

[文章编号] 1004- 0609(2002) 01- 0082- 05

半固态 LC₄ 合金的屈服应力^①

田文彤, 罗守靖, 张广安

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

[摘 要] 以 SIMA 法制备的非枝晶 LC₄ 合金为例, 进行压缩试验, 测出了应变速率、变形温度及保温时间不同时的屈服应力。结果表明: 当应变速率相同时, 在固态区, 屈服应力随着变形温度的增加稍有减小; 而在半固态区, 屈服应力随着变形温度的提高明显减小, 且在共晶点附近急剧下降。屈服应力随着保温时间增加而略有减小的主要原因是由于随着保温时间的增加, 晶粒的尺寸、球形化程度、固相晶粒间的结合程度及晶粒内俘获的液体不同所致。当变形温度及保温时间相同时, 随着应变速率的升高, 屈服应力明显增加。通过分析不同变形温度及保温时间的材料显微组织进化规律, 阐明了屈服应力与显微组织之间的内在联系。

[关键词] 屈服应力; 显微结构; 变形温度; 保温时间; 应变速率

[中图分类号] TG 146. 3

[文献标识码] A

与传统的近净成型技术相比, 半固态金属成型由于模具寿命长、凝固收缩小、气孔少、偏析小及力学性能高等优点, 而成为 21 世纪最具发展前景的近净成型技术^[1~4]。尽管该技术在国内外已获得一些成功的应用, 但与其潜在的技术优势相比, 还远远不够^[5, 6], 这主要是由于对半固态金属的流变行为及工艺控制等方面的关键问题的研究还不够深入。

半固态金属是近球形的固相间充满液体的固液混合物, 其流变行为与粘塑性材料的相似。即当作用应力小于屈服应力时, 材料的行为像固体; 而当作用应力大于屈服应力时, 材料就会像流体一样流动^[7, 8]。目前, 研究者^[7, 9, 10]一般都从力学角度研究半固态材料的屈服应力, 而很少有人将屈服应力的变化与材料的显微结构联系起来。作者通过大量实验, 测量了不同条件下的屈服应力, 分析了不同条件时的显微结构进化规律。在此基础上, 研究了显微结构与屈服应力间的内在关系。

1 实验

选用的材料为 SIMA 法制备的 LC₄ 合金, 其主要成分如表 1 所示。该合金的熔化起始温度为 586 ℃, 熔化结束温度为 626. 6 ℃, 固液相线温度区间为 40. 6 ℃。压缩实验在 INSTRON 1186 电子万能

材料实验机上进行, 压缩试样加工成 $d 15 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$ 的圆柱体, 一共进行了 3 组压缩实验。第一组为应变速率($8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)及保温时间(10 min)一定, 变形温度分别为 560, 580, 585, 592, 600, 605 和 610 ℃; 第二组为应变速率($4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)及变形温度(600 ℃)一定, 保温时间分别为 5, 10, 15, 20, 30, 40 min; 第三组为变形温度(600 ℃)及保温时间(10 min)一定, 应变速率分别为 8×10^{-4} , 4×10^{-3} , 1.6×10^{-3} , 4×10^{-2} 和 $1.6 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。温差控制在 $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 在试样两端涂上石墨以减小摩擦。屈服应力取压缩真实应力—真实应变曲线的峰值。在另一台电阻炉中进行相同的加热实验, 加热完后, 立即将试样水淬, 并沿横截面切开, 进行金相分析。

表 1 LC₄ 合金的主要成分

Table 1 Composition of LC₄ alloy

Element	Zn	Mg	Cu	Fe	Mn	Si	Cr	Al
Mass fraction/ %	5.9	2.1	1.8	0.42	0.40	0.36	0.18	Bal.

