

文章编号: 1004 - 0609(2006)06 - 0958 - 06

双级时效对 7050 铝合金组织和性能的影响^①

田福泉, 崔建忠

(东北大学 EPM 重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 采用力学性能和电导率测试及透射电镜组织观察的方法, 研究了 7050 合金挤压带板的单级时效、双级时效及两级时效之间处理条件对合金组织和性能的影响。结果表明: 7050 合金在 120 ℃时效有很高的抗过时效能力, 抗拉强度超过 619 MPa, 但电导率较低仅为 32.3% IACS; 采用第二级时效温度为 165 ℃的双级时效, 合金可获得强度为 551 MPa 和电导率为 40.6% IACS 的配合; 双级时效过程的两级时效之间处理条件对合金的强度有明显的影响, 间断时效和第一级时效后快冷有利于提高合金的强度; 经过第一级时效后空冷再进行 165 ℃、16 h 时效, 合金的强度和电导率分别为 559 MPa 和 40.2% IACS。

关键词: 7050 铝合金; 双级时效; 挤压带板; 电导率; 析出相

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Effect of duplex aging on microstructure and properties of 7050 aluminium alloy

TIAN Fu-quan, CUI Jian-zhong

(The Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials,
Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110006, China)

Abstract: The effects of single aging, duplex aging and conditions between the first and second step agings on the microstructures and properties of the extruded plate of 7050 aluminium alloy were investigated, by means of TEM, tensile and conductivity tests. The results show that 7050 aluminium alloy aged at 120 ℃ can obtain tensile strength of 619 MPa and conductivity of 32.3% IACS, and its overaging at that temperature needs long time. 7050 aluminium alloy after duplex aging with the second step aging at 165 ℃ can obtain the combinations of the tensile strength of 551 MPa and the conductivity of 40.6% IACS. Obvious effects of the treatment conditions exist between the first and second step agings on the tensile strength of 7050 aluminium alloy during duplex aging. The tensile strength of 7050 aluminium alloy can be increased as stop aging or quick cooling after the first step aging during duplex aging. 7050 alloy can obtain tensile strength of 559 MPa and conductivity of 40.2% IACS when it is aged at 165 ℃ for 16 h after air cooling following the first step aging.

Key words: 7050 aluminium alloys; duplex aging; extruded plate; conductivity; precipitates

7050 铝合金厚板已大量应用于 Boeing 777 客机以及 F/A - 18Hornet 和 F - 22Raptor 军用飞机^[1], 成为飞机制造业通用的结构材料^[2]。该合金降低 Fe 和 Si 提高了韧性, 以 Zr 代 Cr 细化晶粒降低了淬火敏感性保证了大断面产品的性能, 提高了 Cu 含量使合金具有较好的强度和抗应力腐蚀性能

的配合^[3]。关于 7050 合金, Gang 等^[4]、Robson^[5]、Adler 等^[6]及 Staley^[7]分别对 7050 合金 GP 区和 η 相的形成、粗大第二相在加工和固溶处理过程的作用以及时效析出行为进行了深入研究。Hardwic 等^[8]和宋仁国等^[9]探讨了 7050 合金的氢脆和应力腐蚀行为。段玉波等^[10]和陆海庆等^[11]分别研究过

① 收稿日期: 2005 - 10 - 17; 修订日期: 2006 - 01 - 19

通讯作者: 崔建忠, 教授, 博士; 电话: 024 - 83681758; E-jzcui@epm.neu.edu.cn

7050 合金厚板的铸造和加工工艺。郑立静等^[12]还探索了细化 7050 合金的特殊方法。为了使 7050 合金获得更好的强度、韧性和抗应力腐蚀性能的结合, 国内外进行了大量的 RRA 处理研究^[13~16], 但这种处理很难在生产中应用。目前 7050 合金实用的热处理制度仍为双级时效处理。已发表的工作通常仅给出第一级和第二级时效的温度和时间范围, 对于第一级时效至第二级时效之间的加热条件未见系统的研究。因此在相同的两级时效温度和时间条件下, 由于两级时效之间处理的条件不同, 可能导致最终获得的性能有差异。

