

变形速率对2219铝合金力学性能影响

李玉辰 谷春杰 张下陆 李永胜 龚立林

(天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

文 摘 为研究变形速率与2219铝合金力学性能之间的关系,选取0.05、0.10、0.15、0.20、0.30、0.40 mm·s⁻¹共6种不同变形速率,通过单向拉伸试验,取得不同变形速率条件下2219铝合金的应力-应变曲线。为符合生产实际情况,分别选取0.075、0.30、0.40、0.55 mm·s⁻¹共4种更大的变形速率,更改材料状态,进行拉伸试验,并进行金相分析,进一步验证不同变形速率条件下2219铝合金力学性能变化趋势。结果表明,2219铝合金屈服强度及抗拉强度对变形速率的变化不敏感,随着变形速率不断增加,断后延伸率存在升高趋势。根据加工设备等实际情况,选择较高的变形速率(建议不超过0.40 mm·s⁻¹),以提高加工效率。

关键词 变形速率,2219铝合金,屈服强度,抗拉强度,断后延伸率

中图分类号: TG146

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.05.014

Effect of Strain Rate on Mechanical Performance of 2219 Aluminum Alloy

LI Yuchen GU Chunjie ZHANG Xialu LI Yongsheng GONG Lilin

(Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co. Ltd., Tianjin 300462)

Abstract In order to study the relationship between strain rate and mechanical performance of 2219 aluminum alloy, through the uniaxial tensile test in 6 different strain rates in 0.05、0.10、0.15、0.20、0.30、0.40 mm·s⁻¹, the stress-strain curve of 2219 aluminum alloy was obtained under different strain rates. In order to accord with the actual production situation, selected 4 larger strain rate in 0.075、0.30、0.40、0.55 mm·s⁻¹, changed the material state, conducted the uniaxial tensile test and metallographic analysis, the variation trend of mechanical performance of 2219 aluminum alloy was tested and verified under different strain rates. The results show that mechanical performance of 2219 aluminum alloy is insensitive in yield strength and tensile strength. As the strain rate goes up, percentage elongation has an upward trend. According to the actual situation of processing equipment, a higher deformation rate (recommended not to exceed 0.4 mm·s⁻¹) is chose to improve processing efficiency.

Key words Strain rate, 2219 aluminum alloy, Yield strength, Tensile strength, Percentage elongation after fracture

0 引言

2219铝合金是一种新型铝合金材料,具有强度高、低温和高温力学性能好、断裂韧性高、抗应力腐蚀性能好和机械加工性能优良等特点,适用于高温315℃下工作的结构件、高强度焊接件。在航空和航天领域蒙皮等大型结构件制造中已经获得广泛应用,具有良好的研究前景和广泛的应用价值。其化学成分如表1所示。

2219铝合金属于可热处理强化的变形铝合金,研究变形程度、变形速率等对2219铝合金板材的力

表1 2219铝合金的化学成分

Tab. 1 Chemical component of 2219 aluminum alloy

| % | | | | | | | | | |
|---------|---------|------|----------|------|-------|------|-----------|----------|---------|
| Cu | Mn | Si | Zr | Fe | Mg | Zn | V | Ti | Al |
| 5.8~6.8 | 0.2~0.4 | ≤0.2 | 0.1~0.25 | ≤0.3 | ≤0.02 | 0.10 | 0.05~0.15 | 0.02~0.1 | Balance |

学性能以及微观组织的影响规律,可以为实际生产中2219铝合金大尺寸板材成形工艺的制定与优化提供基础理论与实验依据,从而控制产品质量并最大限度提高生产效率。

在变形速率对材料成形组织性能影响方面,相

收稿日期:2022-06-10

基金项目:天津市科技支撑项目(17YFZCGX00530)

第一作者简介:李玉辰,1988年出生,主要研究方向为运载火箭箭体结构制造与质量检测技术的工作。E-mail:nxca2004.student@sina.com

关单位开展了研究,针对不同变形速率下,对铝合金材料应力应变数据变化,成形性能影响,组织结构分析等方面进行研究^[1-6]。针对2219铝合金热处理状态^[7-11]、变形温度^[12-16]等对力学性能方面影响进行相关研究,在变形速率对2219合金组织性能影响方面,国内外并未进行深入研究。

