

锻造工艺对大规格 2219 铝合金锻环综合力学性能的影响

王 博, 边颖帅, 岳战国, 王亚安, 郭小敏, 刘建林, 李 艳
(西安航空制动科技有限公司 锻造厂, 陕西 兴平 713100)

摘要: 采用 1 t 电液自由锻锤制备了大规格 2219 铝合金锻环 ($\Phi 690 \text{ mm} \times \Phi 448 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$), 研究了 2219 铝合金锻环的不同锻造工艺, 检测了锻环切向、径向以及轴向的室温力学性能, 分析了不同锻造工艺下的总锻造比对锻环抗拉强度、规定非比例延伸强度和伸长率的影响。结果表明: 随总锻造比增大, 锻环的切向、径向以及轴向的抗拉强度先增加后趋于稳定, 规定非比例延伸强度和伸长率先增加后减小, 因此, 适当地增加总锻造比有利于提高锻环的综合力学性能。当采用对原料进行径向十字锻造后, 再进行连续镦粗、冲孔、扩孔以及 T6 态热处理的工艺方案, 其总锻造比为 9.8, 制备得到的大规格 2219 铝合金锻环的综合力学性能最优, 且远超 GJB 2057A—2018 中的要求。

关键词: 2219 铝合金; 锻造工艺; 力学性能; 锻造比; 锻环

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.11.006

中图分类号: TG319 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 11-0035-05

Influence of forging process on comprehensive mechanical properties for large-size 2219 aluminum alloy forging rings

Wang Bo, Bian Yingshuai, Yue Zhanguo, Wang Ya'an, Guo Xiaomin, Liu Jianlin, Li Yan
(Forging Factory, Xi'an Aviation Brake Technology Co., Ltd., Xingping 713100, China)

Abstract: The large-size 2219 aluminium alloy forging rings ($\Phi 690 \text{ mm} \times \Phi 448 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$) was prepared by 1 t electro-hydraulic free forging hammer, and the different forging processes of 2219 aluminum alloy forging rings were studied. Then, the tangential, radial and axial mechanical properties of forging rings at room temperature were detected, and the influences of total forging ratio on tensile strength, specified non-proportional extension strength and elongation of forging rings under different processes were analyzed. The results show that with the increasing of the total forging ratio, the tensile strengths in the tangential, radial and axial directions increase first and then become stable, and the specified non-proportional extension strength and elongation increase first and then decrease. Thus, appropriately increasing the total forging ratio is conducive to improve the comprehensive mechanical properties of forging rings. When the process scheme that the raw material was first processed by radial cross forging and then upsetting, punching, hole expansion and T6 state heat treatment was used, its total forging ratio is 9.8, the comprehensive mechanical properties of the prepared large-size 2219 aluminum alloy forging rings are optimal and far exceed the requirements in GJB 2057A—2018.

Key words: 2219 aluminium alloy; forging process; mechanical property; forging ratio; forging rings

已全面取代 2014 和 2A14 铝合金, 成为大型运载火箭贮箱主体材料的 2219 铝合金, 是一种可热处理强化的变形铝合金, 在可锻性上, 较 7XXX 铝合金更具优势^[1-3]。同时, 又因其优异的耐蚀性、焊接性以及无低温脆性等特点使其具有重要的研究价值^[4-6]。但是, 由于其力学性能的稳定性和均匀性需求, 以及产品规格的提升, 严重制约了 2219 铝合

金作为高性能材料的应用^[7]。

近年来, 研究者们为提高 2219 铝合金的力学性能进行了大量工作。马云龙等^[8]研究发现, 当淬火水温为 40 °C 时, 锻环综合力学性能最优。王健等^[9]研究了 2219 铝合金的热轧工艺, 通过改变轧制温度和变形量, 使得合金抗拉强度达到 450 MPa, 伸长率为 20.2%。姚梦等^[10]通过改变锻造工艺制备了法兰锻件, 使其径向伸长率比轴向的高 57%。杨晓禹等^[4]优化热处理工艺参数, 发现淬火温度为 530~540 °C、冷变形量为 8%~12%、时效温度为 150~160 °C、保温 14 h 时, 2219 铝合金板材的性能最优。目前, 主要通过淬火+冷变形+人工时效

