

DOI: 10.11973/jxgccl201912011

同步冷却热成形+时效后 AA2024 铝合金的显微组织及拉伸性能

陈国亮^{1,2}, 陈明和², 王春艳¹, 王宁², 孙佳伟²

(1.常州机电职业技术学院,常州 213164;2.南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

摘要:在 435~505 °C 下对 H18 态 AA2024 铝合金板料进行同步冷却热成形,并在 150~230 °C 下时效处理 4~12 h,研究了时效后的显微组织和拉伸性能。结果表明:同步冷却热成形+时效后,试验合金中的主要强化相为 Al_2CuMg 相;随时效温度的升高, Al_2CuMg 相的尺寸增大、数量变多,时效时间对该相的影响较小;试验合金的抗拉强度和屈服强度随成形温度的升高而增大,随时效温度的升高先增大后减小;在成形温度不高于 475 °C 条件下,试验合金的抗拉强度和屈服强度随时效时间的延长呈先增大后降低的变化趋势,并在时效 8 h 时达到峰值,在成形温度高于 475 °C 条件下,时效时间对合金强度的影响很小。

关键词: 同步冷却热成形;AA2024 铝合金;显微组织;拉伸性能

中图分类号: TG178

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2019)12-0057-05

Microstructure and Tensile Properties of AA2024 Aluminum Alloy after Hot Forming with Synchronous Cooling and Aging

CHEN Guoliang^{1,2}, CHEN Minghe², WANG Chunyan¹, WANG Ning², SUN Jiawei²

(1.Changzhou Institute of Mechatronic Technology, Changzhou 213164, China; 2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: AA2024-H18 aluminum alloy sheet was hot formed at 435—505 °C with synchronous cooling, and then aged at 150—230 °C for 4—12 h. The microstructure and mechanical properties after aging were studied. The results show that the main strengthening phase in the test alloy after hot forming with synchronous cooling and aging was Al_2CuMg . The size and quantity of Al_2CuMg phase increased with the aging temperature, however, the aging time had little effect on Al_2CuMg phase. The tensile strength and yield strength of the test alloy increased with the increase of the forming temperature, and increased first and then decreased with the increase of the aging temperature. When the forming temperature was not higher than 475 °C, the tensile strength and yield strength of the test alloy increased first and then decreased, and reached peak values when aging for 8 h. When the forming temperature was higher than 475 °C, the aging time had little influence on the strength of the alloy.

Key words: hot forming with synchronous cooling; AA2024 aluminum alloy; microstructure; tensile property

0 引言

同步冷却热成形(HFSC)工艺是对可热处理强化铝合金同时进行固溶处理和冲压成形的一种新工艺^[1-2];该工艺将可热处理强化铝合金板料加热到成

形温度并保温一段时间,使合金原子最大限度溶解到基体中并实现组织均匀化,然后将板料快速移入恒定为室温的模具中进行冲压成形并保压,通过模具使板料快速冷却以获得过饱和固溶体。在同步冷却热成形后,对成形件进行相应的时效处理使组织中析出强化相,从而获得形状和力学性能均满足使用要求的零件^[3]。与传统冷成形工艺^[4]相比,同步冷却热成形过程中板料在高温状态下成形,高温下

收稿日期:2019-07-01;修订日期:2019-10-15

作者简介:陈国亮(1978—),男,江西玉山人,讲师,博士

板料的塑性好、变形抗力低,因此成形时变形量大,成形后制品的回弹小^[5];此外,板料在闭合模具中利用与模具之间的热传递进行冷却,不仅可以消除淬火变形^[6],提高制品成形精度,而且可以省去冷却工序、简化生产流程,从而降低生产成本。与传统温/热成形工艺^[7-8]相比,同步冷却热成形工艺只需对铝合金板料进行固溶处理,能耗较低,并且加热时间可控,最终制品不会出现晶粒粗大等组织缺陷^[9]。