2 结果与分析

2.1 变形温度的影响

图 1 给出了保温时间为 10 min, 应变速率为 $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时的屈服应力与变形温度间的关系曲线。由图可看出, 当变形温度低于固相线温度时,

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59975023)

[收稿日期] 2001- 03- 07; [修订日期] 2001- 06- 04

[作者简介] 田文彤(1968-), 女, 博士研究生。

随着变形温度的升高, 屈服应力略有减少; 而当变形温度高于固相线温度(固液两相区)时, 屈服应力随温度的升高明显减小, 且在固相线附近屈服应力急剧减小。实际上, 半固态时的屈服应力与固态时的有所不同, 在固态下, 作用力完全由固相晶粒承担, 只有当其弹性变形达到一定程度时才发生屈服, 其变形程度由固体晶粒的塑性变形控制, 且在高温下由于再结晶和加工硬化相平衡, 使得屈服应力受变形温度的影响不大。而在半固态下, 当作用力达到固相晶粒间的结合力及合金的内部摩擦(内部摩擦指完全无粘合力材料的剪切阻力)时, 材料才发生屈服, 此时屈服应力远小于固态时的屈服应力值, 半固态的变形程度由液体渗透和晶粒滑动控制, 且屈服应力受变形温度的影响很大^[7, 11]。因此, 在共晶点附近, 由于液体的出现, 屈服应力急剧下降。图 2 给出了保温时间为 10 min, 不同温度时的显微组织。图中白色区域是初生 α 相, 黑色区域是液相。随着加热温度的升高, 晶粒内俘获的液体开始由于晶粒的聚集长大而增多, 而后由于 Ostwald 长大而减少, 但该变化对晶界处液体量的影响

很小, 无法改变晶界处液体不断增加的事实; 固相晶粒的形状逐渐趋于球形, 其球形化程度由快到慢并趋于稳定。因此, 固相晶粒间的结合程度不断减弱, 导致材料的屈服应力下降。此外, 晶粒的平均尺寸受温度的影响不大, 在 605 °C 以前, 晶粒的平均尺寸增大, 有利于屈服应力的降低, 超过 605 °C, 晶粒的平均尺寸由于受晶界处的液体迁移

