



半固态 ZCuSn10 铜合金坯料 单向压缩变形行为及显微组织

胡海莲¹, 肖 寒¹, 王 佳¹, 周荣锋^{1,2}, 卢德宏¹, 周 荣¹

(1. 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093;

2. 昆明理工大学 分析测试研究中心, 昆明 650093)

摘 要: 采用 Gleeble-1500 材料热/力模拟机, 对应变诱导熔化激活法(SIMA)制备的不同原始半固态组织的 ZCuSn10 铜合金进行单向压缩实验。研究预变形量和压缩变形条件对半固态坯料真应力-应变曲线及其组织的影响, 并结合 ZCuSn10 铜合金压缩后的宏观形貌和显微组织对液相的流动规律进行分析。结果表明: 随着预变形量和变形温度的增加, 流变应力降低。变形温度对半固态 ZCuSn10 铜合金压缩变形峰值应力影响较大, 对稳态应力影响较小。与固态金属压缩变形相同, 半固态 ZCuSn10 铜合金在半固态温度区间压缩变形时, 存在 3 个典型压缩变形区域, 即难变形区(I 区)、大变形区(II 区)、自由变形区(III 区), I、II、III 区的液相率分别为 15.23%、5.31%、20.12%。各个变形区之间发生了液相流动, 小部分难变形区内的液相流到大变形区, 大部分大变形区内的液相流到自由变形区。

关键词: ZCuSn10 铜合金; 半固态; 单向压缩; 变形行为

中图分类号: TG146.1

文献标志码: A

Deformation behavior and microstructure of semi-solid ZCuSn10 copper alloy billet during uniaxial compression

HU Hai-lian¹, XIAO Han¹, WANG Jia¹, ZHOU Rong-feng^{1,2}, LU De-hong¹, ZHOU Rong¹

(1. Faculty of Materials Science and Engineering,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Research Center for Analysis and Measurement,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The uniaxial compressive deformation experiments on ZCuSn10 copper alloy billet with different original semi-solid organizations prepared by strain induced melt activation (SIMA) process were carried out using Gleeble-1500 thermo-mechanical simulator. The effect of pre-deformation and compressive deformation conditions on true strain-stress curves and organizations of semi-solid billet were analyzed. And the liquid flowing law was studied by analyzing the macroscopic morphology and microstructure of ZCuSn10 copper alloy after the compression. The results show that deformation resistance reduces with increasing the pre-deformation amount and deformation temperature. The deformation temperature of uniaxial compression has a greater impact on the peak stress of semi-solid ZCuSn10 copper alloy during uniaxial compression, but has a less impact on steady stress. As same as the compressive deformation of solid metal, there are three typical compression areas in semi-solid ZCuSn10 copper alloy during uniaxial compression, namely difficult deformation zone (zone I), large deformation zone (zone II) and free deformation zone (zone III). The contents of liquid phase in zones I, II and III are 15.23%, 5.31% and 20.12%, respectively. And the liquid phase

基金项目: 云南省应用基础研究重点项目(2011FA007); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20125314120013); 云南省应用基础研究面上项目(2014FB131)

收稿日期: 2014-09-26; **修订日期:** 2014-12-29

通信作者: 周荣锋, 教授, 博士; 电话: 13708868341; E-mail: zhourfchina@hotmail.com

flowing occurs among different deformation zones, a small amount of liquid phase in the difficult deformation zone flows to the large degree deformation zone, and a large amount of liquid phase in the large degree deformation zone flows to the free deformation zone.

