

文章编号: 1004-0609(2004)10-1689-05

汽车用铝合金板拉深性能评估参数^①

于忠奇, 赵亦希, 林忠钦

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘 要: 为了准确地评估汽车用铝合金板的拉深性能, 在单向拉伸试验、平面应变拉伸试验和圆筒件拉深试验获得的样本基础上, 采用回归分析方法, 全面地分析了汽车用铝合金板各种材料性能参数与其拉深性能之间的对应关系。研究表明: 在所给出的材料性能参数中, x_b 值(平面应变抗拉强度与单向抗拉强度之比)对极限凸模行程的相关性最为显著, 其次是硬化指数 n 及宽度颈缩率 ϕ 等参数, 而厚向异性系数 r 与铝合金的拉深性能并不相关。上述结果表明, 在评估汽车用铝合金板的拉深性能时, 使用 x_b 值为评价指标最为准确。

关键词: 铝合金板; 拉深性能; 评价指标; 回归分析

中图分类号: TG 389

文献标识码: A

Evaluation parameter of drawability of automotive aluminum alloy sheets

YU Zhong-qi, ZHAO Yi-xi, LIN Zhong-qin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to exactly evaluate drawability of automotive aluminum alloy sheets, the correlation between material properties and formability of automotive aluminium alloy sheets, based on the sample data obtained from uniaxial tension, plane strain tension and cylindrical deep drawing tests, is analyzed by means of regression analysis method. Investigation shows that correlation of the value x_b , namely the ratio of the tensile strength in plane strain tension and uniaxial tension tests, is the most remarkable among all the given material parameters, and that of the hardening exponent n and the width necking percentage ϕ is less than that of the x_b , but the anisotropical coefficient r doesn't have correlation. The results above indicate that it is much more exact to evaluate drawability of automotive aluminium alloy sheets by means of the values of x_b .

Key words: aluminium alloy sheet; drawability; evaluation parameter; regression analysis

近 20 年来, 世界性的能源危机和环境污染问题越来越受到人们关注, 减轻汽车自身质量, 降低油耗, 降低排放成为各大汽车生产厂商提高竞争力的关键。减小汽车质量的主要途径就是使用轻量化的材料。与汽车用钢板相比, 铝合金板具有密度小、强度高、耐锈蚀等优点, 已成为汽车轻量化技术中替代钢板的主要材料^[1-4]。尽管铝合金板在车身上的使用量逐年增加, 为汽车轻量化做出了巨大

的贡献, 但在冲压成形方面, 铝合金板的某些特性又不完全与钢板相同, 无法借鉴钢板成形方面的经验, 需要找到适合铝合金自身特点的成形方法和规律。

板材成形性能是指板材对冲压加工的适应能力^[5]。目前, 人们已经清楚地认识到, 板材成形性能和材料性能参数之间存在着相关性, 而且这种相关性一旦被确定, 一种材料只需通过简单的拉伸试

① 基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(50225520); 美国通用汽车 R&D 资助项目(2003)

收稿日期: 2004-02-11; 修订日期: 2004-05-16

作者简介: 于忠奇(1973-), 男, 博士。

通讯作者: 于忠奇, 博士; 电话: 021-62932660-111; E-mail: yuzhq@sjtu.edu.cn

验所得到的结果, 就可以准确地评价板材成形性能。所以, 各国学者都在努力地寻找二者之间的对应关系。对传统汽车用钢板来说, 硬化指数 n 值越大, 胀形性能越好, 厚向异性系数 r 值越大, 拉深性能越好^[6]。而铝合金与钢在变形性能上有很大差异, 铝合金成形时, 很多情况下是不能套用钢的变形规律的^[7-14]。Kurosaki 认为铝合金板的总延伸率与极限拉深比是相关的^[9]; Hayashi 指出, 在 n 值和 r 值之间, n 值与铝合金极限拉深比的相关性更大^[3]。李春峰^[10]在研究不同金属板的 r 值、 x_b 值 (平面应变抗拉强度与单向抗拉强度之比) 与极限拉深比关系时指出, 对有色金属而言, x_b 值与极限拉深比是相关的, 但研究材料并没有涉及铝合金板。Wan 等^[11]建立了不同形状的拉伸试样与成形性能的评价系统, 认为带孔拉伸试样的局部延伸率与极限拉深比是相关的。这些学者从不同的角度研究了材料性能参数与拉深性能之间的对应关系, 但 these 研究中涉及铝合金种类较少, 或者材料性能参数不全面。随着铝合金在车身覆盖件上使用的增加, 系统地研究高强度铝合金板材料性能与其成形性能之间的对应关系, 对汽车覆盖件生产有着重要的意义。

