2016年12月 December 2016

文章编号: 1004-0609(2016)-12-2523-07



喷射态 7075 合金欠时效低温回归处理

苏睿明, 曲迎东, 李想, 尤俊华, 李荣德

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘 要:采用欠时效代替传统峰值时效处理,再结合低温回归处理,可获得良好的综合性能指标,采用透射电镜 观察、拉伸及电导率测试等方法,研究 RRA 处理中预时效处理对低温回归和再时效后喷射成形 7075 合金组织与性能的影响。结果表明:采用 120 ℃、16 h 的欠时效预处理比 120 ℃、24 h 峰值时效预处理更有利于合金在 160 ℃ 低温回归过程中晶内析出相的回溶,并且晶界相粗化、断开,合金抗腐蚀性能改善。欠时效预处理的合金经低温 RRA 处理后,其抗拉强度、屈服强度、伸长率和电导率分别为 773 MPa、724 MPa、8.8%和 37.2%(IACS),力学性能均高于 T6 峰值时效和传统低温与高温 RRA 的水平,且耐蚀性能也接近传统高温 RRA 制备小尺寸试样的,此工艺更适用于大型件的工业化热处理。

关键词: 7075 铝合金; 喷射成形; 再时效; 低温回归; 预时效; 电导率 中图分类号: TG146.2 文献标志码: A

7075 铝合金属于 7xxx 系 Al-Zn-Mg-Cu 合金,因 其具有比强度高、易加工等优点,广泛应用于航空航 天领域^[1-4]。近年来,众多文献中报道了具有快速凝固 特征的喷射成形技术在 7075 合金制备上应用,其强度 可达 730 MPa 以上^[5-6],为进一步提高 7075 合金综合 性能提供了有力的支撑。作为超高强铝合金,7xxx 系 合金对应力腐蚀较为敏感,尤其以 T6 峰值时效状态 最为突出^[7-8], T73 制度作为改善抗应力腐蚀性能的一 种传统方法,但却带来了 10%~15%的强度损失^[9-11]。

为解决强度和抗腐蚀能力之间的矛盾,1974年, CINA^[12]提出的一种新型热处理方法,即回归再时效 (Retrogression and re-aging, RRA)工艺,它可使7xxx 系铝合金在保持T6状态强度的同时获得接近T7状态 的抗腐蚀能力^[13-15]。由于传统的RRA处理工艺过程 中高温回归时间很短,仅有几十秒至多几分钟,并不 能满足大尺寸产品的工业化应用。现今,只有美国等 少数发达国家对该工艺实现了工业化应用,并且国外 对具体的RRA工艺高度保密。因此,研究和开发工 业化生产中满足于大型件的RRA处理制度对我国的 发展具有十分重要的意义。

针对上述情况,本文作者以喷射成形 7075 铝合金 为对象,利用透射电镜、拉伸测试、电导率测试等手 段,研究 RRA 处理中不同的预时效处理对低温回归 和再时效后合金组织与性能的影响,探讨喷射成形 7075 铝合金预时效处理与回归处理之间的关系以及 它们对整个 RRA 处理的影响。一般地,在 7xxx 系铝 合金抗腐蚀性能的研究中,合金的抗腐蚀性能与电导 率之间存在着正相关的关系,即电导率越大,则其抗 腐蚀性能越高。因此,本文作者采用电导率测试判定 不同时效条件下合金的应力腐蚀倾向,旨在为喷射成 形 7075 铝合金热处理工艺优化提供理论和实验依据, 为进一步的研究提供参考。

1 实验

本实验中所用合金为国标 7075 铝合金,其合金成分(质量分数)见表 1。

喷射成形实验具体工艺参数如下:采用二级雾化, 雾化气体为高压氮气,垂直喷射距离为 370~380 mm; 盘面偏心为 60~65 mm;导液管内径为 3.6 mm;沉积 盘倾角(即液流入射角)为 37°~39°;浇注温度为 770~ 780 ℃;保温坩埚温度为 735~745 ℃;沉积盘水平移 动速度为 0.15 mm/s,垂直移动速度为 0.18 mm/s;喷

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(515774167); 辽宁省创新团队项目(LT2015020)

收稿日期: 2015-10-27; 修订日期: 2016-04-08

通信作者:曲迎东,教授,博士;电话:13889375206; E-mail: LX843352624@163.com

表 1	7075 合金坯料化学分析结果
表 I	7075 合金坯料化字分析结果

Table 1Chemical composition of 7075 alloy (massfraction, %)

Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Mn	Ti	Cr	Al
5.48	2.21	1.48	0.121	0.371	0.278	0.028	0.189	Bal.

