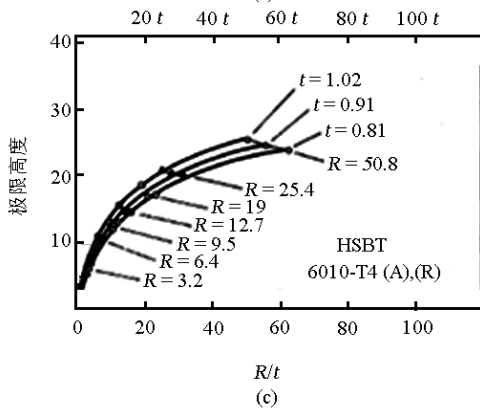
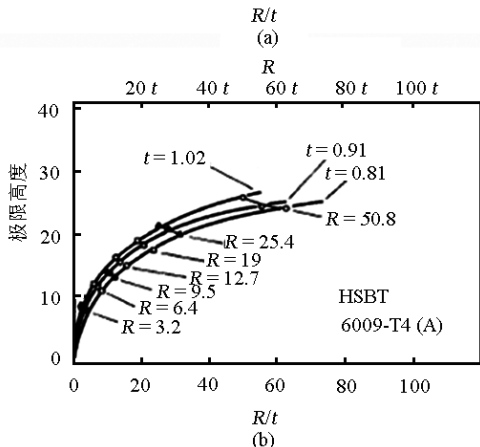
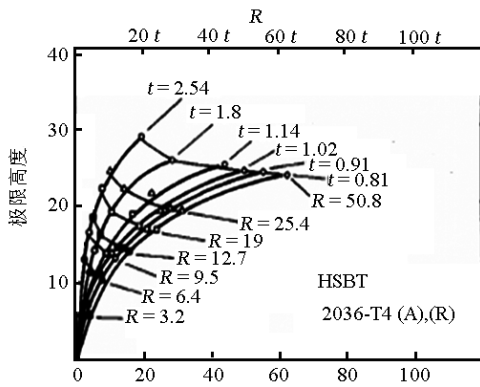


图 12 几种材料的半球展延弯曲成形性的试验结果(单位:mm)

Fig. 12 KtH formability curves of HSBT for various aluminum alloy sheets(Unit:mm)

径下铝合金回弹角较软钢板大 2~3 倍<sup>[5]</sup>,这一特点,在设计铝合金冲压模具时必须充分考虑。

文献 [30,31] 曾研究了 AA6022, AA6082, AA6111, A6016 等合金的回弹特性;合金 AA5754-0 具有很好的成形性和抗蚀性,文献 [32] 中研究了 5754-0 状态的铝合金板的回弹,板材供货状态的屈服强度为 104.6 MPa,经 10%,20%,30% 冷轧后的屈服强度分别为(沿轧向):189,208,268 MPa,在图 15 所示的 V 型弯曲装置上进行变形并测

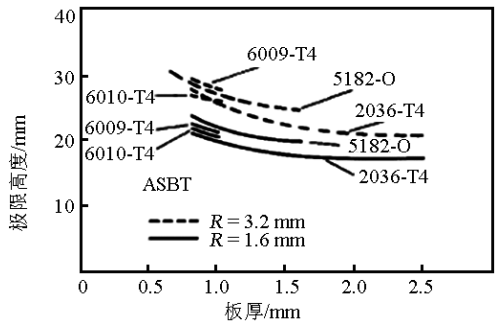
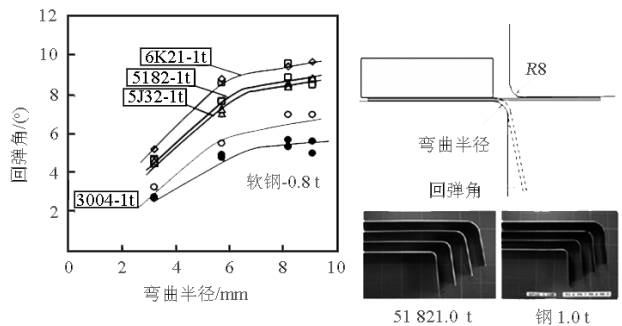


图 13 角度延展弯曲成形时 2 种冲头半径的板厚和极限高度的关系曲线

Fig. 13 Effect of thickness on formability of the aluminum alloy at 2 punch radii in the ASBT



(a) 不同材料回弹角对比

(b) 试验夹具和试样

图 14 铝合金板材的回弹角与软钢板的对比  
Fig. 14 Spring back angular of aluminum and soft steel sheets

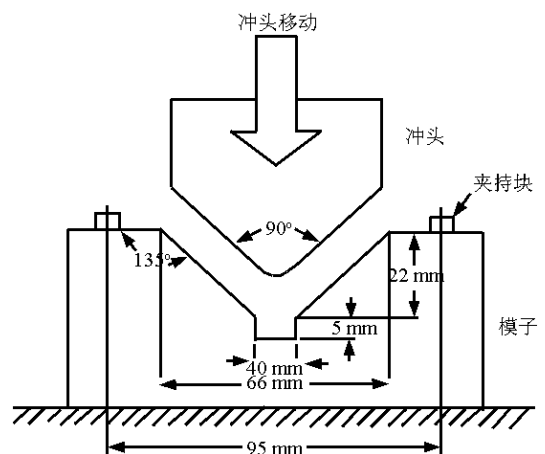


图 15 90°V 型弯曲工具图

Fig. 15 Tool geometric parameters for 90° V shape bending test

量变形后构件的回弹角,试验装置配有合适半径的冲头,将装置放在 Instron4469 试验机上。试样为长方形带状试样,127 mm × 25.4 mm,冲头半径  $R$  为: 3.18, 4.35, 12.7 mm,以研究弯曲半径对回弹的影响;模子底部有方型槽,以防止底部板材受到压缩,模子上部有两个钢块,以施加在试样上不同压力(即夹紧扭矩)。测量 V 型成型样品底部 90°角的变化作为回弹参量。弯曲半径、夹紧力和冷加工对回弹的影响见表 13。表 13 中数据可以看出,冷加工使回弹量增加,这与冷加工增加屈服强度,减薄厚度有关;即冷加工使  $YS/E$  增加,同时也使  $R/t$  的值增加,这些都增加回弹量;而屈服强度增加的影响更大。同样厚度下,冲头弯曲半径  $R$  增加,则回弹也增加,这与随  $R$  增加,弹性带的宽度增加有关。

