

# 汽车用铝合金的研究进展

王孟君<sup>1,2</sup>, 黄电源<sup>1</sup>, 姜海涛<sup>1</sup>

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**介绍了铝合金在现代汽车工业中的应用, 从合金元素、热处理工艺和冲压成形技术等方面分析了国内外汽车用铝合金的研究现状与发展趋势, 指出铝合金是现代汽车工业最理想的材料之一。针对我国汽车用铝合金的开发与应用所存在的问题, 提出了加速我国汽车用铝合金发展的建议和对策。

**关键词:**汽车用铝合金; 合金元素; 热处理; 冲压成形

**中图分类号:** TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2006)09-0034-05

## Research Progress of Aluminium Alloys for the Automotive Industry

WANG Meng-jun<sup>1,2</sup>, HUANG Dian-yuan<sup>1</sup>, JIANG Hai-tao<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design & Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

**Abstract:** The application of the aluminium alloys in modern automotive industry has been introduced systematically in this paper. The current research status and future development of the aluminium alloys have also been analyzed from some aspects such as alloying elements, heat treatment and stamping-formed technology. It has been indicated that the aluminium alloys would be one of the perfect materials for the automotive modernization. To counter the problems existing in the research and application of the aluminium alloys in China automotive industry, suggestions and countermeasure are put forward to speed up the development of the aluminium alloys for our automotive industry.

**Key words:** aluminium alloys for automobile; alloying element; heat treatment; stamping-formed

近年来,随着全球气候变暖和能源问题的日益突出,各国政府均要求汽车制造企业降低产品能耗、减少污染、提高燃料的经济性。而要改善汽车的上述性能,关键是减轻汽车本身的质量。有数据表明<sup>[1]</sup>:汽车自重每降低 100 kg,油耗就可以减少 0.7 L/km。因此,最大限度地减轻汽车的自重也就成为当前的研究热点。而实现汽车轻量化的途径有:小型化,发展小排量汽车;结构的合理化,汽车及零部件的优化设计;轻量化材料的应用,即使用轻量化材料来代替目前使用最多的钢铁材料。近年来汽车用钢材的占有量不断下降,铝、镁等轻合金及塑料、复合材料的应用大幅增加<sup>[2]</sup>。与汽车用钢铁材料相比,铝合金具有密度小、比强度和比刚度较高、弹性好、抗冲击性能好和相当高的再回收率、再生率等一系列优良特征,因此受到了人们的普遍关注。据欧洲铝业协会预测<sup>[2]</sup>:今后 5 年内平均汽车耗铝量将达 150 kg/辆,2007 年世界汽车年耗铝量将达 1000 万吨。美国资深汽车工程师 David

Scholes 也预言<sup>[3-5]</sup>:未来轿车上的每一个零件都有可能用铝合金生产,10~15 年后会有越来越多的铝合金用于汽车,而且铝合金制品完全可能比塑料还轻。Rolls-Royce 推出的一款轿车,其车身框架全部用铝合金制成,是迄今为止在轿车上用量最大的铝合金整体结构<sup>[6]</sup>。虽然镁合金的密度更小,仅为铝的 2/3,意大利 FIAT 公司也成功开发镁合金使汽车部件减轻 25%<sup>[7]</sup>,但考虑到镁合金存在易腐蚀、强度相对较低、高温蠕变抗力较差及价格等综合因素,铝合金无疑是现代汽车工业中最具竞争力的轻质材料。

## 1 铝合金材料在汽车中的应用

### 1.1 车身板用铝合金

汽车车身是汽车中用量及质量最大的部件,约占汽车总质量的 30%,所以汽车车身的轻量化对于减轻汽车自重具有重要的意义。用铝合金材料来制造汽车车身板,要求既具有一定的强度性能,又具有良好的冲压成形性能,还要具有良好的焊接性能、抗腐蚀性能,可以在涂漆后的烘烤期间发生完全的沉淀硬化作用<sup>[8]</sup>。用于汽车车身板的铝合金主要有 2000 系、5000 系和 6000 系合金。

