

文章编号: 1004-0609(2003)06-1461-06

在线淬火工艺对 6005A 合金挤压型材 组织与性能的影响^①

沈 健¹, 李彦利¹, 朱鸣峰²

(1. 北京有色金属研究总院, 北京 100088;

2. 西南铝业(集团)有限责任公司, 重庆 401326)

摘 要: 采用正交试验和模拟试验的方法, 研究了在线淬火方式、淬火冷却速度及淬火延迟时间对 6005A 铝合金空心型材组织和性能的影响。结果表明: 提高在线淬火冷却强度比提高挤压温度和挤压速度对改善型材性能的效果更明显, 型材强度随淬火冷却速度的增大明显提高, 而延伸率并无明显降低; 在线精密水雾淬火可使型材性能满足车辆型材使用要求; 缩短在线淬火前型材在室温环境下的停留时间, 可以显著提高型材强度性能。

关键词: 6005A 合金; 在线淬火; 性能; 挤压

中图分类号: TG 146.21; TG 151; TG 376.2

文献标识码: A

轨道交通用 6000 和 7000 系大型扁宽薄壁复杂断面铝合金空心 and 实心型材是地铁列车、高速列车和轻轨列车等高速化、轻量化的关键材料之一。生产技术难度大, 主要表现在型材大宽幅、大宽厚比、大压挤系数与挤压筒的小比压之间的矛盾以及需精确控制在线淬火工艺等方面, 大多需要在大吨位挤压机上采用扁挤压技术生产, 对挤压工艺参数的选择, 特别是对在线淬火条件的选择非常苛刻^[1, 2]。热挤压与在线淬火工艺是影响 Al-Mg-Si 合金可挤压成形性、组织及性能的重要因素, 有时甚至是决定性因素^[3]。

6005A 合金是一种含过剩 Si 的 Al-Mg-Si 系合金, 过剩 Si 的存在有利于通过细化 β' 相和 Si 质点相来增强时效沉淀强化效果^[4-7]。虽然 6005A 合金的挤压性能较好, 较小规格型材采用在线风冷淬火的方式生产, 并经时效处理后一般可以获得满足使用要求的强度性能, 但对断面形状复杂的 6005A 大宽幅空心型材来讲, 采用在线风淬很难保证淬火效果, 通常需要采用水雾淬火或风冷+水雾复合淬火来保证性能^[8, 9]。挤压后淬火时机的选择对型材性能也有着较大的影响^[8], 因而对在线淬火工艺的选择与优化就显得尤为重要。特别是合金中添加了 Mn、Cr 等合金元素, 使合金的淬火敏感性发生变化, 并影响挤压后型材的组织变化^[10]。

本文作者研究了不同在线淬火工艺条件对 6005A 合金挤压型材组织及时效后 β' -Mg₂Si 沉淀强化相的析出行为的影响, 探讨了在线淬火工艺与型材性能的关系, 提出了 6005A 合金大型材合理的挤压与热处理工艺条件。

1 实验

在 25MN 挤压机上用尺寸为 192 mm × 650 mm 铸锭挤压铸成尺寸为 60 mm × 80 mm × 4 mm 的 6005A 空心型材, 合金成分为 Al-0.62Mg-0.70Si-0.20Mn-0.07Cu-0.03Cr-0.14Fe。铸锭感应梯温加热温度为 490~550 °C, 个别铸锭采用 570 °C 超高温挤压, 挤压速度为 1~5 m/min。型材挤压后进行在线淬火, 在线淬火冷却方式包括风冷和水雾冷 2 种, 随后对型材进行 1%~3% 拉伸矫直和 175 °C, 8 h 人工时效处理。挤压温度、速度、淬火条件选择按三因素三水平正交试验方案安排。