表 13 不同试验状态下的试样的回弹

Table 13 Spring back value for various testing and cold rolling conditions

夹持状态	冲头弯曲半径/mm	在下面冷加工量下的回弹/(°)			
		0% CW	10% CW	20% CW	30% CW
无夹紧	3.10	0.50	1.00	1.60	2.05
	6.35	1.40	2.45	2.70	3.65
	12.70	2.60	4.30	5.85	8.50
手动夹紧	3.18	1.00	1.00	2.30	3.00
	6.35	2.10	2.75	2.90	4.00
	12.70	4.25	4.30	6.25	9.20
$T = 2.4N \cdot m$	3.18	0.70	1.20	1.85	2.15
	6.35	1.50	2.40	2.75	3.10
	12.70	3.90	4.55	6.00	9.25
$T = 6.36N \cdot m$	3.18	0.30	1.00	1.50	2.00
	6.35	0.65	1.55	1.70	2.25
	12.70	2.20	4.05	5.15	8.25

Schey<sup>[33]</sup>曾提出了估算回弹的公式(3)和(4)。

$$\frac{r_i}{r_f} = 1 - 3\left(\frac{r_i}{t} \times \frac{ys}{E}\right) + 4\left(\frac{r_i}{t} \times \frac{ys}{E}\right)^3 \quad (3)$$

$$\frac{\alpha_i}{\alpha_f} = \left(r_i + \frac{t}{2}\right)\left(r_f + \frac{t}{2}\right) \quad (4)$$

$r_i$ —回弹前的初始半径; $r_f$ —回弹后的最终半径; $ys$ —残留变形为 0.2% 的屈服强度; $E$ —弹性模量; $\alpha_i$ —回弹前的初始角度; $\alpha_f$ —回弹后的最终角; $t$ —板材厚度。

式(3)表明: $r_i/t$  或  $ys/E$  增加将增加回弹  $r_f$ , 按式(4)当  $r_f$  增加时,  $\alpha_f$  也增加,其回弹量 ( $\alpha_i - \alpha_f$ ) 也将增加;图 16 示出了式(3), (4) 计算的回弹量和

$ys/E$  的关系,理论预测值和试验值具有很好的一致性。

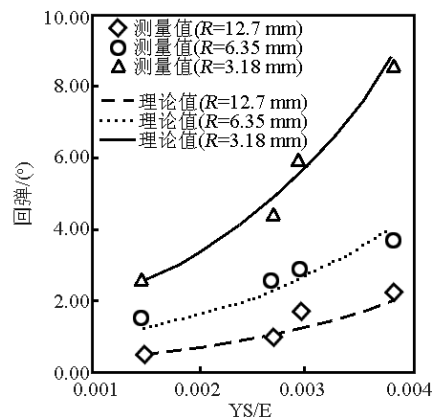


图 16 回弹值和  $YS/E$  的关系  
Fig. 16 Spring back VS  $YS/E$

### 3.6 汽车铝合金板材的碗状试样冲压成形性

5000 系和 6000 系及软钢的碗状试样冲压成形时的开裂/起皱的极限高度与压边力的关系见图 17。从图 17 可以看出:在低压边力下,3 种材料起皱的极限高度没什么区别;但在高压边力 (BHF) 时,由于铝合金样品产生开裂而不能使成形高度进一步提高。因此,在模具设计时,对于铝合金板材冲压成形,应在较低的压边力下 (BHF) 进行。

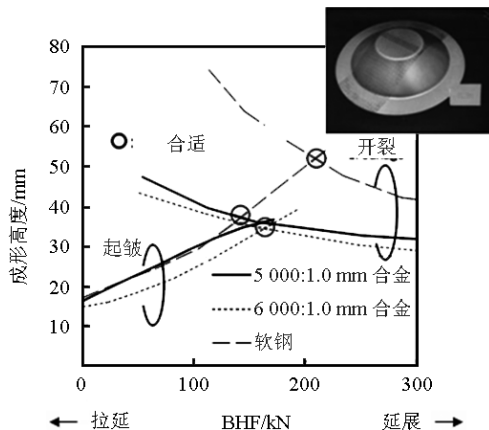


图 17 不同材料的碗状试样在冲压成形时的开裂/起皱的极限高度和压边力的关系  
Fig. 17 The relation of formability limit height VS BHF for various sheets

### 3.7 铝合金汽车板的翻边延性

板材在冲压翻边时,抵抗开裂的特性称之为翻边延性。作为汽车外覆零件,在冲压成形后,要进行翻边加工工序,如发动机盖板的内外板的合成等均采用翻边工艺,因此要求铝合金板材应具有良好的

翻边延性,以保证在翻边成形时不发生开裂。板材的翻边延性和板材的总延伸率有关,也与材料的内部组织有关。翻边延性可用冷弯来检测,但通常的冷弯并未考虑到应变速率敏感性,而冲压翻边时则变形较快,应变速率较大,从而对翻边延性有更高的要求。按现代的物理冶金和力学冶金的进展和理念,改善翻边性能或孔胀成形性的方法是:a.采用纳米粒子强化,并且材料的性能尽可能为各项同性;b.如果是板材组织有两项组织强化,则两相组织的性能应尽可能相近。目前铝合金汽车外板和内板的连接方式多数为翻边连接。变形铝合金尤其是用作汽车外板的变形铝合金板材更应具有良好的翻边延性。晶粒细化而均匀,第二相细化等是提高翻边延性的重要因素。

