

基于正交试验的低镁 ZL305 铝合金热处理工艺优化

王满林¹, 卢行乐², 吴永国², 柴舒心³, 屈俊岑³, 高世磊³, 万元元³

(1.海装重庆局, 重庆 401120; 2.重庆长安工业(集团)有限责任公司, 重庆 401120;
3.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 优化低镁含量 ZL305 铝合金热处理工艺参数。**方法** 采用正交试验法, 研究固溶温度、固溶时间、淬火介质对低镁 ZL305 铝合金力学性能和组织的影响。**结果** 固溶温度对抗拉强度的影响最大且显著, 固溶时间和淬火介质温度对抗拉强度的影响次之, 但不显著; 对断后伸长率影响最大的是固溶温度, 其次是淬火介质温度和固溶时间, 但影响均不显著。**结论** 当采用固溶温度为 495 °C、固溶时间为 12 h、淬火介质温度为 25 °C 的处理参数时, 低镁 ZL305 铝合金材料的固溶效果最优。

关键词: 低镁 ZL305 铝合金; 正交试验; 热处理工艺; 优化

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.04.021

中图分类号: TG166.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)04-0116-05

Optimization of Heat Treatment Process for Low Mg Content ZL305 Aluminum Alloy Based on Orthogonal Test

WANG Man-lin¹, LU Xing-le², WU Yong-guo², CHAI Shu-xin³, QU Jun-cen³, GAO Shi-lei³, WAN Yuan-yuan³

(1.Chongqing Military Representation Bureau of NAVFEC Department, Chongqing 401120, China;
2.Chongqing Changan Industry (Group) of Limited Liability Company, Chongqing 401120, China;
3.Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The paper aims to optimize parameters on heat treatment process of low magnesium content ZL305 aluminum alloy. The effects of solution temperature, solution time and quenching medium temperature on the mechanical properties and microstructure of low magnesium ZL305 aluminum alloy were investigated by orthogonal test. The effect of solution temperature on the tensile strength was the largest and significant. The effect of solution temperature and quenching medium on the tensile strength was the second largest, but not significant. The solution temperature had the greatest influence on the elongation after fracture, followed by the quenching medium temperature and solution time, but their impacts were not significant. The optimum solution parameters of low magnesium ZL305 aluminum alloy are: solution temperature 495 °C, solution time 12 h, quenching medium temperature 25 °C.

KEY WORDS: low Mg content ZL305 aluminum alloy; orthogonal test; heat treatment process; optimization

ZL305 铝合金属于热处理强化型铸造铝合金, 在新淬火状态下, 抗拉强度可达 290 MPa, 断后伸长率可达 8%, 密度仅为 2.62 g/cm³, 具有优良的力学性能和抗电化学腐蚀能力, 被应用于大型船舶上承受较大冲击载荷的关键部件^[1-5]。该合金铸造流动性较差,

热裂敏感性强, 对铸造工艺水平要求较高, 使其仅限于应用在国防领域特种装备的重要部位, 未能在铝合金铸件领域进行大量推广应用^[6-9]。

近年来, 由于国防领域研发水平飞速发展, 大量重型装备战技指标日益提高, 导致 ZL305 铝合金

收稿日期: 2017-05-19

作者简介: 王满林(1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为装备开发与制造。

铸件在某些服役条件恶劣的环境下，难以满足装备整体性能的要求，具体表现为自然时效导致 Al_3Mg_2 相大量析出，造成材料抗拉强度升高，断后伸长率下降，进而降低冲击韧性，使该合金铸件开裂倾向增大^[10—13]。通过减少 ZL305 铝合金中的镁元素含量，以及进行优化固溶处理工艺，有助于降低自然时效倾向，提高合金力学性能的稳定性，增大设备可靠性^[14—15]。文中通过设计正交试验，对不同热处理工艺条件下低镁含量 ZL305 铝合金力学性能和组织进行研究，进而得出各工艺参数对力学性能指标影响的重要程度及显著性，优化最佳热处理工艺。

1 试验

试验材料为低镁含量的 ZL305 铸造铝合金，含有质量分数为 7.56% 的 Mg，1.32% 的 Zn，0.19% 的 Ti，0.04% 的 Be，0.06% 的 Si，0.14% 的 Fe，0.01% 的 Mn，0.01% 的 Cu。为了检测合金最高固溶处理温度，在 SDT-Q600 差热分析仪上对该材料进行差热分析，加热速度为 20 °C/min，加热温度区间为 26~700 °C；根据 GB 1173—2013，浇注铸造铝合金力学性能检测试棒(mm)，试棒尺寸见图 1。