在型材长度方向上取板片状试样, 分别在 500 °C 和 540 °C 重新进行固溶处理, 出炉后在空气中放置(延迟)不同时间后进行强风冷淬火, 模拟风淬条件下型材的冷却过程和淬火冷却强度, 淬火延迟时间为 10~600 min, 挤压后时效并测量其布氏硬度(HBS)变化, 研究淬火冷却速度和延迟时间对

① 基金项目: 国家计委“九五”产业化前期关键技术研制开发项目资助项目(计高技[1998]1907 号)

收稿日期: 2003-05-30; 修订日期: 2003-09-19

作者简介: 沈 健(1968-), 男, 教授级高级工程师, 博士。

通讯联系人: 沈 健, 教授级高级工程师, 博士; Tel: 010-82241261; E-mail: jshen@mail.grim.com.cn

6005A 型材性能的影响。型材的抗拉强度 σ_b 、屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 、延伸率 δ_5 、硬度 HBS 等力学性能测试按 GB228—87 进行。分别观察在不同线淬火条件下型材的纵向宏观(OM)和微观(TEM)组织,评价在线淬火工艺对型材组织的影响。

2 结果与讨论

2.1 淬火冷却速度对型材性能的影响

选用型材的屈服强度作为正交方差分析的评价指标,不同挤压工艺条件对型材性能影响的分析数据如表 1 所示。表中(I_j , II_j , III_j)分别为正交表中第 j 列(因素 $j=1, 2, 3$)水平对应的 $\sigma_{0.2}$ 之和, $\bar{I}_j$, $\bar{II}_j$, $\bar{III}_j$ 分别为其相应的平均值,极差 R_j 为 j 因素中 $\bar{I}_j$, $\bar{II}_j$, $\bar{III}_j$ 的最大和最小值之差。根据平均变动平方和 V_j 来判断不同挤压工艺参数对 6005A 型材屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的波动影响程度。

由表 1 可以看出:各挤压工艺参数的平均变动平方和 V_j 均远大于误差项的相应值(23.4),说明挤压温度、挤压速度和淬火方式等工艺参数对 6005A 合金型材性能有较明显的影响,而试验误差(如温度变化、速度差异、性能检测误差等)的影响可以忽略不计。从表 1 中 I_j , II_j , III_j 各值,极差 R_j 及平均变动平方和 V_j 值的大小可以看出,淬火

方式对 6005A 合金型材性能的影响最大,其次是挤压速度和挤压温度。

表 2 所示为部分挤压工艺条件下 6005A 型材的力学性能数据。研究表明:提高挤压温度时,一定挤压速度下挤压后的水雾淬火型材强度增量比风冷型材强度增量大;水雾淬火条件下,提高挤压温度和挤压速度可改善 6005A 型材时效后的强度,但随挤压速度的提高,型材屈服强度和抗拉强度虽然增加,而延伸率却大幅降低。

对型材性能数据进行比较可以发现,风冷淬火(冷却速度 1~4 °C/s)型材的性能都难以满足要求。随淬火冷却速度增加,6005A 型材的抗拉强度和屈服强度明显提高,所有水雾淬火(冷却速度 5~13 °C/s)型材各项性能均超过性能指标要求。型材性能的这种变化趋势,主要是由于在风淬前的空冷及风淬的低速冷却过程中,型材温度已大幅下降,强化相提前析出并长大,降低了时效时的沉淀析出驱动力,从而导致性能降低。而水雾淬火可以保证型材的时效前的固溶效果,促进细小弥散强化相均匀析出,并提高型材强度性能。

验证试验表明,水雾淬火型材强度和塑性性能均高出性能指标要求,正交优化后的最优工艺(表 2 中标有* 号的数据)条件下的强度性能大幅提高,而延伸率却无明显降低。说明正交试验的方案选择

表 1 6005A 合金型材正交挤压工艺试验结果的方差分析
Table 1 Deviation analysis of 6005A extrusion sections