2000 系合金属于 Al-Cu-Mg 系,是一种热处理可强化的铝合金,其具有优良的锻造性、较高的强度和良

**作者简介:**王孟君(1965—),男,湖南长沙人,博士,教授,主要从事有色金属成形理论和技术的研究。联系电话:0731-8836408 E-mail:wmj1965@yahoo.com.cn

**基金项目:**汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金

**收稿日期:**2006-03-21

好的焊接性能,强化相为  $\text{CuMgAl}_2$  和  $\text{CuAl}_2$ 。2000系合金具有很好的烘烤强化效应,但其抗腐蚀性则比其它系列的铝合金差。目前 2036和 2022合金已部分用于汽车车身板材,如法国贝西内公司 2000系的 AU2G-T4,美国雷伊路菲公司的 2036-T4等<sup>[9]</sup>。

5000系合金中 Mg是主要的合金元素,固溶于铝基体中,形成固溶强化效应,是一种热处理不可强化的铝合金。AlMg合金具有良好的抗腐蚀性和焊接性能,但退火状态的 AlMg合金在加工变形时可能产生吕德斯线和延迟屈服,因此主要用于车体内板等形状复杂的部位。目前, HANV 金属公司开发的 HANV5182-O 材料<sup>[7]</sup>、美国 ALCOA 公司开发的 X5085-O及 5182-O等材料已用于汽车车体内板<sup>[3]</sup>。

6000系合金中主要的合金元素是 Mg和 Si,并形成  $\text{Mg}_2\text{Si}$ 相,属于热处理可强化铝合金。AlMg-Si合金具有较高的强度、较好的塑性和优良的耐腐蚀性。

表 1 汽车车身用铝合金的力学性能和成形特性

Table 1 Mechanical properties and shaping characteristic of the aluminum for auto body sheets

材质	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	(%)	完全伸长率 (%)	均匀伸长率 (%)	应变硬化指数 $n$ 值	塑性应变化 $r$ 值	埃里克森值 /mm	表面拉伸伤痕
2002-T4	330	180	26	26	20	0.25	0.63	9.6	无
2008-T4	245	125	28						
2117-T4	275	180	25	25	20	0.25	0.59	8.8	无
2036-T4	340	195	24	24	20	0.23	0.75	9.1	无
2038-T4	325	170	25	25	—	0.26	0.75	—	—
5182-O	275	130	26	26	19	0.33	0.80	9.9	有
5182-SSF	270	125	24						
X5182-O	295	145	30	30	20	0.30	0.66	—	有
6009-T4	230	125	25	25	20	0.23	0.70	9.7	无
6010-T4	290	120	24	24	19	0.22	0.70	9.1	无
6111-T4	290	160	27.5	27.5	—	—	—	8.4	无
6016-T4	235	125	28.1	28.1	24.6	0.26	0.7	—	无
冷轧钢板	315	175	42	42	20	0.23	1.39	11.9	无

## 1.2 车身框架和保险杠用铝合金

目前,世界各国都在积极推进车身、车体主要部件的铝材化,奥迪公司更是推出了如图 1所示全铝概念车<sup>[2,22]</sup>。该概念车用铝合金作汽车车身框架和保险杠,能有效减轻车体质量 30%~40%,并与钢铁制件具有同等的抗冲击强度。目前,7000系-T5合金的屈服强度和抗拉强度不仅比 6000系-T5和 T6都高,而且大大超过了冷轧钢板<sup>[17-18]</sup>,已逐步应用于制造汽车的安全保险和防冲撞系统<sup>[10]</sup>。据文献[19,21]报道,德国已成功研制出泡沫金属铝,用这种材料制造的汽车保险杠能最大程度地将两车的碰撞能量吸收掉,使汽车的安全性得到很大改善。