Key words: ZCuSn10 copper alloy; semi-solid; uniaxial compression; deformation behavior

金属半固态加工技术由 SPENCER 等^[1]于 1971 年首次提出, 是一种依靠金属从液态向固态转变或从固态向液态转变过程中所具有的特性进行成型的方法。该方法具有加工温度比液态低、变形抗力比固态小、可一次以大变形量成形形状复杂且精度和性能质量要求较高的零件等优点, 被称为 21 世纪最有前途的材料成形加工方法^[2-6]。目前, 制备半固态坯料的方法有多种, 其中应变诱导熔化激活法(SIMA)是将金属铸锭经预变形, 然后将其加热至半固态温度区间等温一定时间, 从而获得半固态坯料^[7-9]。采用 SIMA 法制备的半固态坯料具有致密度高、无污染、适用范围广的特点, SIMA 法尤其对制备较高熔点的非枝晶合金具有独特的优越性^[10]。目前, 国内外科研人员对 SIMA 法制备半固态坯料及其变形行为开展了大量的研究工作, 主要是通过半固态等温压缩试验来研究不同的预变形工艺以及重熔工艺参数对半固态坯料组织性能的影响^[11-12]。刘允中等^[13]和李志龙等^[14]采用 SIMA 法制备了半固态 7050 铝合金坯料, 利用 Gleeble-3500 热模拟试验机分别对 7050 铝合金进行了半固态等温压缩实验, 分析了其应力-应变关系, 研究了半固态 7050 铝合金压缩变形时液固组织变化规律。陈少东等^[15]对半固态 ZL101 合金坯料进行半固态等温压缩实验, 研究变形温度和应变速率对半固态 ZL101 合金流动应力的影响。BENKE 等^[16]对半固态 A356 铝合金在不同温度下进行了单向拉伸和压缩试验, 研究其在浇注凝固过程中的本构行为。但是, 这些研究工作大多针对铝合金和镁合金等低熔点合金, 而对较高熔点合金的半固态加工的研究相对较少, 对高熔点合金的研究主要集中于钢铁材料^[17]。

ZCuSn10 铜合金被广泛用于蒸汽锅炉和船舶工业的重要阀件、齿轮和涡轮等。该合金采用传统铸造成形时, 锡偏析严重, 导致组织和性能不均匀, 从而影响该合金的使用寿命^[18]。因此, ZCuSn10 铜合金的半固态成形的研究对提高 ZCuSn10 铜合金使用寿命和扩大其应用领域具有重要意义。本文作者在 ZCuSn10 铜合金半固态坯料制备的研究基础上^[19-20], 采用 Gleeble-1500 材料热/力模拟机, 对半固态 ZCuSn10 铜合金在不同变形温度进行等温压缩实验, 研究 ZCuSn10 铜合金半固态坯料压缩变形行为, 分析压缩过程中固液两相组织的演变规律, 为铜合金半固态成

形提供理论基础。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为 ZCuSn10 铜合金, 其化学成分如表 1 所列。采用耐驰 STA449F3 同步热分析仪进行差热分析(DSC)确定该合金的固相线温度为 830 °C, 液相线温度为 1020 °C, 其 DSC 曲线如图 1 所示。

表 1 ZCuSn10 铜合金化学成分

Table 1 Chemical composition of ZCuSn10 copper alloy (mass fraction, %)

Cu	Sn	Others
88.25	10.48	1.27

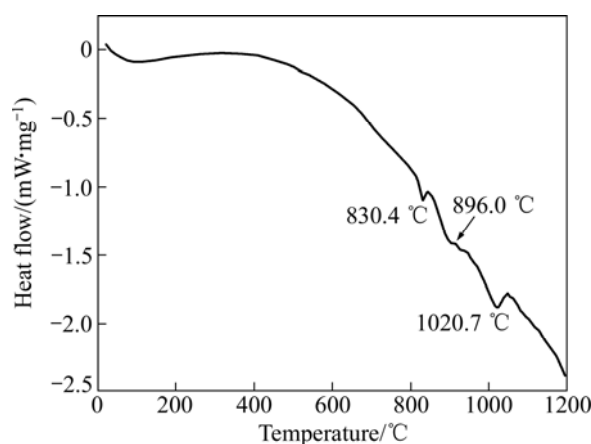


图 1 ZCuSn10 铜合金铸锭的 DSC 曲线

Fig. 1 DSC curve of as-cast ZCuSn10 copper alloy

1.2 实验方法

ZCuSn10 铜合金半固态坯料的制备过程为: 第一步为铸锭的制备与轧制。将 ZCuSn10 铜合金在 1180 °C 浇注至金属模成型, 凝固后开模取出空冷至室温, 获得 ZCuSn10 铜合金铸锭。在铸锭上截取为 25 mm×25 mm×150 mm 的矩形棒料作为轧制试样。通过控制轧制压下量得到预变形量分别为 13.8%和 20.8%的试样。第二步为半固态温度区间等温处理。等温过程在

