

热处理参数对 5052 铝合金板材力学性能的影响

贾向东, 赵 阳, 徐思齐

(南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

摘 要: 以 5052-H32 铝合金冷轧板为研究对象, 借助于单向拉伸试验、硬度测试对不同热处理参数条件下的力学性能进行研究, 分析不同热处理工艺参数对 5052 铝合金力学性能参数的影响机制, 结果表明: 对 5052-H32 铝合金进行再次热处理时, 可以显著地降低其变形抗力, 提高塑性变形能力; 在热处理过程中的加热温度起主要作用, 在合理的热处理温度和保温时间条件下, 冷却方式对 5052 铝合金的强度、硬度的影响不大。在此基础上, 借助 Johnson-Cook 模型建立了再次热处理后 5052 铝合金板材的本构模型。

关键词: 铝合金; 热处理; 力学性能; 流变应力; 本构模型

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)03-0963-10

铝合金具有密度低、质量轻、耐腐蚀、比强度高优点, 是结构轻量化设计的首选材料^[1], 但是最终成形的铝合金的力学性能与铝合金的最终热处理状态和变形条件的影响很大。因此, 探究不同热处理条件和变形条件下的铝合金的基本力学性能是研究的重点^[2,3]。Eivani 等^[4]通过热压缩试验对 7020 铝合金在高温下的变形行为, 获得了不同应变速率和变形温度条件下 7020 铝合金的流变应力曲线和本构模型。Zuiko 等^[5]对 2519 铝合金在时效处理时的析出行为和力学性能进行研究, 获得了不同时效温度和时效时间对 2519 铝合金强度、延伸率的影响。孙雪等^[6]研究了 Al-Mg-Sc-Zr 合金的超塑性性能。结果表明, 在 Al-Mg-Sc-Zr 合金超塑性变形过程中发生了动态再结晶, 同时析出的第二相粒子可以有效抑制晶粒粗大的长大。Zhu 等^[7]对热压缩条件下 2050 铝锂合金的热变形行为进行研究, 分析了摩擦条件和温差对流动应力影响, 获得了 2050 铝锂合金的在不同温度和应变速率条件下的流动应力。Zhang 等^[8]通过等温热压缩试验研究了 Al-Zn-Mg-Cu 合金在不同温度和应变速率下的高温流变应力特性, 获得了不同变形条件下 Al-Zn-Mg-Cu 合金的硬化特性。Liu 等^[9]通过透射电镜、硬度测试和拉伸试验等方法, 研究不同热处理工艺参数对 7075 铝合金板强度的影响, 研究结果表明: 时效温度在 100~140 °C 范围内, 7075 铝合金板的硬度呈现先增加后降低变化趋势。黄裕金等^[10]综合考虑形变热、变形温度和应变速率对 2E12 铝合金流变行为

的影响, 获得了不同变形温度和应变速率条件下 2E12 铝合金的流变特性。蔡一鸣等^[11]通过对 7039 铝合金在热压缩条件下的变形行为的研究发现: 变形温度和应变速率对 7039 铝合金流变应力的大小具有显著影响, 随变形温度的升高流变应力减小; 在相同的变形温度条件下随着应变速率的增加流变应力逐渐增大。

5 系铝合金属于 Al-Mg 合金, 具有良好的成形加工性能和抗腐蚀性能, 被广泛应用于航空、汽车和轨道交通领域^[12-15]。5052 铝合金是 5 系铝合金中研究较为广泛和工业应用较广的合金之一, 具有比强度高、焊接性能和加工性能优异等优点, 广泛应用于工业制造领域^[16,17]。随着制造业的快速发展, 对 5052 铝合金的性能提出了更高的要求。因此, 研究 5052 铝合金板材的流动应力对金属塑性变形工艺的制定具有重要意义。Wang 等^[18]和许晓静等^[19]借助金相显微结构分析和基本力学性能测试, 对不同轧制变形量及后续退火处理条件下 5052 铝合金的组织与性能进行研究, 获得了不同轧制条件和退火工艺条件下 5052 铝合金的抗拉强度、均匀延伸率、硬度等力学性能参数。魏小华^[20]研究了不同冷轧变形程度、退火温度和保温时间等因素对 5052 铝合金板材力学性能的影响, 确定了 5052 合金 H32 状态板材的生产工艺参数。林启权等^[21]对不同变形温度和变形速率条件下 5052 铝合金板材的流变应力进行研究, 并且基于 Zener-Hollomon 参数的 Arrhenius 双曲正弦关系建立了高温条件下 5052 铝合金的本构模型。从上述研究成果可以看出, 5052 铝合

收稿日期: 2020-03-10

基金项目: 江苏省高校自然科学基金面上项目(18KJB460020); 南京林业大学青年创新基金 (CX2018027); 南京林业大学高层次(高学历)人才启动基金 (GXL2018020)

作者简介: 贾向东, 男, 1987 年生, 博士, 讲师, 南京林业大学机械电子工程学院, 江苏 南京 210037, E-mail: jiaxd.good@163.com

金的力学性能指标主要受最终热处理状态的影响很大,为了制定合理的塑性成形工艺,必须明确不同热处理状态条件下 5052 铝合金的力学性能参数,在保证强度指标的前提下获得最大延伸率是保证塑性成形工艺的关键。

因此,本研究以 5052 铝合金为研究对象,借助于单向拉伸试验、硬度测试对不同热处理参数条件下的力学性能进行研究,分析不同热处理工艺参数对 5052 铝合金力学性能参数的影响机制,在此基础上构建经过再次热处理后 5052 铝合金板材的本构模型。

1 实 验

以西南铝生产的 5052-H32 商用铝合金冷轧板为研究对象,其原始质量分数如表 1 所示。采用线切割设备沿板材轧制方向切取拉深试样,试样尺寸如图 1a 所示。将试样置于图 1b 所示的箱式加热炉中按照表 2 所示的热处理工艺参数对 5052 铝合金试样进行再次热处理。借助维氏硬度测量仪(如图 1c)和电子万能材料试验机(如图 1d)分别获得不同热处理工艺参数条件下的维氏硬度和流变应力曲线,进而获得不同热处理工艺参数条件下 5052 铝合金的力学性能参数。