目前,同步冷却热成形工艺的研究内容主要集中在 2000 和 6000 系铝合金的工艺可行性^[10]和成形性能^[5,11-13],以及该工艺对 AA2024 铝合金强化机制的影响^[7]等方面,尚未涉及成形温度及之后的时效温度、时效时间等工艺参数对 AA2024 铝合金最终显微组织和力学性能的影响。为此,作者在不同工艺参数下对 AA2024-H18 铝合金板料进行同步冷却热成形+时效处理,研究了时效后试样的显微组织和拉伸性能,拟为 AA2024 铝合金板料的同步冷却热成形工艺研究提供试验依据。

1 试样制备与试验方法

试验材料为 AA2024-H18 铝合金轧制板料,实测化学成分(质量分数/%)为 0.4Si,0.3Fe,4.1Cu,0.67Mn,1.52Mg,0.03Cr,0.18Zn,0.06Ti,余 Al。在 AA2024 铝合金板料上截取尺寸为 184 mm×80 mm×0.8 mm(长度×宽度×厚度)的试样,宽度沿轧制方向。

在马弗炉中将试样加热到成形温度(435,455,475,495,505 ℃)并保温 5 min,随后快速移动到室温模具中,使用高速液压机进行同步冷却热成形,成形工艺及成形试样的尺寸见图 1,保压时间为 1 min,利用冷却管路保证模具在试验过程中始终处于室温状态。在马弗炉中对成形试样进行人工时效处理,时效温度分别为 150,170,190,210,230 ℃,时效时间为 4,8,12 h,出炉后空冷。在加热过程中,采用 2 个测量精度为±1 ℃的 K 型热电偶,分别用于控制炉温与测定试样温度。

在时效处理后的试样 R5 mm 圆角处截取直径 3 mm 的圆片,机械抛光及离子减薄后,利用 JEM-2100 型透射电镜(TEM)观察其微观形貌,使用附带的能谱仪(EDS)进行微区成分分析。利用线切割设备在试样上加工出拉伸试样,取样位置和试样尺寸见图 2,使用特制夹具在 RG2000-20 型电子拉伸试验机上进行拉伸试验,应变速率为 0.000 25 s⁻¹。

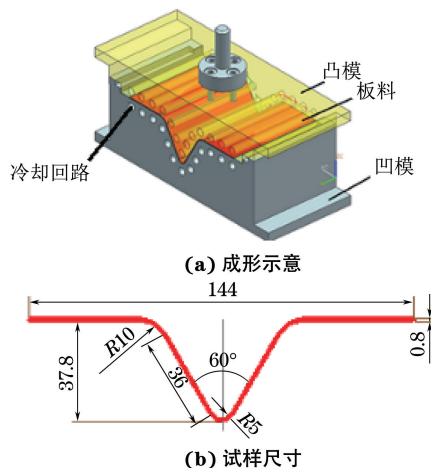


图 1 同步冷却热成形工艺示意及成形试样的尺寸
Fig.1 Schematic of hot forming process with synchronous cooling (a) and size of formed sample (b)

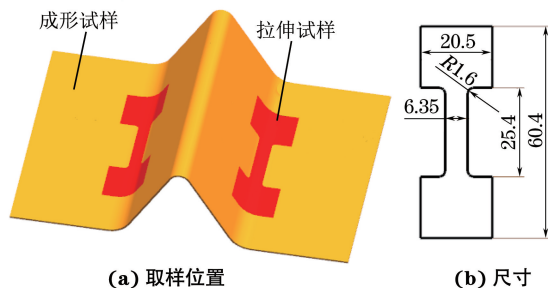


图 2 拉伸试样的取样位置及尺寸
Fig.2 Sampling position (a) and size (b) of tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图 3 可以看出,经过同步冷却热成形+时效处理后,试验合金组织中存在大量位错和细针状颗粒(如箭头所示)。采用传统“先成形后固溶处理”工艺时,由于在固溶处理加热和保温过程中发生了静态回复和静态再结晶,可热处理强化铝合金组织中的位错密度很低;而在同步冷却热成形过程中,试验合金先通过加热和保温获得静态再结晶组织,再在降温过程中进行成形,成形时的动态回复不能完全消除塑性变形产生的位错,因此试验合金中存在大量位错。

由图 4 可知,同步冷却热成形+时效处理后试验合金中的细针状颗粒为 Al₂CuMg 相。细针状 Al₂CuMg 相是一种强化相,能够钉扎位错^[14],形成沉淀强化效应。

