文章编号: 1004-0609(2008)05-0777-06

含 Sc 超高强 Al-Zn-Cu-Mg-Sc-Zr 合金的热压缩变形流变应力

李文斌^{1,2},潘清林¹,梁文杰¹,何运斌¹,刘俊生¹,李运春¹

(1. 中南大学 材料科学与工程学院,长沙 410083;2. 湖南城市学院 土木工程学院,益阳 413000)

摘 要: 采用 Gleeble1500 热模拟机在应变速率为 0.001~10 /s、温度为 380~470 ℃、真应变为 0~0.7 的条件下, 研究了实验合金的流变应力行为。结果表明: 该合金热压缩变形时存在较明显的稳态流变特征, 当 $\dot{\epsilon}$ <1 /s 时, 流变应力开始随应变增加而增加, 达到峰值后趋于平稳, 呈动态回复特征; 当 $\dot{\epsilon}$ ≥1 /s 时, 流变应力均出现了明显的峰值应力, 为连续动态再结晶特征。带 Zener-Hollomon 参数的双曲正弦函数可描述合金高温变形时的流变应力, σ 解析表达式中 *A*、 α 和 *n* 值分别为 5.952×10⁸/s、0.021 MPa⁻¹和 5.397; 热变形激活能 *Q* 为 157.9 kJ/mol。 关键词: Al-Zn-Cu-Mg-Sc-Zr 合金; 热压缩变形; 流变应力; Zener-Hollomon 参数; 热变形激活能 中图分类号: TG 146.21 文献标识码: A

Flow stress of super-high strength Al-Zn-Cu-Mg-Sc-Zr alloy containing Sc under hot compression deformation

LI Wen-bin^{1, 2}, PAN Qing-lin¹, LIANG Wen-jie¹, HE Yun-bin¹, LIU Jun-sheng¹, LI Yun-chun¹

School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
 Department of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: The flow stress of the studied alloy over the strain rate of 0.001-10 /s, the temperature of 380-470 °C and true strains of 0-0.7 was studied on Gleeble–1500 hot simulator. The experimental results show that the steady-state flow characteristics exist during hot compression deformation in the range of experiments. At lower strain rates($\dot{\epsilon} < 1$ /s), the flow stress increases with the increase of strain, then keeps steady and shows dynamic recovery. At high strain rates($\dot{\epsilon} > 1$ /s), the flow stress decreases after the flow stress reaches obvious peak value with the increase of strain and shows dynamic recrystallization. The flow stress of the alloy during high temperature deformation can be represented by a Zener-Hollomon parameter in the hyperbolic Arrhenius-type equation. Structure factor *A*, stress level parameter α and stress index *n* in the analytical expressions of σ are turned to be 5.952×10^8 /s, 0.021 MPa⁻¹ and 5.397. The average hot deformation activation energy of the alloy is 157.9 kJ/mol.

Key words: Al-Zn-Cu-Mg-Sc-Zr alloy; hot compression deformation; flow stress; Zener-Hollomon parameter; hot deformation activation energy

含 Sc Al-Zn-Cu-Mg-Sc-Zr 合金是一种新型超高强 铝合金, 被广泛用作航空和重要轻型结构材料, 其热 变形的工艺参数与高温变形时流变应力的变化规律有 关, 国内外对铝合金高温变形时流变应力的研究不 少^[1-5],加 Sc Al-Zn-Cu-Mg-Sc-Zr 合金的高温流变应力 行为的研究还未见报道。金属热变形流变应力是材料 在高温下的基本性能之一,不仅受变形温度、变形程 度、应变速率和合金化学成分的影响,也与变形体内

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA03Z523)

收稿日期: 2007-08-29; 修订日期: 2007-12-17

通讯作者:潘清林,教授,博士;电话: 0731-8830933; E-mail: pql@mail.csu.edu.cn

部组织结构的演变有关。在热塑性工艺学中,金属流 变应力是个基本参数,其数值的精确程度是提高理论 计算精度的关键。近些年来,这方面的研究渐趋活 跃^[6-8]。本文作者在 Gleeble1500 热模拟机上,采用圆 柱体轴对称高温单道次压缩实验,对一种含 Sc Al-Zn-Cu-Mg-Sc-Zr 超高强铝合金流变应力进行了系 统研究,回归分析出高温变形时流变应力的变化规律, 获得了有关的材料常数值,为制定合理的热加工工艺, 有效控制产品的组织性能,提高产品质量提供了实验 依据。