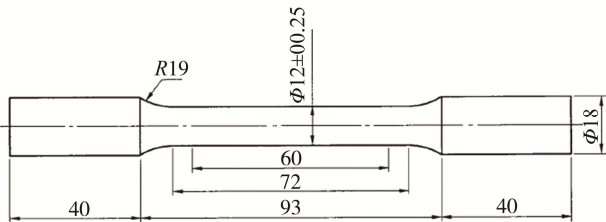


图 1 砂型铸造试样
Fig.1 Sand casting sample

根据 GB 228—2010，在 CMT-5105 型万能试验机上检测低镁含量 ZL305 合金；将各试验状态下的试样通过热镶嵌方法制备金相试样，经砂纸打磨和机械抛光后，进行金相化学腐蚀，腐蚀剂采用体积分数为 0.5% 的氢氟酸水溶液，腐蚀时间为 5~8 s，试样腐蚀后在蒸馏水中冲洗，最后用酒精棉擦净吹干，用 OLYMPUS GX51 型金相显微镜对试样表面的金相组织进行观察。

2 结果与分析

2.1 DSC 分析

为了更合理地设计低镁 ZL305 铝合金材料固溶温度的试验区间，首先采用差热分析法，检测合金从室温加热至熔点温度过程中的相变点，该合金铸态试样 DSC 分析结果见图 2，低镁 ZL305 铝合金在加热过程中存在 2 个熔化峰，即在 441 °C 发生一次共晶体

熔化吸热反应，在 498.5 °C 发生第 2 次熔化反应，因此该合金固溶处理的加热过程应分为 2 个阶段，第 1 阶段的保温温度不能超过 441 °C，第 2 阶段的保温温度不能超过 498.5 °C。据相关文献资料分析，在 441 °C 附近发生熔化的是 Al, Mg, Zn 组成的三元微量相，该相是铝镁锌系合金在非平衡凝固过程中的产物，对 ZL305 铝合金的固溶强化作用微弱。根据铸造铝合金热处理工艺国家标准资料，并结合低镁 ZL305 铝合金 DSC 分析结果，以及试验所用铝合金淬火炉温度波动范围为 ±3 °C 等数据，将固溶处理第 1 阶段的保温温度设定为 435 °C，保温时间设定为 10 h，第 2 阶段保温极限温度为 495 °C。

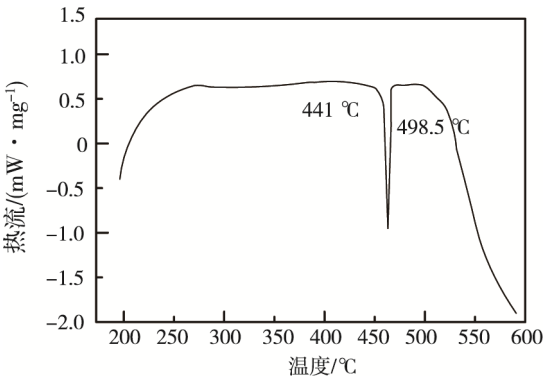


图 2 铸态低镁 ZL305 铝合金 DSC 分析
Fig.2 DSC analysis of low Mg ZL305 aluminum alloy

2.2 正交试验

低镁 ZL305 铝合金只进行固溶处理，影响该工艺过程的主要工艺参数有固溶温度、固溶时间、淬火转移时间、淬火介质温度、淬火介质种类和加热保温速率等，通过查询铸造铝合金行业手册及结合 DSC 试验结果，最终选择低镁 ZL305 铝合金第 2 阶段固溶保温时间（后续简称为固溶时间，记为 A）、第 2 阶段保温温度（后续简称为固溶温度，记为 B）和淬火介质温度（记为 C）作为正交试验因素，每个因素分别选取 3 个水平，根据正交试验设计原则，选用 4 因素 3 水平正交表 $L_9(3^4)$ 进行正交试验，因素水平见表 2。