910 °C 下进行, 保温时间为 20 min。将试样在保温处理后立即水淬, 得到两种不同原始组织的 ZCuSn10 铜合金半固态试样。利用 Image-pro Plus 软件计算原始半固态组织和半固态温度区间压缩后试样的液相率、晶粒尺寸和圆整度。计算时, 取同一区域 3 张或以上图片, 取其平均值作为计算结果, 其中液相率为液相面积与图片面积之比, 存在孔洞的地方则去除孔洞面积。

在 Gleeble-1500 材料热/力模拟机上对 d 10 mm×15 mm 的圆柱形试样进行半固态压缩试验, 为了减少压缩过程中摩擦阻力的影响, 压缩试样按照 GB/T73142005 中有关压缩试样制备要求进行加工, 压缩过程中试样端部涂有一定量的石墨润滑^[21-22]。压缩实验过程中, 加热速度为 10 °C/s, 但为了避免加热系统的惯性使试样的实际温度超出预定变形温度, 在加热到距预定变形温度 50 °C 时, 将加热速度降为 2 °C/s, 加热到预定变形温度之后保温 10 s。具体的热压缩变形参数为: 实验热压缩应变量为 0.2, 变形温度为 900 和 910 °C, 应变速率为 1 s^{-1} 。试样在半固态温度区间压缩变形后立即水冷, 以保留其原始组织。试样沿轴线从中心剖开, 经粗磨、细磨、抛光后腐蚀, 并采用 LEICA DMI 5000M 金相显微镜观察试样的显微组织。

2 结果与讨论

2.1 半固态 ZCuSn10 铜合金真应力-真应变曲线

图 2 所示为利用 SIMA 法制备的 ZCuSn10 铜合金半固态试样在 900 和 910 °C 进行等温压缩变形后的应力-应变曲线。由图 2 可以看出, 不同预变形量和不同温度的压缩试样的应力-应变曲线形状是相似的。在变形的初始阶段, 随着应变的增加, 应力值从 0 迅速增加到最大峰值应力, 曲线表现为准弹性。这时的合金组织可以看成是近球状 α -Cu 固相颗粒与液相搭建的骨架组成, 由于受到压应力的作用, 液相由中心处的较大等静压力区域向外侧较小等静压力区域流动, 使得液相在宏观范围内重新分布, 此阶段的变形方式为液相流动及固液相混合流动。当应变继续增加时, 应力-应变曲线出现了缓慢下降的趋势, 说明此时合金发生了永久塑性变形。在外力的作用下, 外力要克服 α -Cu 球形晶粒间液相的运动阻力和 α -Cu 球形晶粒之间的摩擦阻力, 液相与 α -Cu 固相之间发生相界面滑动。随着压缩的进行, 球状固相晶粒不断调整运动方向与位置, 使液相与 α -Cu 固相晶粒之间的相界面滑动得以进行。同时, 热源不断地向变形体提供能量,

液相与固相之间的表面张力逐渐降低, 使固相晶粒与液相的滑移转动更易进行。因此, 随着应变增加, 应力缓慢降低, 最终应力与应变达到了相对稳定的状态, 此阶段的变形方式为晶粒塑性变形。

表 2 所列为铜合金试样压缩变形后的峰值应力 σ_m 和稳态应力 σ_s 。由表 2 可以看出, 峰值应力随温度变化较大, 稳态应力随温度变化较小, 说明温度对峰值应力的影响较大, 对稳态应力影响较小。在半固态变形过程中, 随着变形温度的升高, 合金中液相体积分增大, 热源提供的热激活能也更高。在变形时, 液相裹着固相颗粒移动, 使得晶粒之间的滑移转动容易进行, 流变应力显著降低。而在后期的变形过程当中, 由于液相流动性较好, 液相先于固相被挤出, 使得液相对变形的影响减弱, 对稳态应力的影响也随之减弱。