Sample No.	Factors			$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$
	Extrusion	Extrusion	Quenching type	
	temperature/ $^{\circ}\text{C}$	velocity/ $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$		
1	1	1	1	160
2	1	2	2	279
3	1	3	3	175
4	2	1	2	259
5	2	2	3	185
6	2	3	1	197
7	3	1	3	169
8	3	2	1	210
9	3	3	2	285
I_j	614	588	567	
II_j	641	674	823	
III_j	664	657	529	
R_j	50	86	294	
$(I_j^2+II_j^2+III_j^2)/3$	409 591.0	410 556.3	426 219.7	
f_j	2	2	2	
S_j	417.6	1 382.9	17 046.3	
V_j	208.8	691.4	8 523.1	

表 2 部分挤压工艺条件下 6005A 型材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 6005A sections extruded under different conditions							
Extrusion temperature/ °C	Extrusion velocity/ (m•min ^{- 1})	Quenching type	Aging	σ _b /MPa	σ _{0. 2} /MPa	δ ₅ /%	HBS
510	3	Fan quenching	175 °C, 8 h	217	186	14	60. 7
510	3	Water spray quenching		302	284	11	84. 1
530	1	Fan quenching		209	169	15	61. 8
530	1	Water spray quenching		290	265	15	82. 6
530	3	Fan quenching		240	210	12	67. 4
530*	3*	Water spray quenching*		323	305	13. 9	—
Standard data				260	215	8	60. 0

是合理的, 结果是可信的。进一步说明淬火冷却强度是影响 6005A 合金型材性能的最重要的参数, 提高淬火冷却强度可明显提高 6005A 型材的各项性能。

2.2 在线淬火工艺对 6005A 型材组织的影响

对型材的光学金相组织观察表明: 几乎所有 6005A 挤压型材均不同程度地发生部分或全部再结晶, 再结晶晶粒尺寸为 10~ 20 μm。部分型材出现厚度不一的表面粗晶层, 粗晶尺寸不等, 约为 0.1 ~ 10 mm 不等。不同淬火条件下型材的典型 OM 组织如图 1 所示。

图 1 表明: 在线淬火冷却速度对 6005A 合金型材的再结晶情况及晶粒大小影响不大, 但挤压速度的影响却要明显得多。比较图 1(a) 和(c) 可以发现, 即使挤压温度较低, 挤压速度的提高也会使型材的晶粒组织大为粗化。这主要是高速挤压增大了挤压温升效应, 使型材出口温度大幅上升, 型材挤压过程中(淬火前) 有足够的时间发生再结晶和晶粒长大, 而导致晶粒粗大。这种粗晶组织的出现对改善型材的耐腐蚀、焊接及疲劳性能不利, 并严重恶化型材的表面质量。

虽然提高淬火冷却速度不能明显细化型材晶粒组织, 但能大幅度提高型材的性能, 这主要与快冷条件下 6005A 合金中合金元素的固溶程度的提高有关。图 2 所示为风淬和水雾淬型材中的不同 β-Mg₂Si 析出相的 TEM 形貌。从图 2(a) 和(b) 可以看到, 风冷淬火型材中均不同程度地出现大量粗大的 β 相, 随挤压温度升高, 型材中所形成的 β 相得到细化, 因淬火冷却速度的提高而导致的 β 相细化和弥散析出效果十分明显, 在图 2(c) 的水雾淬火型材中, 无任何粗大 Mg₂Si 相析出, β 相以非常细小、均匀、弥散的形式析出。

Al-Mg-Si 合金中的主要强化相为时效过程中弥散析出的 β-Mg₂Si 相, 其次是过剩 Si 相。β 相和

过剩 Si 相的尺寸越小, 数量越多, 合金强度就越高^[4, 11]。6005A 合金中 β 相的形核驱动力主要取决于 3 个方面, 即固溶体的过饱和程度、过剩 Si 含量以及含 Mn, Cr, Zr 的弥散中间相的含量。过剩 Si 含量以及含 Mn, Cr, Zr 的弥散中间相的存在可作为 β 非均匀形核核心而诱发其形核^[10]。毫无疑问, 挤压加热温度越高, 挤压前固溶体的过饱和程度越大, 挤压过程中 Mg, Si 等合金元素会继续溶入基体中, 增大基体的过饱和固溶程度, 增大时效时 β 的形核驱动力, 使 β 相细化。