## 1.3 汽车空调用铝合金

汽车空调的冷凝及散热系统,如压缩机、冷凝器、

与钢板相比,6000系-T4态板材的屈服强度和抗拉强度相近,硬化系数  $n$ 值甚至超过钢板<sup>[10]</sup>。目前,6009、6010和 6016铝合金由于其塑性好,并在成形后的喷漆烘烤过程中可实现人工时效而获得较高强度等特征,被用于汽车车身外板和内板<sup>[11]</sup>。Audi A8的车身板,即采用了本系铝合金。另外为增强汽车的缓冲能力和增强抗疲劳强度,德国 VAW、日本 KOK、中国西南铝加工集团均以此系合金为基础,研制和开发了高性能的汽车用铝板和铝型材<sup>[12]</sup>。这种复杂断面形状的铝合金型材,不仅具有质量轻、强度高和抗冲击性好等特点,而且具有很好的挤压成形性能,容易制作,所以在汽车上将得到广泛应用<sup>[12-16]</sup>。

表 1列出了 2000系、5000系和 6000系中常用的合金与冷轧钢板的力学性能和成形性能特征<sup>[17]</sup>。数据表明:铝合金的冲压性能与钢相比已基本接近,某些方面甚至已超过钢材,可以替代钢用于汽车车身板。

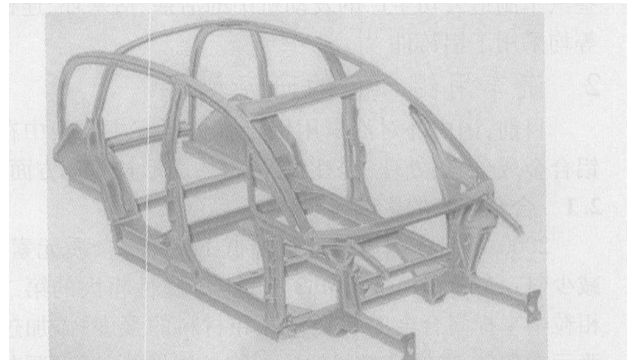


图 1 Audi AL2全铝车身结构

Fig.1 Audi AL2 with an all aluminium body structure

蒸发器和各种配管等都要求材料具有良好的焊接性能,易于成形,抗腐蚀性能好,强度高及导热好等特点。而铝合金在这方面的性能均优于现行采用的铜合金,并且铝散热器的质量比铜低 37%~45%,所以铝合金

正在逐步用于汽车空调系统,如散热器的铝化率在欧洲已经达到 90%~100%,在美国达到 60%~70%,在日本达到 25%~35%<sup>[17]</sup>。目前美国研制了用于汽车散热器的 AA3003、AA3004、AA5005 和 AA5052 合金;而日本采用 A3003、A6951 和 A1050 合金用于散热器<sup>[17]</sup>。中国已成功地开发出了汽车热交换器用三层复合铝合金硬钎焊板带<sup>[22]</sup>,其产品已经达到国外同类产品先进水平。

#### 1.4 车轮用铝合金

目前国外铝合金车轮的使用率已经达到 80%以上<sup>[17]</sup>。铝合金车轮主要采用重力铸造、低压铸造等方法生产,但随着对轻量化的更高要求,用铝合金板材进行冲压加工、旋压加工,来制造整体车轮和两部分组合车轮的工艺日益用于生产实际。例如,美国的森特来因·图尔公司<sup>[3]</sup>用分离旋压法试制出整体板材(6061)车轮,比钢板冲爪车轮质量减轻 50%,并且旋压加工所需时间每个不到 90 s,不需组装作业,适宜大批量生产,经济效益好;我国西南铝加工厂和日本轻金属株式会社合作用 A6061 合金生产出了  $\phi 571.5 \text{ mm} \times 190.5 \text{ mm}$  的汽车铝轮毂<sup>[23]</sup>。

#### 1.5 发动机用铝合金

汽车发动机的气缸体和气缸盖均要求材料导热性能好、抗腐蚀性能高,而铝合金在这方面具有非常突出的优势。目前很多汽车公司生产的发动机的气缸体和气缸盖已经采用了全铝型,如美国通用汽车公司已采用全铝气缸套;法国汽车的铝气缸套已经达 100%,铝气缸体达 45%<sup>[20]</sup>;日本日产公司 VQ 和丰田公司的凌志 MZ-FE V6 均采用了铸铝发动机油底壳<sup>[24]</sup>,同时某些汽车制造公司生产的发动机中的活塞、活塞环、连杆等均采用了铝铸件<sup>[11]</sup>。