本文作者研究 7050 合金双级时效制度以及两级时效之间处理条件对合金性能的影响, 使其获得较高的强度和电导率的结合。

1 实验

实验用 7050 合金挤压带板采用电阻炉熔炼, 铸成横断面尺寸为 d 204 mm 的半连续铸锭, 均匀化退火后, 切头去尾扒皮, 加热挤压成横断面为 102 mm × 25 mm 的带板, 其化学成分见表 1。由于挤压带板纵向力学性能受取样位置的影响较大^[17], 因此本研究沿挤压带板长横向截取拉伸性能试样, 按 GB6397—86 标准加工成圆棒状拉伸试样, 其中 $d_0=6\text{ mm}$, $l_0=5\text{ }d_0$ 。沿挤压带板长横向截取宽度为 20 mm 的试块用于电导率测定。在拉伸样品端头取金相和透射电镜样品。

表 1 实验合金的化学成分分析值

Table 1 Chemical composition of alloy

(mass fraction %)

Zn	Mg	Cu	Zr
6.24	2.26	2.32	0.13
Ti	Fe	Si	Al
0.03	0.11	0.07	Bal.

样品在 470 ℃盐浴中固溶处理 50 min(拉伸样品)和 60 min(电导率试块), 水淬。单级时效为 120 ℃时效不同时间。双级时效制度如下: 第一级时效条件 120 ℃、6 h; 第二级时效条件分别为 165 ℃、12 h, 165 ℃、16 h, 165 ℃、24 h, 165 ℃、28 h。第一级时效至第二级时效之间的加热条件有 4 种: 第一级 120 ℃、6 h 后水淬或空冷, 室温停放 10 h 再在 165 ℃时效, 为制度 A 和 B; 第一级 120 ℃、6 h 后随炉匀速加热 2 h 或 10 h 到 165 ℃时效, 为制度

C 和 D。字母后所附数字为在 165 ℃时效时间。

时效在烘干箱中进行, 采用 TCW-32B 型程序控温仪控温。使用的拉伸试验机、透射电镜及电导仪的型号分别为 CMT5105、EM-420Philips 和 Sigmascope SMP10。

2 结果与分析

7050 合金挤压带板横向力学性能随 120 ℃单级时效时间的变化如图 1 所示。7050 合金在 120 ℃时效 6 h 时 $\sigma_b=581\text{ MPa}$, $\delta=14.9\%$; 时效 24 h 时 $\sigma_b=602\text{ MPa}$, $\delta=14.5\%$; 时效 68 h 时 $\sigma_b=618\text{ MPa}$, $\delta=14.1\%$ 。7050 合金在 120 ℃时效 6、24、36 和 68 h, 其电导率分别为 30.6、31.4、31.5 和 32.3% IACS。可见 7050 合金在 120 ℃时效直至 68 h 时强度还在升高, 未出现过时效现象, 说明该合金有很高的组织稳定性。虽然 7050 合金在 121 ℃时效 0.5~4 h 之内即可出现 η' 相^[4], 但与 7075 合金相比它有更高的抗过时效能力。这与 7050 合金含有更高的 Cu 提高了 GP 区稳定的温度范围有关^[3]。

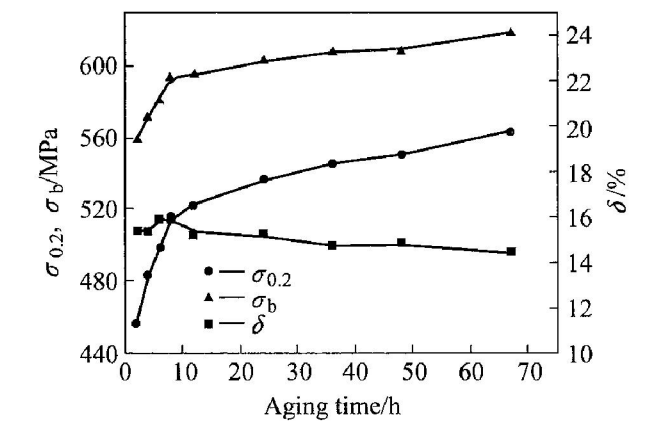


图 1 7050 合金力学性能随 120 ℃时效时间的变化

Fig. 1 Variations of mechanical properties of 7050 alloy with aging time at 120 ℃