## 4 影响汽车铝合金板材性能和成形性的因素

### 4.1 合金系和合金元素

用于汽车板的变形铝合金板材主要是 5000 系和 6000 系;5000 系主要是由于镁原子的固溶强化,晶粒细化强化以及少量铜原子固溶和析出强化,该系具有良好成形性。但 5000 系铝合金室温放置时,易出现屈服点伸长(或 Lüders 伸长),冲压成形后表面起皱,影响外观;而且 Fe 的增加会明显恶化该系铝合金的延展性和冷弯性能;由于无烘烤硬化性,油漆烘烤后易发生软化,从而影响零件的抗凹性。

6000 系合金以 Si, Mg 作为合金元素(6111 合金还加入 Cu 作为合金元素),这类铝合金是靠 Si, Mg 在固溶处理后时效的析出作为强化手段的可热处理强化的铝合金板材,这类板材在预处理状态下具有良好的成形性,无屈服点伸长,适合作汽车外板,并具烘烤硬化性,在油漆烘烤后,具有高的流变应力,零件具有高的抗凹性;但发生时效后会导致翻边延性下降和成形性恶化。

### 4.2 预处理工艺

铝合金板材的制造工艺已有一些专利申请和发表,如“冷轧耐蚀铝合金板材(WO 95/31580 和 US. Patent 6,129,792)”,“铝合金及制造铝合金板的方法(WO 96/03531)”,“可热处理强化的铝合金板的制造工艺(WO 00/03052)”,“冲压铝合金产品的热处理(WO 00/70115)”,“具有良好弯曲性能的铝合金

板材的制造方法(WO 02/090609)”,这些专利针对不同成份系的铝合金板材的性能改善提出了相应的处理工艺方法;所述指标与汽车变形铝合金板材的综合性能要求亦还有一定差异。“烘烤硬化优异的 Al-Mg-Si 系铝合金板的制造方法(200480042140.X)”<sup>[34]</sup>为日本学者在中国申请的专利,重点保护铝合金板材薄带连铸,无需均质处理的相关技术,以此获得细晶粒和均匀组织;加拿大学者在中国申请的专利<sup>[35]</sup>,重点为双带连铸、热轧、冷轧的 Al-Si-Cu 铝合金板材的制造方法;专利中以热通量的下限值定义的双带连铸的内涵。专利<sup>[36]</sup>重点介绍铝合金板材在固溶处理后,将板材加热到 100~300℃ 范围内,保温 1 min 以内,然后快速冷至 85℃ 下,以获得良好成形性和烘烤硬化性的工艺;专利<sup>[37]</sup>提出冷轧后的预处理为 450℃ 以上的固溶处理,淬火后室温时效 1 h,再于 180~300℃ 不降低电导率的范围内实施短时间处理,得到与板面平行的晶粒不大于 90 μm,与垂直于轧向的晶粒大小的长度比值为 1~4,含 Mg 和 Si 的化合物的平均最大长度不大于 10 μm,可获得良好成形性和烘烤硬化性;专利<sup>[38]</sup>提出了一种 6111 板材的预热处理工艺,以改善其成形性和烘烤硬化性,经固溶处理水淬后,时效温度在 180~200℃ 之间,时间为 7~15 min;该专利用于 6111 铝合金,经这种处理后,强度较高,成形效果和其他铝合金相比尚需提高;专利<sup>[39]</sup>针对 6022 和 6016 的预处理技术,包括固溶处理工艺、时效工艺等;通过预处理工艺改善了板材的力学性能,使板材的成形性和烘烤硬化性及抗时效稳定性合理匹配,并使冲压构件具有高的抗凹性,满足汽车零件的使用要求。由于相关专利技术的保密性,使得专利真正的使用价值受到影响;因此,真正合适的铝合金汽车板的成份,相适用的工艺技术还需要生产应用者的具体试验结果进行制定。中国汽车工程研究院结合国家“八六三”项目和企业的合作,对 6016 T<sub>4</sub>Pd 处理后的性能进行了研究,其力学性能列于表 14,由表中数据可以看出:经 T<sub>4</sub>Pd 处理和冷轧状态相比,其综合力学性能明显改善;预处理工艺是 6000 系变形铝合金板材的关键工艺过程,有关预处理工艺应包括固溶温度,冷却模式和预时效工艺,预时效前的停留时间等,这些工艺参数对变形铝合金性能都有明显影响,有关研究成果将会陆续发表。

表 14 不同处理工艺的铝合金板材力学性能

Table 14 Pretreatment tech. and Properties for aluminum sheet

工艺号	板厚/mm	取样/(°)	r 值变形量 8 %	YS/MPa	TS/MPa	e <sub>t</sub> /%	e <sub>u</sub> /%	n 值变形量 0.5 % ~ 14 %
T <sub>4</sub> Pd	0.9	0	0.727	142.0	244.0	25.0	18	0.220
T <sub>4</sub> Pd	0.9	45	0.802	138.0	240.0	27.0	18	0.212
T <sub>4</sub> Pd	0.9	90	0.506	130.0	230.0	24.6	14	0.231
CR	0.9	0	0.495	208.2	224.4	6.9	6.5	0.142
CR	0.9	45	1.036	200.4	219.1	5.9	5.6	0.176
CR	0.9	90	0.850	214.0	233.2	6.0	5.8	0.180

r 值—金属薄板塑性应变各向异性值; n 值—金属薄板拉伸应变硬化指数; YS—屈服强度; TS—抗拉强度; e<sub>t</sub>—总延伸率; e<sub>u</sub>—均匀伸长率。