由图 5 可以看出:在 150 ℃下时效 8 h 后,试验合金的晶内和晶界均只有少量针状 Al₂CuMg 相析出;随着时效温度的升高,Al₂CuMg 相的尺寸增大,

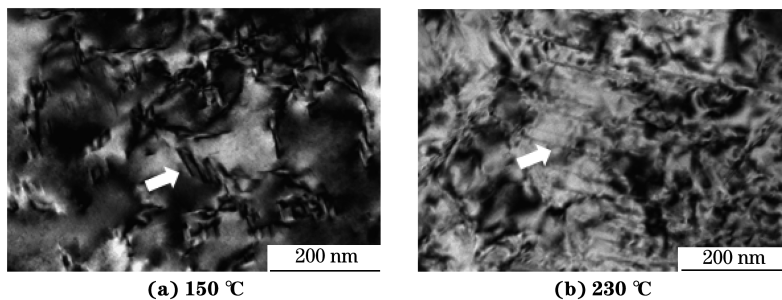


图 3 495 °C 同步冷却热成形+不同温度时效处理 8 h 后试验合金的 TEM 形貌

Fig.3 TEM micrographs of test alloy after hot forming at 495 °C with synchronous cooling and then aging at different temperatures for 8 h

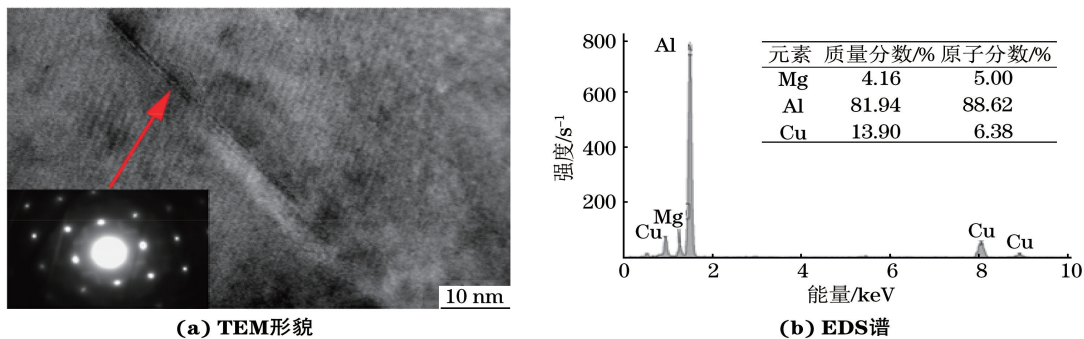


图 4 495 °C 同步冷却热成形+190 °C 时效 8 h 后试验合金中细针状颗粒物的 TEM 形貌和 EDS 谱

Fig.4 TEM micrograph (a) and EDS pattern (b) of fine-needle-like particles in test alloy after hot forming at 495 °C with synchronous cooling and then aging at 190 °C for 8 h