收稿日期: 2023-03-13; 修订日期: 2023-06-15

作者简介: 王 博 (1995-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: 447641988@qq.com

通信作者: 岳战国 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: 784244507@qq.com

(T852 热处理) 的方式来提高 2219 铝合金的力学性能, 但这也对其工业化的生产应用产生了一定的约束。但是, 如果仅通过改变锻造工艺和采用常规的热处理方式 (T6 态热处理) 即可以提高 2219 铝合金的力学性能, 那么其工业应用的研究将更具实际意义。

本文针对 2219 铝合金锻环不同锻造工艺的总锻造比, 分析了不同锻造工艺对其综合力学性能的影响, 进一步优化了 2219 铝合金锻环的锻造工艺。

1 实验材料与方法

以工业用 2219 铝合金铸棒为原材料, 规格为 $\Phi 300 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$, 化学成如表 1 所示, 符合 GB/T 3190—2020^[11] 的要求。对原材料进行不同工艺的自由锻, 得到尺寸为 $(\Phi 660 \pm 5) \text{ mm} \times (\Phi 448 \pm 8) \text{ mm} \times (75 \pm 5) \text{ mm}$ 的锻环, 并对锻环进行相同的 T6 态热处理。从 T6 态热处理后经不同锻造工艺制得的锻环上, 分别切取切向、径向和轴向的试样块, 再按照 GB/T 228. 1—2021^[12] 加工为标准试样进行室温拉伸力学实验。锻造工艺如表 2 所示, 共 4 种不同的锻造工艺方案。采用箱式电阻炉加热坯料, 始、终锻温度分别为 460 和 360 $^{\circ}\text{C}$ 。采用 1 t 电液自由锻锤完成自由锻过程。采用立式铝合金淬火炉和时效炉进行 T6 态热处理。采用 AG-I 250KN 电子万能实验机进行拉伸力学实验, 实验温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 40%, 拉伸速率为 2 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。为了保证实验结果的可重复性和准确性, 每组实验至少测 3 次。

表 1 2219 铝合金化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 2219 aluminum alloy (% , mass fraction)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	V	Zr	Al
0.20	0.30	6.20	0.28	0.02	0.10	0.05	0.06	0.14	余量

表 2 不同锻造工艺方案

Table 2 Different forging process schemes

方案	工艺
1	连续镦粗+冲孔、扩孔
2	拔长+连续镦粗+冲孔、扩孔
3	径向十字锻造+连续镦粗+冲孔、扩孔
4	双径向十字锻造+连续镦粗+冲孔、扩孔

2 结果与分析

2.1 不同锻造工艺的总锻造比分析

锻造可以有效消除材料内部的缺陷, 并且改善

材料的力学性能, 使金属组织发生变化, 并产生各向异性^[13-14]。锻造比在一定程度上可以反映锻造的变形程度, 而选用合适的锻造比, 可以大大保证铸件的质量和简化锻造工序, 提高生产效率^[13]。