1 实验

实验合金成分为 Al-8.1Zn-2.3Cu-2.05Mg-0.2Sc-0.12Zr(质量分数,%),合金采用坩埚炉按质量要求熔 铸。铸锭在箱式电阻炉内进行均匀化处理:以 40 ℃/min升温至460℃保温24h,炉冷至200℃ 出炉空冷。机械加工出尺寸为*d*10 mm×15 mm,两端 留浅凹槽的压缩试样。在热压缩实验在 Gleeble1500 热模拟机上进行。热压缩实验前,在圆柱试样两端的 浅槽内填充 75%石墨+20%机油+5%硝酸三甲苯脂,以 减小摩擦的影响。实验温度范围为 380~470 ℃,应变 速率范围为 0.001~10/s,总压缩真应变量为 0.7。利用 试样自身电阻进行加热,加热速度为 1 ℃/s。用连接 到试样表面上的热电偶测量试样的温度,到实验温度 后保温 5 min 再开始热压缩变形。

2 结果与分析

2.1 热压缩变形的真应力—真应变曲线

含 Sc Al-Zn-Cu-Mg-Sc-Zr 超高强铝合金热压缩变 形时的实测真应力—真应变曲线如图 1 所示。由图 1 可见,在研究条件下,合金热压缩变形时均存在较明 显的稳态流变特征:即在一定的温度和应变速率下, 当真应变 ε 超过一定值后,真应力 σ 不随真应变的增 大而发生明显变化;当应变速率一定时,真应力随温



图1 热压缩变形真应力一真应变曲线

Fig.1 True stress—true strain curves during hot compression deformation: (a) 380 °C; (b) 410 °C; (c) 440 °C; (d) 470 °C

第18卷第5期

度升高而降低;当变形温度一定时,随着应变速率的 增加,真应力水平升高;且随着应变速率的增大和温 度的降低,进入稳态流变阶段所对应的真应力值逐渐 增大。在 *ἐ* ≥1 /s 的高应变速率下,各变形温度的流 变应力均出现了明显的峰值应力,呈连续动态再结晶 特征。不同温度和不同应变速率条件下的峰值应力如 表1所列。

表1 不同变形条件下的峰值流变应力

 Table 1
 Peak flow stress under different conditions of hot compression (MPa)

$\dot{\varepsilon}$ /s ⁻¹	Peak flow stress			
	380 °C	410 °C	440 °C	470 ℃
0.001	57.18	49.35	39.76	32.75
0.010	73.39	65.33	52.70	42.99
0.100	98.17	79.23	73.05	64.97
1.000	105.19	97.72	88.28	81.81
10.000	130.12	120.38	117.40	105.81

2.2 热压缩变形流变应力方程

对金属高温变形时流变应力的研究主要是希望建 立材料稳态流变时的本构方程。对应变速率 έ,变形 温度 *T* 与流变应力 σ 间的模拟数学表达式的研究结果 主要有以下 3 种^[9-13]:

1) 低应力水平(ασ < 0.8)时:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \tag{1}$$

2) 高应力水平(*α*σ >1.2)时:

 $\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma)$

3) 所有应力下:

$$\dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT)$$
(3)

其中 A_1 、 A_2 、A、 n_1 、n、 α 和 β 均为与温度无关的 常数; R 为摩尔气体常数; T 为绝对温度; Q 为热变 形激活能; α 、 β 及n之间满足 $\alpha = \beta/n$; $\dot{\varepsilon}$ 为应变 速率; σ 可表示峰值应力或稳态流变应力,即稳态流 变阶段某指定应变量对应的流变应力。

大量的研究结果表明^[9],式(3)能较好地描述常规 热变形加工过程中的流变应力变化规律。这一关系式 是由 SELLARS 和 TEGART 提出的,包含材料热变形 激活能 *Q* 和温度 *T* 的双曲正弦形式的 Arrhenius 关系, 用于描述热激活稳态变形行为。该式还广泛用于估算 各种金属及合金的热变形激活能 *Q*^[13]。在低应力和高 应力条件下,式(3)分别简化为^[9]