本文作者在拉伸试验和圆筒形拉深试验获得的样本基础上, 通过回归分析方法, 较全面地分析了汽车用铝合金板材料性能参数和拉深性能之间的对应关系, 从而建立评估铝合金板拉深性能的评价指标, 为冲压加工中合理选材和预测成形性提供可靠的依据。

1 实验

1.1 材料与试验

车身覆盖件用的铝合金板材料主要是 5XXX 和 6XXX 系列, 前者主要用于加工内覆盖件, 后者主要用于外覆盖件。本研究使用的铝合金板材料是 6111-T4、X611-T4、5754-O 和 5052-O, 初始厚度分别为 1.25、1.25、1.5 和 1.6 mm。

材料性能从单向拉伸试验中获得, 并与轧制方向成 0° 、 45° 、 90° 3 个方向的试样进行拉伸实验。单向拉伸试验按照标准 GB/T228—2002 进行。表 1 是单向拉伸试验获得的性能参数, 是上述三个方向上的平均值。与此同时, 为了计算 x_b 值, 按图 1 的尺寸制作了平面应变拉伸试样, 其他与单向拉伸试验的相同。将平面应变拉伸试验获得的抗拉强度 σ_{b-p} 与单向拉伸试验的抗拉强度 σ_{b-u} 相除, 则获得

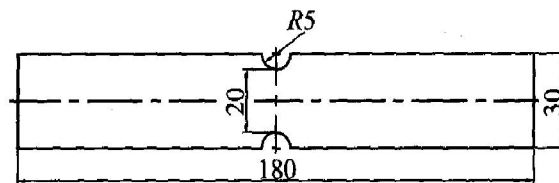


图 1 平面应变拉伸试样尺寸
Fig. 1 Plane strain tension specimen size

表 1 铝合金单向拉伸性能

Table 1 Uniaxial tension properties of aluminum alloys

Material	σ_s /MPa	σ_b /MPa	n	$\bar{r}$	δ /%
X611-T4	117	218	0.23	0.62	24.2
6111-T4	141	256	0.25	0.65	26.2
5754-O	103	230	0.31	0.71	27.1
5052-O	146	234	0.21	0.63	21.9

x_b 值, 即

$$x_b = \sigma_{b-p} / \sigma_{b-u} \quad (1)$$

拉深性能用圆筒件拉深试验的极限凸模行程来表示。极限凸模行程定义为拉深过程中成形件出现拉裂时的凸模行程, 即图 2 中的 s 值。每种材料进行 3 次相同的试验。对于每种材料, 找出裂纹发生方位相近的试件, 并计算它们极限凸模行程的平均值。拉深试验模具的几何尺寸为: 凸模直径 $d100$ mm, 凹模腔直径 $d104$ mm, 凸模和凹模的圆角半径分别为 $R10$ mm, 如图 2 所示。拉深试验中, 板料初始直径为 $d200$ mm; 恒定压边力取 98 kN; 采用专用拉延油进行润滑。临界凸模行程由液压机上的位移标尺读出。