采用在线风冷淬火, 冷却强度较低, 在风淬前的空冷过程中及风冷时 β-Mg₂Si 相仍会发生前期非均匀析出和长大, 使析出相较粗大且分布不均。水雾冷却条件下, 型材温度可以在相当短的时间内降低到 200 °C 以下, 避免了淬火过程中 β 的前期非均匀析出, 确保了时效时 Mg, Si 元素的过饱和固溶度和 β 的形核驱动力, 促使其在时效时均匀析出和细化, 从而大大提高型材的性能。

如果风冷淬火的冷却强度足够大(如冷却速度达到 5 °C/s 或以上), 也可以获得较好的淬火效果, 使型材获得满意的性能。Barry 等^[12] 认为, 6005 合金的最佳淬火冷却速度应达到 5~ 10 °C/s, 壁厚 4.4 mm 以上型材淬火冷却速度应高于 8 °C/s。采用精密淬火装置^[13, 14] 时, 对 6000 系型材来讲, 平均淬火冷却速度控制在 7~ 20 °C/s 可保证获得满意的性能。但冷却速度过高, 型材各部分冷却不均匀时, 可能使型材发生严重扭拧变形而增大矫直的难度。因此, 6005A 合金型材在线淬火冷却强度的选择非常重要, 一般应达到 5 °C/s 以上。

2.3 淬火延迟时间对型材性能的影响

不同固溶处理温度 and 不同淬火延迟时间下 6005A 合金型材的布氏硬度(HBS) 测量结果如表 3 所示, 表中的强度值根据挤压型材的性能数据进行反算^[9] 而得。

