

文章编号: 1004-0609(2004)10-1683-06

挤压比对 6201 铝合金半固态连续挤压 成形组织和性能的影响^①

周天国, 温景林, 陈彦博, 李英龙, 王顺成

(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘 要: 研究了挤压比对 6201 合金线材的微观组织、力学性能和导电性能的影响。结果表明: 随着挤压比的增大, T6 态合金的强化相 β (Mg_2Si) 弥散质点的尺寸减小, 弥散程度增加, 合金线材的抗拉强度, 延伸率和电阻率增大, 其增大的趋势随着挤压比的进一步增加而逐渐减小; 当挤压比一定时, 随着在线固溶温度与时效温度的升高, 线材的力学性能下降, 导电性能升高。当挤压比为 16.5~29.7, 线固溶温度为 520~540 °C, 时效温度为 150~160 °C 时, 合金力学性能和导电性能分别为: $\sigma_b=310\sim328\text{ MPa}$, $\delta=8.5\%\sim10.3\%$, $\rho=0.0322\sim0.0328\text{ n}\Omega\cdot\text{m}$, 较好地满足 Al-Mg-Si 导线标准要求。采用合理的挤压比, 可直接生产性能良好的铝合金导电线材。

关键词: 6201 铝合金; 挤压比; 连续挤压; 半固态; 电阻率

中图分类号: TG 335.11; TG 249.9

文献标识码: A

Effect of extrusion ratio on microstructures and properties of 6201 alloy wire produced by semisolid continuous extrusion

ZHOU Tian-guo, WEN Jin-lin, CHEN Yan-bo, LI Ying-long, WANG Shun-cheng

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Effect of extrusion ratio on microstructures, mechanical properties and electric resistivity of 6201 alloy wire were investigated. It is shown that when the extrusion ratio increases, under T6 heat treatment state, precipitation-hardening phases β (Mg_2Si) precipitate heavily and become smaller, meanwhile, the tensile strength, elongation and electric resistivity increase. However, this increase tendency becomes moderate with further increase of extrusion ratio. For a given extrusion ratio, mechanical properties of alloy wire decrease and conductivity increases with increase of on-line solution temperature and ageing temperature. Under the conditions that the extrusion ratio is 16.5~29.7, on-line solution temperature is 520~540 °C and ageing temperature is 150~160 °C, the mechanical properties and electric resistivity are $\sigma_b=310\sim328\text{ MPa}$, $\delta=8.5\%\sim10.3\%$ and $\rho=0.0322\sim0.0328\text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ respectively. It is satisfied for the application of Al-Mg-Si conductor wire. So fine aluminum conductor wire can be produced by the proposed process and under proper extrusion ratio.

Key words: 6201 aluminum alloy; extrusion ratio; continuous extrusion; semisolid; resistivity

半固态连续挤压技术是集金属半固态浆料制备和连续挤压为一体的有色金属近终成形新技术, 是传统挤压技术和连续挤压技术的进一步发展。与传统挤压工艺相比, 半固态连续挤压技术具有设备投

资少、节能、效率高、连续化生产和挤压出口温度和晶粒大小易于控制等一系列优点, 但迄今为止, 英国的 ALFOM ALLOYS 公司对该技术的应用还停留在生产纯铝导线阶段, 未见生产 6201 铝合金高

① 基金项目: 国家自然科学基金与上海宝钢集团公司联合资助项目(50274020)

收稿日期: 2004-03-01; 修订日期: 2004-05-20

作者简介: 周天国(1964-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 周天国, 电话: 024-83686459; E-mail: ztg6835@sina.com