本文通过选取6种不同变形速率(应变速率 $0.05\sim 0.4\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$),针对2219铝合金开展单向拉伸试验,研究不同变形速率对2219铝合金板材力学性能的影响规律,建立应力-应变曲线图,获得变形速率与材料力学性能之间影响关系,为实际生产工艺制定提供理论依据与试验基础。

1 实验

采用室温条件下单向拉伸试验来表征2219板材的基本力学性能指标。试验依据的标准是GB/T228—2010。试样采用电火花线切割加工,试验外形尺寸为片状矩形截面拉伸试样,试验设备采用Instron 5500型电子万能拉伸试验机进行拉伸试验,如图1所示。拉伸试验中,样品的应变速率分别为 0.05 、 0.10 、 0.15 、 0.20 、 0.30 、 $0.40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,试验温度为室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)。采用引伸仪记录拉伸过程中的应变,建立工程应力-工程应变曲线,用GB/T228—2010规定的方法获取材料的力学性能指标。



图1 电子万能试验机

Fig. 1 Electronic universal testing machine

在GB/T228—2010中,规定比例试样工作距离长度为: $L_0=k\times(S_0)-1/2$ 。其中, k 为比例系数,这里取 5.65 ,即5倍试样, L_0 为试样工作距离长度, S_0 为平行部分截面积,由板材的厚度 t 和平行部分宽度 w 相乘得到。按国标对矩形界面样品的规定,宽度 w 可以取 12.5 、 15 、 20 、 25 和 30 mm ;在课题工作中,取试样宽度 w 为 30 mm ,由样品厚度分别计算得到试样的平行部分长度、总长度等。对 w 为 30 mm 的样品, 11 mm 厚板材工作距离长度 L_0 为 240 mm ,平行部分长度 L_c 为 113 mm ;试样的尺寸如图2所示。

在上述拉伸样品取样过程中,沿着与轧制方向呈 0° 方向切割拉伸样品,进行6组单向拉伸实验:取 $3\times 6\times$

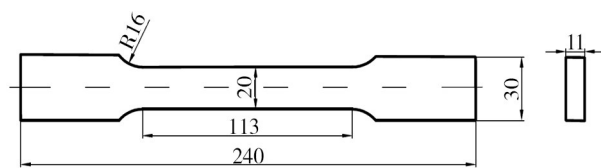


图2 宽度30 mm 国标拉伸样品尺寸

Fig. 2 National standard tensile test specimen with width of 30 mm

2共36个拉伸试样,以 0.05 、 0.10 、 0.15 、 0.20 、 0.30 、 $0.40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的拉伸速率测试6组,每组6个样品,其中有3个样品是在有引伸计的情况下进行测量的,另外3个是没有引伸计的情况下进行的。有引伸计时所测得的应变跟屈服强度比较精确,其数据可以用来进行承载能力的精确计算,而不加引伸计所测得的应力-应变曲线则更加符合服役过程中承受拉力所造成的破坏情况,从而对实际的服役情况做出指导。

2 结果分析

经过单向拉伸试验,在加持引伸计情况下的试样断裂的宏观特征基本相似,无明显的区别,如图3所示。从图中可以看出在不同的拉伸速率下试样都有较为明显的颈缩现象,说明2219铝合金具有良好的塑性及韧性,同时具有较高的延伸率。

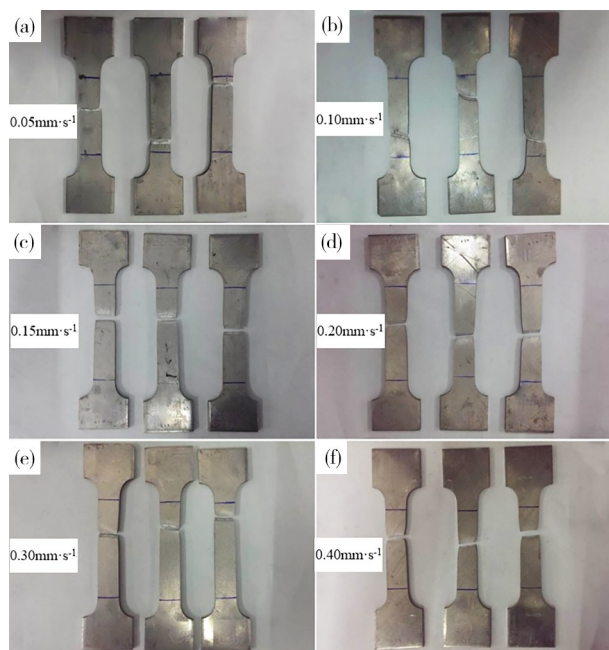


图3 加持引伸计条件下六组拉伸试样的断后照片

Fig. 3 Post fracture photos of six sets of tensile specimens with extensometers

对于加持引伸计的情况下,不同速率条件下拉伸试样的拉伸性能数据详见表2。从表中数据分析,在不同的拉伸速率下2219铝合金在屈服强度约为 138 MPa ,抗拉强度约为 329 MPa ,断后延伸率约为 23% ,也表现出良好的塑性变形能力。