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^n \exp(-Q / RT) \tag{4}$$

$$\dot{\varepsilon} = A[\exp(\beta\sigma)]\exp(-Q/RT)$$
(5)

ZENER 和 HOLLOMON 提出并验证了应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 和温度 *T* 的关系可用一项参数 *Z* 表示,称为 *Z* 参数 或 Zener-Hollomon 参数。其定义为^[13]

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) \tag{6}$$

式(3)代入式(6)得

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{7}$$

式中 A为结构因子, s^{-1} ; α 为应力水平参数, MP a^{-1} ; n为应力指数。为了研究材料在高温变形时的力学行为, 先应了解与应变速率和温度有关的流变应力 σ 的变化规律。从式(7)可推出:

$$\sinh(\alpha\sigma) = (Z/A)^{1/n} \tag{8}$$

根据双曲正弦函数的反函数公式,有:

$$\sinh^{-1}(\alpha\sigma) = \ln[\alpha\sigma + (\alpha^2\sigma^2 + 1)^{1/2}]$$
(9)

由此通过Z参数定义式可将流变应力 σ 表达成应 变速率和温度的函数,从而可表达成 Zener-Hollomon 参数Z值的函数:

由式(8)和(9)有:

(2)

$$\sinh^{-1}(Z/A)^{1/n} = \sinh^{-1}[\sinh(\alpha\sigma)] = \alpha\sigma$$

$$\sigma = (1/\alpha) \ln \left\{ (Z/A)^{1/n} + [(Z/A)^{2/n} + 1]^{1/2} \right\}$$
(10)

由式(7)和(9)可知,只要知道 *A*、*Q*、α和 *n*等材 料参数,便可求得材料在任意变形条件下的流变应力 值。式(3)和(10)未考虑应变 *ε* 对流变应力的影响,但 由图 1 可知,合金高温塑性变形时,在稳态变形阶段 流变应力对应变是不敏感的,因而可忽略应变大小对 流变应力的影响。下面先计算 *A*、*Q*、α和 *n*等材料 参数值。

对式(1)和(2)两边分别求对数得:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma \tag{11}$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma \tag{12}$$

依据式(11)和(12),取流变应力为峰值应力,分别 作 ln *ἐ*—ln σ、ln *ἑ* — σ 曲线,用最小二乘法线性回 归(见图 2)。*n*₁可取图 2(a)中 380~470 ℃ 4 条直线斜 率的平均值,得*n*₁=9.578 2; *β*可取图 2(b)中 4 条直 线斜率的平均值,得*β*=0.126 7, *α* = β/*n*₁=0.013 2。 对式(3)两侧取自然对数,并假定热变形激活能与

779



国王 应义还半马峰值应力之间的八尔

Fig.2 Relationships between strain rate and peak stress

温度无关,可以得到: $\ln \dot{\varepsilon} = \ln A - \frac{Q}{RT} + n \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$

可写成:

 $\ln \dot{\varepsilon} = A' + n \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ (A' = ln A - $\frac{Q}{RT}$, 当 T - 定时为常数) (13)

将不同变形温度下合金变形时的应变速率和峰值 流变应力分别代入式(13),绘制 ln έ~ln[sinh(ασ)]关 系曲线,再用最小二乘法线性回归,可看出应变速率 的对数和流变应力双曲正弦的对数较好地满足线性关 系。图 3 所示为直线的斜率即为应力指数 n。由 4 条 直线斜率的平均值求得 n=7.164 3。这种双曲正弦函数 关系可用于描述合金所有应力水平下流变应力 σ 和 应变速率 έ 之间的关系,为控制应变速率和热加工的 应力水平及工艺参数提供了实验依据。

当应变速率一定时,假定一定温度范围内Q值不变,由式(7)的 $\dot{s} \exp(Q/RT) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n$,两边取对



图 3 峰值应力的 $\ln \dot{\varepsilon} 与 \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 的关系