强度导电线材的相关报道^[1,2]。众所周知,人们对可形变热处理铝合金材料的热处理强化进行了广泛的研究^[3-5], Lutts 和 Thomas 等提出了广泛采用的过剩 Si 合金的时效脱溶模型。其过程为: 过饱和固溶体 $\rightarrow$ GP-I $\rightarrow$ β'' (GP-II 区) $\rightarrow$ β' $\rightarrow$ β (Mg_2Si) + Si 相; Thomas 等还对析出相种类、大小、形貌的变化做了深入的研究, 研究表明: 随着时效时间的延长, 析出相逐渐长大, 其各阶段析出相的分布情况为: GP-I 区大小为 1~3 nm, 完全共格球化; GP-II 典型结构为细针状, 尺寸为 $4\text{ nm} \times 4\text{ nm} \times 50\text{ nm}$, β' 相为密集六方晶体, 其大小分别是 $a = 0.705\text{ nm}$, $c = 0.405\text{ nm}$ 和 $a = 0.104\text{ nm}$, $c = 0.405\text{ nm}$; β 析出相为 fcc 结构, $a = 0.639\text{ nm}$ 。合金的力学性能不仅与合金的化学成分、挤压工艺、固溶温度及随后的冷却速度、时效温度等工艺有关, 还与主要强化相 β' (Mg_2Si) 的形态、结构、大小等因素有关; 其中 β' 相是 Al-Mg-Si 系合金的主要强化相。Cavazos 等对 6063 合金挤压制品的力学性能与挤压比及固溶冷却速度间的关系进行了深入的研究表明^[6-9]: 随着挤压比和冷却速度的增加, 合金的最大时效强度呈现上升的趋势, 但对力学性能和导电性能之间的相互关系缺乏研究。为了获得组织和性能稳定、导电性能和力学性能(抗拉强度 $\geq 300\text{ MPa}$) 匹配最佳的铝合金线材, 本文作者主要研究挤压比对不同出模温度的合金线材的微观组织、力学性能和导电性能的影响。

1 实验

以工业纯铝, Al-Si 中间合金和工业纯镁为合金原料, 制备 6201 合金液体坯料, 该合金的固相线温度为 $607\text{ }^\circ\text{C}$, 液相线温度为 $654\text{ }^\circ\text{C}$, 半固态加工温度范围为 $47\text{ }^\circ\text{C}$, 其化学成分如表 1 所示; 在相同挤压筒和挤压轮转速的条件下, 采用半固态连续挤压成形工艺生产了挤压比 λ 分别为 7.1(A), 11.8(B), 16.5(C), 23.0(D), 29.5(E) 的铝合金线材, 挤压比的计算公式为: 挤压比 = 挤压筒的横断面面积/线材的横断面面积, 在挤压出口分别进行水淬在线固溶处理, 其工艺参数如表 2 所示。

表 1 试样的化学成分

Mg	Si	Fe	Cu	Al
0.8	0.7	0.1	0.02	Bal.

表 2 试样的时效工艺参数

Table 2 Aging process parameters of specimens

Specimen No.	Extrusion exit temperature/ $^\circ\text{C}$	Extrusion ratio	Artificial aging temperature/ $^\circ\text{C}$
A	540, 520	7.1	170, 160, 150
B	540, 520	11.8	170, 160, 150
C	540, 520	16.5	170, 160, 150
D	540, 520	23.0	170, 160, 150
E	540, 520	29.7	170, 160, 150

首先将合金线材制成标准的拉伸试样, 然后分别对试样进行人工时效, 时效后试样在 INSTRON 4206 电子拉伸试验机上进行拉伸试验, 取 3 组试样的最小值。金相样品经磨光、抛光后, 用合酸腐蚀, 在 DMIRM 金相显微镜下观察。透射电镜样品采用双喷电解法制取, 电解液为混合液, 电镜观察用 Philp DM420 透射电镜。线材的电性能(抗拉强度 $\geq 295\text{ MPa}$) 测试采用 QJ36 型两用直流电桥, 在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温条件下进行, 取测试电阻的最大值计算电阻率。

2 结果与讨论

2.1 合金线材的微观组织

合金线材连续挤压状态下的显微组织如图 1 所示, 从图 1(a) 可以得出, 连续挤压的合金组织为细小等轴晶。其原因是: 随着挤压比的增加, 一方面挤压轮对合金的剪切作用增大, 导致晶粒大量破碎, 提高了晶粒的再结晶趋势; 其次半固态连续挤压出模温度高达 $520\sim 540\text{ }^\circ\text{C}$, 对合金的形核和再结晶长大有利, 但由于同时形核数量的急剧增加, 加之合金在模腔中的停留时间短, 合金线材出模后又受到快速冷却(降温速度为 $30\text{ }^\circ\text{C/s}$), 反而阻碍了晶粒的长大, 所以呈现图 1(a) 所示的典型再结晶组织; 图 1(b), (c), (d), (e) 为合金峰值时效的 TEM 组织, 由此可以看出, 合金的主要强化相 β' (Mg_2Si) 呈针状析出, 弥散、均匀分布于基体中^[8-10], 析出相的大小随着挤压比的增大而减小, 弥散程度随着挤压比的增大而加重。这是因为随着挤压比的增加, 挤压轮对合金和第二相质点的剪切作用加大, 使得合金相质点破碎程度严重, 强化相元素在随后的人工时效过程中析出、团聚、长大的数量增加, 所以随着挤压比增大, 强化相的密度增大, 而尺寸却减小。从图 1(f) 可以看出, 合金中分布着大量的弥散质点和位错, 并相互钉扎, 这主要