表 2 正交试验因素水平
Tab.2 Orthogonal experimental factors

固溶温度/°C	固溶时间/h	淬火介质温度/°C
475	6	95
485	9	55
495	12	15

根据表 2 所述因素与水平，设计的正交试验方案及结果见表 3，当固溶温度为 475, 485, 495 °C 时，分别记为 A1, A2, A3；当固溶时间为 6, 9, 12 h 时，分别记为 B1, B2, B3；当淬火介质温度为 25, 55, 95 °C 时，分别记为 C1, C2, C3。

表3 低镁 ZL305 铝合金试样正交试验方案及结果
Tab.3 Low Mg ZL305 aluminum alloy sample orthogonal test program and results

试验号	因素				试验结果	
	固溶温度/℃	固溶时间/h	淬火介质温度/℃	空列	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
1	A1	B1	C1	1	282	10.63
2	A1	B2	C2	2	285	9.42
3	A1	B3	C3	3	279	9.43
4	A2	B1	C2	3	287	11.04
5	A2	B2	C3	1	314	11.42
6	A2	B3	C1	2	318	12.54
7	A3	B1	C3	2	328	11.12
8	A3	B2	C1	3	345	14.87
9	A3	B3	C2	1	352	14.02

2.3 正交试验结果极差分析

极差分析最能直观地反映出正交试验各因素对考察结果影响大小的规律,即通过计算与各水平所对应的考察指标平均值的最大差值,计算出该列的极差,通过比较极差数值大小,判断各因素在正交试验中的影响力大小。正交试验结果的极差分析见表4。

表4 极差分析结果
Tab.4 Range analysis results

	抗拉强度/MPa			断后伸长率/%		
	A	B	C	A	B	C
k_1	282.000	290.667	306.333	9.827	10.930	12.680
k_2	298.333	306.000	302.667	11.667	11.903	11.493
k_3	319.333	311.000	298.667	13.337	11.997	10.657
R	37.333	20.333	7.666	3.510	1.100	2.023

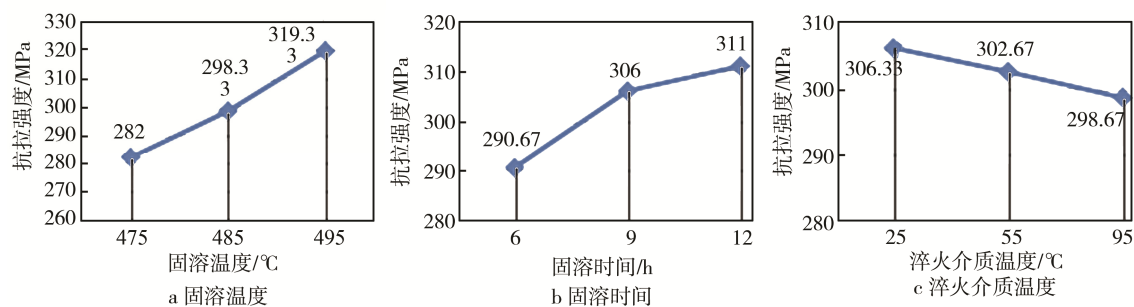


图3 各试验因素对低镁 ZL305 铝合金抗拉强度的影响

Fig.3 Effect of each test factor on tensile strength of low Mg ZL305 aluminum alloy

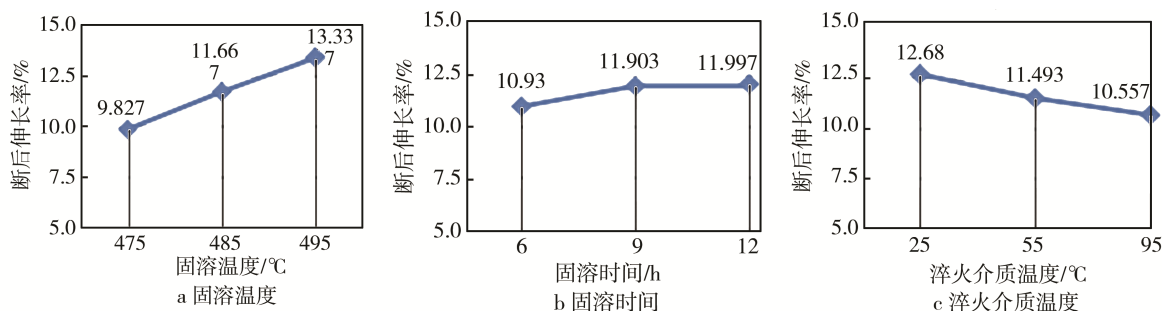


图4 各试验因素对低镁 ZL305 铝合金抗拉强度的影响

Fig.4 Effect of each test factor on tensile strength of low Mg ZL305 aluminum alloy