射时间约为 12~12.5 min。

喷射成形制得的沉积坯件经热挤压处理,挤压温 度为 420 ℃,坯锭保温 0.5 h,模具预热温度 400 ℃,挤压速率 1.5 mm/s。之后分别在挤压所得棒材上截取 组织观察试样和标准拉伸试件。然后对试样进行 (450 ℃,1 h)+(475 ℃,2 h)的双级固溶处理,水淬。RRA 处理中预时效温度为 120 ℃,分别进行 16 h 欠时效处 理和 24 h 峰值时效处理。随后,将预时效处理后的试 样进行 160 ℃低温回归处理,最后对试样进行(120 ℃, 24 h)再时效处理,同时,制备了传统高温 RRA 处理 ((120 ℃,24 h)+(200 ℃,10 min)+(120 ℃,24 h))小尺寸 试样,并对其进行组织性能对比分析。

拉伸性能在 CSS-55100 型电子万能实验机上进 行,样品按照国标 GB/T 228.1—2010 的规定制成标距 25 mm、直径 5 mm 的标准试样,每个状态合金测定 3 个有效样品,取平均值。电导率测试采用 FH-1 型涡 流式电导仪完成,试样表面经抛光处理,每个试样测 量 5 次,取平均值。透射样品经机械减薄至 50~60 µm 后冲制成直径 3 mm 的圆片,然后进行双喷减薄,双 喷电解液为硝酸甲醇溶液,其中硝酸与甲醇体积比为 3:7,温度控制在-30 ℃以下,工作电压为 12~15 V, 电流为 60~80 mA。随后样品在 JEM-2100 透射电子显 微镜(TEM)上观察。

2 实验结果

经(120 ℃, 16 h)和(120 ℃, 24 h)预时效处理后喷 射成形 7075 铝合金进行 160 ℃低温回归处理以及相 应再时效处理后的抗拉强度和电导率变化如图 1 所 示。由图 1 可以看出,两个预时效制度下的合金在低 温回归和再时效下的曲线都有相似的特征,即回归过 程中,随着回归时间的进行,合金的强度开始迅速下 降,强度下降到一定程度后又有明显的回升趋势,但 回升的幅度不大,之后,强度再次下降,此次下降幅 度相对平缓;再时效后强度逐渐上升,升至最大值后 开始下降。而欠预时效制度下的合金在回归过程中, 强度的下降幅度较大,且在再时效后强度回升的幅度



图 1 预处理下合金经回归与再时效后的抗拉强度与电导率 Fig. 1 Tensile strength and conductivity of alloy during 160 ℃ retrogression and with different pre-aging treatments: (a) (120 ℃, 16 h); (b) (120 ℃, 24 h)

显著, 欠预时效 RRA 后的峰值强度为 772 MPa, 高于 T6 峰值时效的 760 MPa 和峰值预时效 RRA 的 753 MPa。

由图1还可以看出,两种预时效处理后的合金在 160 ℃低温回归处理过程中,随着回归时间的延长, 电导率均从初始状态开始快速上升,在回归处理的前 1h以内,合金的电导率迅速上升。之后,回归超过2 h 后, 合金的电导率虽然依旧上升, 但幅度有所减缓。 与(120 ℃, 24 h)的峰值时效预处理相比, 预时效为 (120 ℃, 16 h)的欠时效处理的合金在回归处理初期, 其电导率较低。但随着回归的进行,欠预时效处理合 金的电导率增幅较为明显,当160℃低温回归处理进 行 1.5 h 后,其电导率就已超过相应的峰值预处理水 平。再时效后的合金电导率均高于对应的回归处理合 金,当合金进行了(120 ℃,16 h)欠时效预处理后,再 进行低温 RRA 处理后, 其电导率为 37.2%(IACS), 远 高于 T6 峰值时效处理的 31.6%(IACS), 且略高于峰值 时效低温 RRA 处理的 36.6%(IACS), 合金的抗腐蚀性 能优良。

表 2 所列为不同时效制度下合金的性能。由表 2

可以看出,喷射成形 7075 合金在经过回归和再时效处

1	, 66					
Pre-aging	Retrogression	Re-aging	<i>R</i> _m /MPa	R _{p0.2} /MPa	A/%	γ(IACS)/%
(120 °C, 16 h)	—		725	681	5.1	31.3
(120 °C, 24 h)	—		760	709	4.8	31.6
(120 °C, 16 h)	(160 °C, 120 h)		588	541	10.6	34.8
(120 °C, 24 h)	(160 °C, 120 h)	_	620	577	9.4	34.5
(120 °C, 16 h)	(160 °C, 120 h)	(120 °C, 24 h)	772	724	8.8	37.2
(120 °C, 24 h)	(160 °C, 120 h)	(120 °C, 24 h)	753	702	8.1	36.6
(120 °C, 24 h)	(200 °C, 10 h)	(120 °C, 24 h)	758	711	8.6	39.1

表2 合金在不同时效处理后的性能

 Table 2
 Properties of allow after different aging treatments

(120 ℃, 24 h)
(120 ℃, 24 h)
(120 ℃, 24 h)
(200 ℃, 10 h)
(120 ℃
(120 ℃, 24 h)
(200 ℃, 10 h)
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃
(120 ℃</l