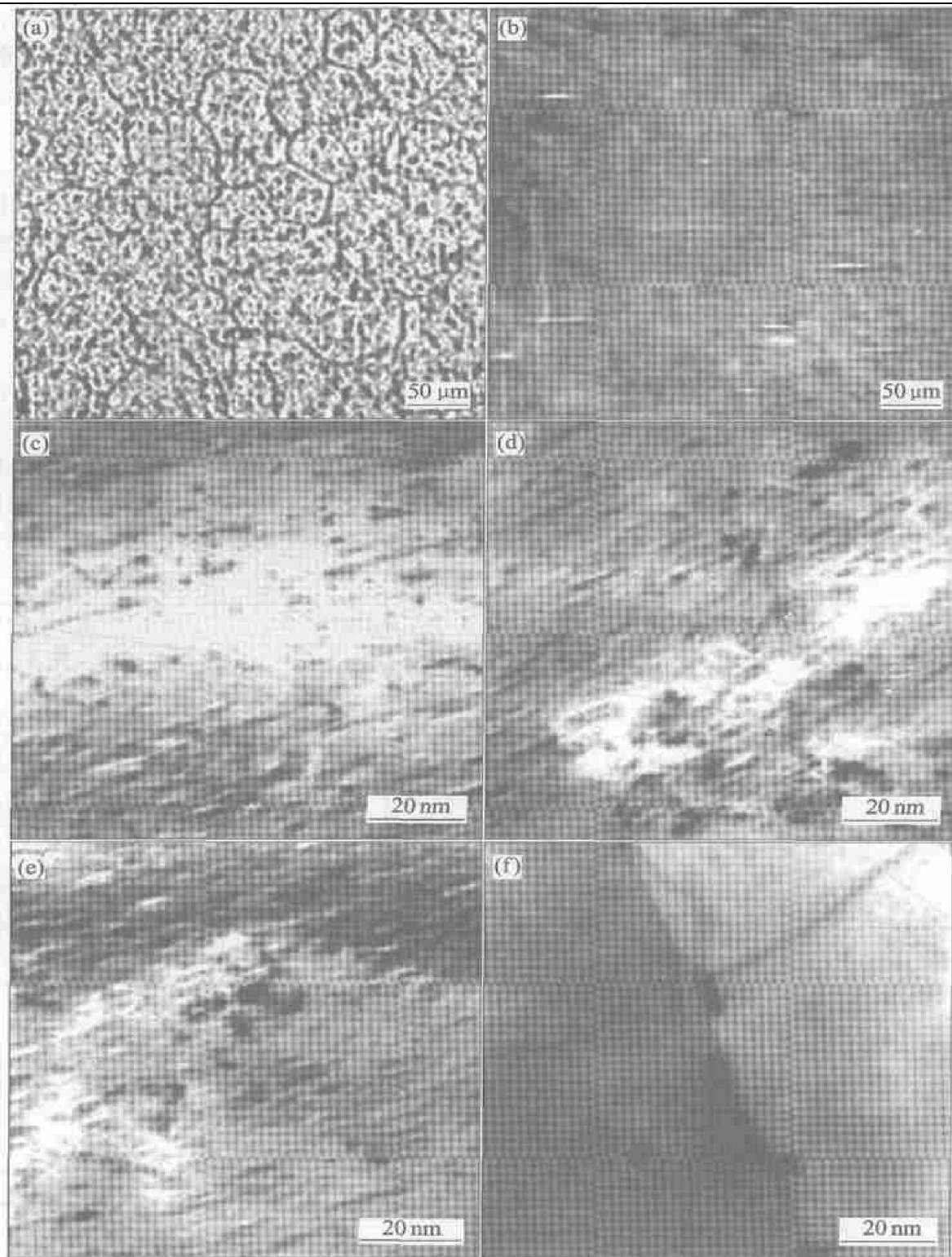


图 1 6201 合金线材的微观组织

Fig. 1 Microstructures of 6201 alloy wires

- (a) —Typical microstructure of alloy wire; (b) —TEM micrograph of alloy A;
 (c) —TEM micrograph of alloy B; (d) —TEM micrograph of alloy D;
 (f) —TEM micrograph of alloy E; (f) —Dispersoids pinning dislocations

