

[文章编号] 1004- 0609(2002)02- 0264- 05

4XXX 系铝合金的锻造性能^①

林哲民, 陈永喆

(1. Department of Metallurgical Engineering, Chonbuk University,
664- 14 ducjir dong ducjir ku, chr ju 561- 756, Korea;

2. Department of Metallurgical Engineering, Chonbuk National University, 664- 14 ducjir dong ducjir ku,
Chor ju 561- 756, Research Institute of Advanced Materials Development, Korea)

[摘 要] 对添加微量 Sb 元素的 4XXX 系列铝合金的铸造、挤压及锻造显微组织进行了观察。结果表明: 铸造状态下的树枝状组织在挤压预热过程中形成了带有方向性的小结晶, 之后再成长为显微结晶, 观察到了变化为球状的结晶粒。锻造后, α 相基体中除了共晶组成(11%~ 12.6% Si) 外, 还存在多角形初晶 Si 和 Al_4Cu_9 相。正是这些相的存在, 提高了合金的高温强度。在凝固过程中, 由于 Mg 的部分偏析, 认为能析出 Mg_2Si , 有助于提高材料的耐热性能, 并判断 Al_4Cu_9 相起维持高温强度的重要作用。用该材料制造的汽车连杆的平均硬度为 Hv133, 大体上能够满足实际需要(Hv137)。随着锻造温度的增加, 变形抗力和加工应力减小, 合金的成形性能得到提高。

[关键词] 成形性能; 挤压; 连杆; 锻造

[中图分类号] TG 146.2

[文献标识码] A

高强耐热 4XXX 系列铝合金具有良好的可焊性和机加工性能^[1], 在 673 K 时的延伸率为 90%, 抗拉强度为 21 MPa, 主要用作内燃机零件^[2, 3], 如连杆、气缸盖和发动机等。用作内燃机零件的 4XXX 系列铝合金与其它用途 4XXX 系列铝合金相比含有较多的 Si, 故其热胀系数较小, 硬度较高^[4, 5]。通常这些内燃机零件大多是采用工艺成本较低的铸造方法制造的。就目前韩国加工企业现状而言, 大部分锻件仍靠进口, 所以, 锻件的国产化和如何提高锻件成形性能成为急待解决的问题。4XXX 系列铝合金的锻造温度范围较宽, 通常在 688~ 1 006 K 温度段内进行^[6]。在锻造作业之前需要对工件进行数小时的预热, 加热温度为 788~ 833 K, 高出通常热锻温度 323~ 373 K, 这是为了形成足够的金属变形, 减小锻造时工件的变形抗力, 以提高变形速度。合金中添加微量的 Sb, 可以提高 4XXX 系列铝合金的成形性能。本文作者用这种材料制作汽车内燃机连杆, 并和进口锻件产品比较, 探讨汽车内燃机零件用锻件国产化的可能性。

1 实验

4XXX 系列铝合金的化学组成见表 1, 为了提

高合金的成形性能及维持 Si 的球状化效果, 合金中增加了微量的 Sb。材料经铸造及挤压后, 再锻造成汽车内燃机连杆。铸造技术条件如表 2 所示。合金铸造采用高频感应炉, 将 100 kg 的铝合金熔化后, 浇入直径为 17.78 cm 的多孔性石墨金属模中, 同时喷射氮氧混合气体(喷射速度为 600 mL/min) 和水进行压铸。热挤压在 3 200 t 水平挤压机上进行, 为提高挤压工艺性能, 材料先进行 T6 热处理, 然后在 448 K 进行 10 h 人工时效。用挤压法制成 $d320\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$ 的棒材, 然后根据工序需要将棒料切成 $d320\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的毛坯, 以便制造汽车连杆^[7]。

为了评价添加了微量 Sb 的 4XXX 系列铝合金的成形性能及力学性能, 在 713~ 733 K 热锻温

表 1 4XXX 系列铝合金的化学组成

Table 1 Chemical composition of novel designed 4XXX series Al alloy (mass fraction, %)

Species	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	
TF-12	11~ 13	2.6~ 3.0	0.1~ 0.7	0.1~ 0.7	0.3~ 0.5	
4XXX	11.9	3.0	0.358	0.181	0.371	
Species	Cr	Zn	Ti	Ni	Sb	Al
TF-12	0.05~ 0.15	< 0.05	< 0.05	0.02~ 0.5		Bal.
4XXX	0.106	0.04	0.01	0.347	0.02	Bal.