由图 2 还可以看出, 当变形温度为 900 °C、预变形量为 13.8% 时, 试样在应变为 0.08 时达到峰值应力 32.88 MPa; 当变形温度为 900 °C、预变形量为 20.8% 时, 试样在应变为 0.1 时达到峰值应力 32.41 MPa。预

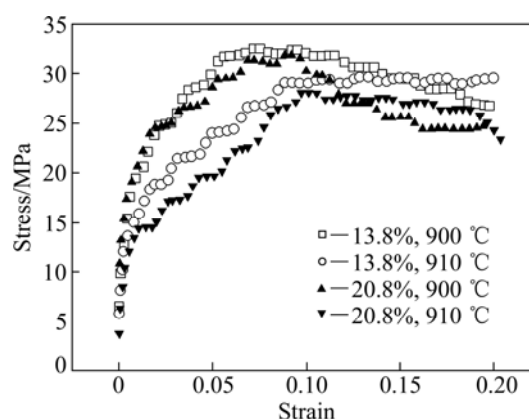


图 2 900 和 910 °C 时 SIMA 法制备半固态的 ZCuSn10 铜合金单向压缩变形真应力-真应变曲线

Fig. 2 Uniaxial compression true stress-true strain curves of semi-solid ZCuSn10 copper alloy prepared by SIMA method at 900 and 910 °C

表 2 不同温度下半固态 ZCuSn10 铜合金单向压缩后峰值应力和稳态应力

Table 2 Maximum stresses (σ_m) and steady stresses (σ_s) of semi-solid ZCuSn10 copper alloy during uniaxial compression at different temperatures

Pre-deformation Amount/%	Temperature/ °C	σ_m /MPa	σ_s /MPa
13.8	900	32.88	29.52
13.8	910	30.04	29.13
20.8	900	32.41	27.54

20.8	910	28.52	27.07
------	-----	-------	-------

变形量 13.8%时试样的真应力-应变曲线一直处于预变形量 20.8%的上方,说明在压缩过程中,预变形量 13.8%时的流变应力较大是由于随着预变形量的增加,半固态试样中的液相增多,使得半固态组织中固相晶粒与液相间的滑移转动更容易进行,从而出现图 2 中随着预变形量的增加应力-应变曲线下移的现象。

2.2 半固态 ZCuSn10 铜合金显微组织

图 3 所示为 ZCuSn10 铜合金原始铸态显微组织。由图 3 可以看出, ZCuSn10 铜合金的原始铸态组织枝晶粗大,其中枝晶主要为 Sn 在 Cu 中的固溶体 α 相,为面心立方晶体结构;枝晶外的深灰色组织为 $(\alpha+\delta)$ 共析组织,铸态组织的一次枝晶和二次枝晶相互连接构成网状结构, $(\alpha+\delta)$ 共析体位于其间隙内。

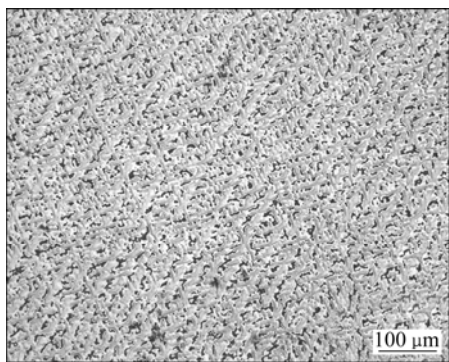


图 3 ZCuSn10 铜合金铸态组织

Fig. 3 Microstructure of as-cast ZCuSn10 copper alloy

图 4 所示为不同预变形量的 ZCuSn10 铜合金在 910 °C 重熔保温 20 min 后水淬得到的显微组织。由图 4 可以看出,不同预变形量的 ZCuSn10 铜合金通过重熔保温均能得到固液两相共存的半固态组织,其中白色部分为 α -Cu 固相颗粒,黑色部分为 $(\alpha+\delta)$ 共析体,其在高温时为液相。经计算,预变形量为 13.8% 试样的液相率为 20.09%、平均晶粒直径为 90.20 μm 、圆整度为 2.65。预变形量为 20.81% 试样的液相率为 27.53%、平均晶粒直径为 71.91 μm 、圆整度为 1.67。随着预变形量的增加, ZCuSn10 铜合金半固态组织晶粒变小且更加圆整,液相也随之增加。这是因为预变形量越大,对 ZCuSn10 铜合金树枝晶组织的破碎程度也大,同时使试样中储备的形变能明显增加,在重熔保温时更容易得到小且圆整的固相晶粒,生成的液相也更多。