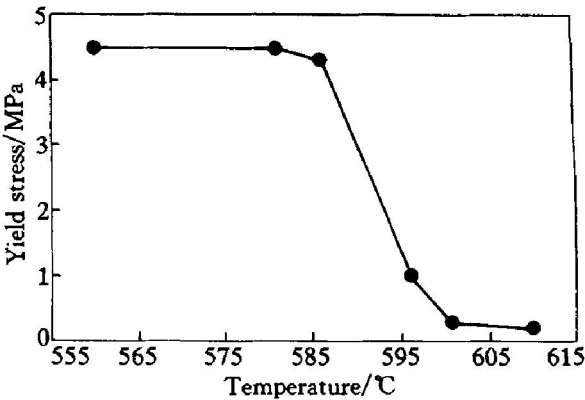


图 1 屈服应力与变形温度间的关系曲线
Fig. 1 Curve of yield stress vs deformation temperature

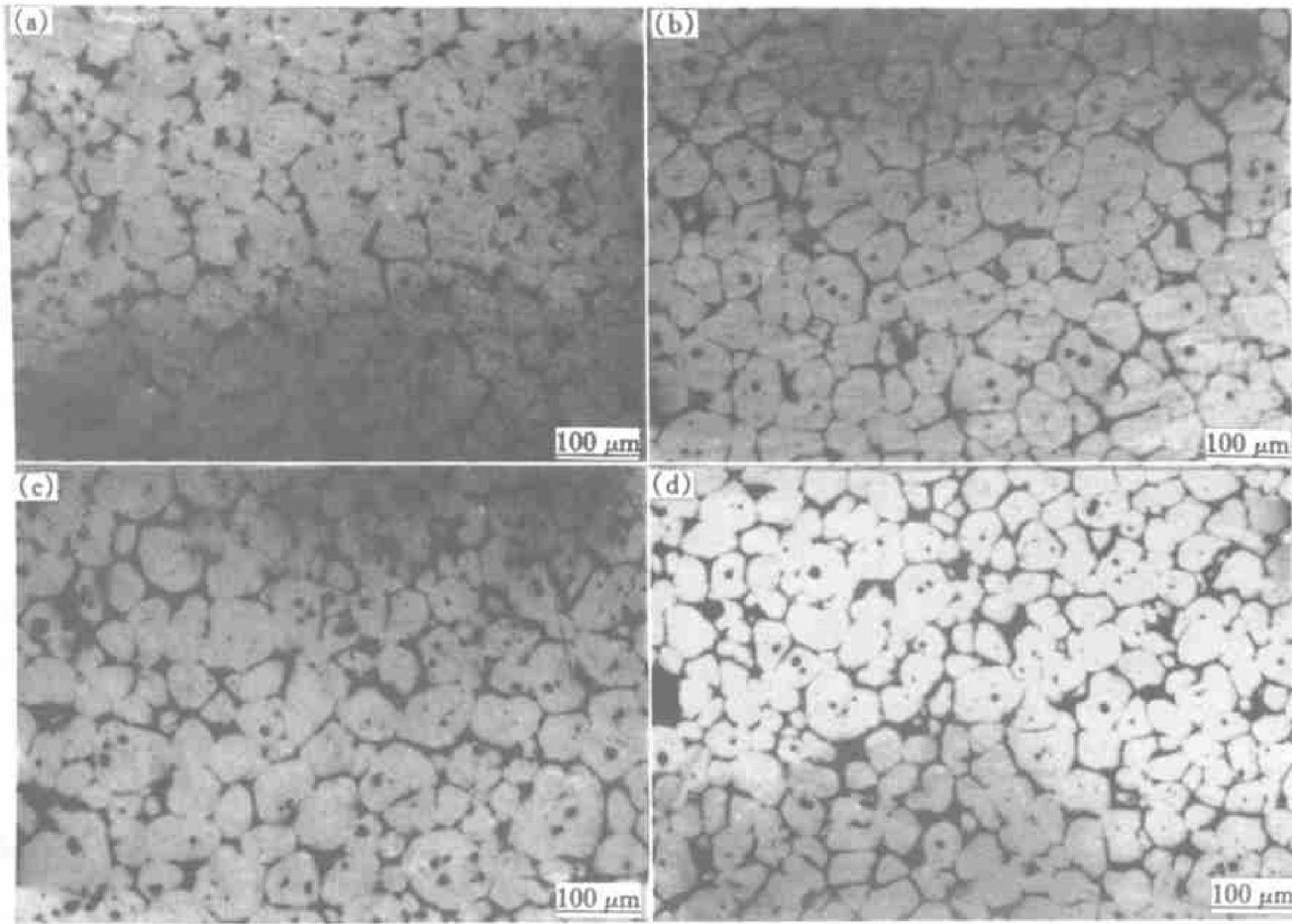


图 2 不同加热温度的显微组织
Fig. 2 Microstructures of different reheating temperature
(a) —590 °C; (b) —600 °C; (c) —605 °C; (d) —610 °C

控制而略有减小^[12], 但其对屈服应力的负面影响是微不足道的, 这点可从图 1 中得到验证。

金相观察表明: 屈服应力下降的开始点与晶粒边界熔化的初始阶段相对应, 屈服应力的急剧下降与大部分低熔点相的熔化相对应, 一旦均匀的低熔点相熔化完成, 屈服应力保持比较低的值, 且屈服应力主要受固相晶粒间结合力的影响。

2.2 保温时间的影响

图 3 给出了在同一变形温度及应变速率(变形温度为 600 °C, 应变速率为 $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) 时的屈服应力与保温时间的关系曲线。图 4 所示为在该温度下不同保温时间的显微组织。由图可看出, 随着保温时间的增加, 屈服应力略有下降。这是由于随着保温时间的延长, 固相晶粒的平均尺寸增大, 晶粒的形状越来越接近于球形, 因此固相晶粒间的结合程度逐渐减弱, 导致屈服应力逐渐下降。同时固相晶粒内俘获的液体由于 Ostwald 长大而减少, 即晶界处液体增加, 引起屈服应力减小。这与图 3 的测量结果是一致的, 即随着保温时间的增加, 屈服应力缓慢减小。