### 4.3 晶粒度和 Mg, Si, Mn 的化合物的大小及分布

对于 6022 和 6016 铝合金而言,晶粒大小对力学性能有明显影响,并影响其预处理效果。在其他条件类同的情况下,(细晶粒直径 50 ~ 70 μm 左右),将具有良好的综合机械性能;预处理后,可望具有较好的成形性。第二相的大小和分布,将明显影响翻边延性(即 Heming 性能);当具有细小,均匀分布的 Mg, Si, Mn 的化合物时,板材具有良好的翻边延性,如果具有粗的,且呈尖角或立方形状的夹杂物,在冲压翻边时很难避免开裂。中汽院近期关于不同晶粒直径和不同第二相大小的 6016 的板材的力学性能试验结果见表 15。从数据可以看出:晶粒细化和第二相细化可以明显改善力学性能,即强度提高,延性改善。

表 15 不同晶粒大小和不同第二相大小的铝合金板材性能对比

Table 15 Properties, grain size and second phase size for 6016 aluminum sheet

合金号	晶粒大小/μm	Z 第二相形状和大小/μm	力学性能		
			YS/MPa	TS/MPa	EL/%
6016	108.0	多为杆状,长 12.5 × 5	128.7	248.0	24.0
6016	58.0 ~ 70	多为杆状,长 6 × 2.3	155.5	260.7	27.0

### 4.4 自然时效

自然时效对 6022 系铝合金力学性能的试验结果见表 16<sup>[8]</sup>。

表 16 自然时效对 6022 变形铝合金板材力学性能的影响

Table 16 Effect of natural aging on the mechanical properties for 6022 sheet

自然时效时间	方向	力学性能		
		YS/MPa	TS/MPa	EL/%
T <sub>4</sub> Pd 状态	纵向	125	238	30
	横向	128	245	29
7 天	纵向	130	246	30
	横向	135	253	29
3 个月	纵向	142	260	30
	横向	146	266	29
6 个月	纵向	145	261	30
	横向	150	267	29
9 个月	纵向	146	262	30
	横向	150	267	29
12 个月	纵向	146	261	30
	横向	150	267	29

表 16 中数据可以看出:放置 7 天到 3 个月,板材的屈服强度和抗拉强度明显上升,而在 3 个月之后几乎没有变化,放置一年内,板材的延伸率完全没有变化。自然时效对铝合金汽车覆盖件内板冲压时达到成形极限的高度时的压边力(BHF)完全没有影响。自然时效对翻边成形性有明显影响,从预处理后到 3 个月之内的自然时效,随时间延长,横向翻边延性从好变到中等水平,纵向翻边延性仍在较好水平,而横向翻边延性变得较差;但自然时效 3 个月后随时间延长,翻边延性不再发生变化。

#### 4.5 抗时效稳定性

铝合金板材在室温存放时不发生时效的特性称之为抗时效稳定性。因为时效在拉伸变形时会出现屈服点伸长,即 Lüders 带,从而在冲压时造成表面变形不均和起皱,影响冲压件的外观;板材从生产出厂到构件冲压成形往往需要运输和储存一段时间,通常要求板材在室温存放 6 个月而不发生时效,即具有抗时效稳定性,预处理是提高铝合金汽车板抗时效稳定性的有效方法,经预处理后的 6000 系铝合金具有良好的抗时效稳定性(见表 16)。

#### 4.6 烘烤硬化性

汽车冲压件在冲压后经油漆烘烤处理而产生时效,使屈服强度上升的特性称之为烘烤硬化性。高的烘烤硬化将会赋予零件高的抗凹性。由于目前大部分汽车企业的油漆烘烤方法是针对钢板的油漆烘烤工艺,而铝合金的油漆烘烤硬化性能和钢的明显不同,因此希望铝合金板的烘烤硬化性可和钢板的油漆工艺兼容;材料的烘烤硬化性可按标准<sup>[40,41]</sup>进行评定。

烘烤硬化性通常是以单轴拉伸试样预应变 2%,然后于 170~180℃,烘烤 30 min,测量其屈服强度增量来衡量;而铝合金板材的烘烤硬化性和合金系列、预处理工艺以及烘烤工艺(温度和时间)均有关系。合金 6022 板材经合适的预处理,经 2% 的预应变,其屈服强度和烘烤温度与保温时间的关系见图 18<sup>[5]</sup>。由图 18 可以看出,当烘烤温度一定时,随烘烤时间的延长,烘烤硬化量上升,如烘烤时间一定(30 min),则 100℃ 以下烘烤对屈服强度影响不大,但在高于 150℃ 时,则屈服应力迅速上升。

#### 4.7 抗凹性

板材和构件抵抗外力和物件压入而不发生凹陷或永久变形的能力称为抗凹性。抗凹性或凹痕抗力  $P_i$  与材料的流变应力  $\sigma_r$  有关,也与材料厚度  $t$  有关<sup>[23]</sup>,并可表示为:

$$P_i = k\sigma_r^n t, n = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{2.5} \quad (5)$$

作为零部件的抗凹性还与零件刚度和结构有关<sup>[42]</sup>。

板材或者汽车覆盖件的凹痕抗力是指抵抗由于准静态加载(或能量)、外加载荷冲击或外加能量作用而抵抗产生的塑性变形的抗力。由于多数材料对高速冲击和准静态载荷的响应不同,故凹痕抗力又分为静态凹痕抗力和动态凹痕抗力。静态凹痕抗力作用是表征板材或者汽车覆盖件抵抗准静态载荷而

产生塑性变形的抗力,该性能主要与局部作用力有关,载荷作用力是影响静态抗凹性能的主要因素;动态凹痕抗力是表征板材或者汽车覆盖件抵抗高速冲击产生塑性变形的能力;冲击物体的动能和动量是影响这一性能的重要因素。两者都是汽车外板设计和性能重要的考虑因素和评价指标<sup>[42,43]</sup>。基于该