2 结果与分析

2.1 热处理温度对 5052 铝合金力学性能参数的影响

2.1.1 热处理温度对 5052 铝合金强度的影响

在相同的保温时间(1 h)和冷却条件(空冷)下,经过不同热处理加热温度条件下的 5052 铝合金板材的屈服强度和抗拉强度的变化曲线如图 2 所示。可知,不再经过二次热处理的 5052-H32 铝合金板材应变速率 0.001 s^{-1} 的屈服强度在 100 MPa 以上,抗拉强度在 180 MPa 以上,均要高于经过再次热处理后获得的

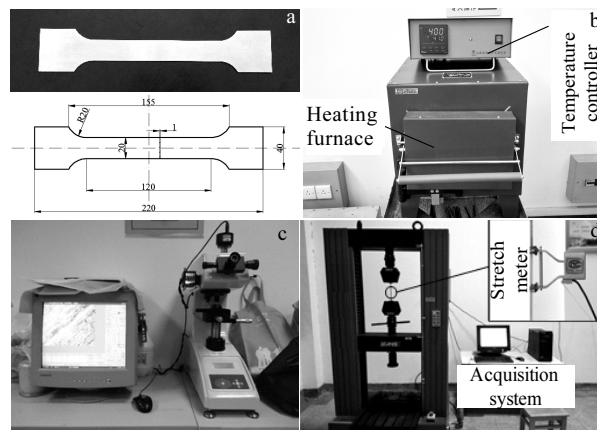


图 1 试验设备与拉伸试样

Fig.1 Test equipment and tensile specimen: (a) tensile specimen, (b) heating furnace, (c) Vickers hardness tester, and (d) material testing machine

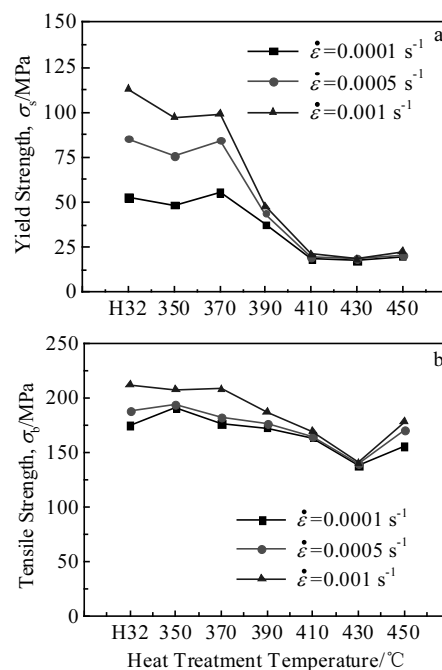


图 2 热处理温度对强度的影响

Fig.2 Influence of heat treatment temperature on strength: (a) yield strength and (b) tensile strength

表 1 5052-H32 板材化学成分

Table 1 Chemical composition of 5052-H32 (wt%)

Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Al
2.50	0.03	0.10	0.08	0.32	0.10	Bal.

表 2 5052 铝合金热处理工艺方案

Table 2 Heat treatment process of 5052 aluminum alloy

Process	Heat treatment temperature/°C	Holding time/h	Cooling mode
1	350, 370, 390, 410, 430, 450	1	Air
2	430	1, 2, 3, 4, 5	Air
3	430	2	Air, water, furnace

5052 铝合金的屈服强度和抗拉强度。对比图 2a 中屈服强度的变化曲线可以看出,在相同的应变速率条件下,随着热处理加热温度的升高,5052 铝合金的屈服强度逐渐降低,且均低于原始的 H32 状态下的屈服强度;在相同的热处理加热温度条件下,应变速率对屈服强度有一定的影响,但是规律性不强。对比图

2b 抗拉强度的变化曲线可以看出, 当热处理加热温度从 350 °C 增加到 370 °C, 抗拉强度有所增加; 当热处理加热温度高于 370 °C 时, 抗拉强度有减小趋势。与热处理加热温度对屈服强度的对比可以看出, 热处理时加热温度对屈服强度的影响大于对抗拉强度的影响。

2.1.2 热处理温度对 5052 铝合金塑性性能的影响

通过试验获得在相同的保温时间和冷却方式条件下, 不同热处理温度对 5052 铝合金板材的均匀延伸率的影响如图 3 所示。由图 3 可知, 不经过二次热处理的 5052-H32 态铝合金板材的均匀延伸率为 10%。在相同的保温时间和冷却方式条件下, 经过再次热处理后的 5052 铝合金的均匀延伸率明显增加, 热处理温度由 350 °C 升高到 450 °C 时, 5052 铝合金的均匀延伸率随热处理温度的升高呈现波动性增加。在热处理温度为 430 °C, 保温 1 h, 空冷条件下, 应变速率为 0.0005 s⁻¹ 时, 5052 板材的均匀延伸率达到最大值 26.44%。

为了进一步分析热处理温度对塑性的影响, 获得热处理温度对 5052 铝合金板材屈强比(σ_s/σ_b)的影响如图 4 所示。从图 4 的结果可以看出, 5052-H32 状态下屈强比较大, 因此在此状态下(H32)的 5052 铝合金抗变形能力较强, 容易在塑性变形过程中发生脆性断裂。随着热处理加热温度的升高, 经过再次热处理后的 5052 铝合金的屈强比明显减小, 这表明对 H32 状态 5052 的铝合金进行再次热处理可以显著提高其塑性性能, 这与图 3 所示的均匀延伸率的结果一致。

2.1.3 热处理温度对 5052 铝合金硬度的影响

为了进一步探究不同热处理温度对 5052 铝合金板材综合力学性能的影响, 采用维氏硬度测量仪获得了在相同保温时间和冷却方式条件下, 不同热处理温度对 5052 铝合金硬度影响的曲线如图 5 所示。由图 5