拉伸速率在 $0.05\sim 0.40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,试样平均屈服强度分别为 138 、 139 、 139 、 136 、 138 及 138

表2 加持引伸计条件下不同速率条件下2219铝合金拉伸试样的力学性能

Tab. 2 Mechanical performance of 2219 aluminum alloy tensile test specimen with extensometers under different strain rates

| 样品编号 | 拉伸速率/ (mm·s ⁻¹) | 屈服强 度/MPa | 抗拉强 度/MPa | 断后延伸 率/% |
|---------------|--------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| Sample 0.05-1 | | 140 | 339 | 22.4 |
| Sample 0.05-2 | 0.05 | 136 | 341 | 20.5 |
| Sample 0.05-3 | | 138 | 337 | 20.3 |
| 平均值 | | 138 | 339 | 21 |
| Sample 0.1-1 | | 139 | 329 | 23.4 |
| Sample 0.1-2 | 0.1 | 141 | 333 | 24.3 |
| Sample 0.1-3 | | 138 | 333 | 21.9 |
| 平均值 | | 139 | 332 | 23.2 |
| Sample 0.15-1 | | 141 | 328 | 22.2 |
| Sample 0.15-2 | 0.15 | 138 | 331 | 22.8 |
| Sample 0.15-3 | | 138 | 328 | 22.0 |
| 平均值 | | 139 | 329 | 22.3 |
| Sample 0.2-1 | | 136 | 320 | 25.0 |
| Sample 0.2-2 | 0.2 | 136 | 327 | 23.1 |
| Sample 0.2-3 | | 138 | 328 | 23.5 |
| 平均值 | | 136 | 325 | 23.8 |
| Sample 0.3-1 | | 135 | 324 | 25.3 |
| Sample 0.3-2 | 0.3 | 139 | 324 | 21.5 |
| Sample 0.3-3 | | 140 | 325 | 23.9 |
| 平均值 | | 138 | 324 | 23.5 |
| Sample 0.4-1 | | 138 | 323 | 24.4 |
| Sample 0.4-2 | 0.4 | 136 | 323 | 23.9 |
| Sample 0.4-3 | | 139 | 321 | 23.1 |
| 平均值 | | 138 | 322 | 23.8 |

MPa,与前文所提屈服强度的总平均值138 MPa相比,其最大的波动是在拉伸速率为0.15 mm·s⁻¹时,屈服强度为136 MPa,变化值为1.45%,说明拉伸速率在0.05~0.40 mm·s⁻¹范围内,变形速率对屈服强度基本没有影响,屈服强度数据无明显变化。

拉伸速率在0.05~0.40 mm·s⁻¹范围内,试样平均抗拉强度分别为339、332、329、325、324及322 MPa,说明随着拉伸速率的增加,2219铝合金抗拉强度由339 MPa逐渐地下降至322 MPa,呈现出其抗拉强度随着拉伸速率的增加而逐步下降的趋势,但其从最大值到最小值总体变化幅度约为5%,说明拉伸速率在0.05~0.40 mm·s⁻¹范围内,试样拉伸速率的变化对2219铝合金的抗拉强度略有影响,抗拉强度随变形速率增加小幅下降,趋势不明显。

拉伸速率在0.05~0.40 mm·s⁻¹范围内,试样平均断后延伸率分别为21.0%、23.2%、22.3%、23.8%、23.5%及23.8%,在拉伸速率达到0.20 mm·s⁻¹之前,断后延伸率变化较为明显,呈现上升趋势,但拉伸速率达到0.20 mm·s⁻¹后,断后延伸率基本保持不变。从数据可知,最大值与最小值之间变化幅度约为11.7%,存在一定变化。

