

7055 高强铝合金大型环件轧制技术研究

陈增奎¹, 周卫卫², 范新中¹, 陈浩³, 涂光纯³

(1. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076; 2. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)
3. 首都航天机械公司, 北京 100076)

摘要: 目的 获得 7055 高强铝合金大型整体构件。方法 开展了 7055 高强铝合金大型环件轧制技术研究, 制定了 7055 高强铝合金环件轧制温度、轧制压缩比等工艺参数, 制备了轧制试验坯料, 对轧制后的大型环件进行了固溶时效强化热处理, 并分析了显微组织和力学性能。结果 通过研究, 最终获得了切向、径向、轴向三向的抗拉强度均高于 580 MPa, 伸长率均大于 8%, 尺寸规格为 $\Phi 2000$ mm 级的 7055 高强铝合金大型环件。结论 成功获得了满足研制需求的 7055 高强铝合金大型整体构件。

关键词: 7055 铝合金; 大型环件; 轧制; 显微组织; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.003

中图分类号: TG339 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2016)04-016-05

Rolling Process of 7055 Aluminum Alloy large Annulus of High Strength

CHEN Zeng-kui¹, ZHOU Wei-wei², FAN Xin-zhong¹, CHEN Hao³, TU Guang-chun³

(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China; 2. Beijing Precision Electromechanical Control Equipment Research Institute, Beijing 100076, China; 3. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: To obtain high-strength large unitary product of 7055 aluminum alloy, a study was carried out on the rolling process of high-strength 7055 aluminum alloy large annulus. It designed technological parameters for 7055 aluminum alloy large annulus like rolling temperature and compression ratio, prepared test blanks, conducted soluted-aged technique thermal treatment for the rolled large annulus, and also analyzed grain microstructure and mechanical property. The 7055 aluminum alloy large annulus got the annular orientation, axis orientation, diametral orientation tensile strength of over 580 MPa, elongation of over 8%, and the diameter of $\Phi 2000$ mm. The study realizes the application of high-strength large unitary product of 7055 aluminum alloy that meets development requirement.

KEY WORDS: 7055 aluminum alloy; large annulus; rolling; grain microstructure; mechanical performance

长期以来, Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金被广泛用于飞机机身、机翼梁、机舱壁板和高强度火箭结构件等的制造^[1-5]。7 系超高强铝合金通过高合金化元素, 提高铝合金的强度, 是强度最高的铝合金系列, 其中 7055 铝合金是可达到的强度最高的热处理铝合金。除强度高之外, 7055 铝合金还有高比模量、高韧性等特点^[6-9]。7055 铝合金较小尺寸的材料制备及

加工成形方面的技术已经成熟, 并在国内外航天航空领域均有应用^[9-12]。

目前, 采用喷射成形较锭坯稳定地制造 7055 铝合金轧制大型环件的研究较少^[11-15]。本文主要采用喷射成形锭坯的 7055 铝合金轧制切向、径向、轴向三向的抗拉强度均高于 580 MPa、延伸率均大于 8%、尺寸规格为 $\Phi 2000$ mm 级的大型环件, 满足了研制

收稿日期: 2016-05-24

基金项目: “十二五”总装预研课题(513180403)

作者简介: 陈增奎(1984—), 男, 工程师, 主要研究方向为壳段结构设计与热防护设计。

需求, 为 7055 合金在航天大型结构件上的应用提供了技术支撑。

1 轧制工艺参数

1.1 轧制温度

对 7055 铝合金进行了热压缩模拟试验, 温度区间为 200 ~ 450 °C, 变形速率分别为 0.01, 0.1, 1.0 s⁻¹, 试验结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出, 7055 铝合金强度对变形温度较为敏感, 在 3 种不同的变形速率下, 7055 铝合金在 350 ~ 450 °C 的温度范围内, 随着变形量的增加, 变形抗力基本保持不变, 加工硬化与动态再结晶过程保持平衡, 材料最易发生塑性变形, 因此 350 ~