## 2 汽车用铝合金的研究现状

目前,国内外对汽车用铝合金的研究主要集中在铝合金成分、热处理工艺以及板材的成形技术等方面。

#### 2.1 合金元素的影响

2000 系铝合金可以通过降低 Fe、Si 等杂质元素,减少  $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$ 、 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{CuAl}_2$  等脆性粗大的第二相粒子来提高合金的断裂韧性和材料的强度;添加过渡元素如 Zr 来提高材料的抗裂纹扩展性能,通过调节 Cu 和 Mg 的比值得到理想的强化效果<sup>[25]</sup>。

5000 系铝合金中,随 Mg 含量的增加,虽然材料的伸长率开始有所下降,但当 Mg 含量超过 2wt% 以后伸长率就会迅速上升,近年来还开发了 Mg 的质量分数达 5%~6% 的高镁铝合金板<sup>[22]</sup>。另一方面,可以适当地加入 Mn 元素,使镁相沉淀均匀,提高合金的抗腐

蚀性能,同时能提高合金的再结晶温度,抑制晶粒长大,确保合金具有更高的稳定性。向铝中添加 1wt% 的 Mg,可以使材料的强度提高约 35 MPa,而加入同量 Mn 的效果则几乎大了一倍。但 Mn 含量多时,提高强度不多,而塑性则显著降低。尤其有微量 Na 存在时,热轧过程就会产生“钠脆”现象<sup>[8]</sup>。

6000 系铝合金中由于强化相为 Mg<sub>2</sub>Si,其 Mg/Si = 1.73, Mg<sub>2</sub>Si 质量分数每增加 0.1% 就可以使材料强度增加 5 MPa,同时伸长率有少量的增加,初生 Si 的质量分数每增加 0.1% 可以使材料强度提高 10~15 MPa,但伸长率会下降 0.25%。所以对于 6000 系合金可以通过添加少量的 Cr、Ti 和稀土等多种元素来细化晶粒,抑制再结晶的发生<sup>[25]</sup>。

#### 2.2 热处理工艺的影响

2000 系和 6000 系合金是热处理可强化合金,合金的热处理工艺对材料的力学性能和成形特性有重要影响。其热处理工艺通常有两种:最终形变热处理(FIMT)和回归再时效处理(RRA)。

FIMT 是指铝合金经过固溶处理+预时效+冷变形+终时效这整套工艺<sup>[21]</sup>。经 FIMT 工艺处理的材料性能比单纯进行固溶+时效的要好许多。在 FIMT 处理过程中由于溶质原子的分布和状态发生了变化,沉淀析出过程和形变位错运动过程交互影响,对铝合金的力学性能产生了很大影响,最终材料的强度极限可提高 20% 以上<sup>[26]</sup>。

RRA 是国外材料学者开发的一种固溶+时效+再时效处理技术<sup>[21]</sup>。铝合金经过固溶和时效后,重新加热到时效温度,经快速冷却,材料性能恢复到固溶时的状态,又可以进行时效处理。RRA 处理后的铝合金具有 T6 的强度,同时又有较好的抗腐蚀性。6000 系铝合金经 5% 预拉伸+自然时效+人工时效可获得良好的综合性能<sup>[27]</sup>。

目前,基于汽车车身板的烘烤效应,研究人员开发了 6000 系铝合金的 T4P 热处理技术,即在 T4 人工时效前进行预时效,从而使材料在烤漆过程中充分发挥合金的时效硬化潜力<sup>[28-32]</sup>。