① [收稿日期] 2001- 05- 08; [修订日期] 2001- 10- 08

[作者简介] 林哲民(1969-), 男, 硕士。

表 2 4XXX 系列铝合金的铸造条件

Table 2 Casting condition of 4XXX series Al alloy

Temperature of molten metal/ K	Pressure of mixture gas/ Pa		Flow rate of mixture gas/(L•min ⁻¹)	Flow rate of cooling water/(L•min ⁻¹)	Casting speed / (mm•min ⁻¹)
	N ₂	O ₂			
1 023	110	115	0. 6	110~ 120	140

度段,采用锻造效果较好和尺寸精度较高的模锻方式制造了 80 个汽车内燃机连杆。热锻用的是普通机械压力机($K_f=400\text{ N/mm}^2$),锻造时保持变形速度和其它试验参数不变。铸、挤、锻试样经研磨,0.3 μm 氧化铝(Al_2O_3)抛光,以及超声波清洗约 5min 后,用 Polution 溶液进行腐蚀,然后用光学显微镜(OM)分别进行显微组织观察。锻件的硬度采用显微硬度计测试,测定负荷为 350 g,时间 15 s。分别在常温下和连杆工作温度 423 K 和 473 K 测定试样的力学性能。拉伸试样的断口形貌用扫描电子显微镜进行观察。连杆工作条件列于表 3。

表 3 汽车连杆的技术要求

Table 3 Requirements of connecting rod

Tensile strength / MPa	Yield strength / MPa	Elongation / %	Hardness (Hv)	Working temperature/ K
3 800	3 200	9	137	403~ 454

磨损试样尺寸为 20 mm×50 mm×5 mm,对偶采用直径 $d10.5\text{ mm}$ 的氮化硅(SiN_4)球。用往复式磨损试验机,在温度 423 K 下加垂直负荷 3 N,摩擦距离达到 500 m 时,测定摩擦因数及磨损量。磨损量用精度为 10^{-5} g 的电子天平测定,可以定量地分析磨损情况,但这时的氧化量的影响未计入在内。

2 实验结果及分析

2.1 微观组织变化及相分析

添加 0.02% Sb 到 4XXX 系列铝合金中,可以较长时间保持合金中 Si 的球状化效果,进而增加高温下材料的延伸率,以提高其成形性能。铸造、挤压、锻造后的金相组织如图 1 所示。从图 1(a)中可以看到铸造合金中存在很发达的粗大树枝状组织,但没有显现出氧化物偏析。从黑又圆的树枝状晶核发生分支,然后成长为树枝状组织的晶体,晶核的尺寸约为 20 μm。铸造状态下形成的树枝状组织,在挤压的预热过程中会变为带有方向性的小结晶粒。然后再成长为微细结晶粒,最后变化为球状的结晶粒,挤压组织中看到铝基体上沿挤压方向分