通过《锻压手册》^[14] 和不同锻造方法可知, 锻件在不同工艺下的锻造比可以通过式 (1)~式 (5) 进行计算。式 (1) 可得到单向拔长时的锻造比 K_L , 式 (2) 可得到单向镦粗时的锻造比 K_H , 式 (3) 可得到径向十字锻造的锻造比 K_{HL} , 式 (4) 可得到马架扩孔时的锻造比 K_M , 式 (5) 可得到连续镦粗时的锻造比 K_{HH} 。在经过不同锻造工艺得到锻件时, 其总锻造比 K 可以通过各工艺的锻造比之和得到。

$$K_L = \frac{D_1^2}{D_2^2} = \frac{l_2}{l_1} \quad (1)$$

$$K_H = \frac{H_0}{H_1} \quad (2)$$

$$K_{HL} = K_{L1} + K_{L2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} + \frac{D_3^2}{D_4^2} = \frac{l_2}{l_1} + \frac{l_4}{l_3} \quad (3)$$

$$K_M = \frac{D_0 - d_0}{D_{11} - d_{11}} \quad (4)$$

$$K_{HH} = K_{H1} \cdot K_{H2} \cdot \dots \cdot K_{Hn} = \frac{H_0}{H_1} \cdot \frac{H_1}{H_2} \cdot \dots \cdot$$

$$\frac{H_{n-1}}{H_n} = \frac{H_0}{H_n} \quad (n \geq 1) \quad (5)$$

式中: D_1 为锻件原始或经径向十字锻造时第 1 次拔长前的直径; D_2 为锻件单向拔长后或经径向十字锻造时第 1 次拔长后的直径; D_3 为锻件经径向十字锻造时第 2 次拔长前的直径; D_4 为锻件经径向十字锻造时第 2 次拔长后的直径; l_1 为锻件原始或经径向十字锻造时第 1 次拔长前的长度; l_2 为锻件单向拔长后或经径向十字锻造时第 1 次拔长后的长度; l_3 为锻件经径向十字锻造时第 2 次拔长前的长度; l_4 为锻件经径向十字锻造时第 2 次拔长后的长度; H_0 为锻件原始高度或连续镦粗时的初始高度; H_1 为锻件单向镦粗后或连续镦粗时第 1 次镦粗后的高度; H_2 为锻件连续镦粗时第 2 次镦粗后的高度; H_{n-1} 为锻件连续镦粗时第 $(n-1)$ 次镦粗后的高度; H_n 为锻件连续镦粗时第 n 次镦粗后的高度; n 为连续镦粗的次数; D_0 为马架扩孔前锻环的外径; D_{11} 为马架扩孔后锻环的外径; d_0 为马架扩孔前锻环的内径; d_{11} 为马架扩孔后锻环的内径; K_{L1} 和 K_{L2} 分别为经过 1 次和 2 次坯料改锻的单向拔长锻造比;

K_{H1} 、 K_{H2} 和 K_{Hn} 为在连续镦粗时第 1 次、第 2 次、第 n 次镦粗时的锻造比。

不同锻造工艺的示意图如图 1 所示。其中，方案 1 锻造工艺如图 1a 所示，直接将未改锻的高度为 220 mm (H_0) 的原料单向镦粗至 80 mm (H_1)，再在锻坯中心冲 $\Phi 120$ mm 的内孔，形成 $\Phi 500$ mm \times

$\Phi 120$ mm $\times 80$ mm 的锻环，最后，通过马架扩孔锻为 $\Phi 660$ mm $\times \Phi 448$ mm $\times 75$ mm 的锻环，即马架扩孔时 D_0 为 $\Phi 500$ mm、 d_0 为 $\Phi 120$ mm、 D_{11} 为 $\Phi 660$ mm、 d_{11} 为 $\Phi 448$ mm，分别将 H_0 、 H_1 、 D_0 、 D_{11} 、 d_0 、 d_{11} 带入式 (2) 和式 (4)，计算可得方案 1 锻造工艺的总锻造比为 4.54。