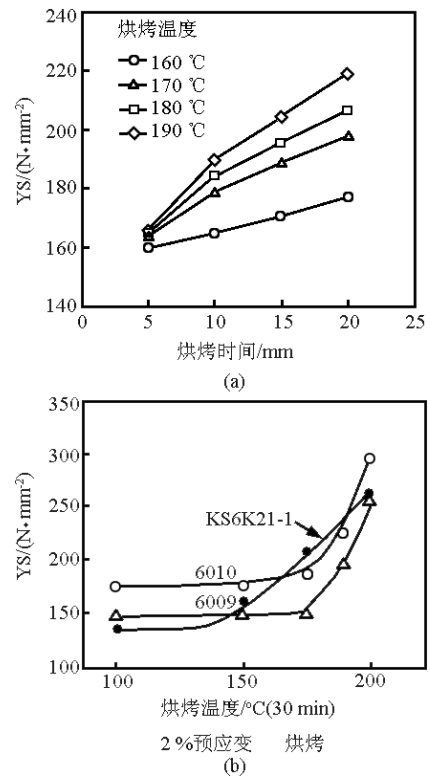


图 18 预应变 2%, 屈服应力和烘烤时间及温度的关系

Fig. 18 Effect of bake time, and bake temperature on the field stress for 6K21 sheet

分类,抗凹性能的测试方法也分为静态测试方法和动态测试方法两种。

静态凹痕抗力测试主要用半球压头在准静态载荷条件下进行测试,半球压头直径多为 25.4 mm,也有压头直径选为 10~25 mm 之间以及 100 mm,压下速度为  $10^{-3}$  mm/s 左右,压头垂直于待测件表面,待测试样类型分为平板试样(试样尺寸为圆形,55~85 mm)、胀形试样(试样为方型,边长在 150~203.2 mm 之间,胀形凸模尺寸多为 101.6 mm)、Marcinik 试样(试样尺寸同胀形试样),以及已成形的汽车构件(如车门、发动机盖板)等。准静态载荷作用力一般通过气压或液压控制,变形是通过电子传感器和分压计测得;主要通过两种方式对静态抗凹性进行测量和给出表征参量:给定一定载荷下所

产生残留凹痕深度;给定一定残留凹痕深度所需的载荷值。

动态抗凹性的测试方式和表征参量通常有两种<sup>[44]</sup>: a. 产生某一残留凹痕深度,测定吸能值; b. 某一冲击能,产生残留凹痕深度值。由于动态载荷为高速冲击载荷,冲击动能将转化为作用点附近的变形能,导致产生塑性变形。其测试装置主要有空气压枪冲击测试设备、落锤冲击测试设备<sup>[45]</sup>和液压动态冲击测试设备;其动态抗凹性测试样品与上述静态测试试样类似,但冲头压下速度一般在 $1 \sim 10^3$  mm/s。由于汽车车身覆盖件多在发生碰撞或者被外界物体高速冲击时产生凹痕,因而动态抗凹性能够更真实反映汽车外板实际使用中抵抗凹痕的能力。2003年,Hua - Chu Shih等<sup>[46]</sup>提出了一种较为精确的动态抗凹性能的测试方法:使用计算机控制的液压伺服机,用加速度计测量压头加速度,考虑了加速度效应以及冲头惯性力的影响,并采用一定的测试和计算方法消除了加载系统的加速度惯性的影响,可更真实地反映板材或构件的动态抗凹性能。文献[46]用不同性能钢板的动态抗凹性的试验结果证实了该方法的有效性。但该文献指出当动态冲击速度超过4.8 km/hr时,以塑性变形深度0.1 mm作为可见凹痕的标准,难以准确表征所测的抗凹性能,应对该参量进行修正。

凹痕抗力测试数据中往往包含有板材或构件测试点的刚度,刚度是表征板材或构件抵抗弹性变形的能力;板材或构件的刚度越大,相同载荷下,弹性变形就越少。抗凹测试过程中板材或构件变形的弹性部分可以定义刚度,即载荷 - 变形曲线的初始线形部分的斜率定义为初始刚度,载荷 - 变形曲线的第二线形部分的斜率定义为二次刚度<sup>[47]</sup>。汽车板或覆盖件某点的刚度也可以借助抗凹性测试设备测量,静态刚度的测试是用直径为25.4 mm的半球压头和边长为100 mm的方板压头在准静态速率下加载待测汽车板,结果发现两种压头测得的静态刚度基本相等<sup>[47]</sup>(待测件边长应远大于100 mm),但Ekstrand认为100 mm方压头过大,只有被测构件或板材的尺寸远大于测试刚度压头的尺寸时,其测试结果才更可靠。动态初始刚度有两种测量方法<sup>[45]</sup>:重力落槌测试,落锤冲击速度在测试过程减小,测试过程中没有能量追加;另一种是液压动态测试,在测试过程仍有能量补充到系统中,即维持压头速度恒定。两种方法测得刚度绝对值不同,但同样可以表

征板材或构件在动态载荷下对弹性变形的抵抗能力。

对6016铝合金汽车板(板厚为0.8 ~ 1.2 mm)的动态和静态抗凹性的研究表明<sup>[48]</sup>:铝合金的屈服强度每提高80 MPa,其动态抗凹性将提高25%;板材厚度每降低或提高0.1 mm,其对板材静态抗凹性的影响与铝合金屈服强度增加或降低30 MPa的效果相当。但在高冲击速率下,大刚度铝合金板的厚度增加并不会引起动态抗凹性的很大提升。由于铝合金汽车板应变速率小于汽车钢板,因此,在低的冲击速率下,两者动态抗凹性的差异小于高速冲击下的差异。构件抗凹性还和构件表面的曲率大小相关,表面曲率对动态抗凹性的影响小于对静态抗凹性的影响。板材冲压试样或构件的刚度对抗凹性的影响,由于不同研究者的测试方法和条件不同结果尚不可比,静态抗凹性是变形和载荷的关系。动态抗凹性则包含载荷,构件吸收动态能量等两种因素。因此,分析不同试验结果,应该根据不同试验条件具体分析。