通过对正交试验结果计算的极差可知,固溶温度对抗拉强度的影响最大,固溶时间次之,淬火介质温度对抗拉强度的影响最小;对断后伸长率影响最大的是固溶温度,其次是淬火介质温度和固溶时间。各试验因素对低镁 ZL305 铝合金抗拉强度指标影响见图3。

随着固溶温度的升高,合金抗拉强度升高,随固溶时间增加;合金抗拉强度也增加,但当固溶时间由9 h 升至12 h 后,合金抗拉强度变化不大,趋势变缓;随着合金淬火介质温度升高,合金抗拉强度略有降低,降低幅度较小。总体来说,在文中试验因素水平所得数据考察范围之内,固溶温度对合金抗拉强度影响较大。

各试验因素对低镁 ZL305 铝合金断后伸长率指标的影响见图4。可知,随着固溶温度升高,合金断后伸长率升高,随固溶时间增加明显;合金抗拉强度也增加,但当固溶时间由9 h 至12 h 变化时,合金断后伸长率无明显变化;随着合金淬火介质温度升高,合金断后伸长率略有降低,但降低幅度较小。总体来说,在文中试验因素水平所得数据考察范围之内,固溶温度对合金断后伸长率影响较大。

2.4 方差分析

通过方差分析,对影响试验结果的各因素的重要程度作量化评估,判断各因素对指标影响作用是否显著。各因素对抗拉强度的方差分析结果见表5。可知, F 值大小顺序为 $A>B>C$,固溶温度对抗拉强度的影响最大且显著。

表 5 抗拉强度指标方差分析结果
Tab.5 Analysis of variance of tensile strength

方差来源	偏差平方和	自由度	F值	$F_{0.05}$
A	5400.667	2	23.618	19
B	548.667	2	2.399	19
C	114.000	2	0.499	19
空列	228.67	2	—	—

各因素对抗拉强度的方差分析结果见表 6。可知， F 值大小顺序为 $A>C>B$ ，在试验选取各因素范围内对断后伸长率影响不大。

表 6 断后伸长率指标方差分析结果
Tab.6 Analysis of variance analysis of elongation

方差来源	偏差平方和	自由度	F值	$F_{0.25}$
A	18.495	2	0.174	3
B	2.094	2	0.020	3
C	6.202	2	0.058	3
空列	106.11	2	—	—

2.5 试验分析

综合极差分析、方差分析和因素变化显著性检验可知，固溶温度是影响低镁 ZL305 铝合金抗拉强度和断后伸长率变化的最重要因素，其次是固溶时间和淬火介质温度。该铝合金最佳第 2 阶段热处理工艺参数组合为：A3, B3, C1，即固溶温度为 495 ℃、固溶时间为 12 h、淬火介质温度为 25 ℃。对于结构复杂的大型铸件低镁 ZL305 合金铸件，为了降低淬火热

应力导致的淬火裂纹倾向，淬火介质温度宜调整至 95 ℃。

大型复杂铝合金铸件需要在沸水中进行淬火，以降低淬火裂纹和铸件变形趋势，所以对大型低镁 ZL305 铝合金铸件进行固溶处理时，需要将淬火介质温度修正为 95 ℃。低镁 ZL305 铝合金在热处理工艺参数为(A3, B3, C1)和(A3, B3, C3)状态下的力学性能见表 7。可知，低镁 ZL305 铝合金试棒经过淬火处理后，抗拉强度和断后伸长率均大幅度提高，而且数据值均大于国家标准要求，符合生产实际要求。

表 7 不同热处理态低镁 ZL305 合金的力学性能
Tab.7 Mechanical properties of low Mg ZL305 alloy at different heat treatment

合金状态	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
铸态	175	1.5
淬火态(A3, B3, C1)	358	15.0
淬火态(A3, B3, C3)	346	13.9