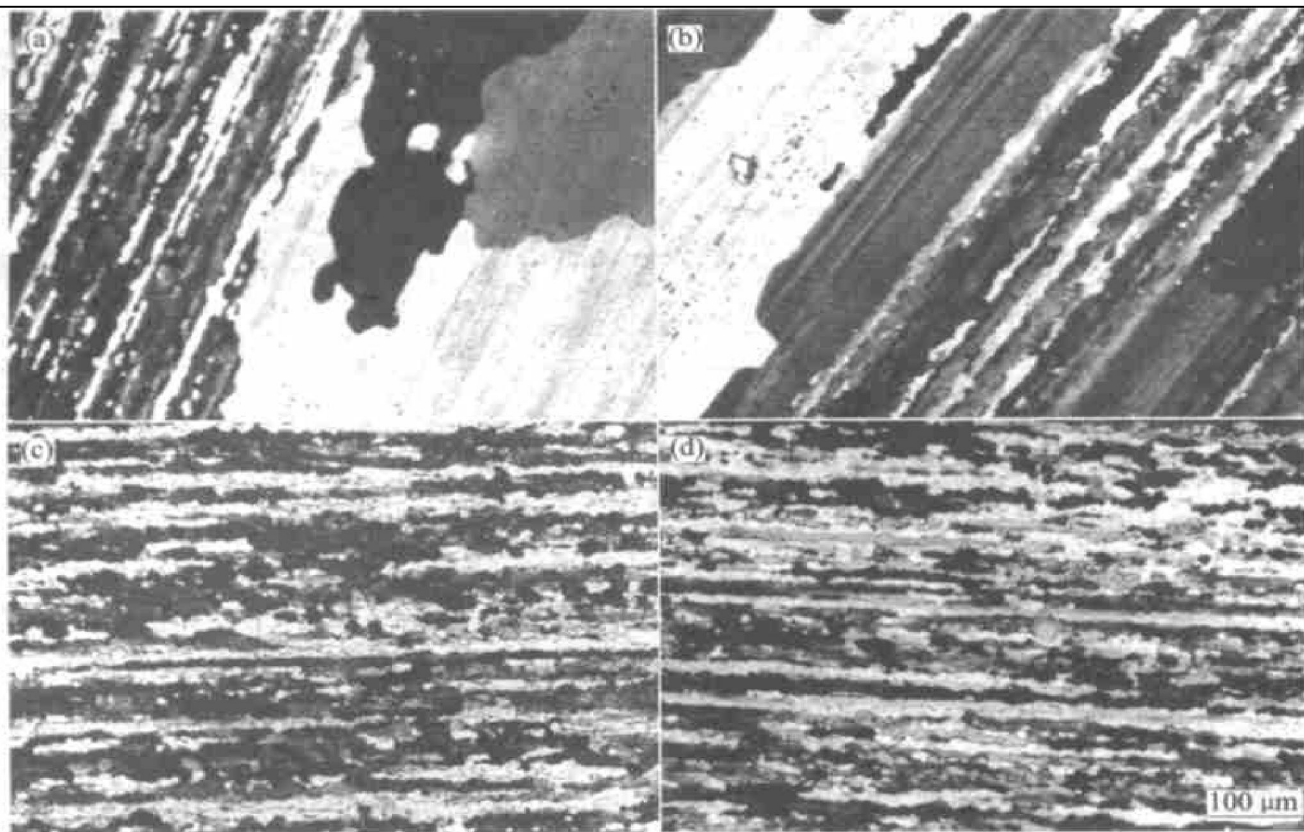


图 1 不同挤压工艺条件下 6005A 型材的晶粒组织

Fig. 1 Grain morphologies of 6005A section extruded under different conditions

(a) $-510\text{ }^{\circ}\text{C}$, $3\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, fan quenching; (b) $-510\text{ }^{\circ}\text{C}$, $3\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, water-spray quenching
(c) $-530\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, fan quenching; (d) $-530\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, water-spray quenching