7050 合金经第一级 120 ℃、6 h 时效($\sigma_b=581\text{ MPa}$, $\delta=14.9\%$, 电导率为 30.6% IACS)后随炉 2 h 内匀速升温至 165 ℃进行第二级时效, 其力学性能随第二级 165 ℃时效时间变化如图 2 所示。可见, 第二级 165 ℃时效 12 h 时, 合金的 $\sigma_b=566\text{ MPa}$, $\delta=11.7\%$; 时效 28 h 时, $\sigma_b=523\text{ MPa}$, $\delta=12.2\%$; 时效时间在 16~24 h 之间合金有较好延伸率, $\delta=12.5\%\sim12.4\%$ 。7050 合金经 120 ℃、6 h 时效, 然后随炉加热 2 h 至 165 ℃进行第二级时效,

其强度和电导率与第二级 165 °C 时效时间的关系如图 3 所示。7050 合金的强度随第二级 165 °C 时效时间延长而单调下降, 其电导率单调上升。美国军用标准规定 7050 合金 T736 状态(高强高韧良好抗蚀性相结合的状态)的强度大于 506 MPa, 电导率在 40% IACS~43% IACS 范围内^[18]。由图 3 可见第二级 165 °C 时效时间超过 12 h 时, 合金的电导率超过美国军用标准 7050 合金 T736 状态的最低要求(40% IACS), 合金的强度可达 560 MPa。当第二级 165 °C 时效时间达到 28 h 时, 合金的电导率达到 42% IACS, 其强度仍为 523 MPa, 满足美国军用标准要求。因此选择 165 °C 为第二级时效温度时, 第二级时效时间在 16~24 h 之间均可获得较高的强度、韧性和抗蚀性的结合。

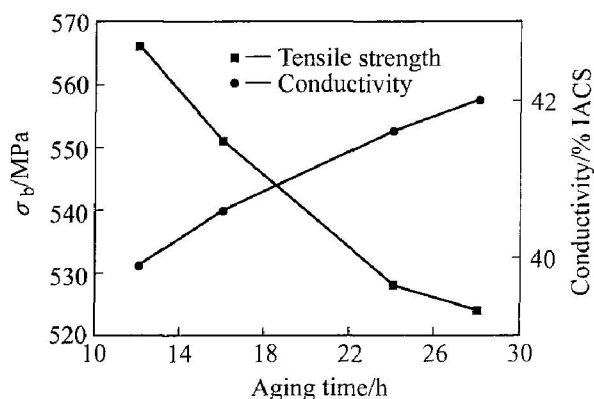


图 3 7050 合金的抗拉强度和电导率随第二级 165 °C 时效时间的变化

Fig. 3 Variations of tensile strength and conductivity of 7050 alloy with time of second-step aging at 165 °C

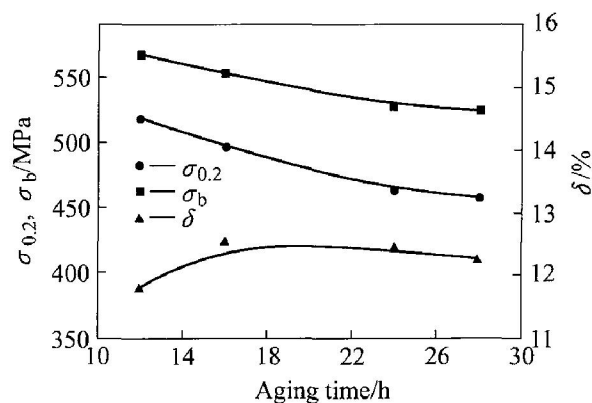


图 2 7050 合金力学性能随第二级 165 °C 时效时间的变化

Fig. 2 Variations of mechanical properties of 7050 alloy with time of second-step aging at 165 °C

7050 合金 120 °C、24 h 单级时效以及 120 °C、6 h 随炉 2 h 内升温至 165 °C、12 h 双级时效的透射电镜组织如图 4 所示。可见合金经温度为 165 °C 的第二级时效后基体和晶界析出相明显粗化, 因此合金的电导率明显提高。