2.6 固溶处理对低镁 ZL305 铝合金组织的影响

固溶处理前后低镁 ZL305 铝合金显微组织形貌见图 5，可知，低镁 ZL305 铝合金显微组织在固溶处理前后发生显著变化。由图 5a—b 可看出，该合金铸态组织主要由基体 $\alpha(\text{Al})$ 相和弥散分布于晶界处的不定形态 $\beta(\text{Al}_8\text{Mg}_5)$ 相组成，在晶界处还分布有黑色块状或骨骼状的 Mg_2Si 相，在晶内和晶界处还弥散分布着少量浅灰色块状 Al_3Ti 相和灰色片状 Al_3Fe 相。

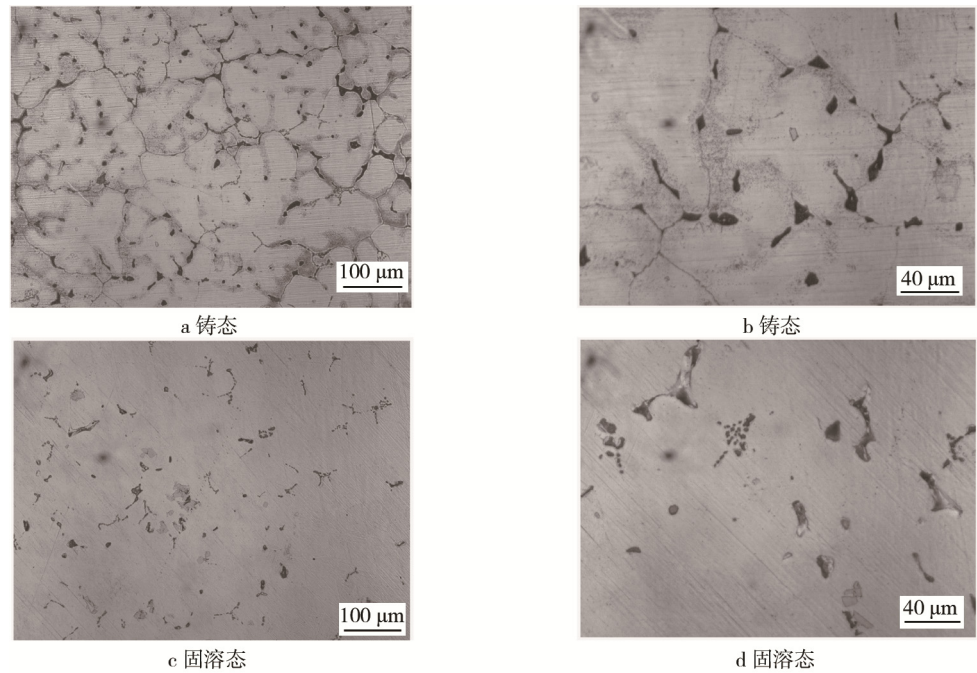


图 5 低镁 ZL305 铝合金铸态和固溶态 OM 照片

Fig.5 OM image of cast state and solid solution state on low magnesium ZL305 aluminum alloy

经固溶处理后,见图5c—d,低镁ZL305铝合金组织中的不定形态 $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_5)$ 相全部溶解到 $\alpha(\text{Al})$ 相中,在淬火过程中未发生析出,最终形成过饱和固溶体; Mg_2Si 相、 Al_3Ti 相和 Al_3Fe 相未发生溶解。

3 结论

1) 通过对低镁ZL305铝合金固溶态试样力学性能数据进行极差分析,结果表明,固溶温度对抗拉强度的影响最大,固溶时间次之,淬火介质温度对抗拉强度的影响最小;对断后伸长率影响最大的是固溶温度,其次是淬火介质温度和固溶时间。

2) 通过方差分析,对影响低镁ZL305铝合金力学性能的各因素的重要程度作量化评估,结果表明,固溶温度对抗拉强度的影响最大且显著,固溶时间和淬火介质对抗拉强度有影响,但不显著;固溶温度、固溶时间和淬火介质温度对断后伸长率有影响,但不显著。

3) 当采用固溶温度为495℃、固溶时间为12h、淬火介质温度为25℃的处理参数时,低镁ZL305铝合金材料的固溶效果最优;针对大型复杂铸件进行固溶处理时,可将淬火介质温度修正为95℃;这2种热处理工艺所得试样力学性能均远大于现行国家标准,满足生产实际需要。