此外, Mg 合金^[13] 及 AlSi 系列合金^[8] 在两相区内屈服应力的变化范围与本实验所测得的结果相近。完全不同系列合金的类似的屈服应力值表明半固态合金的屈服应力值主要受固相晶粒间及固液晶

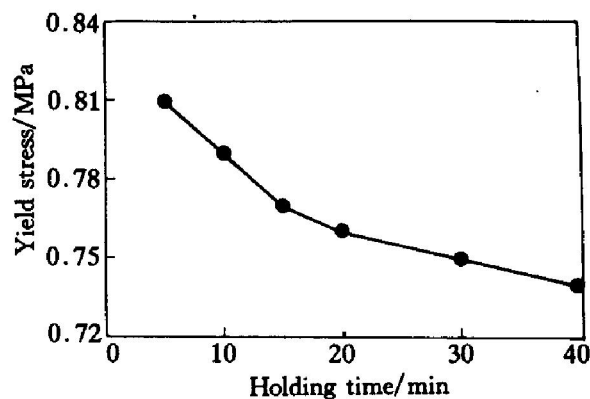


图 3 屈服应力与保温时间的关系曲线

Fig. 3 Curve of yield stress vs holding time

粒间的相互作用。对于给定的固相分数, 不同系列合金的屈服应力没有明显的差别, 这表明温度对屈服应力的影响占主导地位。因此, 尤其对固液温度区间比较窄的合金的成型来说, 温度控制是至关重要的, 因为小的温度变化会导致流动性的很大变化。另外, 改善材料的流动性可通过提高变形温度及延长保温时间来实现。

2.3 应变速率的影响

图 5 给出了变形温度及保温时间相同(变形温度 600 °C, 保温时间 10 min) 时的屈服应力与应变速率间的关系曲线。由图可看出, 随着应变速率的增加, 屈服应力也增加。这是由于应变速率越高, 液体来不及移出, 在变形体内部产生很大的气孔