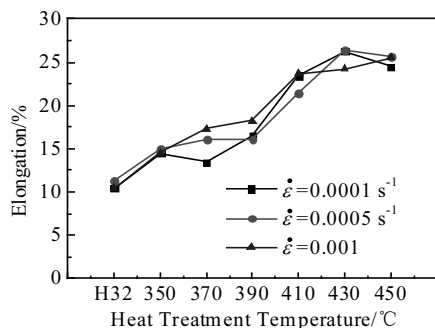


图3 热处理温度对均匀延伸率的影响

Fig.3 Influence of heat treatment temperature on uniform elongation

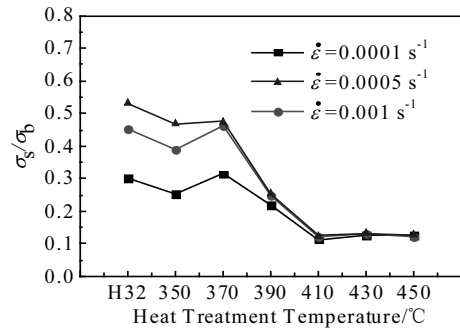


图4 热处理温度对屈强比的影响

Fig.4 Influence of heat treatment temperature on σ_s/σ_b

可知, 5052-H32 冷轧板的初始硬度(HV)为 1216 MPa。在相同的保温时间和冷却方式条件下, 当热处理温度由 350 °C 升高到 430 °C, 5052 铝合金的硬度(HV)值从 832 MPa 下降到 715 MPa。随着热处理温度的升高, 5052 铝合金的硬度逐渐降低, 但是当热处理温度继续超过 430 °C 后, 5052 铝合金板材的硬度随热处理温度的升高呈现增大趋势。当加热温度为 470 °C 时, 铝合金的硬度达到 786 MPa。通过上述研究可以看出, 5052 铝合金的硬度受热处理加热温度的影响很大, 随加热温度的升高合金的硬度呈现先降后升的变化趋势。但是, 经过再次热处理后获得的 5052 铝合金的硬度值均低于初始 5052 冷态铝合金板材的硬度。

通过上述研究发现, 在相同的保温时间和冷却方式条件下, 热处理时的加热温度对 5052 铝合金的影响很大, 对 5052-H32 态铝合金进行再次热处理可以显著的降低其变形抗力, 提高塑性变形能力。这是由于对 5052-H32 态冷轧板进行再次热处理时的加热温度均高于 5052 铝合金的再结晶温度(250 °C 左右^[18]), 5052

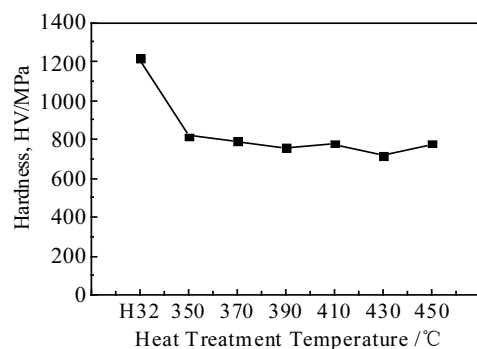


图5 热处理温度对硬度的影响

Fig.5 Influence of heat treatment temperature on hardness

铝合金将会发生再结晶。随着热处理加热温度的逐渐升高,再结晶的驱动力逐渐增大,逐渐消除由于轧制所带来的晶格的畸变,降低位错密度,同时析出二次相 Mg_2Si 、 Al_3Fe 发生变化^[18],5052 铝合金的屈服强度和硬度降低,均匀延伸率逐渐增大。

2.2 保温时间对 5052 铝合金力学性能参数的影响

2.2.1 保温时间对 5052 铝合金强度的影响

在热处理加热温度研究的基础上,对 5052 铝合金在温度 430 °C 下,经历不同保温时间后的力学性能参数进行研究。通过单向拉伸试验获得在热处理温度为 430 °C、空冷条件下,经过不同保温时间后获得的 5052 铝合金的屈服强度和抗拉强度如图 6 所示。由图 6 可以看出,当保温时间从 1 h 延长到 2 h 时,5052 铝合金的屈服强度和抗拉强度均出现减小的现象。当保温时间从 2 h 延长到 3 h 时,5052 铝合金的屈服强度和抗拉强度变化不明显。但继续延长保温时间至 4 h,可以看出随着保温时间增加,屈服强度逐渐增大,而抗拉强度变化不明显。当保温时间从 4 h 增加到 5 h 时,5052 铝合金的屈服强度和抗拉强度均趋于稳定。对比图 6a 和图 6b 可以看出,5052-H32 态铝合金冷轧板再次热处理时,延长保温时间主要影响 5052 铝合金板材的屈服强度,而对抗拉强度影响较小。

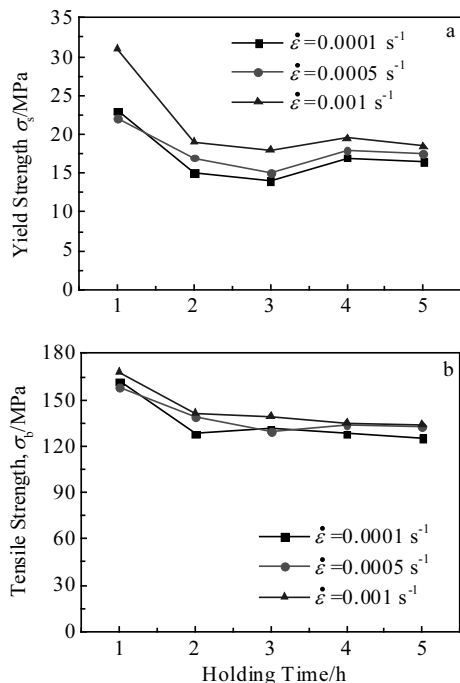


图 6 热处理保温时间对强度的影响

Fig.6 Influence of heat treatment holding time on yield strength(a) and tensile strength (b)