布着平均尺寸大约为 10 μm 的灰色硅粒子。同时也观察到黑色的 Al_4Cu_9 相(如图 1(b)所示)。为了充分去除挤压材料中的内应力,进行了吹气作业,

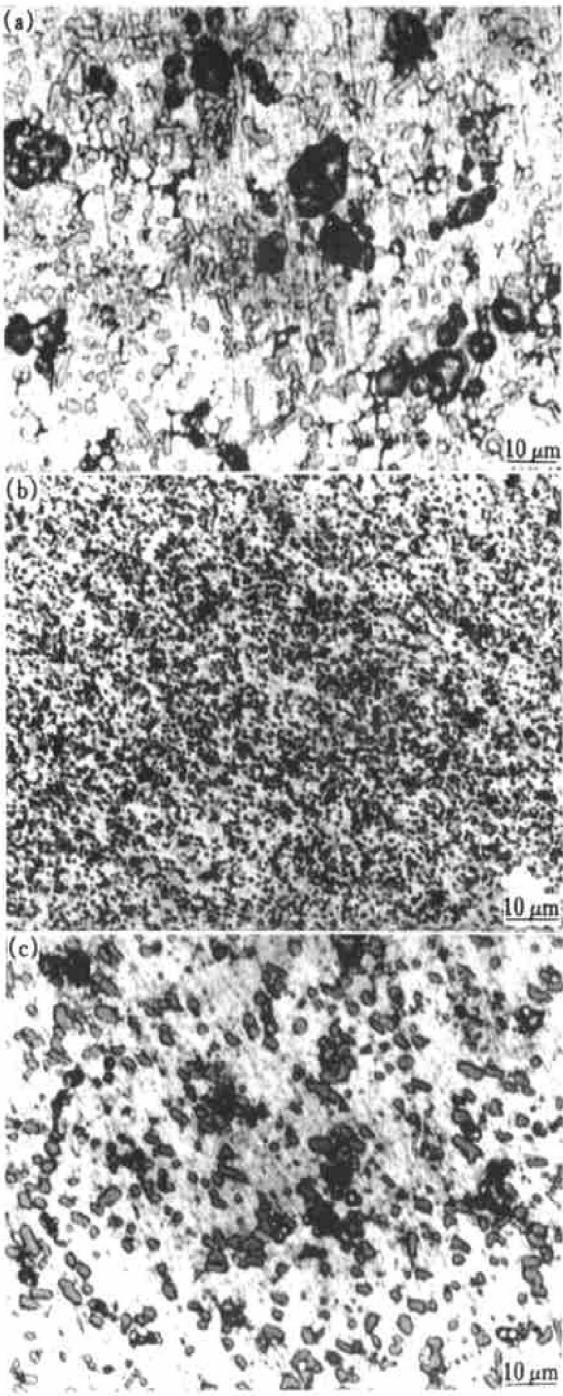


图 1 4XXX 系列铝合金的显微组织

Fig. 1 Optical microstructures of 4XXX series Al alloy

(a) —As cast; (b) —Extrusion bar;
(c) —Forged connecting rod

同时锻造是在工件充分预热后进行的, 在这过程中挤压形成的组织发生了再结晶, 而这种再结晶的组织在锻造过程中进一步变成微细晶粒(如图 1(c)所示)。锻造时发生了 Si 和 Cu 的球状化是提高材料强度的原因。随着加工度的增大, 越明显地观察到了这种微细晶粒。为了改善锻件的可锻性, 锻造前进行了时效处理, 使锻件组织形成微细析出相, 因而细化了晶粒。在锻造后的微观组织中, 明显地观察到了共晶组织(11%~12.6% Si), 多角形初晶 Si 和 Al_4Cu_9 相。在凝固过程中, 由于 Mg 的部分偏析, 能析出 Mg_2Si , 这将有利于改善合金的耐热性能; 而 Al_4Cu_9 相则在维持合金高温强度方面起着重要作用。为了观察挤压及锻造后的组成相的变化, 进行了 XRD 分析, 结果如图 2 所示。分析表明, 两种材料中组成主相的是 Al 和 Si, 初晶 Si 和 Mg 形成 Mg_2Si 相, 且合金中还存在 Al_4Cu_9 相。

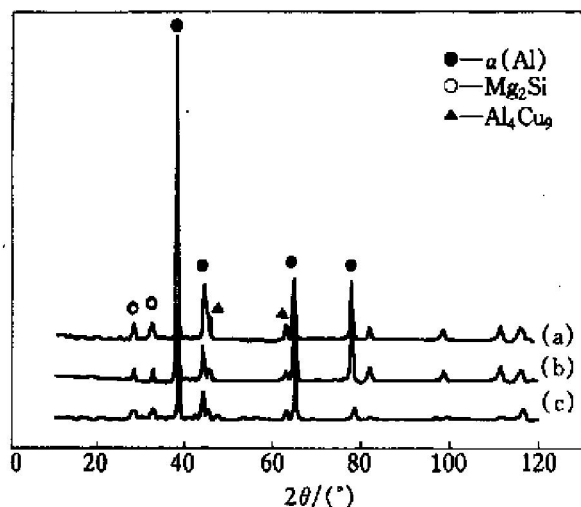


图 2 挤压态及铸态合金的 X 射线衍射图

Fig. 2 XRD patterns of extruded and forged alloys

(a) —Extrusion; (b) —Forging at 713 K;
(c) —Forging 733 K

2.2 力学性能

自制连杆的硬度分布示于图 3。在不同位置测定的连杆硬度分布为 Hv131~139, 其平均硬度为 Hv133 左右, 大体上能够满足汽车内燃机连杆所要求的 Hv137 的条件。图 4 所示是高温拉伸试验结果。与挤压件相比, 在 713 K 及 733 K 温度下锻造的锻件, 其抗拉强度均有所提高。但锻造温度从 713 K 提高到 733 K, 一方面因工件变形抗力和加工应力减小, 提高了成形性能, 但另一方面, 由于加工硬化效果的减弱, 其抗拉强度和硬度反而有所下降。