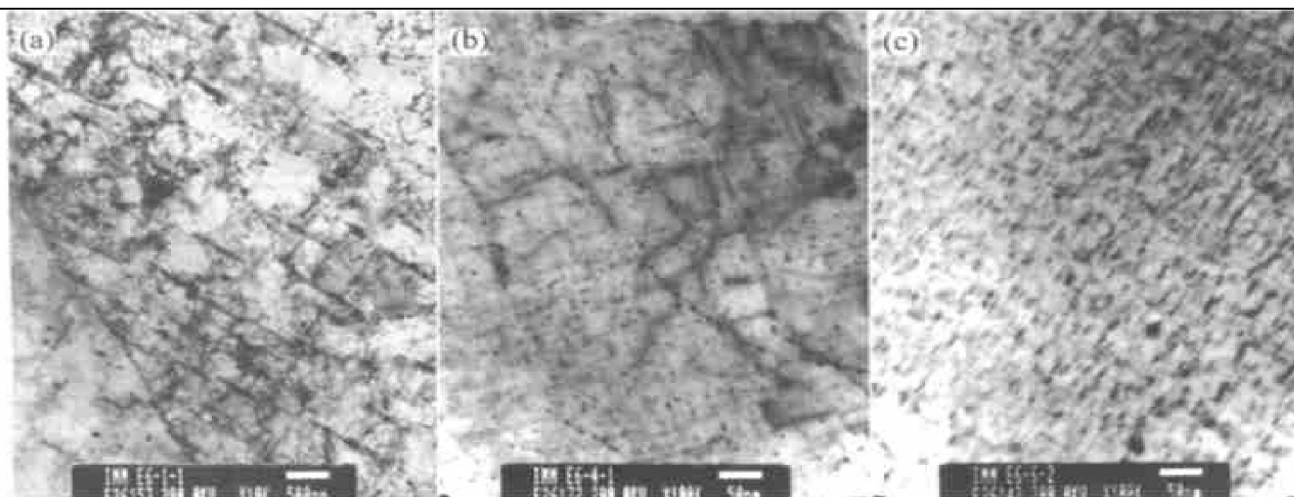


图 2 6005A 型材中析出的 β - Mg_2Si 相形貌

Fig. 2 TEM morphologies of β - Mg_2Si precipitating in 6005A extrusion sections

(a) $-490\text{ }^{\circ}\text{C}$, fan quenching; (b) $-530\text{ }^{\circ}\text{C}$, fan quenching; (c) $-530\text{ }^{\circ}\text{C}$, water-spray quenching

从表 3 中 6005A 型材的硬度变化可以看出, 固溶温度(模拟挤压出口温度)越高, 淬火前室温停放(淬火延迟)对合金性能的影响越大。型材在空气中的淬火延迟时间越长, 时效后的性能降低越大。如在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶后, 风冷淬火前在空气中停留 10, 60, 100 s 后, HBS 分别下降 1.8%, 8.6% 和

12.4%, 相应地屈服强度降低 2.5%, 11.2% 和 16.3%。在 $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶条件下, 停留时间由 60 s 增加到 100 s 后, 硬度将急剧降低 20.1%, 10 min 后降低 35.7%, 强度损失分别高达 24.8% 和 43.9%。Gullotti 等^[5]发现: 6 005 合金经 $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶处理后快速冷却到 $357\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在此温度保温一定时间后水淬

表 3 不同淬火延迟时间下 6005A 合金型材的性能

Table 3 Mechanical properties of 6005A sections after different delay-time before press quenching

Solution temperature/ °C	Delay-time before quenching/ s	Aging	HBS	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	Δ HBS/ %	$\Delta \sigma_{0.2}$ / %
500	10	175 °C, 8 h	81.3	290	269	- 1.8	- 2.5
	60		75.7	270	245	- 8.6	- 11.2
	100		258.0	231	12.4	- 16.3	
	600		72.9	259	233	- 12.0	- 15.6
540	10	175 °C, 8 h	100.1	358	350	- 0.2	- 0.3
	60		100.1	358	350	- 0.2	- 0.3
	100		80.1	286	264	- 20.1	- 24.8
	600		64.5	229	197	- 35.7	- 43.9

并进行人工时效处理, 保温时间达 10 s, 1 min, 3 min后, 合金强度比不经保温的合金分别降低 3.9%, 7.8% 和 18%。这一结果与本研究结果一致, 说明淬火延迟时间的延长将大幅降低合金型材的性能。

经测定, 大部分挤压条件下 6005A 型材出口温度为 485~ 530 °C, 挤压后的空冷速度为 50~ 100 °C/min, 风淬前的淬火延迟时间为 1~ 4 min。这段时间内型材表面温度将下降到 300~ 400 °C左右, 特别在低速挤压时温降较大。文献[15] 表明: β -Mg₂Si 相在 316~ 427 °C范围内析出最快, 开始析出前的孕育时间仅为 7~ 70 s。6005A 型材在淬火延迟时间内的温降过程中, 原来固溶在铝中的 β 等相将从基体中快速析出并长大。挤压温度越低、挤压速度越慢, 风冷淬火延迟时间就越长, β 相的先期析出就越多, 导致随后弥散析出的 β 相减少, 使 T5 型材性能大幅降低。

结合以上对在线淬火方式、淬火冷却强度及淬火延迟时间对型材性能的分析, 可以认为大截面 6005A 型材挤压时应尽早进行在线强制风冷淬火(冷却速度> 5 °C/s)或风冷+ 水雾联合淬火, 以减少型材在淬火前的空冷过程中 β -Mg₂Si 相的非均匀析出, 尽量提高型材时效前的过饱和固溶程度, 防止型材因冷却速度和淬火延迟时间过长而导致性能的大幅度降低。