2.2.2 保温时间对 5052 铝合金塑性性能的影响

在强度指标研究结果的基础上,获得在相同的热处理加热温度和冷却方式条件(430 °C, 空冷)下,分别建立 5052 铝合金的均匀延伸率和屈强比随热处理保温时间的变化曲线如图 7 和图 8 所示。由图 7 可以看出,在相同的热处理加热温度和冷却方式条件下,保温时间对 5052 铝合金板材的均匀延伸率的影响较为显著。结合屈强比的变化曲线(如图 8 所示),当保温时间从 1 h 增加至 2 h 时,屈强比逐渐减小,5052 材料的抵抗变形抗力逐渐减小,塑性变形能力逐渐增大,进而使得 5052 铝合金的均匀延伸率明显增大。但是继续增加保温时间(2 h 增加至 5 h),随着保温时间的增加,屈强比呈现出波动增大,增加了 5052 变形的难度,因此当保温时间大于 2 h 后,随着保温时间的增加,均匀延伸率逐渐减小。

2.2.3 保温时间对 5052 铝合金硬度的影响

在相同热处理温度和冷却方式(430 °C, 空冷)条件下,获得 5052 铝合金的硬度随保温时间的变化曲线如图 9 所示。由图 9 可以看出,当保温时间由 1 h 变化到 2 h,5052 铝合金的硬度(HV)由 715 MPa 减小为 685

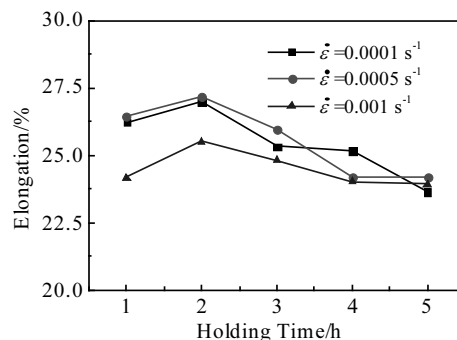


图 7 保温时间对均匀延伸率的影响

Fig.7 Influence of heat treatment holding time on uniform elongation

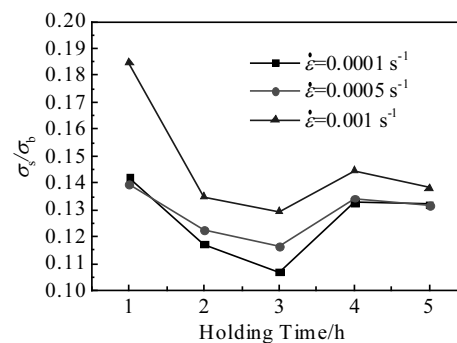


图 8 保温时间对屈强比的影响

Fig.8 Influence of heat treatment holding time on σ_y/σ_b

MPa, 继续延长保温时间至 5 h 时, 5052 铝合金板材的硬度逐渐增大。

将硬度随保温时间的变化规律与强度和塑性性能变化规律相结合可以看出, 在相同的热处理加热温度和冷却方式条件下, 当保温时间从 1 h 延长至 2 h 时, 5052 铝合金的强度和硬度降低、塑性性能增强。这是由于在相同的热处理温度条件下, 随着保温时间的增加, 合金元素有充足的时间进行扩散和溶解, 铝合金的再结晶过程更彻底, 这就导致 5052 铝合金强度和硬度降低, 塑性性能有所提高。但是当保温时间继续增大, 合金元素将开始形成化合物(主要为 $\text{Al}_3\text{Mg}_2^{[18]}$), 且在此过程中形成的再结晶组织将逐渐长大, 使得材料的强度和塑性性能参数同时下降。

2.3 冷却方式对 5052 铝合金力学性能参数的影响

2.3.1 冷却方式对 5052 铝合金强度的影响

在热处理温度 430 °C, 保温 2 h 条件下, 对 5052 铝合金板材分别在空冷、水冷和炉冷 3 种条件下的屈服强度和抗拉强度进行研究, 获得不同冷却方式处理后 5052 铝合金板材的强度变化曲线如图 10 所示。

对比不同冷却方式下的屈服强度(图 10a)可知, 不同冷却方式对屈服强度的影响不大。对比不同冷却方式下的抗拉强度(图 10b), 空冷和水冷条件下 5052 铝合金板材的抗拉强度变化不大, 而炉冷方式降低了处理后 5052 铝合金板的抗拉强度, 但是减小的幅度不大。

2.3.2 冷却方式对 5052 铝合金塑性性能的影响

在相同的热处理温度和保温时间条件(430 °C/2 h)下, 不同冷却方式对 5052 铝合金板材的均匀延伸率的影响曲线如图 11 所示。与对强度的影响规律一样, 炉冷方式降低延伸率较明显。