#### 4.8 冲压构件的表面光鲜性

铝合金板材和钢板不同,其晶粒度远大于钢,在较粗的晶粒下,如果晶粒大小不均则会导致冲压构件的表面沿轧制方向出现像绳索圈样的变形不均匀,这种表面缺陷又称罗平线<sup>[6]</sup>;导致油漆后表面光鲜不一致。这种缺陷也与变形能力的方向性有关;另一种表面缺陷是板材在拉伸变形后,在表面形成桔皮状的起皱和不平,造成这种缺陷的原因还需要进一步研究。

通常铝合金表面是没有织构花样的,其表面有精轧表面,从1980年开始,引入电火花处理轧辊的表面,以得到电火花处理的织构花样(EDT),这既改善铝合金表面冲压的润滑性能,又避免精轧表面的方向性条纹;最近又引入了电子束织构花样处理轧辊的表面;三种处理的表面的状态见图19。其中EBT有确定的织构花样,EDT是随机的织构花样,且有孤立束状的规则的织构花样,这对成形和油漆都有好处。文献[3]认为Roping性是6000系铝合金板材的另一表面缺陷,这种性能通常是由于在轧制板材的端部上存在的一种带状的组织织构所控制,这种带状的组织织构是由沿轧制方向有类似晶粒取向的平行的晶粒束所构成。它主要是由在离板材表面某一定的深度下,在热轧过程中,产生剪切变形所诱发产生的。在冲压和延展时,有两个因素对

评价板材的 Roping 性是很重要的:一个是板材表面的粗糙水平,它可以通过变形板材的表面粗糙度来确定,另外一个形貌为连续的或者断续的线形花样,也就是 Roping 线,形状像断线的雪茄。从冶金学的观点,控制 Roping 线的关键因素是平行晶粒束构成的带状组织的直径或长度以及剪切变形层的深度。

为了使铝合金板材有好的成形性,板材应该具有各向同性的力学性能,在这种情况下,要求板材具有随机的织构。而一般 6000 系的铝合金,在轧材的端部,通常有比较强的再结晶织构;因此,采用正确的工艺,控制再结晶和取向变形织构的平衡,是铝合金板材取得各向同性力学性能的重要手段。

#### 4.9 表面处理特性

钢铁材料油漆之前,其表面要经过酸洗磷化处理,以改善冲压件表面与油漆的结合力,提高其抗蚀性;由于铝合金表面会有一种结合紧密的氧化膜,油漆前的表面处理方法和钢铁材料不同,不能用一般的酸性磷化方法,而是采用铬化处理;考虑到六价铬对人体的毒性,近年来开发了无铬式或低铬处理技术,其中典型处理方法是 Arodine 方法<sup>[49]</sup>,并已有较成熟的生产线;另一种方法是在含 F 离子的特殊磷化液中进行表面处理得到良好的表面处理结果<sup>[5]</sup>。显然,上述各个性能既互相关联和影响,又相互矛盾,如何将上述相关性能得到合理匹配,满足汽车冲压件的性能要求是铝合金汽车板研发的主要内容和目标。

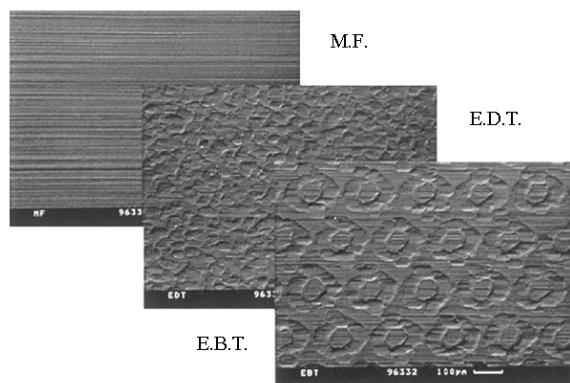


图 19 不同的处理的表面状态

Fig. 19 Surface condition and processing

## 5 铝合金汽车板的应用

2005 年欧洲汽车应用的铝合金中,板材占

20% (车身面板和空间构件等),挤压材占 12% (保险杠、加强件、安全汽车卡支架等),铸件 65% (车轮、传动系统壳体以及制动构件等),锻件占 3% (主要是悬架支撑、活塞等),最近锻铝车轮有很大发展。汽车节能减排的要求,给铝合金在白车上应用提供了广阔的空间,用铝代替钢,可使白车身减重达 50%,从而使汽车整车减重可达 20%~30%。

国内外的研究表明:6000 系可热处理的铝合金是生产变形铝合金的汽车外板合适的材料;美国铝业公司、加拿大铝业公司及神户钢铁公司都进行了 6000 系和 5000 系变形铝合金汽车板的生产和应用研究,并已批量生产和应用<sup>[3,50]</sup>;6000 系铝合金汽车板主要应用汽车外覆零件如发动机罩盖等和钢制零件相比可减重 50%,同时,铝质零件的导热性好,可以有效散发发动机的热量,并且在满足汽车碰撞对行人的保护的相关法规中也发挥重要作用。目前国际上采用较多的铝合金汽车板型号有:AA6016, AA6022, AA6111, AA6005, AA6009 和 AA6010, AA5182, AA5754, AA5052 等,如:Plymouth Prowler 采用 6022 作车身板,Audi A8 采用 6016 作车身板,Acura NSX 使用 5052 作为车身以及 6000 系作为外部面板,Jaguar XJ220 和 GM EV1 采用 5754 作为车身覆盖件材料。