3 结论

挤压温度、挤压速度和淬火方式等工艺参数对 6005A 合金型材性能有较明显的影响, 淬火冷却强度是影响 6005A 合金型材性能的最重要的参数, 提高淬火冷却强度可在不显著降低 6005A 型材塑性的情况下明显提高型材的强度性能。在线淬火冷却

强度应达到 5 °C/s 以上, 在线水雾淬火可使 6005A 型材性能满足使用要求。

提高在线淬火冷却速度对 6005A 合金型材的再结晶情况及晶粒大小变化影响不大, 但却能大幅度提高型材的性能。水雾淬火可避免淬火过程中 β 的前期非均匀析出, 确保时效时 β 相的形核驱动力, 促使其均匀弥散析出, 从而大大提高型材的性能。淬火延迟时间的延长将导致 β 等相的非均匀析出和长大, 并由此降低时效时 β 相的形核驱动力, 从而大幅度降低型材的力学性能。

REFERENCES

[1] 刘静安. 大型工业铝合金型材的挤压生产工艺与关键技术(续)[J]. 铝加工, 2001, 24(3): 1~7.
LIU Jing-an. Extrusion techniques and key technologies for large commercial aluminium sections[J]. Aluminium Fabrication, 2001, 24(3): 1~7.

[2] 刘静安, 赵云路. 铝材挤压生产关键技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社. 1997. 230~242.
LIU Jing-an, ZHAO Yun-lu. Key Technology for Extrusion of Aluminium Alloys[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997. 230~242.

[3] 刘静安. Al-Mg-Si 系合金的热加工工艺与可挤压性[J]. 铝加工, 2002, 25(1): 1~5.
LIU Jing-an. Hot deformation technology and extrudability of Al-Mg-Si series alloy[J]. Aluminium Fabrication, 2002, 25(1): 1~5.

[4] Hassen P, Cahn R W, Haasen P, et al. Structure and Properties of Nonferrous Metals[A]. Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment, Vol. 8 [M]. Weinheim, Gernmay: VCH Verlagsgesselschaft GmbH, 1996. 248~250.

[5] Annenkoff A, Marchive D. Properties of 6106 and 6005A extrusion alloys[A]. Proceedings of the 2nd In-

[12] 王德伟, 王明普, 王正安, 等. 在线挤压淬火对地铁列车用 6005A 合金力学性能及微观组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 603-606.
WANG Zhi-wei, WANG Ming-pu, WANG Zheng-an, et al. Effects of on-line extrusion quenching technique on mechanical properties and microscopic structure of 6005A alloy employed in underground railway trains[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 603

606. Technology behind the press[J]. Aluminium, 1998, 78(5): 340-348.

[15] Gullotti D V, Crane J, Setzer W C. Isothermal transformation characteristics of several 6xxx series alloys [A]. Proceedings of the 3rd International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Vol. 1[C]. Atlanta: Aluminium Association Incorporation & Aluminium Extruders Council, 1984, 1: 250-257.

Effect of press quenching variables on microstructures and mechanical properties of 6005A alloy extrusion sections

SHEN Jian¹, LI Yan-li¹, ZHU Ming-feng²

(1. General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China;

2. Southwest Aluminium (Group) Co. Ltd, Chongqing 401326, China)

Abstract: Effects of the type of press quenching, the cooling velocity and the delay time before press run-out quenching on the microstructures and mechanical properties of Al-Mg-Si (6005A) hollow sections were investigated by orthogonal optimizing method. The results indicate that the increase of cooling rate of the extrusion profiles during press quenching, rather than preheating temperature and extrusion speed, leads to significant improvement of the ultra-strengths of the sections with limited diminishing to the elongation, while the shortened delay time before press quenching favors the increase of strength of the sections considerably. The mechanical properties of the 6005A sections intensively water-spray quenched can meet the commercial application requirements for vehicle and transportation industries.

Key words: 6005A alloy; press quenching; mechanical property; extrusion

(编辑 李向群)