7050 合金经第一级 120 °C、6 h 时效后以不同的条件加热到 165 °C 进行第二级时效, 其力学和电导率的变化见表 2。将制度 A16 和 B16 与制度 C16 和 D16 相比较可见, 第一级时效后冷却至室温置放 10 h 再进行 165 °C 的间断双级时效, 合金可获得较高的强度和延伸率。比较制度 C16 和 D16 可见由第一级至第二级时效是随炉加热时, 加热速度缓慢, 合金的强度降低。为了研究第一级时效后在 10 h 之内匀速加热至第二级时效的热效果的作用, 假设 10 h 的加热的热效果相当于在 165 °C 延长 5 h 的

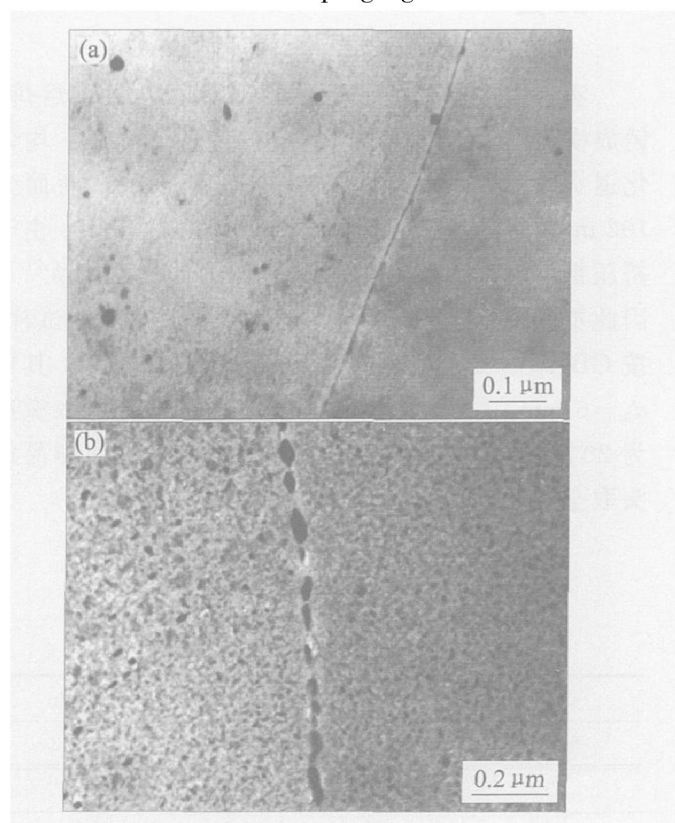


图 4 7050 合金单级和双级时效的透射电镜组织

Fig. 4 TEM micrographs of 7050 alloy after single and duplex aging

(a) —120 °C, 24 h; (b) —120 °C, 6 h / (2 h) 165 °C, 12 h

作用, 设计了 B21 和 B29 制度, 即第一级时效后空冷, 室温停放 10 h 再将样品放入 165 °C 时效炉中时效 21 和 29 h。将 B21 和 B29 制度与 D16 和 D24 进行比较。可见采用 B21 制度处理的样品比采用 D16 制度处理样品的强度高, 比较 B29 和 D24 制度也有相同的结果。这说明第一级时效后随炉缓慢加热到