450 °C 为 7055 铝合金的轧制温度范围。同时, 考虑到自由轧制过程为完全开放的成形系统, 材料不受模具的保护, 直接与空气接触, 表面温度损失较大, 容易造成材料的温度分布不均匀, 故将终锻温度提高 30 °C, 控制为 380 °C, 对工装、模具预热, 预热温度为 400 °C。

制定的 7055 铝合金的轧制热加工工艺参数: 始轧温度为 (455±5) °C; 终轧温度为 (380±10) °C; 保温系数为 2 min/mm; 保温时间 300 min; 轧制火次为 1 火次; 吊装方式为水平吊装; 冷却方式为空冷。

1.2 轧制压缩比

环件轧制的压缩比设计是轧制技术的重要参数, 合理的压缩比能够利于轧制过程的顺利进行, 利于降低轧制环件的表面凹坑、材料折叠等过程缺陷。压缩比 λ 按照工艺系统的要求, 当 $\lambda=0.60$ 时, 是最佳的轧制区间, 轧制转变点变化幅度最小, 对应的轧制变形程度最为均匀。而 $\lambda=0.60$ 多为工艺设计的理想状态, 实际生产或试验中, 由于材料类别、制坯规格、公差余量等各项要求, 只能使 λ 值趋近最佳状态。对于本课题的轧制件环件, 设计计算的压缩比为 $\lambda=0.52$, 与理想值相差 12.9%, 属于工艺允许范围。

2 轧制试验

2.1 轧制坯料制备

为避免喷射成形锭坯的裂纹倾向性, 提高塑性变形能力, 对喷射锭坯采用变形速率较慢的镦粗、挤压等多道次充分变形, 提高原始材料的致密度, 细化晶粒尺寸, 使大部金属间化合物固溶于材料基体, 改善晶界强度, 以提高材料轧制性能。

轧制试验坯料制备过程中, 采取多道次的挤压、镦粗、马杠扩孔方式, 细化晶粒, 改善组织。在镦粗、扩孔过程中, 由于 7055 铝合金对自由锻造的冲击载荷较为敏感, 因此严格保证变形温度分布的均匀性, 对锻造设备的上下砧面、工装以及扩孔所用的马杠预热至 400 °C 以上, 同时, 工序间坯料重新加热至 450 °C 并进行保温, 消除塑性变形硬化。环轧试验件坯料进行了 4 次镦粗变形, 1 次挤压变形,