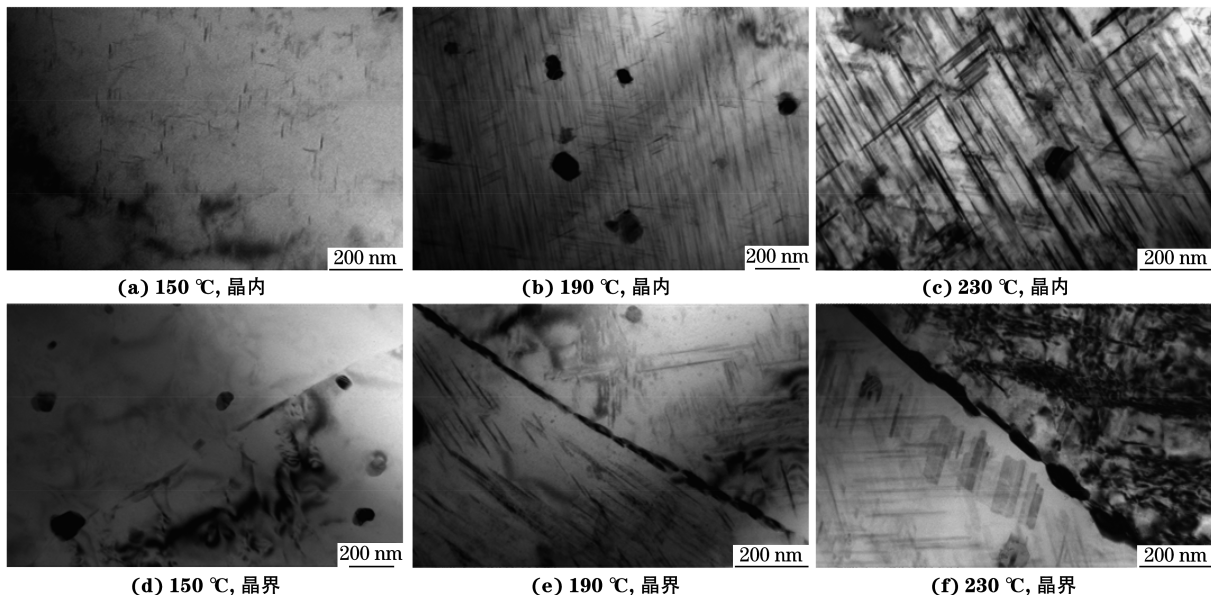


图 5 495 °C 同步冷却热成形+不同温度时效 8 h 后试验合金中第二相的 TEM 形貌

Fig.5 TEM micrographs of second phases in test alloy after hot forming at 495 °C with synchronous cooling and then aging at different temperatures for 8 h: (a-c) in grains and (d-f) on grain boundaries

分布变得越来越密集;当时效温度升至 230 °C 时, Al_2CuMg 相呈粗大板条状布满晶内和晶界。

由图 6 可以看出,在时效温度 190 °C 下,随着时效时间的延长,细针状 Al_2CuMg 相的尺寸没有显著变化,只是分布密度略有增加。与时效温度相比,

时效时间对 Al_2CuMg 相尺寸、形貌及分布情况的影响相对较小。此外,由图 5 和图 6 还可以看出,试验合金的晶内还存在少量颗粒状第二相,这些第二相为弥散相 $\text{Cu}_2\text{Mn}_3\text{Al}_{20}$ [9]。 $\text{Cu}_2\text{Mn}_3\text{Al}_{20}$ 是自然时效态 AA2024 铝合金中的主要强化相,其尺寸和数量

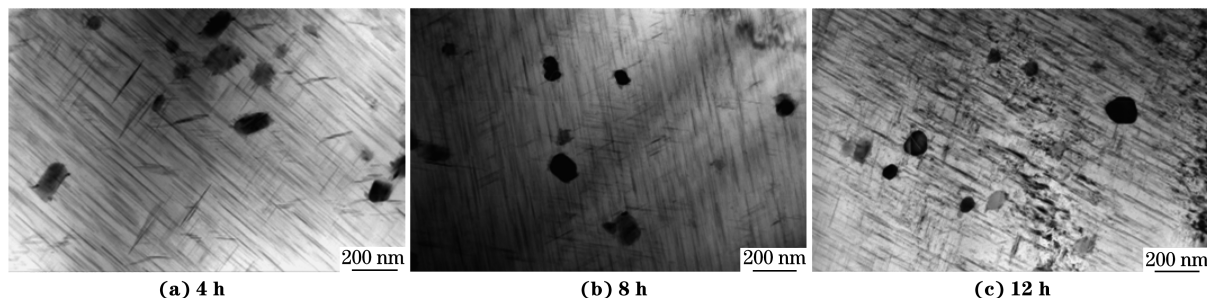


图 6 495 °C 同步冷却热成形+190 °C 时效不同时间后试验合金中第二相的 TEM 形貌

Fig.6 TEM micrographs of second phases in test alloy after hot forming at 495 °C with synchronous cooling and then aging at 190 °C for different times

由成形温度决定^[14],基本不受时效时间和时效温度的影响;该相对铝合金基体的强化作用弱于 Al_2CuMg 相的。

2.2 拉伸性能

由图 7 和图 8 可以看出,同步冷却热成形+时效后,试验合金的抗拉强度和屈服强度均随成形温度的升高而增大。成形温度越高,合金原子的动能越大,在铝合金基体中的溶解度越大;在后继时效处理过程中较高含量的合金原子以针状 Al_2CuMg 相的形式析出,从而提高了合金的强度。时效温度的升高会促使 Al_2CuMg 相的数量增加,从而增强其