2.3 半固态 ZCuSn10 铜合金等温压缩变形组织

图 5(a)所示为 ZCuSn10 铜合金半固态压缩时的固液相流动示意图。图 5(a)中 I 区为变形的致密区,该区由于变形抗力较大,属于难变形区;图 5(a)中 II 区为处于试样中心处的大变形区(固液相混合区),该变形区随着压缩的进行,液相不断被挤向边缘,该区的致密化发生在 I 区之后;图 5(a)中 III 区为自由变形区(液相区),由于 II 区液相被挤入该区域,该区域液相不断增多,流变应力主要用来克服液相的流动和少量固相的滑动和转动。图 5(b)所示为预变形量为 13.8% 的半固态 ZCuSn10 铜合金经等温温度 900 °C、应变速率 1 s^{-1} 、应变量 20% 压缩变形后试样截面的宏观形貌。由图 5(b)可知,与固态金属压缩相同,压缩试样中部有明显的凸起,是压缩变形后的典型现象。能明显地观察到上述的 3 个不同的变形区,即靠近端部的难变形区、中心部位的大变形区及凸起部位的自由变形区。半固态温度区间压缩变形后各变形区变形组织呈现出较大的差异,且各个变形区的变形方式也不尽相同。半固态合金在半固态温度区间变形时,随着变形量的不断增大,心部液相向试样边缘流动,导致试样中各区域固液相分布不均。其中, I 区、II 区较为致密; III 区有裂纹,主要是较多的液相流向该区域,这些液相在水淬后形成了裂纹,使组织较为疏松。

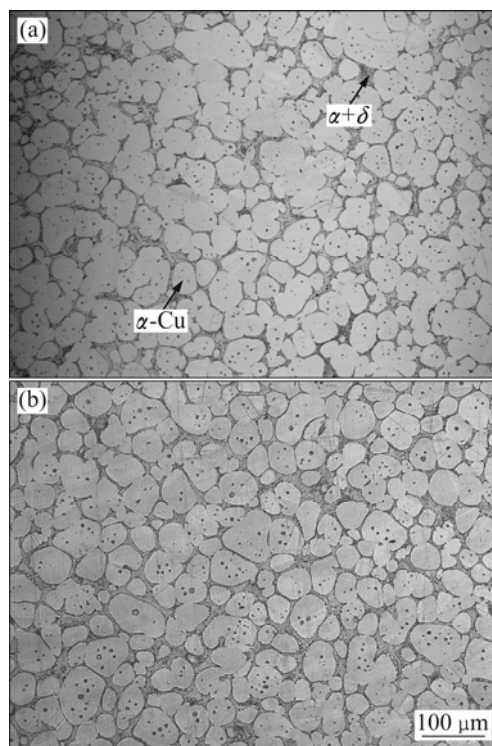


图 4 不同预变形程度的 ZCuSn10 铜合金在 910 °C 重熔保温 20 min 水淬后的半固态组织

Fig. 4 Microstructures of semi-solid ZCuSn10 copper alloy remelted at 910 °C for 20 min with different pre-deformations:

(a) 13.8%; (b) 20.8%

液相均匀分布于固相晶粒边界处, 使得固相晶粒间几

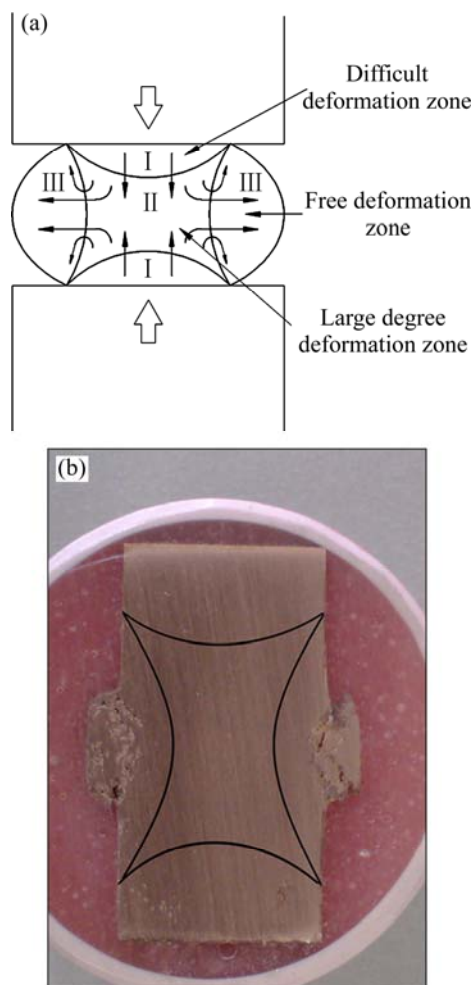


图 5 ZCuSn10 铜合金压缩时固液相流动示意图和压缩后的形貌

Fig. 5 Schematic diagram(a) of solid-liquid phase flow of ZCuSn10 copper alloy in compression process and morphology(b) of semi-solid ZCuSn10 copper alloy after compression process

图 6 所示为图 5(b)中 ZCuSn10 铜合金半固态试样 I、II、III 区的金相显微组织。经计算, I、II、III 区的液相率分别为 15.23%、5.31%、20.12%。随着压缩的进行, 难变形区(I 区)的液相率稍有减少, 大变形区(II 区)液相率减少较多, 自由变形区(III 区)液相率相对大变形区又有所增加。由图 6 可以看出, 难变形区(I 区)的组织基本上保持为原始半固态组织, 即液相包裹的近球形固相颗粒, 液相均匀地分布在固相颗粒之间, 没有明显的偏析现象, 说明在压缩变形过程中, 以液-固相颗粒混合流动为主, 即固-液两相协同流动; 而在大变形区(II 区)可以观察到固-液两相分离现象严重, 这是由于半固态金属中固液相混合共存,

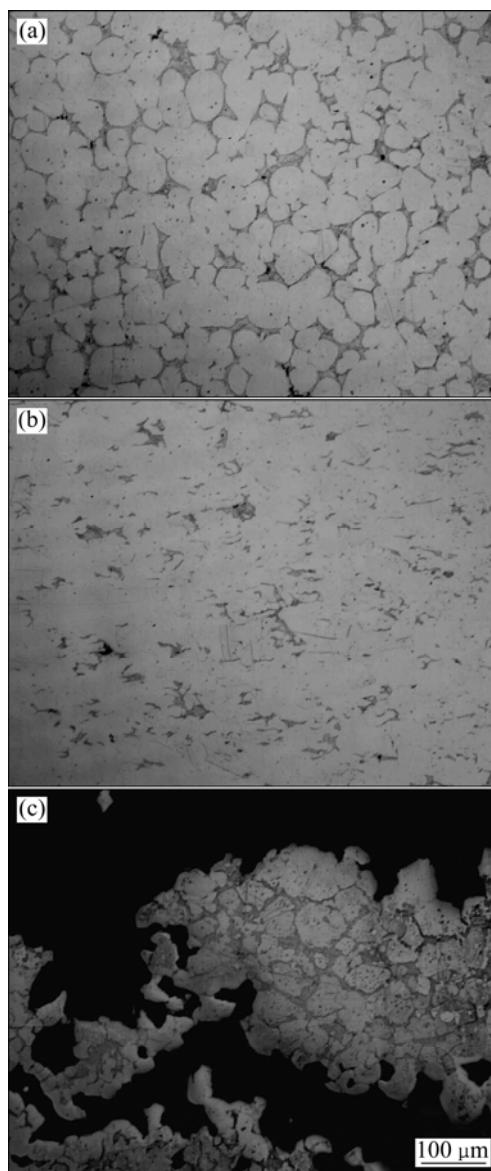


图 6 900 °C 预变形为 13.8% 的半固态 ZCuSn10 铜合金等温压缩变形显微组织

Fig. 6 Microstructures of semi-solid ZCuSn10 copper alloy with 13.8% pre-deformation at 900 °C: (a) Difficult deformation zone (Zone I); (b) Large deformation zone (Zone II); (c) Free deformation zone (Zone III)