2.3.3 冷却方式对 5052 铝合金硬度的影响

同理, 借用维氏硬度仪测得 3 种冷却方式(430 °C, 2 h)条件下 5052 铝合金的硬度变化曲线如图 12 所示。

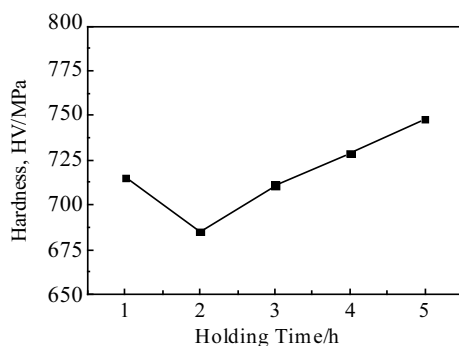


图 9 保温时间对硬度的影响

Fig.9 Influence of heat treatment holding time on hardness

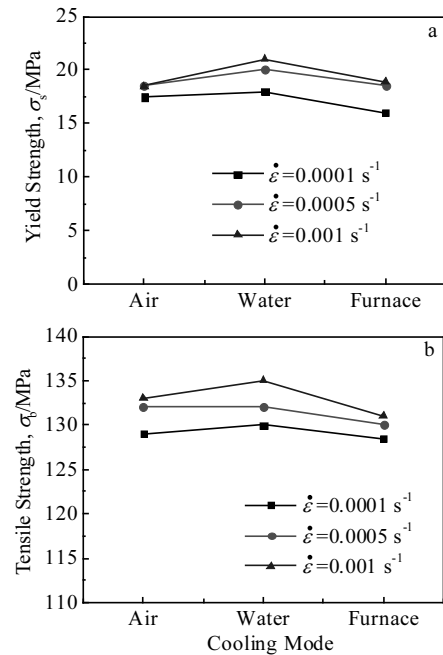


图 10 冷却方式对强度的影响

Fig.10 Influence of cooling mode on strength: (a) yield strength and (b) tensile strength

根据图 12 所示的不同冷却方式下获得 5052 铝合金板的硬度可以看出, 在炉冷条件下, 5052 铝合金的

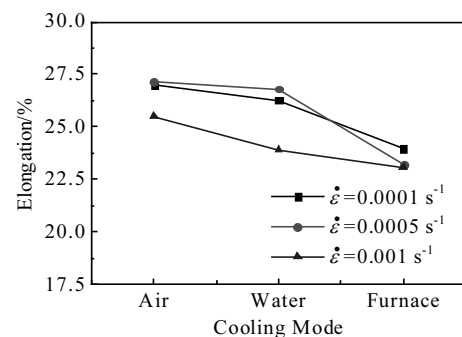


图 11 冷却方式对均匀延伸率的影响

Fig.11 Influence of cooling mode on uniform elongation

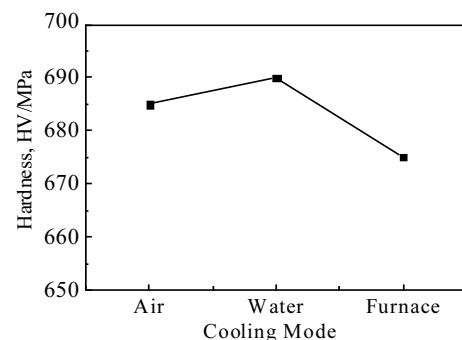


图 12 冷却方式对硬度的影响

Fig.12 Influence of cooling mode on hardness

硬度最小;在水冷方式下,5052 铝合金板的硬度最大;对比 3 种冷却方式下板材的硬度值,3 种冷却方式对板材的硬度影响不大。

将 3 种不同冷却方式下的性能指标参数结合可知,冷却方式对 5052 铝合金板材的强度和硬度的影响不大。就均匀延伸率而言,水冷和空冷条件下的延伸率高于炉冷条件下 5052 铝合金板材的延伸率。由于研究所采用的研究对象为板材,空冷和水冷条件下板材都会在短时间内降温,合金元素的扩散时间和扩散速度相差不大,因此 2 种冷却方式条件对 5052 铝合金板材性能指标的影响不大。但是当采用炉冷方式时,由于加热炉冷却速度缓慢,加热炉将在一段时间内一直保持在再结晶温度以上(5052 铝合金的再结晶温度为 250 °C 左右^[19]),在此条件下合金元素开始逐渐析出形成化合物(主要为 Al_3Mg_2 ^[18]),且晶粒长大的倾向变大,使最终板材的塑性性能有所降低。

在热处理工艺中,加热温度、保温时间、冷却方式是热处理工艺必不可少的 3 个环节。对比 3 种热处理工艺参数对 5052 铝合金板材力学性能指标的影响可知:热处理的加热温度起主要作用;在合理的热处理温度和保温时间条件下,冷却方式对 5052 铝合金的强度、硬度的影响不大。因此,为了提高 5052 铝合金冷轧板材的塑性成形性能,必须首先确定合理的热处理温度和保温时间,在此基础上选择冷却方式。

3 本构模型

根据不同热处理参数条件下 5052 铝合金的试验结果可知,在确定的热处理工艺参数条件下,经过再次热处理后的 5052 铝合金板材的流变应力具有明显的加工硬化和应变率效应。Johnson-Cook 模型综合考虑了变形温度、应变速率和应变对流动应力的影响,可以较好地描述金属材料在塑性变形过程中的加工硬化、应变效应和温度软化效应,属于一种经验型的粘塑性本构模型。只考虑流动应力的 Johnson-Cook 本构关系的表达式如公式(1)所示。

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*) \cdot [1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

其中: A 、 B 、 n 、 C 、 m 为材料参数; $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$, T 为环境温度, T_0 为室温, T_m 为材料的熔点; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率, ε_p 为真实塑性应变。

本研究对再次热处理后铝合金的塑性性能测试均是在室温下进行的,因此 $T^* = 0$,此时 Johnson-Cook 本构模型可简化为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*) \quad (2)$$

对于刚进入屈服时,塑性应变 $\varepsilon_p^n = 0$,屈服应力 σ_s

可根据公式(2)表述为:

$$\sigma_s = A + AC\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \quad (3)$$

在选定的参考应变速率条件下(本研究中选择 $\dot{\varepsilon}_0 = 0.0001 \text{ s}^{-1}$),对热处理温度 430 °C、保温 2 h、空冷后获得的 5052 铝合金板材分别在 3 个应变速率条件下的屈服应力进行研究,绘制屈服应力 σ_s 随 $\ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)$ 变化规律图如图 13 所示。采用最小二乘法对屈服应力 σ_s 随 $\ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)$ 变化规律进行线性拟合,即可获得不同塑性应变条件下的材料参数 A 和 C 值,如表 3 所示。

对于选定的应变速率条件,公式(2)将可变化为包含材料参数 B 、 n 在内的应力 σ 关于塑性应变 ε_p 的幂函数。

$$\frac{\sigma}{(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)} = A + B\varepsilon_p^n \quad (4)$$