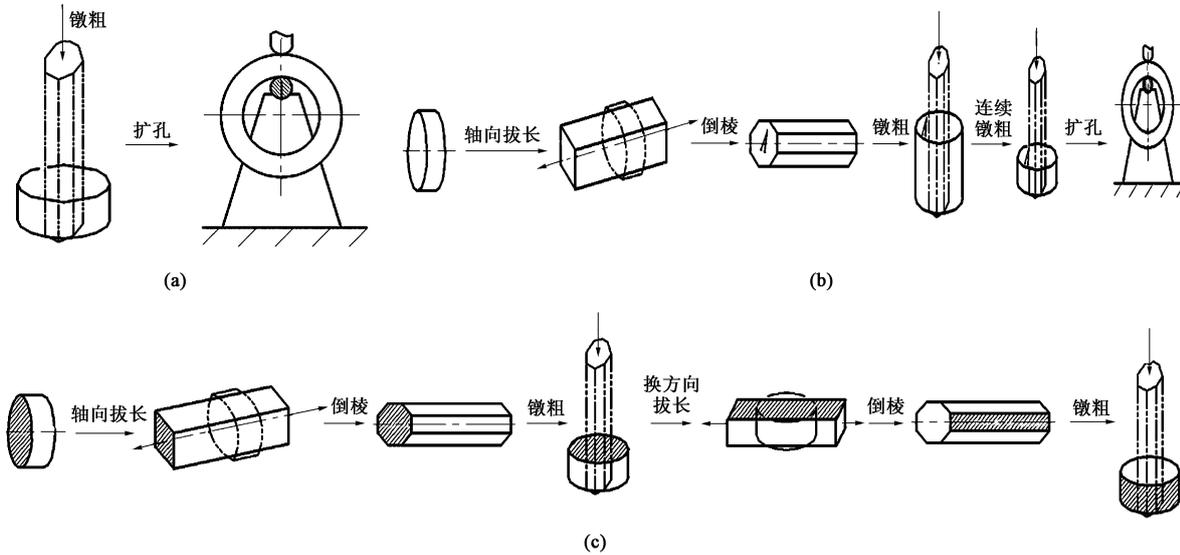


图 1 不同锻造工艺示意图

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3

Fig. 1 Schematic diagrams of different forging processes

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3

方案 2 锻造工艺如图 1b 所示，首先，将经过 1 次改锻后长度为 220 mm (l_1) 的原料沿轴向单向拔长至 350 mm (l_2)，将未改锻的高度为 350 mm (H_0) 的原料沿轴向镦粗至 175 mm (H_1)，再继续沿轴向镦粗至 80 mm (H_2)，最后，重复 1 组的冲孔和扩孔工艺。分别将 l_1 、 l_2 、 H_0 、 H_1 、 H_2 、 D_0 、 D_{11} 、 d_0 和 d_{11} 带入式 (1)、式 (2)、式 (4) 和式 (5) 中，计算可得方案 2 锻造工艺的总锻造比为 7.76。

方案 3 锻造工艺如图 1c 所示，对原料先进行径向十字锻造改锻后，再进行冲孔和扩孔工序。首先，将经过 1 次改锻后长度为 220 mm (l_1) 的原料沿轴向单向拔长至 360 mm (l_2)，再镦粗至 230 mm (l_3)，接着沿横截面拔长至 360 mm (l_4)，最后，进行方案 2 中的连续镦粗工序和方案 1 中的冲孔、扩孔工序。分别将 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 带入式 (3) 计算出拔长-镦粗-拔长的锻造比，再将 H_0 、 H_1 、 H_2 、 D_0 、 D_{11} 、 d_0 、 d_{11} 带入式 (2)、式 (4) 和式 (5) 中，计算可得方案 3 锻造工艺的总锻造比为 9.80。