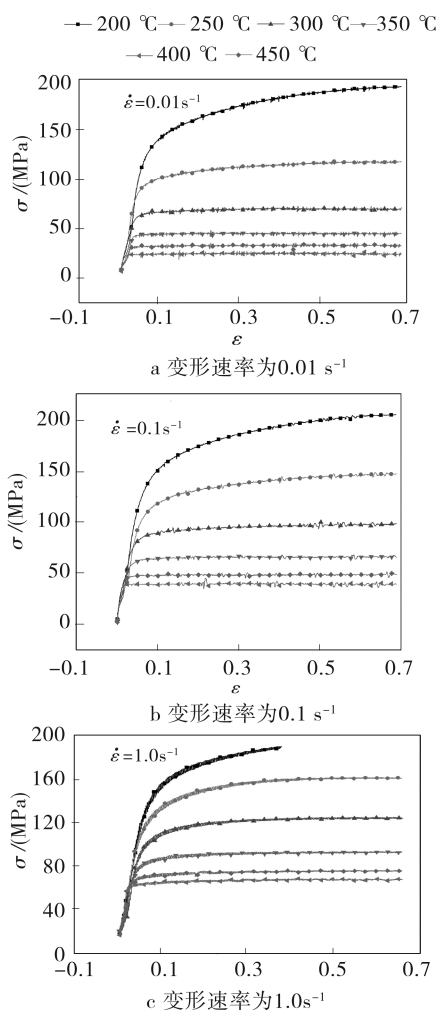


图 1 热压缩模拟试验结果

Fig. 1 Hot compression experiment by simulation

2次扩孔变形,道次变形量最小为110%,最大为265%,总的累积变形量约为1100%,轧制试验坯料的制备方法见表1。

表1 轧制试验坯料制备
Table 1 Blank preparation of rolling process

序号	变形方式	原始坯料→变形坯料	变形温度/℃	保温时间/min
1	挤压	$\Phi 485 \text{ mm} \times 1350 \text{ mm} \rightarrow \Phi 630 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$	450	360
2	挤压	$\Phi 630 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \rightarrow \Phi 350 \text{ mm} \times 2100 \text{ mm}$	450	480
3	镦粗	$\Phi 350 \text{ mm} \times 1020 \text{ mm} \rightarrow \Phi 490 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$	450	360
4	镦粗	$\Phi 490 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \rightarrow \Phi 700 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$	450	180
5	镦粗	$\Phi 700 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \rightarrow \Phi 860 \text{ mm} \times 165 \text{ mm}$	450	180
6	冲孔	冲孔尺寸 $\Phi 330 \text{ mm}$	450	180
7	扩孔	表面温度低于 380°C 时回炉继续加热	450	180
8	扩孔	扩孔至 $\Phi 970 \text{ mm} \times \Phi 530 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$	450	180
9	机加工	机加工修整至 $\Phi 950 \text{ mm} \times \Phi 550 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$	—	—

制备的轧制试验坯料如图2所示,尺寸规格为 $\Phi 950 \text{ mm} \times \Phi 550 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。



图2 轧制试验坯料
Fig.2 Blank of rolling process

2.2 轧制过程

轧制过程主要分为5个阶段,对应轧制环件的轧制曲线及轧制过程分别如图3和图4所示:阶段0为原始坯料 $\Phi 950 \text{ mm}$;0~1阶段为初始咬合整圆过程,即主辊、锥辊、抱辊与环件坯料咬合接触,并对环件的圆度校圆,同时核算真实的压缩比;1~2阶段为工艺转变点,在咬合阶段的基础上,环件的圆度得到调整,表面温度因吊装、装机过程中的损失在变形热效应的作用下得到补偿,为下一步的轧

制做好了准备;2~3阶段为工艺过渡阶段,由坯料变形为过渡环件,此时的变形程度最为剧烈,外径增压了693 mm,亦是轧制的关键阶段,需要合理的轧制力与速度进给匹配,实现环件的轧制过渡,轧制过程中在环件上下表面、内外圆面以及圆角位置出现卷料、折叠、凹坑时,需要进行必要的人工干预;3~4阶段为过渡终了阶段,环件此时的表面温度以及外圆直径快速升高和长大,需要重新变化轧制进给速率,以保证过渡阶段的顺利完成;4~5阶段为轧制终了阶段,环件已接近尺寸要求,直径变大后的轧制风险也随之增大,此阶段需要对环件的圆度、高度进行修整,校正椭圆以及去除端面凹坑。

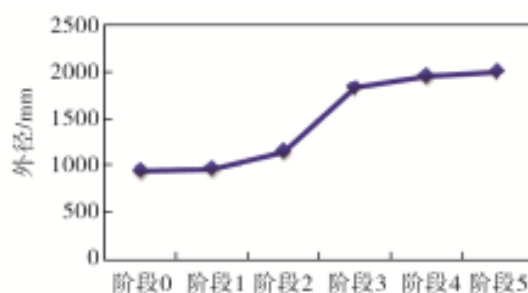


图3 轧制过程曲线
Fig.3 Curves of rolling process



图4 环件轧制过程
Fig.4 Rolling process of annulus

轧制的7055铝合金大型环件如图5所示,尺寸规格为 $\Phi 2000 \text{ mm} \times \Phi 1794 \text{ mm} \times 112 \text{ mm}$ 。