4) 低镁ZL305铝合金经固溶处理后,铸态组织中的不定形 $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_5)$ 相全部溶解到 $\alpha(\text{Al})$ 相中,形成过饱和固溶体; Mg_2Si 相、 Al_3Ti 相和 Al_3Fe 相未发生溶解。

参考文献:

- [1] 刘志超, 吴华方. Al-10Mg型固溶合金自然时效稳定性研究[J]. 材料开发与应用, 2003, 18(3): 28—31.
LIU Zhi-chao, WU Hua-fang. Stability of Al-10Mg Solid Solution Alloy Ageing at Room Temperature[J]. Development and Application of Materials, 2003, 18(3): 28—31.
- [2] BATES A P, RIDLEY J. Improved High Strength Aluminium Alloy[J]. Metallurgia, 1966, 33(1): 101—110
- [3] ASKINS M C, MARTIN J W. Structure and Strength of an Al-Zn-Mg Alloy after Duplex Aging Treatment[J]. Metallography, 1982, 15(2): 141—155.
- [4] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
Chinese Mechanical Engineering Society Heat Treatment Association. Heat Treatment Manual[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002.
- [5] 陈强. 合金加工流变学及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
CHEN Qiang. Rheological Alloy Processing and Its Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [6] HAAS M D E. Grain Boundary Phenomena and Failure of Aluminum Alloys[D]. Groningen: University of Groningen, 2002.
- [7] PORTER D A, EASTERLING K E. Phase Transformation in Metals and Alloys[M]. Oxford: Alden Press, 1981.
- [8] 曾苏民. 影响铝合金固溶保温时间的多因素相关规律[M]. 中国有色金属学报, 1999, 9(1): 80—83.
ZENG Su-min. Disciplines of Multiple Factors Affecting Solution Treating of Aluminum Alloy[M]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(1): 79—86.
- [9] NAKAI M, ETO T. New Aspects of Development of High Strength Aluminum Alloys for Aerospace Applications[M]. Materials Science and Engineering, 2000, 285(1): 62—68.
- [10] JIE Jin-chuan, WANG Hong-wei, ZOU Chun-ming, et al. Precipitation in Al-Mg Solid Solution Prepared by Solidification under High Pressure[J]. Materials Characterization, 2014, 87: 19—26.
- [11] 肖远伦, 赵强, 黄志伟, 等. 淬火介质对ZL114A铝合金性能、变形和组织的影响[J]. 精密成形工程, 2013, 5(5): 13—16.
XIAO Yuan-lun, ZHAO Qiang, HUANG Zhi-wei, et al. Effects of Quenching Medium on Mechanical Properties Deformation and Microstructure of ZL114A Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(5): 13—16.
- [12] 闫峰, 赵强, 肖元伦, 等. 分级固溶对ZL114A铝合金组织与性能的影响[J]. 精密成形工程, 2013, 5(5): 2—4.
YAN Feng, ZHAO Qiang, XIAO Yuan-lun, et al. Effects of Progressive Solution Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of ZL114A Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(5): 2—4.
- [13] 戴晓元, 夏长清, 吴安如, 等. 含抗超高强铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2006, 20(5): 104—107.
DAI Xiao-yuan, XIA Chang-qing, WU An-ru, et al. Present Research and Developing Trends of Ultra High Strength Aluminium Alloys Contained Scandium Element[J]. Material Review, 2006, 20(5): 104—107.
- [14] 魏尊杰, 王振玲, 王宏伟, 等. 高压凝固对Al-Mg合金枝晶形态的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(11): 685—688.
WEI Zun-jie, WANG Zhen-ling, WANG Hong-Wei, et al. Effects of High Pressure Solidification on Dendrite Morphology of Al-Mg Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2006, 26(11): 685—688.
- [15] 王祝堂, 张新华. 汽车用铝合金[J]. 轻合金加工技术, 2011, 39(2): 1—14.
WANG Zhu-tang, ZHANG Xin-hua. Aluminum Alloy for Automobile Usage[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2011, 39(2): 1—14.
- [16] 李慎兰, 黄志其, 蒋福利, 等. 固溶温度对6061铝合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(5): 131—136.
LI Shen-lan, HUANG Zhi-qi, JIANG Fu-li, et al. Effect of Solution Temperature on Microstructure and Property of Transactions of a 6061 Aluminum Alloy[J]. Materials and Heat Treatment, 2013, 34(5): 131—136.