是由于挤压轮单辊转动对合金的强烈剪切作用所致。

2.2 合金的力学性能

图 2 所示为合金经不同出模温度和人工时效处

理后最大抗拉强度与挤压比的关系。由图 2 可以看出: 线材的抗拉强度随着挤压比的增大而增大, 随着挤压出口温度和时效温度的升高而降低。其原因是: 由于挤压比的增大, 强化相 β' (Mg_2Si) 的尺寸减小, 密度增大, 对位错运动的阻力增加, 因而强度

升高;时效温度升高,强化相长大的趋势增加,同时发生回复的趋势增加,缺陷减少,对位错运动的阻力减小,从而使线材的强度下降。由图3可以看出合金的延伸率随着挤压比的增加而增大,随着时效温度的升高而减小,随着在线固溶温度的下降而上升。其原因是:挤压比的增加,细化了晶粒,因而提高了线材的延伸率;时效温度升高,强化相长大的趋势上升,引起铝合金基体晶格畸变的趋势增大,导致伸长率下降;另一方面,由于在线固溶温度与挤压出口温度成正比,同时,在一定工艺条件下,挤压出口温度的变化导致晶粒再结晶和晶粒长大速度变化,挤压出口温度愈高,合金的再结晶和晶粒的长大速度愈快,挤压出口温度高的材料的晶粒较大,相反,挤压出口温度较低的合金晶粒则细小;因而在一定挤压出模条件下,挤压温度愈低,

合金的抗拉强度和延伸率则愈高。这较好地符合Cavazos等对析出相种类、大小、形貌的变化机理的研究成果^[9, 10, 13]。

2.3 电阻率

合金线材在峰值时效的电阻率与挤压比的关系如图4所示。由图4可以看出,合金线材的电阻率随着挤压比的增大而升高,随着时效温度和在线固溶温度的升高而下降。其原因是^[12-15]:当挤压比较小时,强化相 β' (GP-II区)和 β 相(图1(b), (c))较大,密度相对较小,对电子的散射作用小,电子运动的自由程长,因而电阻率较低;反之,当挤压比增大时,则强化相 β' (GP-II区)和 β 相较小,密度增大(图1(d), (e)),对电子的散射作用大,缩短了电子运动的自由程,因而电阻率升高。时效温度对