1.2 评价方法

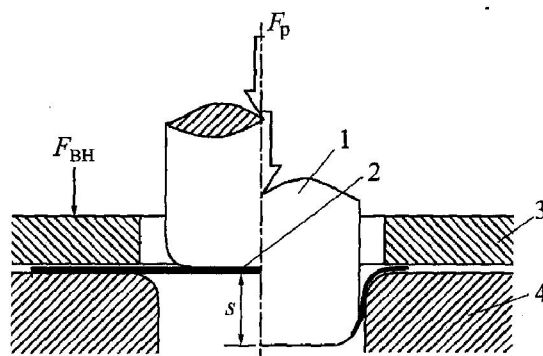


图 2 拉深模具示意图

Fig. 2 Schematic diagram of deep drawing tools

1—Punch; 2—Blank;
3—Blank holder; 4—Die

影响板材成形性能的因素较多。为在众多的材料性能参数中, 找到与成形性能最为相关的影响因素, 采用数理统计方法, 对获得的样本进行一元线性回归分析。处理中, 使用公式(2)分别计算各个参数的相关系数 r_c , 且当 $|r_c| \geq r_{0.01}$ 时, 表示线性关系是高度显著的; 当 $r_{0.01} > |r_c| \geq r_{0.05}$ 时, 表示线性关系是显著的, 而当 $|r_c| < r_{0.05}$ 时, 表示没有明显的线性关系^[15], 即不相关。

$$r_c = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中 x_i 为材料性能参数, $\bar{x}$ 为所有材料参数的均值; y_i 为极限凸模行程, $\bar{y}$ 为所有极限凸模行程的均值。

在相关系数的显著性水平基础上, 获得最佳的材料性能参数与成形性能之间的对应关系, 从而确定铝合金板拉深性能的评价指标。

2 结果与讨论

图 3 所示是材料性能与极限凸模行程之间的散点图。本研究中, 只有 6111 板在拉深时破裂发生的方位出现在 2 个不同的方向上。在图 3 中, 横坐标是极限凸模行程, 而纵坐标分别是与裂纹方位相近方向上的材料性能: 屈服强度、抗拉强度、屈强比、 n 值、 r 值、板平面内方向性 Δr 、总延伸率 δ 、宽度缩颈率 ϕ 及 x_b 值。其中 ϕ 值为

$$\phi = \frac{b_0 - b}{b_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中 b_0 为单向拉伸试样原始宽度; b 为试样拉断后, 断裂处的最小宽度。

上述参数比较全面地考察了材料性能与极限胀形高度之间的关系。从图 3 中不难看出, 屈强比值、 n 值, δ 值, ϕ 值及 x_b 值与极限凸模行程有着较好的线性关系。

为准确地描述材料性能与极限凸模行程之间线性关系的密切程度, 使用式(2)计算了材料性能的相关系数, 并给出了显著性水平, 其结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 在这 9 个参数中, x_b 值对极限凸模行程具有高度显著的线性关系, 其次为 ϕ 值, n 值, δ 值和屈强比; 而 r 值对拉深性能却无相关性。这与 r 值对钢板的拉深性能是相关的结论是不一致的。

在圆筒件拉深时, 其成形能力主要取决于凸模圆角处危险断面的承载能力。因此, 提高此危险处

的抗拉强度, 或者降低法兰变形区的变形抗力, 都可以改善其拉深性能。 x_b 值反映了不同应力状态下抗拉强度之比, 式(1)中 σ_{b-p} 值对应的应力状态与危险断面处的应力状态是相同的。 x_b 值越大, 说明拉深成形时工件侧壁的承载能力越大, 极限凸模行程也就越大。所以说, x_b 值客观地反映了拉深成形的变形能力。这也是表 2 中 x_b 值与极限凸模行程高度相关的原因。除此以外, 单向拉伸性能参数 n 值、 ϕ 值、 δ 值和屈强比也都与极限凸模行程有相关性。 ϕ 值与 δ 值都是材料的塑性指标, 前者主要用于评价压缩变形方式的成形性能, 而后者主要用于拉伸变形方式中。从表 2 中可以看出, ϕ 值与拉深性能有更好的相关性; 同时也可以进一步证实, 对于铝合金板, n 值比 r 值更能真实地反映其拉深性能。

表 2 材料性能的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of material properties

Material parameter	$ r_c $	Degree of correlation
σ_s	0.844	-
σ_b	0.166	-
σ_s / σ_b	0.967	+
n	0.981	+
r	0.871	-
Δr	0.713	-
δ	0.978	+
ϕ	0.983	+
x_b	0.995	++