方案 4 为对原料进行双径向十字锻造改锻后 (两次图 1c 所示的工序)，再进行方案 2 中的连续

镦粗工序和方案 1 中的冲孔、扩孔工序，径向十字锻造改锻过程和方案 3 相同。因此，计算可得方案 4 锻造工艺的总锻造比为 12.70。

可以看出，随着变形程度的复杂化，锻造时的总锻造比越来越大，每锻造火次后的累计变形量逐渐增加，合适的总锻造比有利于简化锻造工序以及提高生产效率^[13-14]。

2.2 锻件的力学性能分析

在锻件上取切向、径向和轴向试样，如图 2 所示^[15]，再通过室温拉伸实验，获得不同锻造工艺下锻环试样的抗拉强度 R_m 、规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 以及伸长率 A 。图 3 为总锻造比 K 与 R_m 的关系曲线，从图 3 中可以看出，随着 K 的增加，整个锻造体系的 R_m 呈现出显著的先增大后趋于稳定的变化趋势。当锻造工艺的总锻造比为 9.80 时，锻件的抗拉强度 (切向、径向、轴向) 已达到饱和，较最小总锻造比的工艺提高 11%，远超 GJB 2057A—2018^[15] 的要求。 K 由 4.54 增大至 7.76 时，锻件的切向抗拉强度由 417 MPa 增加至 430 MPa，径向抗拉强度由 400 MPa 增加至 426 MPa，轴向抗拉强度由 380 MPa 增加至

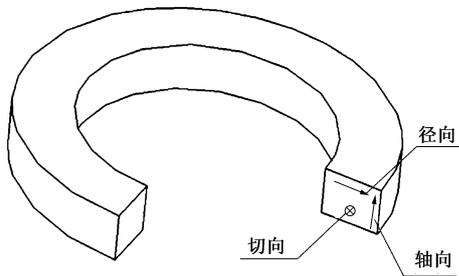


图 2 取样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling

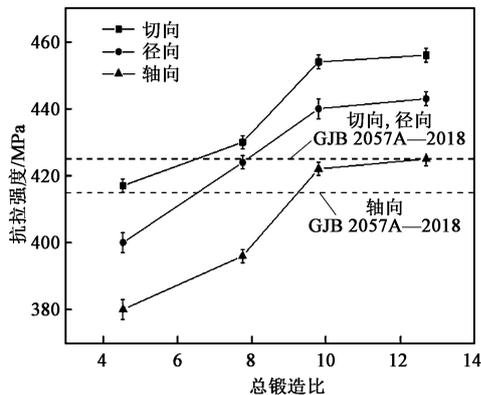


图 3 总锻造比对抗拉强度的影响

Fig. 3 Effect of total forging ratio on tensile strength

396 MPa。K 由 7.76 增大至 9.80 时，锻件的切向抗拉强度由 430 MPa 增加至 454 MPa，径向抗拉强度由 426 MPa 增加至 440 MPa，轴向抗拉强度由 396 MPa 增加至 422 MPa。而当 K 由 9.80 增大至 12.70 时，锻件切向、径向、轴向的抗拉强度分别增加了 2、3 和 3 MPa。可以看出，提高总锻造比，锻件具有明显的强化效果，但是当工艺复杂化到一定程度时，这种强化效果开始减弱。

图 4 为总锻造比 K 与规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 的关系曲线，从图 4 中可以看出，随着 K 的增加，整个锻造体系的 $R_{p0.2}$ 呈现出显著的先增大后减小的变化趋势。K 由 4.54 增大至 7.76 时，锻件的切向 $R_{p0.2}$ 由 279 MPa 增加至 312 MPa，径向 $R_{p0.2}$ 由 317 MPa 增加至 321 MPa，轴向 $R_{p0.2}$ 由 279 MPa 增加至 313 MPa。K 由 7.76 增大至 9.80 时，锻件的切向 $R_{p0.2}$ 由 312 MPa 增加至 340 MPa，径向 $R_{p0.2}$ 由 321 MPa 增加至 336 MPa，轴向 $R_{p0.2}$ 由 313 MPa 增加至 320 MPa。而当 K 增大至 12.70 时，锻件的切向、径向、轴向 $R_{p0.2}$ 均开始减小。图 5 为总锻造比 K 与伸长率 A 的关系曲线，从图 5 中可以看出，随着 K 的增加，整个锻造体系的 A 同样先增大后减小。当 K 为 9.80 时，即通过对原料进行单径向十字