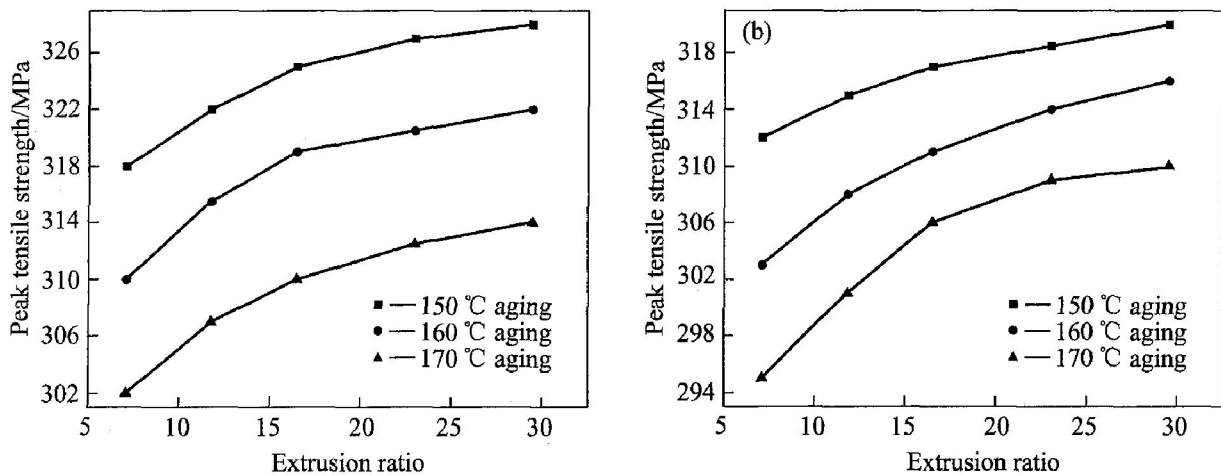


图2 拉伸强度与挤压比的关系

Fig. 2 Relationships between tensile strength and extrusion ratio

(a)—520 °C on-line solution; (b)—540 °C on-line solution

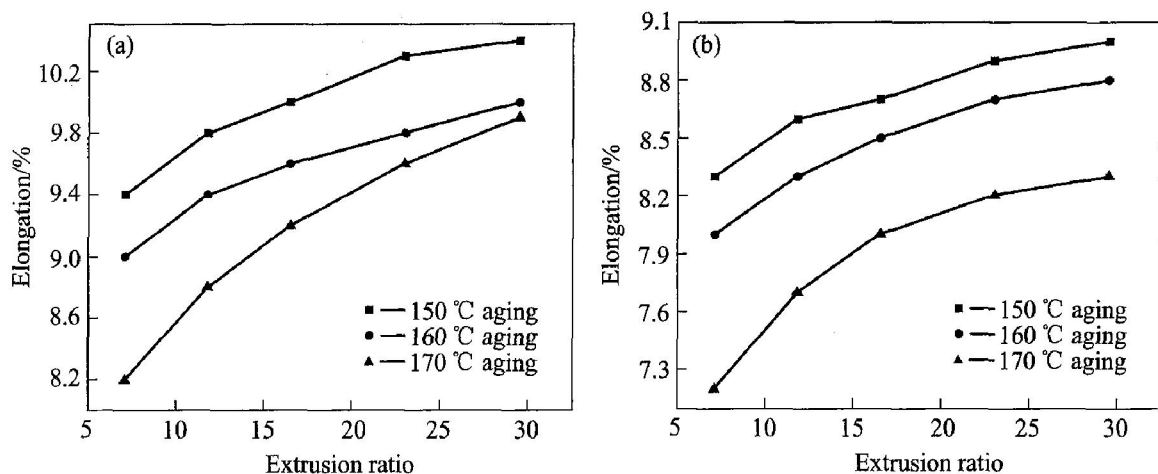


图3 延伸率与挤压比的关系

Fig. 3 Relationships between elongation and extrusion ratio

(a)—520 °C on-line solution; (b)—540 °C on-line solution

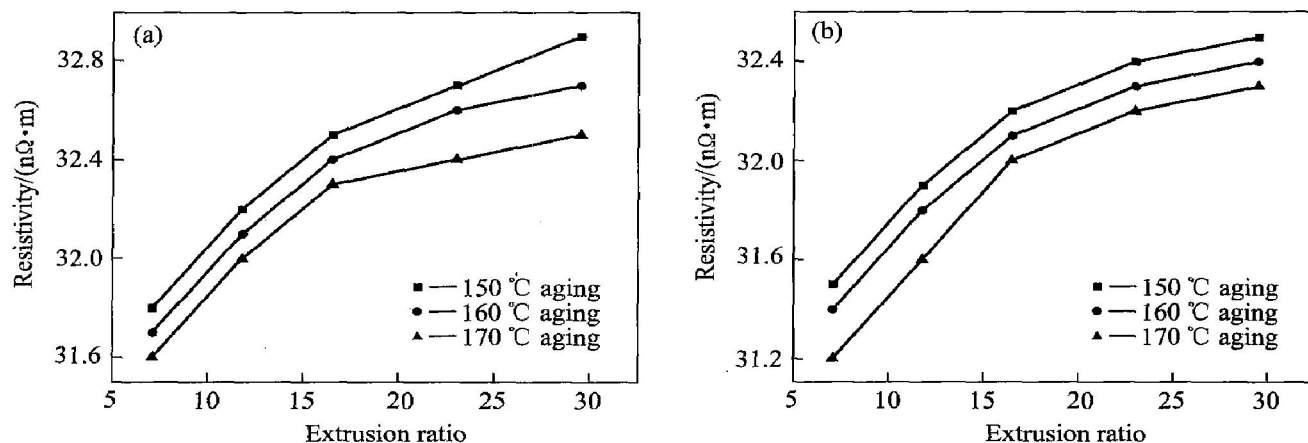


图4 20 °C时电阻率与挤压比的关系

Fig. 4 Relationship between resistivity and extrusion ratio at 20 °C
(a) -520 °C on-line solution; (b) -540 °C on-line solution