将公式(4)两边同时取对数,并整理可得:

$$\ln\sigma' = \ln B + n\ln\varepsilon_p \quad (5)$$

其中,

$$\sigma' = \frac{\sigma}{(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)} = A$$

从公式(5)可以看出, $\ln B$ 是关于 $\ln\sigma'$ 和 $\ln\varepsilon_p$ 的直线方程的截距, n 是关于 $\ln\sigma'$ 和 $\ln\varepsilon_p$ 的直线方程的斜率。将表 3 拟合得到的 A 和 C 的值代入到公式(5)中,并且取塑性应变为 0.05、0.08、0.1、0.13、0.15、0.18

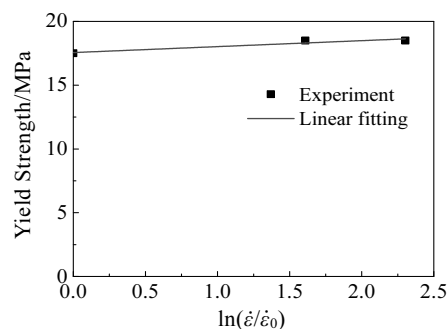


图 13 σ_s 随 $\ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)$ 变化规律图

Fig.13 Graph of variation of σ_s with $\ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)$

表 3 不同应变速率条件下 A 、 C 取值

Table 3 Values of A 、 C under different strain rates

A/MPa	AC/MPa	C
17.56	0.4672	0.0265

和 0.2 时的应力为研究对象。做 $\ln\sigma'$ 随 $\ln\epsilon_p$ 变化规律图如图 14 所示, 借助最小二乘法对试验数据进行线性拟合后即可求得不同应变速率条件下材料参数 B 、 n 的取值如表 4 所示。

同理, 即可获得经过不同热处理后 5052 铝合金的 Johnson-Cook 模型参数如表 5 所示。

根据拟合数据绘制出 Johnson-Cook 模型各参数随热处理加热温度的变化曲线如图 15 所示。从图 15 可以看出, 对 5052-H32 铝合金进行再次热处理时, 当热处理温度从 350 °C 增加至 430 °C, 随着热处理加热温度的升高, Johnson-Cook 模型中的参数 A 、 B 、 C 总体上呈现随热处理温度的升高而逐渐减小趋势。但是当加热温度继续增加至 450 °C 时, 参数 A 、 B 、 C 又有增加趋势。在热处理温度 350~430 °C 范围内, 参数 n 随热处理温度的升高而增大, 应变硬化效果逐渐增加。在 430~450 °C 范围内, 随着温度增加应变硬化效果有所减弱。

将上述变化规律与图 2、图 3 所示的曲线对比可知, 参数 A 、 B 、 C 的变化规律与不同热处理温度后铝合金的屈服强度、抗拉强度的变化规律相同; 而参数 n 的变化规律正好相反。因此, 对同一材料、不同变形条件下建立的 Johnson-Cook 模型而言, 当模型参数 A 、 B 、 C 的取值为最小值, n 为最大值时, 此时模型所对应的材料的实际延伸率最大。

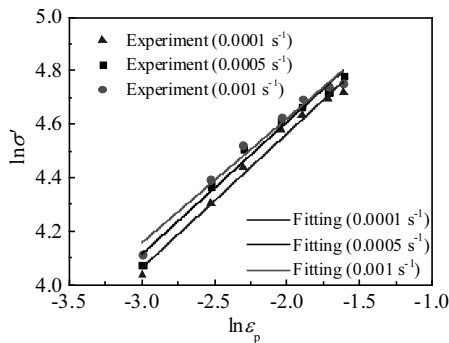


图14 $\ln\sigma'$ 随 $\ln\epsilon_p$ 变化规律图

Fig.14 Graph of variation of $\ln\sigma'$ with $\ln\epsilon_p$

表4 不同应变速率条件下 B 、 n 取值

Table 4 Values of B , n under different strain rates

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	0.0001	0.0005	0.001	Average
$\ln(B/MPa)$	5.5525	5.5998	5.5712	5.57
B/MPa	257.8815	270.3723	262.7492	263.67
n	0.4653	0.4953	0.503	0.4879

采用 4 次多项式对图 15 所示的 Johnson-Cook 模型参数进行拟合。获得经过再次热处理后 Johnson-Cook 模型各参数随热处理加热温度的函数关系如式 (6)~式(9)所示, 拟合曲线如图 16 所示。

$$A(T_t) = -5 \times 10^{-6} T_t^4 + 0.0083 T_t^3 - 5.1196 T_t^2 + 1393.7 T_t - 41605 \quad (6)$$

$$B(T_t) = 2 \times 10^{-5} T_t^4 - 0.0326 T_t^3 + 19.125 T_t^2 - 4969.6 T_t + 483232 \quad (7)$$

$$C(T_t) = -4 \times 10^{-8} T_t^4 + 6 \times 10^{-5} T_t^3 - 0.0344 T_t^2 + 9.1822 T_t - 913.86 \quad (8)$$

$$n(T_t) = -3 \times 10^{-8} T_t^4 + 4 \times 10^{-5} T_t^3 - 0.0261 T_t^2 + 6.7404 T_t - 652.09 \quad (9)$$

其中, T_t 代表对 5052 铝合金进行再次热处理时的加热温度。

从图 16 可以看出, 采用 4 次多项式可以对不同热处理温度条件下的 A 、 B 、 C 和 n 值进行拟合。拟合曲线与各热处理温度条件下计算结果的相关系数 R^2 如表 6 所示。对比相关系数, 4 次多项式对参数 A 、 C 、 n 的拟合精度高于参数 B 的拟合精度。

将公式(6)~公式(9)所建立的模型参数函数代入公式(2)中, 即可建立经过再次热处理后 5052 铝合金板材的本构模型。如公式(10)所示。

$$\sigma = \left(A(T_t) + B(T_t) \epsilon_p^{n(T_t)} \right) \left(1 + C(T_t) \ln \dot{\epsilon}^* \right) \quad (10)$$