乎无结合力。当施加外力时液相成分和固相成分存在分别流动的情况, 且一般来说液相成分有先行流动的倾向, 造成液相偏析, 后流动的固相晶粒之间相互接触, 发生严重塑性变形, 相互粘连在一起, 且晶界出现熔融现象, 特别是试样中心部位, 晶界几乎消失。说明在压缩开始时是以液相流动为主的变形, 随着压缩的进行, 液相被挤出, 固相晶粒接触之后相互挤压,

以晶粒塑性变形为主,此时,固相晶粒之间存在一定程度的晶粒间滑移转动。由于大变形区的液相流入自由变形区,发生液相的宏观转移,所以越靠近自由变形区,液相越多,且自由变形区(III区)的固相晶粒呈现球化现象,出现了大量的孔洞,这是由于液相流动会造成局部的固液分离,当周围的液相及固相未能及时补充,就会留下孔洞,在外力作用下,孔洞处产生应力集中形成裂纹。因此,自由变形区的变形方式为液相流动与液-固相颗粒混合流动。因此,在压缩过程中,试样不同位置的变形方式不同。

3 结论

1) 当其他条件相同时,随着预变形量和变形温度的增加,流变应力降低,应力-应变曲线呈现“下移”现象。

2) 在半固态 ZCuSn10 铜合金等温压缩时,变形温度对峰值应力影响较大,对稳态应力影响较小。

3) 与固态金属压缩变形相同,半固态 ZCuSn10 铜合金在半固态温度区间压缩变形时,存在 3 个典型压缩变形区域,即难变形区(I区)、大变形区(II区)、自由变形区(III区),I、II、III区的液相率分别为 15.23%、5.31%、20.12%,各个变形区之间发生了液相流动,小部分难变形区内的液相流到大变形区,大部分大变形区内的液相流到自由变形区。