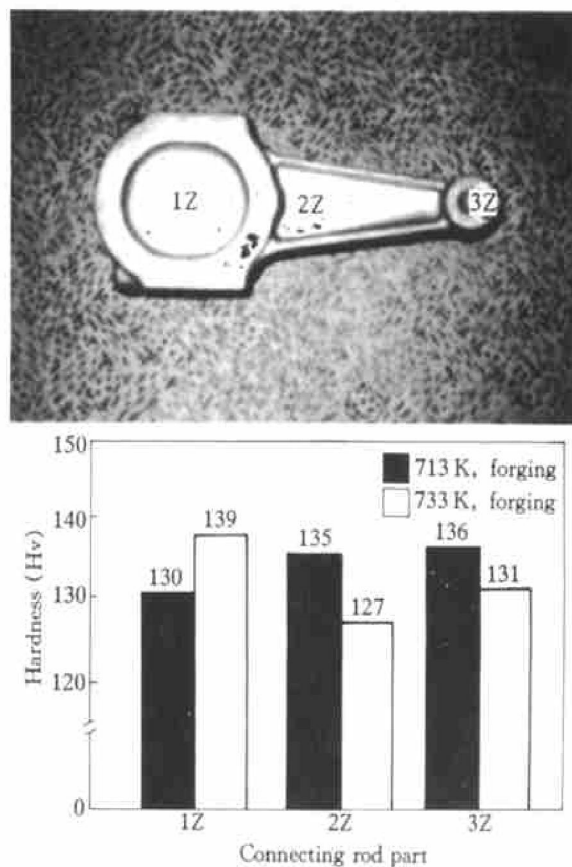


图 3 4XXX 系列铝合金的硬度分布

Fig. 3 Hardness distribution of 4XXX series Al alloy

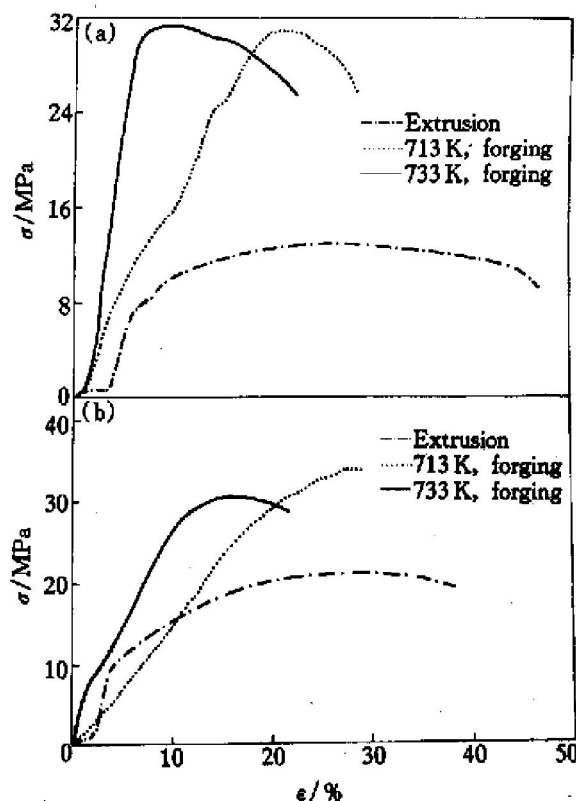


图 4 4XXX 系列铝合金的高温应力—应变曲线

Fig. 4 Stress—strain curves of 4XXX series Al alloy at high temperature
(a) —423 K; (b) —473 K