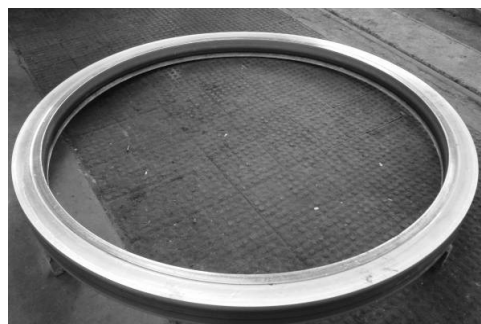


图5 轧制试验件
Fig.5 Annulus of rolling process

3 轧制试验结果分析

对轧制后的大型环件进行了固溶时效强化热处理，固溶时效热处理参数为：470 ℃×4 h，水冷；120 ℃×4 h，空冷。对环件的切向、径向、轴向三向试样进行金相显微组织观察，轧制试验件三向显微组织如图 6 所示。

由图 6 可以看出，切向、径向的显微组织相对较为均匀细化，而轴向显微组织极度不均匀，并有大量的条状未破碎组织存在。原因是：在轧制过程中，切向、径向得到充分的挤压塑性变形，晶粒细化，而轴向尺寸仅从 150 mm 变形至 110 mm，变形量相对较小，并且在轧制过程中伴随摩擦热与挤塑变热效应的综合作用，晶粒长大，故晶粒不均匀，且相对粗大。

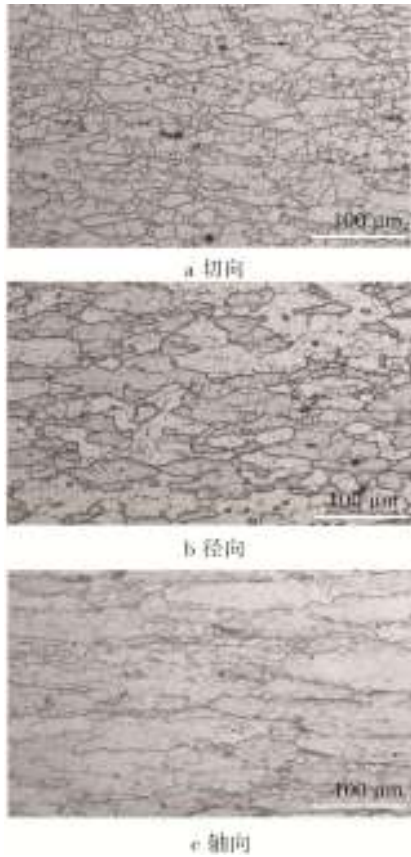


图 6 轧制试验件三向显微组织
Fig.6 Grain microstructure for different direction of annulus

轧制试验件的切向、径向、轴向力学性能如表 2 所示。由表 2 可知，轧制试验件的切向、径向、轴向三向的抗拉强度均高于 580 MPa，延伸率均大于

8%，其中切向和径向性能较高，轴向性能最低。根据 Hall-Petch 公式，即 $\sigma_s=\sigma_0+Kd^{1/2}$ ， d 值越大，强度越低，因轴向晶粒相对粗大，故轴向强度相对较低。

表 2 轧制环件力学性能
Table 2 Mechanical performance for annulus of rolling process

取样方向	室温力学性能		
	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_s /%
切向	610	585	10.0
径向	605	575	9.0
轴向	580	470	8.0

4 结论

制定的 7055 高强铝合金环件轧制的温度参数：始轧温度为 455 ℃，终轧温度为 380 ℃，轧制压缩比为 0.52。

对喷射成形锭坯进行了 4 次镦粗变形，1 次挤压变形，2 次扩孔变形，制备的轧制试验坯料尺寸为 $\Phi 950\text{ mm}\times\Phi 550\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 。

经过 5 个阶段的制过程，轧制的 7055 高强铝合金大型环件尺寸规格为 $\Phi 2000\text{ mm}\times\Phi 1794\text{ mm}\times 112\text{ mm}$ 。

7055 高强铝合金环件轧制的试验件，切向、径向、轴向三向的抗拉强度均高于 580 MPa，伸长率均大于 8%。其中，轴向性能较低，原因为轴向变形量相对较小，晶粒不均匀，且相对粗大，导致了力学性能偏低。

参考文献：

[1] 薛永春. 金属等温成形工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
XUE Yong-chun. Isothermal Metal Forming Processes[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1992.