++ —Most remarkable correlation;

+ —Remarkable correlation;

- —No correlation

由于计算 x_b 值时, 需要 2 种应力状态下的试验才能获得。而实际中, 材料性能参数一般是从单向拉伸试验中获得的。若用 x_b 值来评价拉深性能时, 需要附加平面应变拉伸试验。为此, 只从单向拉伸试验角度出发, 可以使用 ϕ 值或 n 值评价铝合金板拉深性能的好坏, 而用 r 值评价其性能是不合适的。

3 结论

在有效的试验样本基础上, 采用一元线性回归分析方法, 确定了汽车用铝合金板拉深性能的评价指标, 即可以使用 x_b 值准确地评价铝合金板拉深

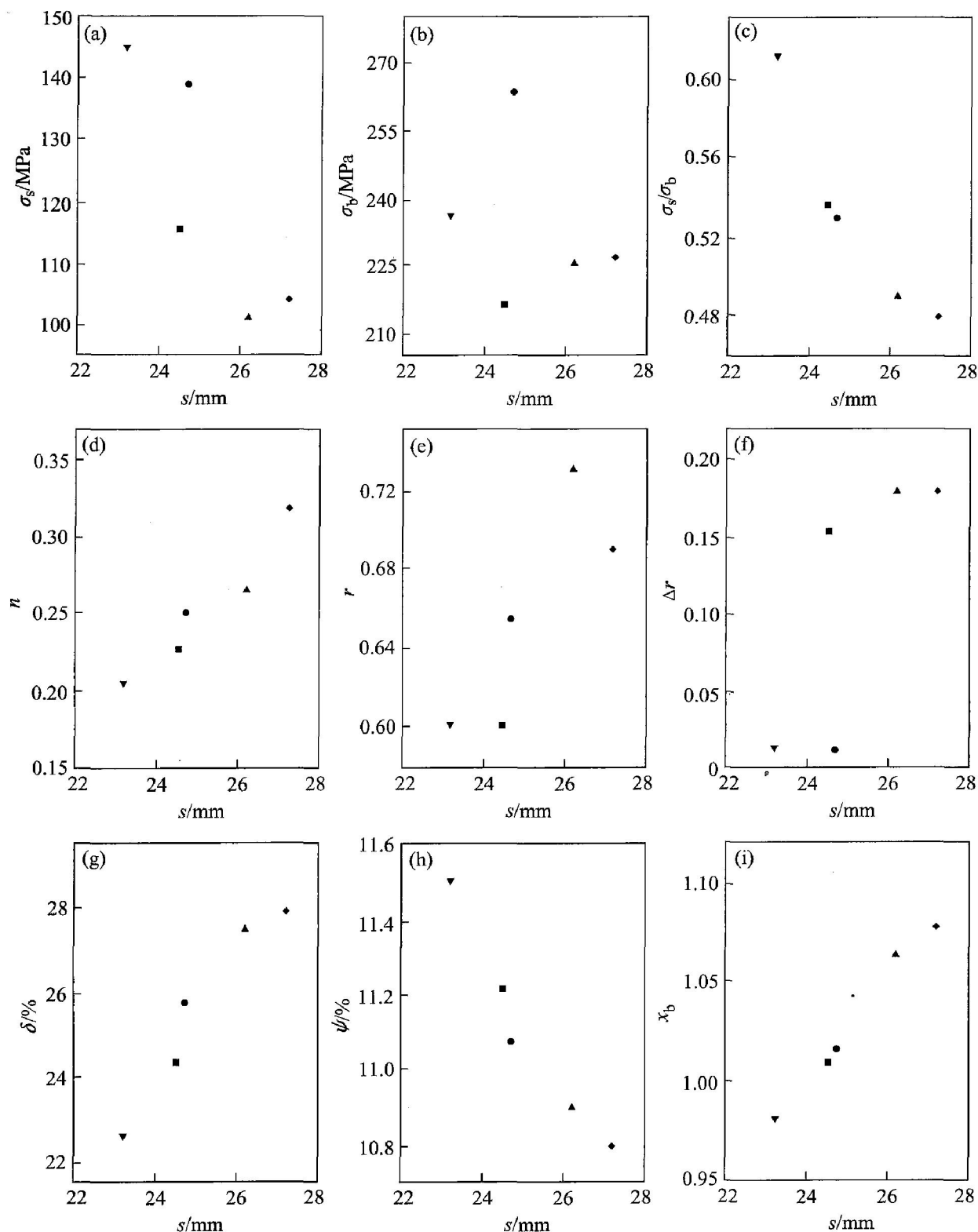


图 3 材料性能与极限凸模行程的关系图

Fig. 3 Correlation between materials properties and limit punch stroke

(a) — σ_s ; (b) — σ_b ; (c) — σ_s/σ_b ; (d) — n ; (e) — r ; (f) — Δr ; (g) — δ ; (h) — ψ ; (i) — x_b
 (●—6111-T4; ■, ▲—X611-T4, in direction of 90° and 0° , respectively; ◆—5754-O; ▼—5052-O)

性能; 在简单的单向拉伸性能参数中, 可以使用 ϕ 值或 n 值对汽车用铝合金板拉深性能进行评价, 而用 r 值是不合适的。这为汽车用铝合金板冲压加工的合理选材和预测成形性提供可靠的依据。

REFERENCES

- [1] Ashley S. Steel cars face a weighty decision[J]. Mechanical Engineering, 1997, 119(2): 56-61.
- [2] Miller W S, Zhuang L. Recent development in aluminium al-

- loys for the automotive industry [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 280: 37 - 49.
- [3] Hayashi H, Nakagawa T. Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels [J]. *Journal of Mater Processing Technology*, 1994, 46: 455 - 487.
- [4] 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: 12 - 14.
GUAN Shao-kang, YAO Bo. The progress and prospect of research on aluminium alloys for auto body sheets [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2001, 25: 12 - 14.
- [5] 李硕本. 冲压工艺理论与新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LI Shuo-ben. *Stamping Forming Theory and New Technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [6] 杨玉英. 大型薄板成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
YANG Yu-ying. *Stamping Technology of Sheet Metals* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.
- [7] 李雪春, 杨玉英. 塑性变形对铝合金弹性模量的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(4): 701 - 705.