近几年国内对变形铝合金汽车板进行了较多研究,笔者对铝合金汽车板进行了大量应用研究,系统总结了对铝合金汽车板的性能要求,从应用的角度确定了研发铝合金汽车板首先应解决成形性问题,再通过预处理工艺的大量试验,解决其相关方面性能的合理匹配的工艺方法,并认真研究了国外铝合金烘烤硬化和抗凹性的测试方法<sup>[40~48]</sup>,初步成果已用于相关的铝合金汽车板的开发上,取得良好的效果。中国汽车工程研究院和西南铝合作,承担国家“八六三”项目,开发出相关产品,通过成形模拟,而成功冲压了奇瑞新车型的发罩。目前国内合资汽车厂生产的标志 307,206 以及北京汽车公司的大切诺基、长安 CV11 混动车等以及一些军车上,都在应用铝合金作汽车覆零件的外板。随着汽车轻量化技术的发展,一些相关法规的实施及出口产品要求,将会有更多车型应用铝合金板材。

成本和价格是影响铝合金汽车板扩大应用的因素;但是随着板材产量的增加和汽车应用批量增加及制造工艺成本下降,铝合金板材冲压件的成本会大幅度下降,而铝合金轻量化的节能效果会更加显

著。铝制汽车构件的成本构成和用量的用量密切相关;研究表明:当一种车型的产量由6万辆上升到19.35万辆时,铝合金材料和制造及装配成本将会下降40%。

## 6 铝合金汽车板的重点研发内容

汽车用铝合金板材,尤其是汽车用铝合金外板是铝合金板材生产中的顶级产品,在其研发中重点需解决的是抗时效稳定性、成形性、烘烤硬化性、翻边延性、油漆光鲜均匀性、抗凹性、其表面处理技术等这些既相互联系又相互矛盾的特性的合理匹配和统一,满足铝合金汽车板的力学性能、工艺性能、构件成形性、以及零部件的功能要求。其具体研发内容为:通过合金成分设计软件,完成汽车外覆盖件用铝合金板合金系列的选择和确定,以首先满足板材的成形性为依据,确定Fe, Mn, Mg, Si, Ti和Zn等合金元素及含量对板材不同性能的影响,达到最高的性价比及最佳的性能匹配。包括:热轧板的均匀化和组织细化处理技术;冷轧工艺控制及优化技术;合理和优化的预处理技术;板材晶粒度和第二相细化和均匀性的控制技术;铝合金汽车板成形性和抗凹性的评估方法;翻边延性的表征参量、试验方法及影响因素和评价指标的研究;研究铝合金的连接方式方法,包括不同的焊接方法、连接、铆接方法等连接技术。

## 7 结语

1) 汽车轻量化和相关法规的实施,要求采用铝合金汽车板制作汽车冲压构件;为满足铝合金冲压构件的使用要求,对汽车用铝合金板材提出了抗时效稳定性、成形性、烘烤硬化性、翻边延性、油漆光鲜性、表面处理特性、抗凹性等性能要求,如何将这些相互的矛盾特性达到合理的匹配,同时赋予板材合理的性价比,仍然有较多的研究与开发工作待深入进行。

2) 做好汽车板的开发和应用研究,须从合金成份的优化、新的生产工艺的研发,以得到细晶粒,细化的第二相、良好表面状态的和综合力学性能的汽车板,同时深入开展板材的应用研究,形成我国汽车用铝合金板材生产的专有技术。

3) 铝合金汽车板的开发与生产应用已得到国家的重视和支持,国内相关单位的联合攻关已取得了一定的进展,但要解决铝合金汽车板材生产和应

用中的诸多问题,形成我国的专有技术和创新成果,尚有大量的技术工作待深入进行;充分利用产、学、研用相结合的模式和优势,使我国汽车用铝合金板材的生产取得新的进展,达到国际先进水平。

4) 扩大铝合金汽车板在汽车中的应用,除了研制和生产性能良好的铝合金板材外,还应该加强应用研究,包括冲压成型,连接技术,铝合金零件性能的检测方法和检测技术等。

## 参考文献

- [1] 马鸣图,易红亮,路洪洲.论汽车轻量化[J].中国工程科学,2009,(11):20-27
- [2] 马鸣图,马露露.汽车轻量化和铝合金的应用[J].新材料产业,2008(9):43-50
- [3] Miller W S,Zhang L, BoHema J, et al. Recent development in aluminum alloys for the automotive industry[J]. Mater Sci Eng, 2000, A280:37-49
- [4] Marlen Bertram. improving sustainability in the transport sector—through weight reduction and the application of aluminum [R]. Dalian:International seminar on the car with aluminum,2007
- [5] Kobe Steel. Lt., Automotive sheet and coils [R]. Shanghai:San-jing Compang, 2008
- [6] Aluminum Standards and data[M]. 2003 Metric SI, The Automotive Association, Inc. Copyright, 2003, 5-1, 5-16
- [7] Alcoa. Material Property[M]. Beijing:2006
- [8] Smerd R, Winkler, Salisburg S, et al. High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet[J]. Int. J. of Impact Engineering, 32(2005), 541-560
- [9] Imbert J, Winkler S L, Worswick M J, et al. Formability and damage in electromagnetically formed AA5754 and AA6111 [R]. Proceedings of the first international conference on high speed forming, Dortmund, Germany; 2004:202-210
- [10] Holt D L, Babcock S G, Green S J, et al. The strain-rate dependence of the flow stress in some aluminum alloys[J]. Transactions of the ASM; transactions quarterly, 1967, 60(2):152-159
- [11] Tanaka K, Nojima T. Strain rate change tests of aluminum alloys under high strain rate [A]. Proceedings of the 19<sup>th</sup> Japan Congress on Materials Research [C]. Japan, 1975, 48-51
- [12] Lindholm U S, Bessey R L, Smith G V. Effect of strain rate on yield strength, tensile strength, and elongation of three aluminum alloys[J]. Mater, 1971, 6(1):119-133
- [13] Oosterkamp L, Djapic, Ivankovic A, et al. High strain rate properties of selected aluminum alloys [J]. Mater Sci Eng 2000, A278, 225-235
- [14] Masuda T, Kobayashi T, Wang L, et al. Effects of strain rate on deformation behavior of A6061-T6 [A]. Materials Science Forum [C]. 2003, 426-432(1):285-290
- [15] El-Magd E, Abouridouane M. Influence of strain rate and temperature on the compressive ductility of Al, Mg and Ti alloys [J].