第二级时效温度继续时效时, 合金的强度较低不仅与缓慢加热过程延长了时效时间的作用有关, 还与缓慢加热过程中析出相的种类和尺寸分布变化有关。

7050 合金在各种条件下双级时效的 TEM 组织如图 5 所示。由图 5(a) 和(b) 可见, 第一级 120 ℃、

表 2 7050 合金各种条件的双级时效性能

Table 2 Properties of duplex-aged 7050 alloy under different conditions

Conditions of heat treatment following first step aging at 120 ℃ for 6 h, (Mark of conditions)		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	Conductivity/ % IACS
Direct aged at 165 ℃ for 6 h following WQ	(A16)	566	515	12. 8	40. 1
Direct aged at 165 ℃ for 24 h following WQ	(A24)	543	483	12. 8	41. 1
Direct aged at 165 ℃ for 16 h following AC	(B16)	559	510	13. 3	40. 2
Direct aged at 165 ℃ for 21 h following AC	(B21)	546	489	13. 2	41. 0
Direct aged at 165 ℃ for 24 h following AC	(B24)	541	479	13. 4	41. 1
Direct aged at 165 ℃ for 29 h following AC	(B29)	524	456	13. 7	41. 9
Heated to 165 ℃ during 2 h in furnace and aged at 165 ℃ for 12 h	(C12)	566	518	11. 8	39. 9
Heated to 165 ℃ during 2 h in furnace and aged at 165 ℃ for 16 h	(C16)	551	497	12. 5	40. 6
Heated to 165 ℃ during 2 h in furnace and aged at 165 ℃ for 24 h	(C24)	528	463	12. 4	41. 6
Heated to 165 ℃ during 2 h in furnace and aged at 165 ℃ for 28 h	(C28)	523	457	12. 2	42. 0
Heated to 165 ℃ during 10 h in furnace and aged at 165 ℃ for 12 h	(D12)	524	457	12. 3	40. 7
Heated to 165 ℃ during 10 h in furnace and aged at 165 ℃ for 16 h	(D16)	514	443	13. 1	41. 7
Heated to 165 ℃ during 10 h in furnace and aged at 165 ℃ for 24 h	(D24)	504	427	13. 3	42. 5