对位错的钉扎作用;但是当时效温度高于 190 °C 时, Al_2CuMg 相呈粗大板条状,对位错的钉扎作用相比细针状 Al_2CuMg 相有所降低,且容易造成特定的取向裂纹^[15],此外晶界上密集分布的板条状 Al_2CuMg 相导致晶界弱化,在外力作用下易发生沿晶断裂^[16]。因此,相同温度同步冷却热成形试验合金的抗拉强度和屈服强度随时效温度的升高先增后降,且均在时效温度为 190 °C 时达到峰值。

由图 8 还可以看出:在 435~475 °C 下同步冷却热成形+190 °C 时效处理后,试验合金的抗拉强度和屈服强度随时效时间的延长基本呈先增大后降低

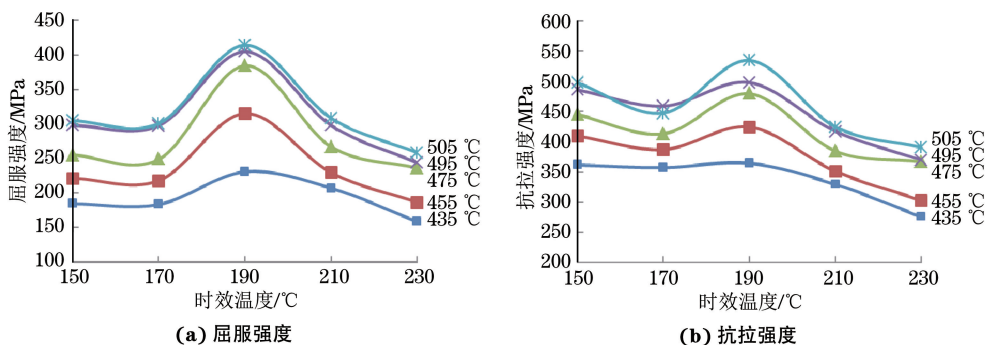


图 7 不同温度同步冷却热成形+不同温度时效 8 h 后试验合金的拉伸性能

Fig.7 Tensile properties of test alloy after hot forming at different temperatures with synchronous cooling and then aging at different temperatures for 8 h: (a) yield strength and (b) tensile strength

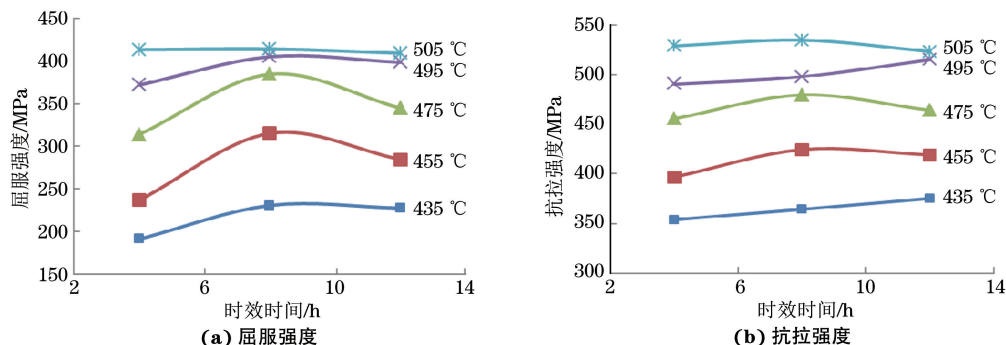


图 8 不同温度同步冷却热成形+190 °C 时效不同时间后试验合金的拉伸性能

Fig.8 Tensile properties of test alloy after hot forming at different temperatures with synchronous cooling and then aging at 190 °C for different times: (a) yield strength and (b) tensile strength

的变化趋势,当时效时间为 8 h 时均达到峰值;而在 495~505 ℃ 下同步冷却热成形+190 ℃ 时效处理后,试验合金的抗拉强度和屈服强度随时效时间的变化均不大,这与时效时间对 Al_2CuMg 相影响较小的结果相符。