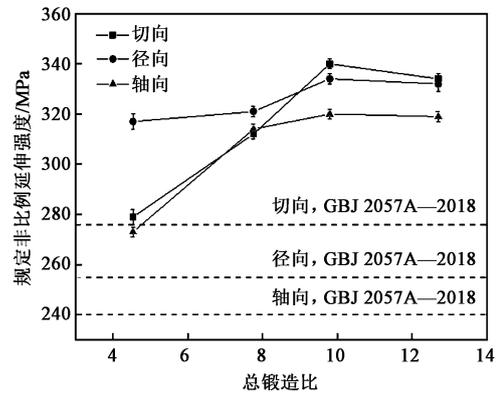


图 4 总锻造比对规定非比例延伸强度的影响

Fig. 4 Effect of total forging ratio on specified non-proportional extension strength

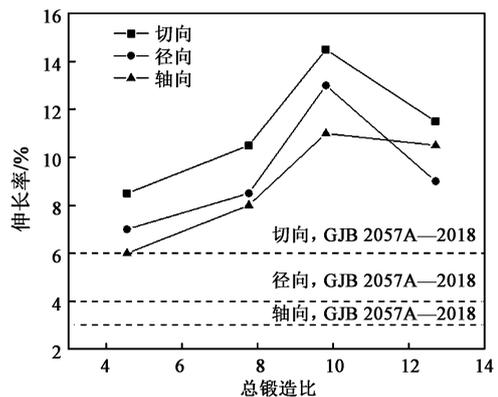


图 5 总锻造比对伸长率的影响

Fig. 5 Effect of total forging ratio on elongation

锻造改锻后，再进行连续镦粗、冲孔以及扩孔工序制备的 2219 铝合金锻环，具有最佳的综合力学性能，并且远超 GJB 2057A—2018^[15] 的要求和其他已有报道^[8] 的 2219 铝合金锻环。

锻造通过升温使材料软化，使原子间结合力减小，原子动能增加，并且导致位错密度增加，位错的攀移运动和滑移系增加，从而使得 2219 铝合金锻环的力学性能得到优化^[7]。通过锻造对 2219 铝合金铸棒进行了有效的热塑性变形，而热塑性变形过程中不同方向的塑性变形量对锻件的综合力学性能有着极大的影响^[16-17]。通过对原料进行径向十字锻造改锻后，再进行连续镦粗、冲孔以及扩孔工序制备得到的 2219 铝合金锻环，在提高总锻造比的同时，也从不同方向上增加了锻件的塑性变形量，从而使得细晶强化效果得到增强以及组织更加均匀化，因此，锻件的综合力学性能得到提升^[17]。但是，总锻造比和塑性变形量的继续增加，并不能持续优化 2219 铝合金锻环的力学性能。这是由于：进行双径向十字锻造改锻时，锻造火次明显增加，削减了细

晶强化的作用, 从而使得 2219 铝合金锻环的综合力学性能下降^[16]。

3 结论

(1) 对铸棒进行径向十字改锻后, 再进行连续镦粗、冲孔、扩孔, 且采用常规 T6 态热处理制备的大规格 2219 铝合金锻环, 其总锻造比为 9.80 时, 锻件的力学性能最优且远超 GJB 2057A—2018 要求: 切向、径向以及轴向抗拉强度分别为 454、440 和 422 MPa, 切向、径向以及轴向规定非比例延伸强度分别为 340、336 和 320 MPa, 切向、径向以及轴向伸长率分别为 14.5%、13.0% 和 11.0%。

(2) 随着总锻造比的增加, 大规格 2219 铝合金锻环的抗拉强度先增加后趋于稳定, 规定非比例延伸强度和伸长率先增加后减小, 适当的增加总锻造比有利于提高锻件的综合力学性能。

参考文献:

- [1] 刘春飞. 新一代运载火箭箱体材料的选择 [J]. 航空制造技术, 2003, (2): 22-27.
Liu C F. Material selection for new-type launch vehicle tank [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003, (2): 22-27.
- [2] 海丰龙, 苏玉长, 廖思敏, 等. 微观组织对 2A14 铝合金轮毂力学性能和腐蚀性能的影响 [J]. 有色金属工程, 2020, 10 (8): 45-51.
Hai F L, Su Y C, Liao S M, et al. Effect of microstructure on mechanical and corrosion properties of 2A14 aluminum alloy wheels [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10 (8): 45-51.
- [3] Kaibyshev R, Sitdikov O, Mazurina I, et al. Deformation behavior of a 2219 Al alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 334 (1-2): 104-113.
- [4] 杨晓禹, 高宝亭, 刚建伟, 等. 2219 铝合金 T87 状态板材生产过程中的热处理工艺研究 [J]. 轻合金加工技术, 2019, 47 (6): 30-35.
Yang X Y, Gao B T, Gang J W, et al. Study on heat treatment technology of 2219-T87 aluminum alloy plate in production process [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2019, 47 (6): 30-35.
- [5] 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.
- [6] 田荣臻, 王祝堂. 铝合金及其加工手册 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000.
Tian R Z, Wang Z T. Aluminum Alloy and Processing Manual [M]. Changsha: Central South University Press, 2000.
- [7] 陈镇扬, 彭文飞, 牛波凯, 等. 超大型环形件用 2219 铝合金的热变形本构方程及热加工图 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 83-92.
Chen Z Y, Peng W F, Niu B K, et al. Hot deformation constitutive equation and hot processing map of 2219 aluminum alloy for super large rings [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 83-92.
- [8] 马云龙, 陈送义, 王习锋, 等. 淬火水温对 2219 铝合金锻环组织和力学性能的影响 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2020, 47 (8): 118-123.
Ma Y L, Chen S Y, Wang X F, et al. Effect of quenching water temperature on microstructure and mechanical property of 2219 aluminum alloy forging ring [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2020, 47 (8): 118-123.
- [9] 王健, 卢雅琳, 周刚, 等. 热轧工艺对 2219 铝合金组织和力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2018, 43 (10): 98-103.
Wang J, Lu Y L, Zhou G, et al. Effect of hot rolling on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43 (10): 98-103.
- [10] 姚梦, 张文学, 马康, 等. 锻造工艺对 2219 铝合金焊接法兰组织与性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (4): 39-44.
Yao M, Zhang W X, Ma K, et al. Effect of forging process on microstructure and properties of 2219 aluminum alloy welded flange [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (4): 39-44.
- [11] GB/T 3190—2020, 变形铝及铝合金化学成分 [S].
GB/T 3190—2020, Chemical composition of wrought aluminium and aluminium alloys [S].
- [12] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [13] 洪慎章, 李名绕. 锻造技术速查手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
Hong S Z, Li M R. Quick Reference Manual for Forging Techniques [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [14] 中国机械工程学会塑性工程分会. 锻压手册 第 1 卷: 锻造 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
China Society for Technology of Plasticity, CMES. Forging Handbook Volume 1: Forging [M]. 3rd Edition. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [15] GJB 2057A—2018, 航天用 2219 铝合金锻件规范 [S].
GJB 2057A—2018, Specification for aluminium alloy 2219 forgings for aerospace [S].
- [16] 邹杰, 彭文飞, 陈镇扬. 大型环形件用 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.
- [17] 周鹏, 信瑞山, 邱焱, 等. 大型锻件内部孔隙性缺陷变化对冲击性能的影响 [J]. 大型铸锻件, 2021, (3): 15-18.
Zhou P, Xin R S, Qiu Y, et al. Influence of internal porosity defect variation on impact properties of large forgings [J]. Heavy Casting and Forging, 2021, (3): 15-18.