根据公式(10) 所示的预测模型分别获得在热处理温度为 410、430、450 °C, 保温 2 h, 空冷条件下的真实应力-应变曲线如图 17 所示。

将试验获得的真实应力-应变曲线与预测曲线对比可知, Johnson-Cook 模型可以准确预测经过再次热处理后 5052 铝合金流变应力状态。

表5 不同热处理温度条件下 A 、 B 、 C 、 n 取值

Table 5 Values of A , B , C , n under different strain rates

Temperature/°C	A/MPa	B/MPa	C	n
H32	50.93	317.35	0.4919	0.2466
350	47.08	326.895	0.4353	0.2413
370	55.13	332.43	0.3409	0.2696
390	37.58	324.61	0.1131	0.3066
410	18.60	316.62	0.0561	0.3880
430	17.56	263.67	0.0265	0.4879
450	19.80	338.70	0.0581	0.4225

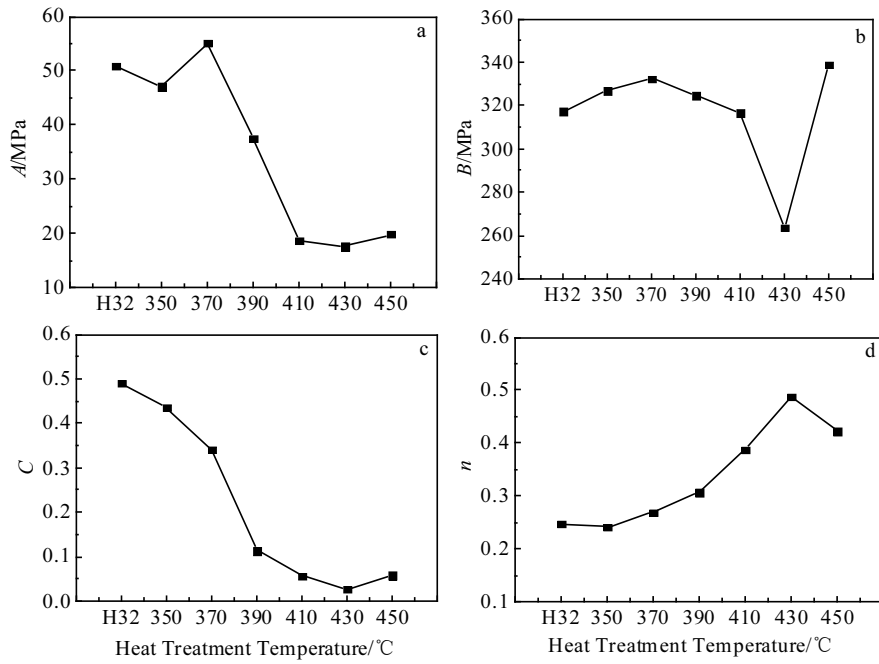


图 15 Johnson-Cook 模型参数随热处理温度变化曲线

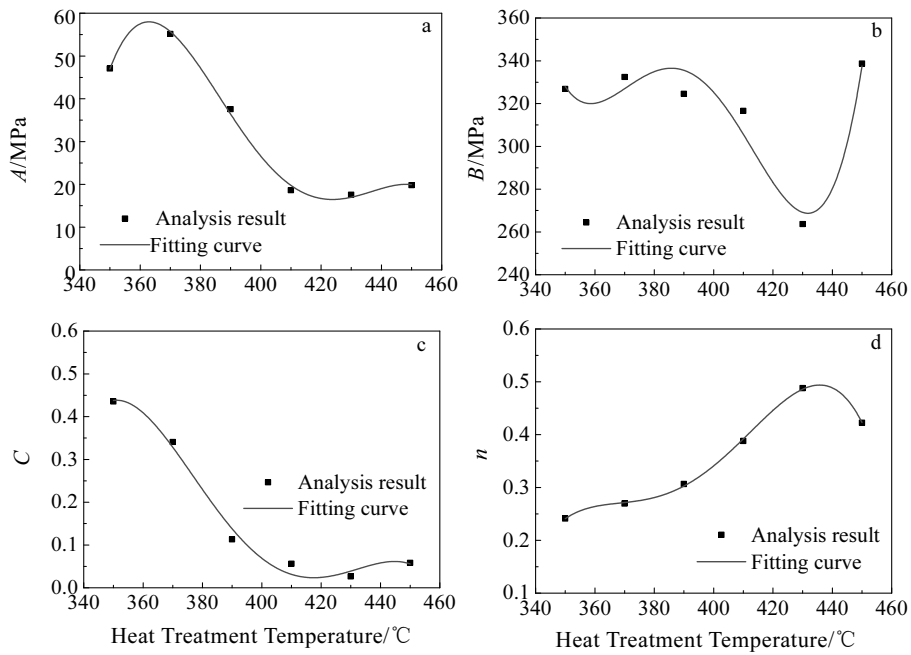
Fig.15 Variation curves of Johnson-Cook model parameters with heat treatment temperature: (a) A , (b) B , (c) C , and (d) n 

图 16 Johnson-Cook 模型参数拟合曲线

Fig.16 Fitting curves of Johnson-Cook model parameters: (a) A , (b) B , (c) C , and (d) n