#### 2.3 成形技术

众所周知,车身板要能真正用于实际生产就必须具有较高的强度和优良的冲压成形性能。铝合金通过调整合金成分及时效工艺,其抗拉强度高达 700 MPa,但铝合金与钢板在冲压成形性方面仍存在较大差距<sup>[33-34]</sup>。铝合金在室温条件下由于回弹较大、塑性较低,用冷冲压方法成形复杂形状的覆盖件较为困难<sup>[35]</sup>。例如抗拉强度为 300 MPa 的 T3 和 T4 态铝合

金板材的伸长率只有 25%,而同样强度软钢的伸长率则可达 42%,是铝合金的 1.68 倍<sup>[36]</sup>。所以,改善铝合金板材的成形工艺对于加快汽车铝化有着十分重要的现实意义。近年来,新的成形技术主要有对置液压成形、温成形和超塑性成形等。

对置液压成形是一种可以提高极限深冲比的深冲成形方法<sup>[11]</sup>,如图 2 所示。对置液压成形是在模腔内充满液体的状态下把材料置于模面上,加上防皱压力后使冲头前进,材料被压入充满液体的模腔内。因此,成形过程中,侧壁与冲头之间产生的摩擦力有部分成为成形负载,减轻了成形制品冲头部位所受的力,从而控制冲头部位的裂纹。该方法已经在德国、日本成功生产出汽车上的车蓬外板、前挡泥板<sup>[11,36]</sup>。

温成形是利用铝合金的伸长率在一定温度范围内随温度的上升而上升来实现的。例如 5182-(O)合金,200 和 25 的成形曲线如图 3 所示<sup>[11]</sup>。从图 3 可知,200 时的成形极限比 25 高,但成形速度快时,即使在 200 也不能显著提高成形性。成形极限图所显示的鼓凸范围对铝合金板来说虽不是特长,但若把成形速度限制在某一范围内,则温成形是大有希望的。

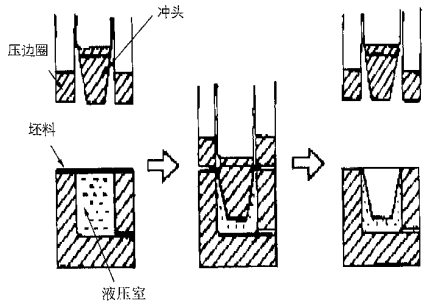


图 2 对置液压成形法

Fig. 2 Opposition hydraulic pressure shaping

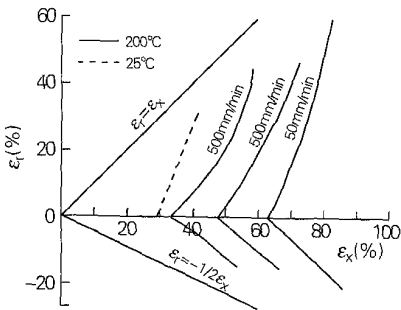


图 3 5182合金板的成形极限曲线

Fig. 3 Shaping limit curve of the 5182 alloy sheet

超塑性成形是指板材在特定的温度和变形速度下产生超塑性后的成形,铝合金的超塑性温度范围为 500~550,比温成形的温度高许多。超塑性成形能加工常规冲压不能成形的复杂零件。目前,国外采用超塑性成形技术成功生产了汽车覆盖件用 5083 板

材<sup>[34-35]</sup>,其超塑性伸长率可以接近 500%。

### 3 我国汽车用铝合金研发对策

目前,发达国家铝消费量的 18%应用于汽车工业,平均每辆汽车用铝 140 kg,并正以每年 20%~30%的速度递增。随着中国汽车工业与世界的接轨,中国已成为世界第 5 大汽车工业国,但我国目前汽车的铝化率还比较低。其中红旗车的用铝量最多,有 110 kg/辆(含 40 kg 轮毂),但还仅相当于日本 80 年代中期水平,而一般轿车单车用铝量仅为 40~50 kg 左右,平均铝化率不超过 4%,远远低于发达国家。因此我国的汽车工业必须瞄准国际先进水平,对汽车用铝合金的性能和生产工艺进行更深入的研究开发。