Fig.3 Relationships between $\ln \dot{\varepsilon}$ of peak stress and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

数可得:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = A_3 + \frac{Q}{RnT}$$
(A3 为公式导出常数) (14)

将不同变形条件下峰值应力的 ln[sinh(ασ)] 值代 入上式,绘制相应的 ln[sinh(ασ)]—T⁻¹曲线,进行线 性回归,如图 4 所示,可求得斜率 Q/Rn。图中 5 条直 线斜率的平均值可计算出 Q/Rn,从而求得合金的平均 热变形激活能 Q。图 4 所示为在相同应变速率条件下, 流变应力的双曲正弦对数项和温度的倒数间满足线性 关系。这种线性关系说明合金高温塑性变形稳态流变 应力和变形温度之间满足 Arrhenius 关系,可用 Z 参 数来描述合金高温塑性变形的流变应力。







781

考虑到 Q 不随 T 变化,对式(13)两边取微分得:

$$Q = Rn \left[\frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)} \right]_{\dot{\varepsilon}}$$
(15)

上式括号中的项为应变速率一定时 ln[sinh($\alpha\sigma$)]— T^{-1} 数据线性回归的斜率。应力指数 *n* 为 7.164 3,图 4 中直线斜率的平均值(即 *Q/Rn*)为 2.721。代入式(14)中,即可求出实验合金平均热变形 激活能 *Q* 值为 162.1 kJ/mol。

对式(6)两边求对数得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$$
(16)

将 Q 值和变形条件逐个代入式(7)求出 Z 值, 再绘 制 $\ln Z$ — $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 关系曲线,进行线性回归,如图 5 所示。由式(15)式和图 5 可知,该回归直线的斜率即 为应力指数 n 值, 而其截距为 ln A, 于是可求出结构 因子 A=4.712 1×10¹⁰/s、应力指数 n=7.047 2。将此 n 值代入 $\alpha = \beta/n$,便可求出新的 α 值,再依前面同样步 骤可求出第二计算循环的 A、n、 α 和 Q 值。如此迭 代计算,求得的材料常数 A、n、 α 和 Q 值更为真实 和可靠[14-16]。根据以上方法,经3个计算循环求得应 力水平因子 $\alpha = 0.021$ MPa⁻¹,平均热变形激活能 Q=157.9 kJ/mol,应力指数 n=5.397,结构因子 $A=5.952\times10^8$ /s。第三计算循环 ln Z 与 ln[sinh($\alpha\sigma$)]的关 系如图 6 所示,两者在实验应变速率和变形温度范围 内的线性关系吻合得相当好,这进一步说明了实验合 金高温塑性变形时的流变应力 σ 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和温度 T之间的关系可用式(3)加以描述。

将 *A*、*n*、*α* 和 *Q* 等值代入式(3),得合金热压缩 变形时的流变应力方程为:





Fig.5 Relationship between *Z* parameter and flow stress during first numeration circle



图 6 第三计算循环 Z 参数与流变应力的关系

Fig.6 Relationship between *Z* parameter and flow stress during third numeration circle

$$\dot{\varepsilon} = 5.952 \times 10^8 [\sinh(0.021\sigma)]^{1/5.397} \exp(-157\,900/RT)$$

其 Z 参数可表述为
 $Z = \dot{\varepsilon} \exp(157\,900/RT)$
用 Z 参数表述的流变应力方程为
 $\sigma = 47.62 \ln\{(Z/5.952 \times 10^8)^{1/5.397} + [(Z/5.952 \times 10^8)^{2/5.397} + 1]^{1/2}\}$

该方程适用于应变速率为 0.001~10 /s、温度为 380~470 ℃、真应变为 0~0.7 范围内实验合金的流变 应力行为,可为控制热加工时应变速率、应力水平及 工艺参数提供实验依据。

3 结论

 1) 热压缩变形时,实验合金流变应力在低应变速率(*ἐ* <1/s)条件下,初始阶段随应变增加而增加,达 到峰值后趋于平稳,呈动态回复特征;在高应变速率 (*ἐ*≥1/s)条件下,每个变形温度的流变应力达到峰值 后均逐渐下降,表现出动态再结晶特征。

2) 采用 Zener-Hollomon 参数的双曲正弦函数形 式来描述实验合金高温压缩变形时的流变应力行为, 获得的流变应力 σ 解析表达式中A、 α 和n值分别为 5.952×10⁸/s、0.021 MPa⁻¹和 5.397, 合金的平均热变 形激活能 Q 为 157.9 kJ/mol。

REFERENCES

[2] IHARA K, MIURA Y. Dynamic recrystallization in Al-Mg-Sc alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2004, 387–389: 647–650.