REFERENCES

- [1] SPENCER D B, MEHRABIAN R, FLEMINGS M C. Rheological behavior of Sn-15 Pct Pb in the crystallization range[J]. Metallurgical Transactions, 1972, 3(7): 1925-1932.
- [2] 余小鲁, 李付国, 李淼泉. 半固态材料触变成形通用本构方程及优化[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 72-76.
YU Xiao-lu, LI Fu-guo, LI Miao-quan. Modeling and optimization of general constitutive equation of semi-solid thixo-forming[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(10): 72-76.
- [3] 孙国强. 半固态加工技术及其应用[J]. 稀有金属, 2003, 27(3): 382-384.
SUN Guo-qiang. Technology and application of semi-solid processing[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(3): 382-384.
- [4] 罗守靖, 姜巨福, 杜之明. 半固态金属成形研究的新进展、工业应用及其思考[J]. 机械工程学报, 2003, 39(11): 52-60.
LUO Shou-jing, JIANG Ju-fu, DU Zhi-ming. New research development, industrial application and some thinking of semi-solid metal forming[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(11): 52-60.
- [5] 罗守靖, 田文彤, 谢水生, 毛卫民. 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 Shui-sheng, MAO Wei-min. Technology and applications of semi-solid forming[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(6): 765-773.
- [6] CANYOOK R, WANNASIN J, WISUTHMETHANGKUL S, FLEMINGS M C. Characterization of the microstructure evolution of a semi-solid metal slurry during the early stages[J]. Acta Materialia, 2012, 60(8): 3501-3510.
- [7] 夏明许, 郑红星, 袁森, 李建国. 大挤压形变 AZ91D 镁合金半固态等温组织演变[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(3): 287-290.
XIA Ming-xu, ZHENG Hong-xing, YUAN Sen, LI Jian-guo. Microstructural evolution of highly extruded AZ91D magnesium alloys[J]. Materials Science and Technology, 2005, 13(3): 287-290.
- [8] CAO Li-jie, MA Guo-rui, TANG Chun-chong. Effects of isothermal process parameters on semi-solid microstructure of Mg-8%Al-1%Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2364-2369.
- [9] KIRKWOOD D H. Semi-solid metal processing[J]. International Materials Reviews, 1994, 39(5): 173-189.
- [10] YOUNG K P, KYONKA C P, COURTOIS J A. Fine grained metal composition: US, 4415374A[P]. 1983-11-15.
- [11] 袁晓光, 张韶华, 刘波, 黄宏军. Al-Fe 基合金的半固态压缩变形特性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 85-90.
YUAN Xiao-guang, ZHANG Shao-hua, LIU Bo, HUANG Hong-jun. Compression deformation behavior of Al-Fe alloy in semi-solid state[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 85-90.
- [12] 潘冶, 曹洪波, 孙国雄. 半固态铝硅合金的压缩变形行为与组织变化[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(4): 552-557.
PAN Ye, CAO Hong-bo, SUN Guo-xiong. Compressive deformation behavior and microstructure of semi-solid Al-Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(4): 552-557.
- [13] 刘允中, 李志龙, 顾才鑫. 7050 铝合金半固态压缩变形行为及组织演变[J]. 金属学报, 2013, 49(12): 1597-1603.
LIU Yun-zhong, LI Zhi-long, GU Cai-xin. Deformation behavior and microstructure evolution of 7050 aluminum alloy during semi-solid state compression process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(12): 1597-1603.
- [14] 李志龙, 刘允中, 游江. 半固态 7050 铝合金材料的触变力学模型[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(2): 371-379.
LI Zhi-long, LIU Yun-zhong, YOU Jiang. Constitutive model for thixo-forming of semi-solid 7050 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2): 371-379.

- [15] 陈少东, 于沪平. 半固态 ZL101 合金触变成形的本构关系[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(3): 82–85.
CHEN Shao-dong, YU Hu-ping. Constitutive relationship of semi-solid ZL101 alloy in thixo-forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(3): 82–85.
- [16] BENKE S, DZIALLACH S, LASCHET G, PRAHL U, BLECK W. Modeling of the uniaxial tensile and compression behavior of semi-solid A356 alloys[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(3): 633–637.
- [17] MACIOL P, ZALECKI W, KUZIAK R. Results of experimental investigations of tool steel during forming in semi-solid state[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(S1): 759–762.
- [18] 耿浩然, 王守仁, 王 艳. 铸造锌、铜合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
GENG Hao-ran, WANG Shou-ren, WANG Yan. Cast zinc, copper alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [19] 王 佳, 肖 寒, 吴龙彪, 卢德宏, 周荣锋, 周 荣. 轧制-重熔 SIMA 法制备 ZCuSn10 合金半固态坯料[J]. 金属学报, 2014, 50(5): 567–574.
WANG Jia, XIAO Han, WU Long-biao, LU De-hong, ZHOU Rong-feng, ZHOU Rong. Study of rolling-remelting SIMA process for preparing the semi-solid billet of ZCuSn10 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(5): 567–574.
- [20] 吴龙彪, 肖 寒, 王 佳, 卢德宏, 周 荣. 重熔工艺对应变诱导熔化激活法制备 ZCuSn10 铜合金半固态组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(12): 3302–3307.
WU Long-biao, XIAO Han, WANG Jia, LU De-hong, ZHOU Rong. Effect of remelting process on microstructure of semi-solid ZCuSn10 copper alloy fabricated by strain induced melt activated method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(12): 3302–3307.
- [21] GB/T73142005. 金属材料室温压缩试验方法[S].
GB/T73142005. Metallic materials-compression testing at ambient temperature[S].
- [22] 王 磊. 材料的力学性能[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2005.
WANG Lei. The mechanical properties of materials[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2005.

(编辑 王 超)