- [16] Mukai T, Higashi K, Tanimura S. Influence of the magnesium concentration on the relationship between fracture mechanism and strain rate in high purity Al - Mg alloys[J]. Mater Sci Eng, 1994, A176:181 - 189
- [17] Higashi K, Mukai T, Kaizu K, et al. Strain rate dependence on mechanical properties in some commercial aluminium alloys[J]. J Physiq, IV France, 1991, 1(8):341 - 346
- [18] Higashi K, Mukai T, Kaizu K, et al. Tsuchida S, The microstructural evolution during deformation under several strain rates in a commercial 5182 aluminium alloy [J]. J Physiq, IV France, 1991, 1(8):347 - 352
- [19] Hayashi T, Yamaura H, Shigeru O. Temperature measurement of metals under high velocity deformation[R]. Japan: International Journal of Impact Engineering, 1977
- [20] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures[R]. Netherlands: Proceedings of the seventh international symposium on ballistics, 1983
- [21] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Eng Fracture Mechanics, 1985, 21(1):31 - 48
- [22] 马鸣图, 吴宝榕. 双相钢物理和力学冶金第二版. [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 290 - 341
- [23] 马鸣图. 先进汽车用钢[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008, 203
- [24] Keeler S P. Backofen Forming limit curve for sheet formability [J]. W A Trans. ASM, 1963 (56): 25 - 31
- [25] Keeler S P. Forming limit diagrams of failure strain during sheet forming[J]. Sheet Met. Ind., 1965, 42:683 - 691
- [26] Kohara S. Forming - limit curves of aluminum and aluminum alloy sheets and effect of strain path on the curves[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1993, 38:723 - 735
- [27] Jain a M, Allin a J, Bull b M J. Deep drawing characteristics of automotive aluminum alloys, Materials Science and Engineering A256, 1998, 69 - 82
- [28] Demeri M Y. The Stretch - Bend Forming of Sheet Metal[J]. J. App. Metalworking, 1981, 2(1):3 - 11
- [29] Demeri M Y. Formability Guidelines for Aluminum Alloys[J]. J. applied metalworking, 1983, 2(4):288 - 292
- [30] Stein J J. The Effect of process variables on sheet metal spring-back [P]. SAE Technical Paper:982299, 1998
- [31] Carden W D, Geng L M, Matlock D K, et al. Measurement of springback[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44:79 - 101
- [32] Zehua Qin, Mallick P K. A Study on the bending springback of aluminum alloy 5754[P]. SAE paper:20030576, 2003
- [33] Schey J A. Introduction to Manufacturing Processes [M]. 2nd Ed, McGraw - Hill, NY, 1987
- [34] 六见敏也, 赵丕植, 小林达由树. 烘烤硬化优良的 Al - Mg - Si 系铝合金板的制造方法[P]. 发明专利号: WO2005/064025, 2007 - 2
- [35] 金一中, 丁费溪西蒙, 等. 铝合金板及制造铝合金板的方法[P]. 发明专利号: 1075124
- [36] 古普塔 A K, 维勒 M J, 布尔 M J, 等. 铝合金板材的热处理方法[P]. 发明专利号: 1068386, 国际公布号: WO96/07768, 2001 - 7
- [37] 岸野邦彦, 佐佐木胜敏. 成形性和加热硬化性优良的铝合金板材的制造方法[P]. 中国专利: 95107003, 7
- [38] 田妮, 赵刚, 刘春明, 等. 改善 6111 铝合金汽车板成形性及烤漆硬化性预热处理工艺[P]. 中国专利: 200610046007. X
- [39] 马鸣图, 游江海, 路洪洲, 等. 汽车变形铝合金板材的预处理工艺[P]. 中国专利: 200910103136. 4
- [40] SEW094 - 1987. 冷成形用高屈服强度含磷钢和烘烤硬化钢冷轧扁平产品供货技术条件[A]. 汽车用钢材国际和国外标准汇编[C]. 北京: 冶金工业信息标准研究院, 2003, 5:343 - 350
- [41] GB/T 20564. 1 - 2007, 汽车用高强度冷轧钢板及钢带[S].
- [42] Dicello A, George R A. Design criteria for the dent Resistance of auto body panels[R]. SAE Paper, 740087, 1974
- [43] Ming F Shi, Meuleman D J. An Evaluation of the dynamic dent resistance of automotive steel[R]. SAE paper, 910287, 1991
- [44] Hua - Chu Shih, Ming F Shi. Development of dynamic dent resistance testing procedures[R]. SAE paper, 2003 - 01 - 0607 2003
- [45] Ming F S, Stephen J. Dynamic, Dent resistance performance of steels and aluminium[R]. SAE paper, 930786
- [46] Hua - Chu Shih, Curt D. Horvath, Effects of Material Bending and Hardening on Dynamic Dent Resistance [R]. SAE paper, 2005 - 01 - 0832
- [47] Ekstrand G. Asnafi N. On testing of the stiffness and dent resistance of auto body panels[J]. Materials and Design, 1998, 10: 145 - 156
- [48] Daniel J, Hoffman L. Optimization of 6016 Aluminum alloy selection for out panels[R]. SAE paper, 2002 - 01 - 2012
- [49] 林钢, 林慧国, 赵玉涛. 铝合金应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [50] 任宾彦. 汽车轻量化和铝合金应用[R]. 重庆: 汽车交通用铝国际研讨会, 2005

(下转 33 页)