线材导电性能的影响主要表现为:随着时效温度的升高,强化相长大趋势增大,对电子运动的散射作用下降,延长了电子运动的自由程,因而温度上升,电阻率下降。在线固溶温度升高,则线材挤压出模温度升高,晶粒粗大,单位体积内晶粒数量和晶界的数量减少,因而电子运动的晶界散射作用减弱,电子运动的自由程增大,电阻率下降。

3 结论

1) 应用半固态连续挤压技术能直接生产出在线固溶所需的淬火组织,减少传统的固溶工序,节约能源。

2) 挤压比影响合金的显微组织和合金中主要强化相 β (Mg_2Si)的尺寸,随着挤压比的增大,合金中强化相 β 尺寸减小,密度增大。

3) 在一定的挤压温度条件下,随着挤压比的增大,合金抗拉强度、延伸率和电阻率增大;随着时效时间的延长和挤压出口温度的降低,合金的抗拉强度呈现上升趋势,而延伸率和电阻率则呈现下降趋势。

4) 6201铝合金线材的最佳生产工艺为:挤压比16.5~30.0,520~540 °C在线水淬固溶,150~160 °C时效。合金线材的综合性能满足铝合金导线标准的要求。合金的拉伸强度为310~328 MPa,延伸率为8.5%~10.3%,电阻率为0.032 2~0.032 8 $n\Omega\cdot m$ 。

REFERENCES

[1] 温景林,管仁国,刘相华. A2017半固态合金的半固态扩展成形[J]. 材料研究学报,2003,17(1): 55 -

61.

WEN Jir-ling, GUAN Ren-guo, LIU Xiang-hua. Manufacturing semisolid A2017 alloy by SRS process and semisolid extending forming [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2003, 17(1): 55 - 61.

[2] 张愈祖,张辉,彭大暑,等. 6201铝合金热连轧的实验模拟[J]. 中国有色金属学报,2000,10(4): 525 - 528.

ZHANG Yu-zu, ZHANG Hui, PENG Da-shu, et al. Experimental simulation on continuous hot-rolling of 6201 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(4): 525 - 528.

[3] Murayama M, Hono K, Saga M, et al. Atom probe studies on the early stages of precipitation in Al-Mg-Si alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A250: 127 - 132.

[4] Edwards G A, Stiller K, Dunlop G L, et al. The precipitation sequence in Al-Mg-Si alloys [J]. Acta Mater, 1998, 46 (11): 3893 - 3904.

[5] Lodgaard L, Ryum N. Precipitation of dispersoids containing Mn and/or Cr in Al-Mg-Si alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A283: 144 - 152.

[6] Cavazos J L, Colás R. Quench sensitivity of a heat treatable aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A363: 171 - 178.

[7] Karabay S, Zeren M, Yilmaz M. Investigation extrusion ratio effect on mechanical behavior of extruded alloy AA-6063 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003(135): 101 - 108.

[8] McQueen H J, Xia X, Cui X, et al. Solution and precipitation effects on hot workability of 6201 alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2001, A319 - 321: 420 - 424.

[9] Cavazos J L, Colás R. Precipitation in a heat treatable aluminum alloy cooled at different rates [J]. Materials Characterization, 2001(47): 175 - 179.

- [10] Murayama M, Hono K. Pre-precipitate and precipitation processes in Al-Mg-Si alloys [J]. *Acta Mater*, 1999, 47(5): 1537 - 1548.
- [11] Andersen S J, Zandbergen H W, Jansen J, et al. The crystal structure of the β'' phase in Al-Mg-Si alloys [J]. *Acta Mater*, 1998, 46(9): 3283 - 3298.
- [12] Gupta A K, Lloyd D J, Court S A. Precipitation hardening in Al-Mg-Si alloys with and without excess Si [J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, A316: 11 - 17.
- [13] Siddiqui R A, Abdullah H A, Belushi K R. Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminum alloy [J]. *Journals of Materials Processing Technology*, 2000(102): 234 - 240.
- [14] Duan X J, Sheppard T. Simulation and control of microstructure evolution during hot extrusion of hard aluminum alloys [J]. *Material Science and Engineering*, 2003, A351: 282 - 292.
- [15] Cabibbo M, Spigarelli S, Evangelista E. A TEM investigation on the effect of semisolid forming on precipitation processes in an Al-Mg-Si alloy [J]. *Materials Characterization*, 2003(49): 193 - 202.

(编辑 吴家泉)