表 6 不同参数的拟合相关系数

Table 6 Correlation coefficients (R^2) of different parameters

A	B	C	n
0.9974	0.9187	0.9896	0.9992

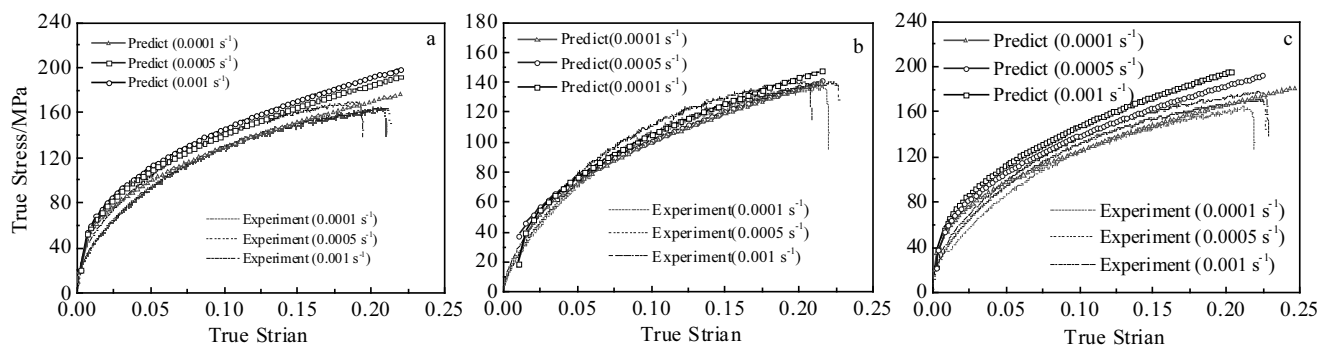


图 17 再次热处理后5052合金真实应力-应变曲线

Fig 17 True stress-strain curves of 5052 alloy after re-heat treatment: (a) 410 °C, (b) 430 °C, and (c) 450 °C

4 结 论

1) 在相同的保温时间和冷却方式条件下, 热处理时的加热温度对 5052 铝合金的影响很大, 对 5052-H32 态铝合金进行再次热处理可以显著地降低其变形抗力, 提高塑性变形能力。

2) 在相同的热处理加热温度和冷却方式条件下, 当保温时间从 1 h 延长至 2 h 时, 5052 铝合金的强度和硬度降低、塑性增强。当保温时间继续增大, 使得材料的强度和塑性性能参数同时下降。

3) 在相同的热处理温度和保温时间条件下, 冷却方式对 5052 铝合金板材的强度和硬度的影响不大。就均匀延伸率而言, 水冷和空冷条件下的延伸率高于炉冷条件下 5052 铝合金板材的延伸率。

4) 基于 Johnson-Cook 模型建立了经过再次热处理后 5052 铝合金的本构模型, 通过与试验结果对比, 表明 Johnson-Cook 模型可以预测不同应变速率条件下的流变应力。

参考文献 References

- [1] Deng Yunlai(邓运来), Zhang Xinming(张新明). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2019, 29(9): 2115
- [2] Gao Guanjin, He Chen, Li Yong *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2018, 28(5): 839
- [3] Li Wenke(李文科), Zhan Lihua(湛利华), Zhao Jun(赵俊). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2016, 26(6): 1159
- [4] Eivani A R, Vafaeezad H, Nikan O *et al.* *Mechanics of Materials*[J], 2019, 129: 104
- [5] Zuiko I, Kaibyshev R. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 759: 108
- [6] Sun Xue(孙雪), Pan Qinglin(潘清林), Li Mengjia(李梦佳) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2016, 26(2): 280
- [7] Zhu R H, Liu Q, Li J F *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2018, 28(3): 404
- [8] Zhang H M, Chen G, Chen Q. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 743 : 283
- [9] Liu Q, Chen S C, Gu R Y. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2018, 27: 4423
- [10] Huang Yujin(黄裕金), Chen Zhiguo(陈志国), Shu Jun(舒军) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(11): 2094
- [11] Cai Yiming(蔡一鸣), Li Huizhong(李慧中), Liang Xiaopeng(梁霄鹏) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2008, 18(10): 1775
- [12] Hosseinipour S J. *Advanced Materials Research*[J], 2009, 83-86: 400
- [13] Zhang Pan(张盼), Ye Lingying(叶凌英), Gu Gang(顾刚) *et al.* *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2014(9): 51
- [14] Kapoor I, Narayanan R G, Taylor S *et al.* *Procedia Engineering*[J], 2017, 173: 897
- [15] Jia X D, Yuan R J, He L Y *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2020, 49 (7): 2189
- [16] Hua Ruyu(华如雨), Xu Xuefeng(徐雪峰), Qiu Zeyu(邱泽宇) *et al.* *Journal of Plastic Engineering*(塑性工程学报)[J], 2019, 26(4): 61
- [17] Xu Bing(许冰), Ou Hang(欧航), Liu Quanyao(柳泉潇潇) *et al.* *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2019, 30(12): 1506
- [18] Wang B, Chen X H, Pan F S *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(8): 2481
- [19] Xu Xiaojing(许晓静), Jiang Ling(蒋凌), Lu Wenjun(陆文俊)

- et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(1): 245
- [20] Wei Xiaohua(魏小华). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(6): 159
- [21] Lin Qiquan(林启权), Wang Xiaowei(王晓伟), Dong Wenzheng(董文正) *et al. Journal of Central South University* (中南大学学报)[J], 2019, 50(11): 2695

Effect of Heat Treatment Parameters on Mechanical Properties of 5052 Aluminum Alloy

Jia Xiangdong, Zhao Yang, Xu Siqi

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Take the 5052-H32 as the research object, the mechanical properties were studied under the condition of different heat treatment parameters by uniaxial tensile test and hardness test, and the influence mechanism of different heat treatment parameters on mechanical properties of 5052 aluminum alloy was analyzed. The results show that the deformation resistance of 5052-H32 aluminum alloy can be significantly reduced and its plastic deformation ability can be improved during re-heat treatment. The heating temperature plays a major role in the process of heat treatment, and the cooling mode has little influence on the strength and hardness of 5052 aluminum alloy under reasonable heat treatment temperature and holding time. On this basis, the constitutive model of 5052 aluminum alloy after re-heat treatment was established by Johnson-Cook model.

Key words: aluminum alloy; heat treatment; mechanical properties; flow stress; constitutive model

Corresponding author: Jia Xiangdong, Ph. D., Lecturer, College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China, E-mail: jiaxd.good@163.com