3 结 论

(1) 同步冷却热成形+时效处理后,试验合金中的主要强化相是 Al_2CuMg 相;时效温度越高, Al_2CuMg 相的尺寸越大、分布越密集;时效时间对该强化相尺寸和数量的影响较小。

(2) 同步冷却热成形+时效处理后,试验合金的抗拉强度和屈服强度随成形温度的升高而增大,随时效温度的升高先增大后减小,并在 190 ℃ 时达到峰值;在成形温度不高于 475 ℃ 条件下,试验合金的抗拉强度和屈服强度随时效时间的延长呈先增大后降低的变化趋势,并在时效 8 h 时达到峰值,在成形温度高于 475 ℃ 条件下,时效时间对合金强度的影响很小。

参考文献:

- [1] CHEN M H, CAO Y Y, CHEN W, et al. Research on synchronized cooling hot forming process of 6016 aluminum alloy [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 452/453: 81-85.
- [2] 曹园园, 陈明和, 王小芳, 等. 6181H18 铝合金同步冷却热成形工艺研究[J]. *航空制造技术*, 2012(5): 81-84.
- [3] CHEN G L, CHEN M H, WANG N, et al. Hot forming process with synchronous cooling for AA2024 aluminum alloy and its application[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86: 133-139.
- [4] HIRSCH J. Aluminium in innovative light-weight car design

[J]. *Materials Transactions*, 2011, 52(5): 818-824.

- [5] WANG L, STRANGWOOD M, BALINT D, et al. Formability and failure mechanisms of AA2024 under hot forming conditions[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(6): 2648-2656.
- [6] 桂奇文. 热处理工艺对 2024 铝合金析出相及性能的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [7] TAYLOR B, LANNING H W. Warm forming of aluminum-production systems [J]. *Society for the Advancement of Materials and Process Engineering*, 1980, 25: 471-480.
- [8] 周国伟, 李大永, 彭颖红. 7075-T6 高强度铝合金温热条件下的拉深成形性能[J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46(9): 1482-1486.
- [9] 陈国亮, 陈明和, 王宁, 等. AA2024-H18 铝合金同步冷却热成形后的强化机制[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(7): 1337-1343.
- [10] GARRETT R P, LIN J, DEAN T A. Solution heat treatment and cold Die quenching in forming AA 6xxx sheet components: Feasibility study [J]. *Advanced Materials Research*, 2005, 6: 673-680.
- [11] MOHAMED M S, FOSTER A D, LIN J G, et al. Investigation of deformation and failure features in hot stamping of AA6082: Experimentation and modelling[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 53(1): 27-38.
- [12] WANG N, CHEN G L, CHEN M H. Constitutive relationship and parameters optimization of 6181 H18 aluminum alloy hot forming process with synchronous cooling [J]. *Materials Science Forum*, 2013, 770: 324-328.
- [13] 曹园园. 6181/6016H18 高强铝合金同步冷却热成形工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [14] 李学朝. 铝合金材料组织与金相图谱[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [15] 贺双喜, 刘向阳, 谢广辉, 等. 时效制度对 2A12 铝合金组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2014(6): 94-96.
- [16] 王祝堂. 2024 型铝合金的热处理[J]. *金属世界*, 2009(2): 43-48.

(上接第 56 页)

- [6] ZHAO Y G, MA B D, GUO H C, et al. Electropulsing strengthened 2 GPa boron steel with good ductility [J]. *Materials & Design*, 2013, 43: 195-199.
- [7] NGUYEN-TRAN H D, OH H S, HONG S T, et al. A review of electrically-assisted manufacturing[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2015, 2(4): 365-376.
- [8] 张志强, 高鹏, 李宪爽, 等. 脉冲电流处理对硼钢性能的影响

[J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(2): 240-244.

- [9] 万雯, 李光布, 简发萍. 热处理对机械齿轮钢组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(4): 195-198.
- [10] 邹磊, 武颖, 岑启宏. 电脉冲处理对 W6Mo5Cr4V2 高速钢的影响[J]. *材料工程*, 2016, 44(2): 23-27.
- [11] QIN R S. Critical assessment 8: Outstanding issues in electropulsing processing [J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 31(2): 203-206.