LI Xue-chun, YANG Yu-ying. Effect of plastic deformation on elastic modulus of aluminum alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(4): 701 - 705.
- [8] Barlat F, Berm J C. Plane stress yield function for aluminum alloy sheets [J]. *International Journal of Plasticity*, 2003, 19(9): 1297 - 1339.
- [9] Kurosaki Y. Some consideration on formability parameters in deep drawing and stretch forming [J]. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, 1980, 21: 189 - 196.
- [10] 李春峰. 评定拉伸性能的新参数[J]. *锻压机械*, 1988(4): 3 - 5.
- LI Chun-feng. A new parameter for evaluating the drawability of sheet metals [J]. *Forging and Stamping Mechanism*, 1988(4): 3 - 5.
- [11] Wan M, Yang Y Y. A system for evaluating sheet formability using tension tests with different shapes of specimens [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2001, 116: 189 - 193.
- [12] Takuda H, Mori K. The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 95: 116 - 121.
- [13] 于忠奇, 杨玉英. 应用韧性断裂准则预测铝合金板材成形极限 [J]. *中国有色金属学报*. 2003, 13(5): 1223 - 1226.
YU Zhong-qi, YANG Yu-ying. The application of a ductile fracture criterion to the prediction of the forming limit in aluminum alloy sheet forming [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(5): 1223 - 1226.
- [14] 胡卓超, 刘沿东, 张德芬, 等. 润滑对 3104 铝合金板织构的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(3): 410 - 417.
HU Zhao-chao, LIU Yan-dong, ZHANG De-fen, et al. Effect of lubrication on evolution of through thickness texture in cold rolled 3104 aluminum alloy sheets [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(3): 410 - 417.
- [15] 方开泰, 全 辉. 实用回归分析[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
Fang Kai-tai, Quan Hui. *Practical Regression Analysis* [M]. Beijing: Science Press, 1988.

(编辑 吴家泉)