(1) 政府应加大对汽车材料国产化研究的投入,并整合目前比较分散的科研力量。

(2) 汽车制造业与铝加工业应通力合作,相互支持,共同研发。

(3) 系统研究铝合金材料的成分、显微组织、力学性能与冲压性能之间的关系;尤其是加大对汽车车身板材用铝合金的研究力度,通过优化合金成分、热处理工艺和加工工艺来开发与钢板的成形性及烤漆硬化性能相同的板材。

(4) 充分研究铝合金的焊接性能,并开发能提高铝与钢铁的焊接性能的合金材料。

(5) 应用人工神经网络和数值模拟技术来实现材料制备工艺与性能间复杂非线性关系的拟合和预测,进一步优化汽车用铝板、铝带和铝型材的加工工艺。

(6) 充分研究铝合金的安全环保和回收等问题,开发再生利用技术。

(7) 开发新型的汽车用铝合金,如 Al-Li 合金、超塑性铝合金、颗粒增强铝基复合材料等。

### 4 结束语

从高速、舒适、美观、耐用、轻量化、节能、保护环境、降低综合成本等综合性能方面来看,铝合金无疑是汽车工业现代化和轻量化的首选材料,世界许多国家都在致力于汽车用铝合金的研究。汽车工业作为我国的支柱产业之一,今后几十年都将得到持续高速发展,研制高性能汽车用铝合金对提高我国汽车工业的国际竞争力具有举足轻重的作用,同时也将产生重大的经济和社会效益。

参考文献:

- [1] 彭晓东,李玉兰. 轻合金在汽车上的应用[J]. 机械工程材料, 1999, 23(2): 1-5.
- [2] Miller W S, Zhuang L, Bottema J. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry[J]. Materials Sci