不同拉伸速率下的2219铝合金力学性能变化趋势详见图4。图中颜色及形状点分别表示不同拉伸速率下的2219铝合金抗拉强度、屈服强度及断后延伸率,同时根据数据拟合直线,可明显反映数据变化趋势。

由图可见,随着拉伸速率的增加,2219铝合金屈服强度基本持平,无明显变化。抗拉强度显现出下降趋势但是幅度不明显。断后延伸率的起伏较大,显现出较明显一定升高趋势,这与在上面分析得出的结论一致。说明拉伸速率在0.05~0.40 mm·s⁻¹范围内对2219合金的抗拉强度及屈服强度无明显影响,对断后延伸率有一定影响。在实际加工或者服役过程中在以上拉伸速率范围内的形变都可以接受,可以采用较大的形变速率提高加工效率。

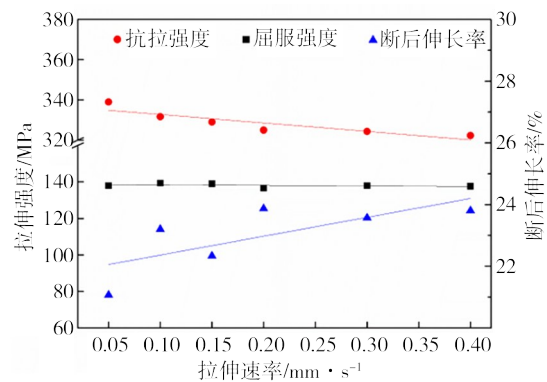


图4 不同拉伸速率下的2219铝合金力学性能对比
Fig. 4 Comparison of mechanical performance of 2219 aluminum alloy under different strain rates

对于无引伸计所测得应力应变曲线如图5所示,图5(a)~(f)分别表示2219铝合金拉伸速率在0.05~0.40 mm·s⁻¹的应力-应变曲线。由图可见,各图中曲线均具有明显的三个变形阶段:首先是弹性变形阶段。应力与应变为线性关系,符合胡克定律,随着应变的增大曲线呈直线形上升趋势。在应变达到约2.5%时,进入塑性变形阶段,即应力与应变之间的关系不再为线性关系。与弹性变形阶段相比,应力的升高速度明显下降,呈类抛物线形上升趋势。随着载荷继续增加,在所能承受的应力达到最大时材料发生断裂。从图中可以看出在相同的拉伸速率下,应力-应变曲线基本相同。