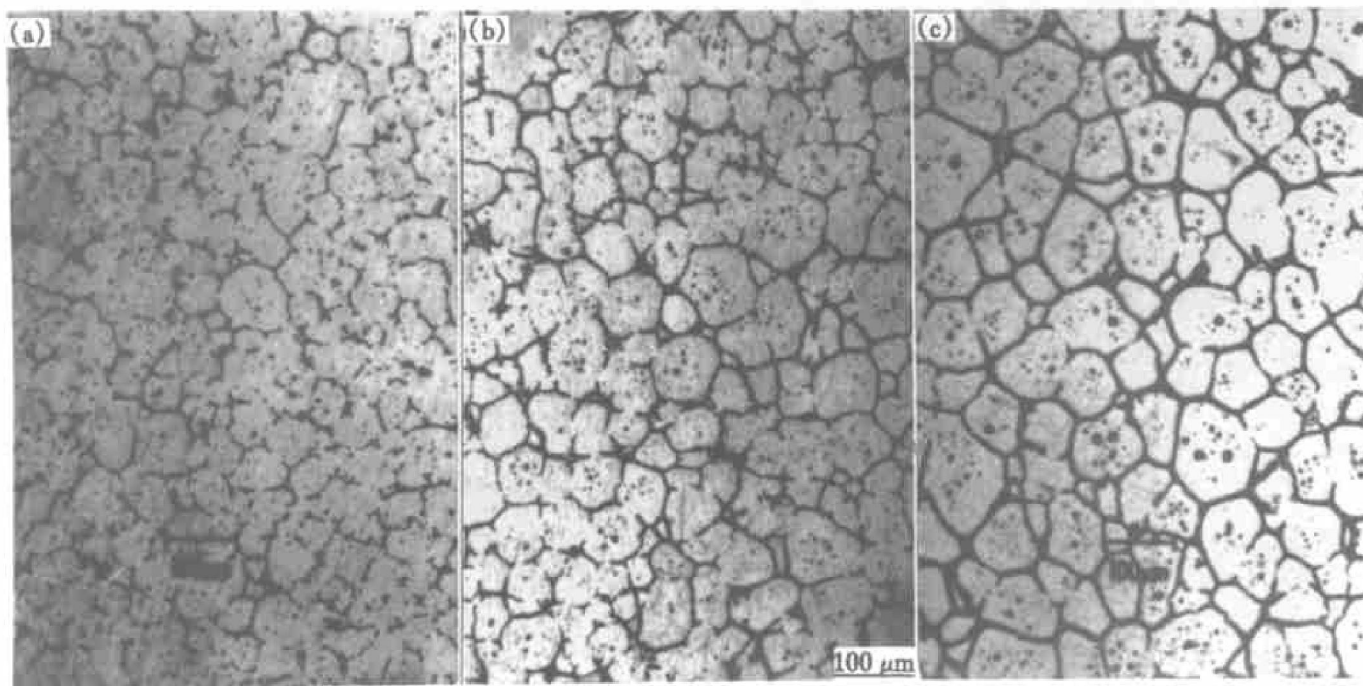


图 4 不同等温时间的显微组织

Fig. 4 Microstructures of different holding time

(a) —10 min; (b) —20 min; (c) —30 min

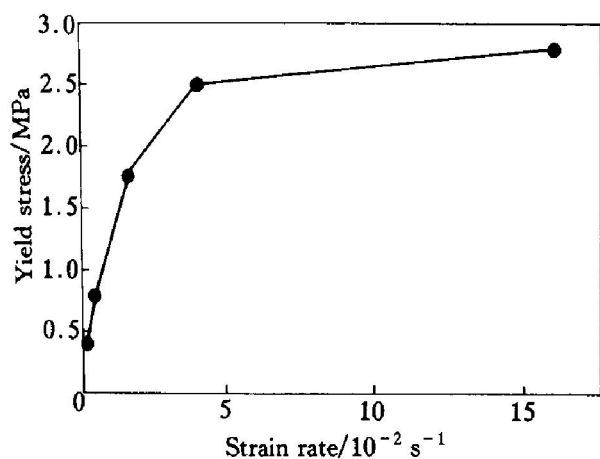


图5 屈服应力与应变速率间的关系曲线

Fig. 5 Curve of yield stress vs strain rate

压力, 使得变形抗力增大, 相应的屈服应力也增大。应变速率越低, 变形体内的液体越有时间向外排出, 从而减小了内部的孔隙压力, 故只需较小的力就能使材料发生屈服。

对半固态材料来说, 屈服应力具有依赖于应变速率的特性。从原理上讲, 当应变速率趋于零时, 剪切应力趋于恒定值, 此时的剪切应力值即为“真正的”屈服应力。然而由于实验条件的限制, 不可能测出“真正的”屈服应力值。

3 结论

1) 半固态下的屈服应力主要受变形温度的影响。随着变形温度的增加, 屈服应力明显下降, 且在固相线附近屈服应力急剧下降。

2) 在变形温度和应变速率相同的情况下, 随着保温时间的增加, 固相晶粒间及固液间的结合强度减弱; 固相晶粒内俘获的液体减少, 这些均导致屈服应力下降。

3) 当在一恒定的应变速率下成型时, 可通过提高变形温度和延长保温时间改善材料的流动性。

4) 在变形温度及保温时间相同的情况下, 随着应变速率的提高, 屈服应力也相应增加。

[REFERENCES]

[1] 罗守靖, 田文彤, 谢水生, 等. 半固态加工技术及应用 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 765– 773.
LUO Shou-jing, TIAN Wen-tong, XIE Shu-sheng, et al. Technology and applications of semisolid forming [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000,

10(6): 765– 773.