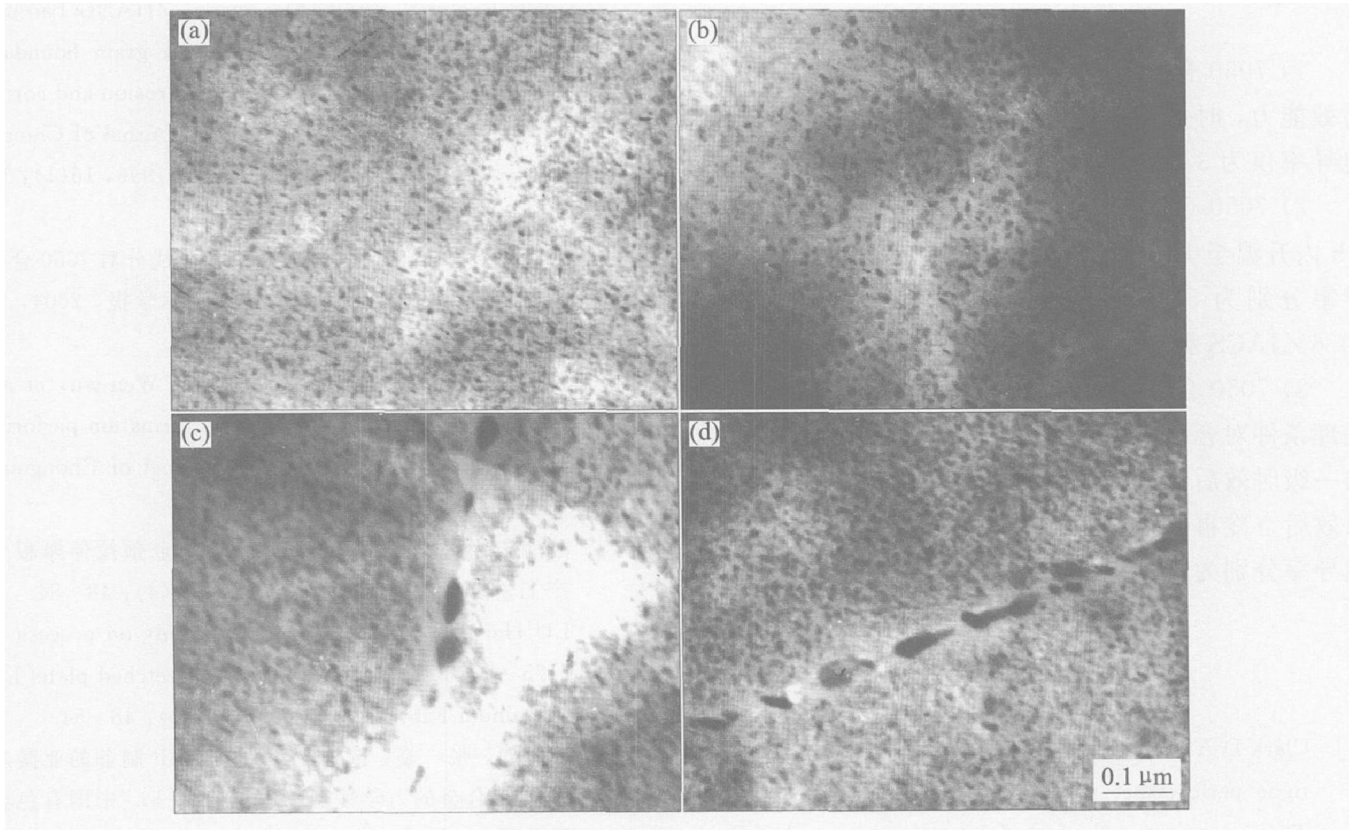


图 5 7050 合金在各种条件下双级时效的 TEM 组织

Fig. 5 TEM micrographs of duplex-aged 7050 alloy under different conditions

(a) -120 ℃, 6 h, WQ+ 165 ℃, 16 h; (b) -120 ℃, 6 h, AC+ 165 ℃, 16 h;

(c) -120 ℃, 6 h ↗ (10 h) 165 ℃, 16 h; (d) -120 ℃, 6 h, AC+ 165 ℃, (16+ 5) h

6 h 时效后水淬再进行第二级 165 °C、16 h 的基体析出相(5(a)) 比第一级 120 °C、6 h 时效后水淬再进行第二级 165 °C、16 h 的基体析出相(5(b)) 更细小。这证明 7050 合金经 120 °C、6 h 时效后快冷在室温停放有稳定析出相尺寸的作用, 使之在第二级 165 °C 时效时析出相不易长大。因为 7050 合金有较宽的 GP 存在温度范围^[3], 在第二级 165 °C 时效时很难发生 GP 的回归。又因 7050 合金较易形成 η 相^[4], 只要基体中有足够的溶质浓度, 在合适的条件下即可均匀地形成 η 相。第一级 120 °C、6 h 时效后快冷有利于保持基体中溶质的过饱和度, 在随后第二级 165 °C 时效时可形成更多 η 相核心, 因此合金析出相的尺寸更细小。合金随炉缓慢加热时, 不仅发生 GP 的合并长大, 同时也使基体中溶质的过饱和度降低, 造成 η 相形核不均匀, 个别 η 相容易长大, 因此随炉缓慢加热到 165 °C 进行时效的样品与第一级 120 °C、6 h 时效后空冷(在室温停放 10 h) 再在 165 °C 时效(并相应地延长时效时间) 的样品相比, 前者基体析出相的尺寸略微粗大, 见图 5(c) 和(d)。

3 结论

1) 7050 合金在 120 °C 单级时效有很高的抗过时效能力, 时效 68 h 时抗拉强度可达 619 MPa, 但电导率仅为 32.3% IACS。

2) 7050 合金经第一级 120 °C、6 h 时效后随炉 2 h 内升温至 165 °C 分别时效 16 和 24 h, σ 、 δ 和电导率分别为 551 和 528 MPa、12.5% 和 12.4%、40.6% IACS 和 41.6% IACS。

3) 7050 合金采用双级时效时, 两级时效之间处理条件对合金的强度有明显的影 响, 间断时效和第一级时效后快冷有利于提高合金的强度, 第一级时效后空冷再进行 165 °C、16 h 时效合金的强度和电导率分别为 559 MPa 和 40.2% IACS。