在不同的拉伸速率下,2219铝合金的屈服强度约为140 MPa,抗拉强度约为325 MPa,与加持引伸计

时所得的数据接近,而且对比在不同拉伸速率下得到的应力-应变曲线图5,在不同的拉伸速率下2219

铝合金的屈服强度、抗拉强度、弹性模量等性能基本近似,与在有引伸计的情况下得出的结论一致。

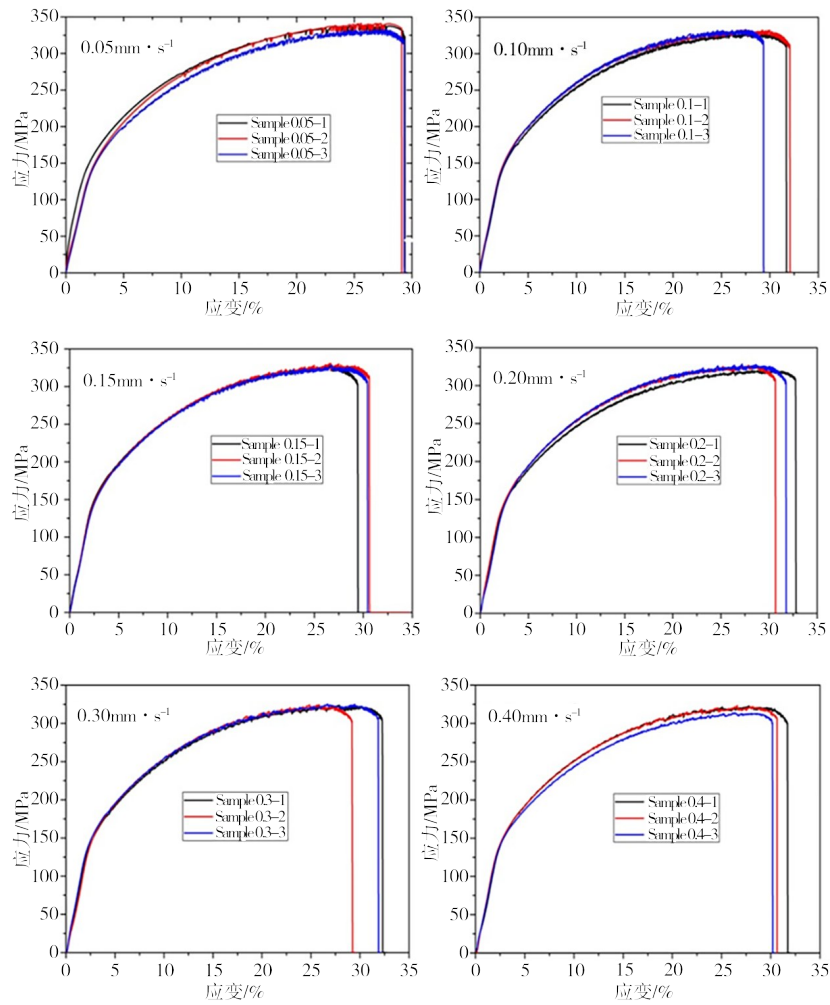


图5 无引伸计情况下不同变形速率拉伸应力-应变曲线

Fig. 5 The stress-strain curve of 2219 aluminum alloy at different strain rates with no extensometers

在前期数据基础上,结合生产实际情况,进一步提升变形速率进行试验分析。选取4组变形速率试样,经过淬火、冷变形及人工时效,取得力学性能数据详见表3,金相组织照片详见图6。从表2数据分析,试样在变形速率为 $0.075 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时其所得到的力学性能最高,在变形速率为 $0.550 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时其所得到的屈服强度及抗

拉强度最差,但断后延伸率上升。由图6分析,在 $0.075 \sim 0.40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,随着变形速率的逐渐增大,图6(a)~(c)中其晶粒尺寸无明显增加,但其尺寸不均匀性增加,这可能是导致强度降低的主要原因。当变形速率为 $0.550 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,大尺寸晶粒数量明显增加,导致强度进一步降低而延伸率上升。

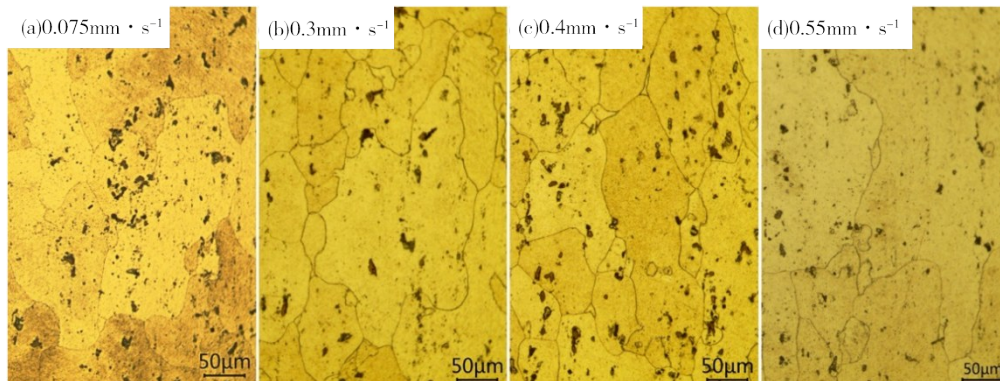


图6 不同变形速率试样微观组织金相照片

Fig. 6 Metallographic photos of microstructure of tensile test specimen under different strain rates

表3 不同速率条件下2219铝合金拉伸试样的力学性能

Tab. 3 Mechanical performance of 2219 aluminum alloy tensile test specimen under different strain rates

| 变形速率/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 断后延伸率/% |
|--|----------|----------|---------|
| 0.075 | 375 | 448 | 14.3 |
| 0.3 | 332 | 433 | 14 |
| 0.4 | 328 | 428 | 13.3 |
| 0.55 | 313 | 428 | 15 |

3 结论

2219铝合金在变形速率升高条件下,抗拉强度及屈服强度出现下降趋势,断后延伸率出现上升趋势,力学性能数据变化均在一定小范围内波动,说明变形速率对2219铝合金力学性能影响较小。在变形速率较大的情况下(达到 $0.55\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$),会出现强度降低等情况。在2219铝合金板材成形过程中,可在满足产品力学性能要求的前提下,根据加工设备等实际情况,选择较高的变形速率(建议不超过 $0.40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$),以提高加工效率。

参考文献

[1] 陈琳,邓盛卫,王游根,等. 变形速度和温度对5182铝合金成形性能的影响[J]. 轻合金加工技术,2017,45(6):28-32,49.