- [2] Chen C P, Tsao C Y A. Semisolid deformation of non-dendritic structures (I) —Phenomenological behavior [J]. Acta Mater, 1997, 45(5): 1955– 1968.
- [3] Martin C L, Favier D, Suery M. Viscoplastic behaviour of porous metallic materials saturated with liquid part II: Experimental identification on a Sn-Pb model alloy [J]. Int J Plast, 1997, 13(3): 215– 235.
- [4] Kang C G, Choi J S, Kim K H. The effect of strain rate on macroscopic behavior in the compression forming of semisolid aluminum alloy [J]. J Mater Proc Tech, 1999, 88: 159– 168.
- [5] 谢水生, 黄声宏. 半固态金属加工技术及其应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999. 133– 134.
XIE Shu-sheng, HUANG Sheng-hong. Technology and Application of Semisolid Forming [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999. 133– 134.
- [6] Kui Z, Jun X, Likas S, et al. Research and applications of SSP in China [A]. Proc of the 6th Int Conf on the Semisolid Processing of Alloys and Composites [C]. Torino Italy, 2000. 115– 120.
- [7] Tzimas E, Zavaliangos A. Mechanical behavior of alloys with equiaxed microstructure in the semisolid state at high solid content [J]. Acta Mater, 1999, 47(2): 517– 528.
- [8] Pan Q Y, Apelian D. Yield stress of Al alloys in the semisolid state [A]. Proc of the 6th Int Conf on the Semisolid Processing of Alloys and Composites [C]. Torino Italy, 2000. 399– 404.
- [9] 孙家宽, 罗守靖. 半固态下 LY12 的变形力学行为 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(3): 493– 498.
SUN Jia-kuan, LUO Shou-jing. Mechanical behaviors of tension and compression deformation of 2024Al alloy at semisolid state [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(3): 493– 498.
- [10] 罗守靖, 田文彤. 半固态金属塑性加工力学的研究进展 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(5): 78– 80.
LUO Shou-jing, TIAN Wen-tong. Research development of semisolid metal plastic working mechanics [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 32(5): 78– 80.
- [11] Lewandowski M S, Overfelt R A. High temperature deformation behavior of solid and semisolid alloy 718 [J]. Acta Mater, 1999, 47(18): 4695– 4710.
- [12] Gullo G C, Steinhoff K, Uggowitzer P J. Microstructural changes during reheating of semisolid alloy AA6082 modified with barium [A]. Proc of the 6th Int Conf on the Semisolid Processing of Alloys and Com-

- posites [C]. Torino Italy, 2000. 367– 372.
- [13] Sannes S, Gjestland H, Arnberg L, et al. Yield point behavior of semi-solid Mg alloys [A]. The 3rd Int Conf on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites [C]. Tokyo, Japan, 1994. 271– 280.

Yield stress of LC₄ alloy in semi-solid state

TIAN Wen-tong, LUO Shou-jing, ZHANG Guang-an

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, China)

[Abstract] Extensive compression experiments were conducted to measure yield stress under different strain rates, deformation temperatures and holding times. Non-dendritic LC₄ alloy fabricated by SIMA method was used. The results of yield stress measurements in a constant strain rate were presented. Yield stress value decreases slightly with the increasing of temperature in solid state, whereas yield stress value decreases dramatically with the increasing of temperature in semi-solid state. A sharp drop of yield stress was found to occur at eutectic point. Grain size, spheroidization, cohesion between solid grains and entrapped liquid inside grains are different with the increasing of holding time, which results in a decrease of yield stress. The results of yield stress measurements at a constant temperature and holding time were also presented. The yield stress value increases dramatically with the increasing of strain rate. In addition, microstructure evolutions at different temperatures and holding time are analyzed. Inherent relationship between yield stress and microstructure is clarified.

[Key words] yield stress; microstructure; deformation temperature; holding time; strain rate

(编辑 吴家泉)