Techonology, 2001, 118(1/3): 356-361.

- [3] ZHANG H, LI L X, YUAN D, PENG D S. Hot deformation behavior of the new Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy during compression at elevated temperatures[J]. Materials Characterization, 2007, 58(2): 168–173.
- [4] MALAS J C, VENUGOPAL S, SESHACHARYULU T. Effect of microstructural complexity on the hot deformation behavior of aluminum alloy 2024[J]. Mater Sci Eng A, 368(1/2): 41–47.
- [5] KIM J H, KIM J H, YEOM J T, LEE D G. Effect of scandium content on the hot extrusion of Al-Zn-Mg-(Sc) alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188: 635–639.
- SHEPPARD T, JACKSON A. Constitutive equations for use in prediction of flow stress during extrusion of aluminum alloys[J].
 Mater Sci Technol, 1997, 13(3): 203–209.
- [7] SHI H, MCLAREN A J, SELLARS C M, SHAHANI R. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminum alloys[J]. Mater Sci Technol, 1997, 13(3): 210–216.
- [8] 韩冬峰,郑子樵,蒋 呐,李劲峰.高强可焊 2195 铝-锂合金 热压缩变形的流变应力[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(12): 2090-2095.

HAN Dong-feng, ZHENG Zi-qiao, JIAN Na, LI Jing-feng. Flow stress of high-strength weldable 2195 aluminum-lithium alloy during hot compression deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(12): 2090–2095.

[9] POIRIER J P. 晶体的高温塑性变形[M]. 关得林, 译. 大连: 大连理工大学出版社, 1989.

POIRIER J P. High temperature plastic deformation of crystals[M]. GUAN De-lin, transl. Dalian: Dalian University of Science and Technology Press, 1989.

- [10] 沈 键. 2091 铝合金高温塑性变形的研究[D]. 长沙: 中南工 业大学, 1996.
 SHEN Jian. Study of hot compression deformation of 2091 aluminum alloy[D]. Changsha: Central South University, 1996.
- [11] JONAS J J, SELLARS C M, TEGART M W J. Strength and structure under hot-working conditions[J]. Int Metall Reviews, 1969, 14: 1–24.
- [12] 吴文祥,孙得勤,曹春艳,王战锋,张 辉. 5083 铝合金热压 缩变形流变应力行为[J].中国有色金属学报,2007,17(10): 1667-1671.
 WU Wen-xiang, SUN De-qing, CAO Chun-yan, WANG Zhan-feng, ZHANG Hui. Flow stress behavior of aluminum alloy under hot compression deformation[J]. The Chinese
- [13] SHEPPARD T, PARSON N C, ZAIDI M A. Dynamic recrystallization in Al-7Mg[J]. Met Sci, 1983, 17(10): 481–490.

Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(10): 1667-1671.

- [14] ZENER C, HOLLOMON J H. Effect of strain-rate upon the plastic flow of steel[J]. J Appl Phys, 1944, 15(1): 22–32.
- [15] 林启全,张 辉,彭大署,林高用,王振球. 5182 铝合金热压 缩变形流变应力[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2002, 24(3): 84-88.
 LIN Qi-quan, ZhANG Hui, PENG Da-shu, LIN Gao-yong,

WANG Zhen-qiu. Flow stress behavior of 5182 aluminum alloy under hot compression deformation[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2002, 24(3): 84–88.

[16] 林高用,张 辉,郭武超,彭大暑. 7075 铝合金热压缩变形流变应力[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(3): 412-415
LIN Gao-yong, ZHANG Hui, GUO Wu-chao, PENG Da-shu. Flow stress of 7075 aluminum alloy during hot compression deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(3): 412-415.

(编辑 李艳红)