REFERENCES

- [1] Clark D A, Johnson W S. Temperature effects on fatigue performance of cold expanded holes in 7050-T7451 aluminum alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 159-165.
- [2] Magnusen P E, Buci R J, Hinkle A J, et al. Analysis and prediction of microstructural effect on long-term fatigue performance of an aluminum aerospace alloy[J]. International Journal of Fatigue, 1997, 19(1): 275-283.
- [3] Lin C K, Yang S T. Corrosion fatigue behavior of 7050 aluminum alloys in different tempers[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 59(6): 779-795.
- [4] Gang S, Alfred C. Early-stage precipitation in Al-Zr-Mg-Cu alloy(7050) [J]. Acta Materialia, 2004, 52(4): 503-4516.
- [5] Robson J D. Microstructural evolution in aluminium alloy 7050 during processing[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 382: 112-121.
- [6] Adler P N, Deilsi R. Calorimetric studies of 7000 series aluminum alloys: II. Comparison of 7075, 7050 and RX720 alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1977, 8(7): 1185-1190.
- [7] Staley J T. Aging kinetics of aluminum alloy 7050[J]. Metallurgical Transactions, 1974, 5: 929-932.
- [8] Hardwick D A, Thompson A W, Bernstein I M. The effect of copper content and heat treatment on the hydrogen embrittlement of 7050-type alloys[J]. Corrosion Science, 1988, 28(12): 1127-1137.
- [9] 宋仁国, 曾梅光, 张宝金, 等. 7050 铝合金晶界偏析与应力腐蚀、腐蚀疲劳行为的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1996, 16(1): 1-7.
- SONG Ren-guo, ZENG Mei-guang, ZHANG Bao-jin, et al. Investigation relation between grain boundary segregation and behavior of stress corrosion and corrosion fatigue in 7050 aluminium[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1996, 16(1): 1-7.
- [10] 段玉波, 唐 剑, 刁文武, 等. 化学成分对 7050 合金扁锭成型性能的影响[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(4): 100-102.
- DUAN Yu-bo, TANG Jian, DIAO Wen-wu, et al. Effect of chemical composition on formation performance of 7050 alloy billets[J]. Journal of Chongqing University, 2004, 27(4): 100-102.
- [11] 陆海庆, 张思平. 7050-T7651 铝合金预拉伸厚板生产工艺研究[J]. 铝加工, 2004, 157(4): 48-54.
- LU Hai-qing, ZHANG Si-ping. Study on process of 7.75-T 7651 aluminum alloy prestretched plate[J]. Aluminum Fabrication, 2004, 157(4): 48-54.
- [12] 郑立静, 张 焱, 曾梅光, 等. ECAP 制备的亚微米 7050 铝合金的力学性能和微观结构[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(5): 1012-1015.
- ZHENG Li-jing, ZHANG Yan, ZENG Mei-guang, et al. Microstructure and mechanical properties of submicrometer 7050 aluminum alloy prepared by ECAP[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Met-

- als, 2002, 12(5): 1012 - 1015.
- [13] Nakai M, Eto T. New retrogression and reaging process for high strength and high stress corrosion resistance 7050 aluminum alloys[J]. Aluminum Alloys, 1998, 3: 1621 - 1626.
- [14] 谷亦杰, 李永霞, 张永刚, 等. 7050 合金 RRA 沉淀析出的 TEM 研究[J]. 航空材料学报, 2000, 20(4): 1 - 5.
- GU YF-jie, LI Yong-xia, ZHANG Yong-gang, et al. TEM observation of precipitates in a 7050 alloy after RRA treatment[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2000, 20(4): 1 - 5.
- [15] 谷亦杰, 林建国, 张永刚, 等. 回归再时效(RRA)处理对 7050 合金的影响[J]. 金属热处理, 2001(1): 32 - 34.
- GU YF-jie, LIN Jian-guo, ZHANG Yong-gang, et al. Effect of RRA treatment on microstructures of 7050 aluminium alloy[J]. The Heat Treatment of Metals, 2001(1): 32 - 34.
- [16] 邱宏伟, 于淑滨, 马洪武. 7050 铝合金厚板 RRA 处理过程中性能和组织变化[J]. 轻合金加工技术, 1997, 25(9): 34 - 37.
- QIU Hong-wei, YU Shu-bin, MA Hong-wu. The of microstructure and mechanical properties of 7050 plate during RRA treatment[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1997, 25(9): 34 - 37.
- [17] 郭俊峰, 李平, 赵刚, 等. 7055 合金挤压带板纵横向的组织与性能[J]. 材料与冶金学报, 2004, 3(3): 219 - 223.
- GUO Jun-feng, LI Ping, ZHAO Gang, et al. Study on microstructures and mechanical properties of 7055 alloy extruded plate in longitudinal and transverse direction[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2004, 3(3): 219 - 223.
- [18] 姜文辉. 高强铝合金热处理制度的再探讨[D]. 沈阳: 东北大学, 1986.
- JIANG Wen-hui. An Investigation of Heat Treatment of High Strength Aluminium Alloys[D]. Shenyang: Northeastern University, 1986.

(编辑 何学锋)