[2] CHENG Yong-qi, CHEN Zhen-hua, XIA Wei-jun, et al. Microstructures and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheet Processed by Equal Channel Angular Rolling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(9):1369-1375.

[3] 伍态宾, 孔凡新, 赵治国. 2A12 铝合金薄壁壳体的近净成形加工技术研究[J]. 锻压技术, 2009, 34(4): 105—109.
WU Tai-bin, KONG Fan-xin, ZHAO Zhi-guo. Study on Near-net-shape Forming Process of Thin-wall Shell Body Made for 2A12 Aluminium Alloy[J]. Forging Technology, 2009, 34(4): 105—109.

- [4] CHANDRASEKARAN M, YONG Ming Shyan John. Effect of Materials and Temperature on the Forward Extrusion of Magnesium Alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 381: 308—319.
- [5] 朱光明, 杜凤山, 孙登月, 等. 板带轧制变形区内摩擦力分布的有限元模拟[J]. 冶金设备, 2005, 21(2): 1—4.
ZHU Guang-ming, DU Feng-shan, SUN Moon. Finite Element Simulation of Strip Rolling Deformation Zone Friction Distribution[J]. Metallurgical Equipment, 2005, 21(2): 1—4.
- [6] 王德尊. 金属力学性能[D]. 哈尔滨工业大学, 1993: 6—38.
WANG Zun-de. Mechanical Properties of the Metal State[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1993: 6-38.
- [7] CHENG Y Q, CHEN Z H, XIA W J, et al. Effect of Channel Clearance on Crystal Orientation Development in AZ31 Magnesium Alloy Sheet Produced by Equal Channel Angular Rolling[J]. Chin J Nonferrous Met, 2007, 184(1): 97—101.
- [8] IWANAGA K, TASHIRO H, OKAMOTO H, et al. Improvement of Formability from Room Temperature to Warm Temperature in AZ-31 Magnesium Alloy[J]. J Mater Process Tech, 2004, s155—156(1): 1313—1316.
- [9] OGAWA N, SHIOMI M, OSAKADA K. Forming Limit of Magnesium Alloy at Elevated Temperature for Precision Forging[J]. Machine Tools and Manufacture, 2002, 42: 607—614.
- [10] 朱光明, 杜凤山, 孙登月, 等. 板带轧制变形区内摩擦力分布的有限元模拟[J]. 冶金设备, 2005, 21(2): 1—4
ZHU Guang-ming, DU Feng-shan, SUN Deng-yue, et al. Finite Element Simulation of Strip Rolling Deformation Zone Friction Distribution[J]. Metallurgical Equipment, 2005, 21 (2): 1-4.
- [11] PALANISWAMY H, NGAILE G, ALTAN T. Finite Element Simulation of Magnesium Alloy Sheet Forming at Elevated Temperatures[J]. J Mater Proc Techn, 2004, 146 (1): 52—60.
- [12] KUBOTA K, MABUCHI M, HIGASHI K. Review Processing and Mechanical Properties of Fine-grained Magnesium Alloys[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34: 255—2262.
- [13] CHEN F K, HUANG T B, CHANG C K. Deep Drawing of Square Cups with Magnesium Alloy AZ31 Sheets[J]. Int J Machine Tools & Manuf, 2003, 43(15): 1553.
- [14] 赵永忠, 朱启建, 李谋渭. 中厚板控冷过程有限元模拟及在生产中的应用[J]. 冶金设备, 2001(6): 12-15.
ZHAO Yong-zhong, ZHU Jian, LI Mou-wei. Finite Element Analysis of Plate Temperature Field in the Process of Controlled Cooling and the Application in Production[J]. Metallurgical Equipment, 2001(6): 12-15.
- [15] TAKUDA H, YOSHII T, HATTA N. Finite-element Analysis of Formability of a Magnesium-Based Alloy AZ31 Sheet[J]. J Mater Proc Techn, 1999, 29(8): 135.
2016-05-24