- ence and Engineering A, 2000, 280 (3) : 37-49.
- [3] Sherman Andrew M. Trend in Automotive application for aluminium [A]. The 7<sup>th</sup> International conference on aluminium alloy [C], Charlottesville, Virginia, April, 2000.
- [4] Bingham Lora J. A Materials odyssey [J]. Automotive Industries, 2000 (10) : 83-89.
- [5] Luo A len Automotive application of aluminium and magnesium alloys [J]. General Motor R & D Center, 2003.
- [6] Stuart Birch The new phantom of rolls royce [J]. Automotive Engineering, 2003 (4) : 30-34.
- [7] Rober B. International magnesium association 56<sup>th</sup> annual world conference [J]. Light Metal Age, 1999 (8) : 64-69.
- [8] 田荣璋, 王祝堂. 铝合金及其加工手册 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000: 186-251.
- [9] Barlat F, Bessone J C. Plane stress yield function for aluminium alloy sheets [J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19 (9) : 1297-1339.
- [10] 关绍康, 姚波. 汽车铝合金车身板材的研究现状及发展趋势 [J]. 机械工程材料, 2001, 25 (5) : 12-18.
- [11] 刘静安. 汽车工业用铝材的开发应用趋势与对策 (1) [J]. 铝加工, 2002, 25 (5) : 11-15.
- [12] Nargess Shahmanesh Lightening the materials [J]. Automotive Engineering, 2003 (9) : 70.
- [13] 许萍. 汽车轻量化用金属材料及其发展动态 [J]. 上海金属, 2002 (3) : 1-6.
- [14] 黄佩贤. 轻质材料铝合金在汽车上的应用 [J]. 上海汽车, 2002 (1) : 37-38.
- [15] 丁向群, 何国球. 6000系汽车车用铝合金的研究应用进展 [J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23 (2) : 302-305.
- [16] Short T. Finishes for aluminium in automotive products [J]. LMA, 1999 (10) : 8-23.
- [17] 赵鸿. 铝在汽车上的应用 [J]. 汽车工艺与材料, 1997 (1) : 19-24.
- [18] Yamashita Hiroyuki, Hirano Masakazu Aluminium door beams for automobiles [J]. Kobelco Technology Review, 2000 (23) : 28-32.
- [19] 鲁彦平. 汽车保险杠用泡沫金属铝的能量特征 [J]. 汽车技术, 1999, 12 (6) : 10-13.
- [20] 孙丹丹, 李文东. 铝合金在汽车中的应用 [J]. 山东内燃机, 2003, 75 (1) : 34-36.
- [21] 刘天湖, 孙友松. 新材料新工艺在新型汽车开发中的应用 [J]. 金属成形工艺, 2001 (1) : 49-52.
- [22] 彭志辉. 汽车工业用铝材的开发与应用 [J]. 湖南有色金属, 1998, 14 (6) : 24-27.
- [23] Nargess Shahmanesh Materials Advantages [J]. Automotive Engineering, 2003 (10) : 38-40.
- [24] 张译中. 国外汽车用非钢材料的开发与运用 [J]. 汽车工艺与材料, 2002 (10) : 37-38.
- [25] 甘卫平, 许可勤. 汽车车身铝化的研究及其进展 [J]. 轻合金加工技术, 2003, 31 (6) : 14-20.
- [26] 邵光杰, 张恒华. 汽车用铝合金材料及热处理进展 [J]. 金属热处理, 2004, 29 (1) : 29-32.
- [27] Zhang L, Kang S B. Effect of predeformation on microstructure and tensile properties of AA6061-type AlMg-Si alloys [J]. Mater Sci & Tech, 1998, 14: 317-321.
- [28] Zhuang L, de Haan R, Bottema J, et al Improvement in bake hardening response of Al-SiMg alloys [J]. Materials Science Forum, 2000, 331-337: 1309-1314.
- [29] Miao W F, Laughin D E. Precipitation hardening in aluminium alloy 6022 [J]. Scripta Materials, 1999, 40 (7) : 873-878.
- [30] Zhen L, Kang S B. Effect of natural aging and presaging on subsequent precipitation process of an AlMg-Si alloys with high excess silicon [J]. Mater Sci & Tech, 1997, 13 (11) : 905-910.
- [31] Kleiner S, Henkel C, Schulz P, et al Paint bake response of aluminium alloy 6016 [J]. Aluminium, 2001, 77 (3) : 185-189.
- [32] 刘宏, 宋文举, 等. 6000系铝合金汽车板预时效及组织性能 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 15 (2) : 270-276.
- [33] 于忠奇, 赵亦希. 汽车用铝合金板拉深性能评估参数 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14 (10) : 1689-1693.
- [34] Dunwood B J. The production of automotive body panels in 5083 SPF aluminium alloy [J]. Materials Science Forum, 2001, 357-359: 59-64.
- [35] 周义, 曾志鹏. 工业铝合金汽车覆盖件的超塑成形研究 [J]. 塑性工程学报, 2004, 11 (5) : 64-66.
- [36] 陈叙. 汽车车身嵌板用铝合金板成形特性 [J]. 铝加工, 1994, 17 (3) : 20-32.

**新书介绍 《热处理技师手册》(2005年 11月出版)** 本手册是为满足热处理高技能人才解决生产中遇到的各种技术质量问题的需要, 结合国内外热处理发展现状编写的。主要内容包括: 热处理原理及工艺, 钢的表面热处理, 钢的化学热处理, 热处理应力、畸变及裂纹的控制, 齿轮的热处理, 轴、杆类零件的热处理, 套圈环类零件的热处理, 紧固件的热处理, 弹簧的热处理, 滚动轴承零件的热处理, 大件、小件的热处理, 工、模具的热处理, 铸铁的热处理, 非铁合金的热处理, 特殊钢及合金的热处理, 热处理设备、仪器仪表的安装、调试及故障排除, 热处理工艺规程制定和质量控制等, 共 17章, 书末附有附录。本书的特点是: 标准新, 数据全, 实用性强, 查阅方便。本手册适用于热处理技师、高级技师和热处理中、高级工使用, 也可供热处理工程技术人员参考。热处理学会售书联系人荆秀华, 电话: 010-82755375, E-mail: chts@chts.org.cn