CHEN L, DENG S W, WANG Y G, et al. Effect of strain rate and temperature on the formability of 5182 aluminum alloy [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2017, 45(6):28-32, 49.

[2] 张孜昭,许晓嫦,刘志义,等. 应变速率对强变形Al-Cu合金中析出相低温回溶速度的影响[J]. 热处理, 2010, 25(2):15-18.

ZHANG Z Z, XU X C, LIU Z Y, et al. Effect of strain rate on redissolution rate of precipitated phase at low temperature in severely plastically deformed Al-Cu alloy[J]. Heat Treatment. 2010, 25(2):15-18.

[3] 赵天生,方羽,孙誉宾. 成形速度对7050铝合金锻件力学性能和断口形貌的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(6):103-107.

ZHAO T S, FANG Y, SUN Y B. Effect of forming speed on mechanical properties and fracture morphology of 7050 aluminum alloy forgings [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(6):103-107.

[4] 王淑花,安秀娟. 拉伸速率对2A40合金拉伸性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(14):72-73.

WANG S H, AN X J. Effect of tensile rate on tensile properties of 2A40 alloy [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(14):72-73.

[5] 张冬冬,王勇,任祥,等. 6016铝合金变形应变场研究新方法[J]. 长春工业大学学报, 2014, 35(2):206-211.

ZHANG D D, WANG Y, REN X, et al. A new method analyzing 6016 aluminum alloy changing strain field[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2014, 35(2):206-211.

[6] 陈贵清,傅高升,程超增,等. 应变速率对3003铝合金热变形动态再结晶组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33

(10):26-31.

CHEN G Q, FU G S, CHEN C Z, et al. Effects of strain rate on dynamic recrystallization microstructure of 3003 aluminum alloy in process of hot deformation [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(10):26-31.

[7] LIU L, WU Y X, GONG H, et al. Modified kinetic model for describing continuous dynamic recrystallization behavior of Al 2219 alloy during hot deformation process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 817: 153301.

[8] LI Z X, ZHAN M, FAN X G, et al. Constitutive model over wide temperature range and considering negative-to-positive strain rate sensitivity for as-quenched AA2219 sheet [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(1): 404-413.

[9] OLASUMBOYE A, OWOLABI G, ODESHI A, et al. Dynamic response and microstructure evolution of AA2219-T4 and AA2219-T6 aluminum alloys [J]. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2018, 4(1-2): 162-178.

[10] 金淳,黄亮,李建军,等. 不同热处理状态下成形速率对2219铝合金成形极限的影响[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(1): 125-132.

JIN C, HUANG L, LI J J, et al. Influence of forming rate on forming limit of 2219 aluminum alloy under different heat treatment conditions[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(1): 125-132.

[11] AN L H, CAI Y, LIU W, et al. Effect of pre-deformation on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy sheet by thermomechanical treatment [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S2):370-375.

[12] 邹杰,彭文飞,陈镇扬. 大型环件用2219铝合金的动态再结晶行为[J]. 机械工程材料, 2021, 45(8):37-44.

ZOU J, PENG W F, CHEN Z Y. Dynamic recrystallization behavior of 2219 aluminum alloy for large-scale rings[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(8):37-44.

[13] HE H L, YI Y P, CUI J D, et al. Hot deformation characteristics and processing parameter optimization of 2219 Al alloy using constitutive equation and processing [J]. Vacuum: Technology Applications & Ion Physics, 2017, 160:293-302.

[14] S S NARAYANA MURTY, A SARKAR, P RAMESH NARAYANAN, et al. Development of processing maps and constitutive relationship for thermomechanical processing of aluminum alloy AA2219[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(5):2190-2203.

[15] 吴长俊,易幼平,何海林. 变形温度对2219铝合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(19):19-23.

WU C J, YI Y P, HE H L. Effects of deformation temperature on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(19):19-23.

[16] 张子群,姜兆亮,魏清月. 2219铝合金动态力学性能及其本构关系[J]. 材料工程, 2017, 45(10):47-51.

ZHANG Z Q, JIANG Z L, WEI Q Y. Dynamic mechanical properties and constitutive equations of 2219 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(10):47-51.