2.3 摩擦磨损性能

图 5 所示为自制的汽车内燃机连杆锻件的磨损试验结果。可见 713 K 锻件的磨损量是 0.048 9 g, 摩擦因数为 0.013; 而 733 K 锻件的磨损量是 0.0535 g, 即摩擦因数和磨损量均高于 713 K 锻件的, 也就是说随着锻造温度的升高, 耐磨性能降低。同时也表明, 表面硬度较高的 713 K 锻件的摩擦因数较 733 K 锻件的低。温度为 423~473 K 时, 因粘着磨损因素, 存在着低温裂化现象, 当发生磨损时, 随着摩擦频率的增加, 摩擦表面的氧化量亦随着增加, 促进了磨损。因而, 粗大的初晶 Si 将使锻件的磨损性能降低。在本实验中设定的全部摩擦速度范围内, 高温用铝合金 713 K 锻件的耐磨性能优于 733 K 锻件的, 这可能与摩擦表面形成了一种氧化层有关^[8~10]。锻件在 423 K 的磨损行为, 可看作机械研削磨损, 或伴随着变形的磨损, 磨损中同时还伴随氧化反应等。

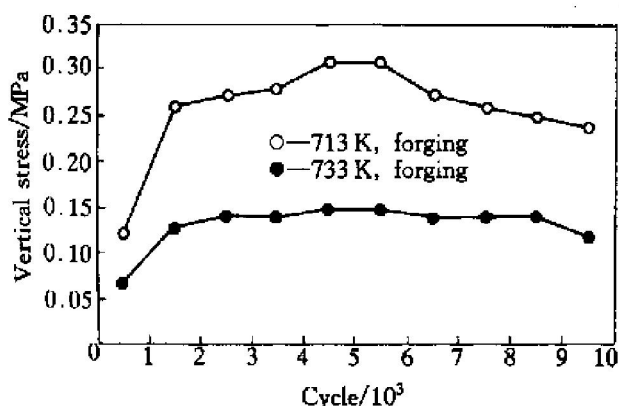


图 5 4XXX 系列铝合金的磨损实验结果

Fig. 5 Wear test result of 4XXX series Al alloy

2.4 成形性能评价

温度是影响铝合金锻造性能的重要因素, 应根据锻造变形量和变形速度在该材料的适用锻造温度范围内进行选定^[11, 12]。成形不良表现在, 温度过低时因温度不均匀及低温引起的工件变形能的下降, 而温度过高时则因变形抗力的减小, 锻造压力不均匀, 发生偏截现象。图 6 所示是 713 K 锻件和 733 K 锻件成形性能比较。图 6 表明, 713 K 锻件的平均废品率为 20%, 733 K 锻件的平均废品率为 10%, 与 713 K 锻件相比大约减少了 10%, 说明其成形性能有了较大提高。虽然锻造温度的增高能带来好的成形性能, 但力学性能变化不大。因此锻造温度越高, 材料变形抗力就越小, 加工所需要功率也越小。但过高的加热温度会引起材料过热, 导致晶界脆化, 不利于锻造。并且如果锻造温度在固相线以下, 高于正常锻造温度, 则加工时材料的表面

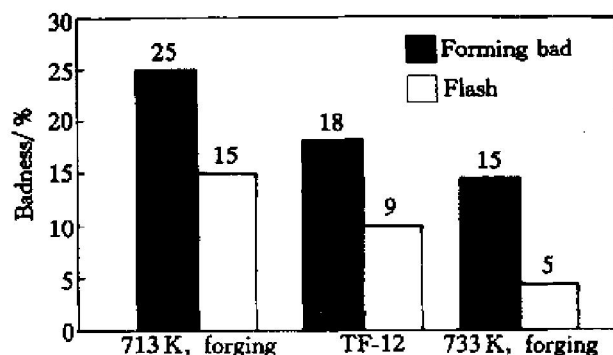


图 6 汽车连杆制造废品率随锻造温度的变化

Fig. 6 Variety of badness during connecting rod production with temperature

将会首先变形, 成为发生表面缺陷及热裂和充不满模腔等的原因。

3 结论

1) 4XXX 系列铝合金中增添了 0.02% Sb, 在挤压组织中发现基体上沿挤压方向存在灰色长短不一的硅粒; 而锻造后的组织除了共晶组织外, 还存在着多角形初晶 Si 和 Al_4Cu_9 相。正是这些相的存在, 提高了合金的高温强度。初晶 Si 和 Mg 形成 Mg_2Si 相, 有助于提高材料的耐热性能。

2) 用该合金自制了汽车内燃机连杆锻造件。当材料的锻造温度从 713 K 提高到 733 K 时, 其变形抗力和加工应力均减少, 表现出优秀的成形性能。

3) 按不同位置测定的连杆硬度分布是 Hv131~139, 其平均硬度为 Hv133, 大体上能够满足汽车连杆所要求的 Hv137 的条件。并且, 耐磨实验结果表明 713 K 锻件的耐磨性能优于 733 K 锻件的。

4) 成形性能评价结果表明 713 K 锻件的平均废品率达 20%, 733 K 的平均废品率为 10%, 这说明 733 K 锻件表明出优秀的成形性能。

致谢

本文工作受到韩国 Research Institute of Advanced Materials Development, Chonbuk National University 的资助, 作者在此表示感谢。

[REFERENCES]

- [1] Ko H S, Kang S B, Kim H W. Effect of intermediate annealing on the texture evolution in Al-6wt% Mg for automobile body sheets application [J]. J of the Korean Inst of Met & Mater, 1999, 37: 891- 897.

- [2] Kim C J, Jung J Y. View and evolution conditions of Al alloys on air plane [J]. Machine and Materials, 1990, 2 (4): 48– 49.
- [3] Kaneko Y, Murakami H, Kuroda K, et al. Foundry Trade, 1980, 2: 379– 397.
- [4] Ho-In Lee. Aluminum engine materials for automobile [J]. J Kor Inst Met & mater, 1991, 4(3): 227– 239.
- [5] Tsuda, Cegawa. Effect of strontium and phosphorus on solid/liquid interface of Al-Si eutectic [J]. J of Japanese Foundry Engineering Society, (in Japanese), 1971, 43 (9): 92– 95.
- [6] Sekiguchi T. Forging of aluminum alloys [J]. J of Japan Institute of Light Metals, (in Japanese), 1994, 44(12): 742– 758.
- [7] Lim C Y, Umezawa O, Nagai K. Influence of low temperature working on microstructure and mechanical properties of Al-7Si(Fe) alloys [J]. Metal and Materials, 1998, 4(5): 1027– 1031.
- [8] Lee H K, Cho K, Park I M, et al. Wear properties of high temperature Al alloys [J]. J Kor Inst Met & Mater, 1995, 33(2): 243– 246.
- [9] Shivanath R, Sengupta P K, Eyre T S. Wear Materials, 1997.
- [10] Jasim K M, Dwarakadasa E S. Effect of mechanical properties on the adhesive wear of metals [J]. Mat Sci Letters, 1992, 11: 1309– 1311.
- [11] Mcqueen H J, Jonas J. 6 Plastic deformation of material [J]. Treatise on Material Science Technology, 1975: 333.
- [12] Sanker J, Mawkins D, Mcqueen J J. Influence of calcium on hot ductility of steels [J]. Met Tech, 1979, 6: 325– 330.

Forgeability of 4XXX series Al alloys

Chul-Min Lim¹, Young-cheol Jin²

(1. Department of Metallurgical Engineering, Chonbuk University,

664– 14 ducjin-dong ducjin-ku, chonju 561– 756, Korea;

2. Department of Metallurgical Engineering, Chonbuk National University, 664– 14 ducjin-dong ducjin-ku, Chonju 561– 756, Research Institute of Advanced Materials Development, Korea)

[Abstract] The microstructures of as-cast, extruded and forged 4XXX series Al alloy with addition of Sb were observed. The results show that dendrites in casting are converted into directional microcrystals, and then recrystallize and grow into spheroidizing grains. After forging, in α phase, polygonal proeutectic Si and Al_4Cu_9 are observed in addition to eutectics (11% ~ 12.6% Si). It is thought that proeutectic Si will improve the heat-resistance by forming Mg_2Si with Mg, and that Al_4Cu_9 will play an important role in maintaining the high temperature strength of the alloy. The average hardness of connecting-rod prepared by this material is Hv133, that almost satisfies the requirement. With the increase of forging temperature, the deformation resistance and stress for working are decreased, which brings about the improvement of formability.

[Key words] formability; extrusion; connecting-rod; forging

(编辑 杨 兵)