3 分析与讨论

合金组织形貌的变化决定了合金的性能变化。 Al-Zn-Mg-Cu 合金中强度的变化主要由 GP 区、 η '相、 η 相等基体析出相(Matrix precipitate, MPt)的尺寸、数 量和分布所决定。7xxx 系合金中沉淀相析出顺序一般 为^[2-4]: α_{sss} (过饱和固溶体)→GP 区→亚稳定 η '相 (MgZn₂)→ η 相(MgZn₂)。对合金起主要强化作用的是 与基体共格的 GP 区和与基体半共格的 η '相, η 相与基 体非共格,对合金的强化作用较小。

而合金的抗腐蚀性能与电导率之间存在着正相关的关系,阳极溶解理论认为,连续的晶界析出相(Grain boundary precipitate, GBP)有助于阳极通道的形成,对合金的抗腐蚀性能不利。又因为 GBP 的电位为-1.05 V,晶间无析出带(Precipitate free zone, PFZ)为-0.85 V,合金基体为-0.75 V^[16-17],从三者的电位来看,GBP 与 PFZ 之间的电位差小于 GBP 与基体之间的电位差,PFZ 宽化对缓解合金腐蚀敏感性能起到积极作用。

图2所示为喷射成形7075合金经双级固溶处理和

淬火后的组织形貌。固溶处理主要是通过升高温度提高合金的过饱和度,为实现合金的析出强化作好准备。 一般来说,固溶处理的最理想组织是使尽可能多的第 二相粒子溶于基体。从图2中可以发现,经双级固溶 和淬火处理之后合金中组织均匀,未发现未溶颗粒吗, 可见第二相粒子大部分回溶至基体中,回溶效果极佳。

图 3 所示为 120 ℃预时效处理 16 h 和 24 h 后合金 的 TEM 像。由图 3 可见,两种预时效处理的 MPt、 GBP、PFZ 存在差异。通过图 3(a)可以发现,合金经 过 120 ℃预时效处理 16 h 后,GBP 析出完整,连续分 布,只是 GBP 的宽度略小,这是时效不充分造成的。 合金的 MPt 细小,近似为球形,尺寸约为 1 nm,这样 的组织有利于合金在随后的高温回归处理时 MPt 的回 溶。通过合金中沉淀相析出顺序可知,这些 MPt 以 GP 区和 η'相为主,GBP 为连续的 η 相。而从图 3(b) 可以看出,经(120 ℃,24 h)(T6)处理后,合金 GBP 呈 连续链状分布,与欠时效预处理后的 GBP 形貌基本一 致,只是此时的 GBP 有一定宽度;而 MPt 同样呈细 小弥散分布,细致观察可发现,峰值时效状态下合金 的 MPt 比欠时效状态合金的 MPt 相略显粗大,尺寸约





Fig. 2 TEM images of alloy after two-stage solution treatment and quenching



图 3 不同预时效处理后合金的 TEM 像 Fig. 3 TEM images of alloy after different pre-aging treatments: (a) (120 ℃, 16 h); (b) (120 ℃, 24 h)

为 1~2 nm,并且晶内发现一些尺寸较大的 MPt,尺 寸约有 5 nm。合金在 120 ℃时效处理 16 h 后, PFZ 略宽于时效 24 h 后的合金,约为 2 nm,但总体上两种 与时效处理后合金的 PFZ 均不明显。

图 4 所示为两种预时效处理后的合金再经(160 ℃, 2h)低温回归处理的 TEM 像。由图 4 可见, 预处理后, 不同组织演变差异性更为明显。低温回归处理可以使 合金 GBP 粗化,分布由连续变成断续,但合金的晶内 的 GP 区和 η'相等 MPt 则是部分被回溶到基体中,仍 有部分粗化、长大。如图 4(a)所示, 欠时效预处理后 的合金, MPt 在低温回归处理过程中仅有部分被回溶 至基体中,回归处理效果一般。但晶界处出现了较为 明显的 PFZ, 宽度约为 10~15 nm, 且 GBP 断续明显。 而从图 4(b)中可以发现, 与图 4(a)类似, T6 预处理后 的合金在再经回归处理,其GBP的分布也由连续变成 断续。合金的MPt与欠时效低温回归之后的合金相比, 个别 MPt 明显地发生了长大现象,尺寸可达到 20 nm 以上。大尺寸 MPt 的数量随预时效程度的加深而增多, 且尺寸也随之增大,这些大尺寸 MPt 在回归处理中不 但没有回溶反而不断粗化、长大。低温回归虽助长了 大尺寸 MPt 的粗化, 但也较为有效地回溶了晶内的小 尺寸 MPt,除个别大尺寸 MPt 外,其他残留的 MPt



图 4 不同预时效处理再经低温回归处理(160 ℃, 2 h)后合 金的 TEM 像

Fig. 4 TEM images of alloy by retrogression treatment (at 160 °C for 2 h) after different pre-aging treatments: (a) (120 °C, 16 h); (b) (120 °C, 24 h)

尺寸上均小于欠时效低温回归处理后的合金。这说明 在回归过程中由于大尺寸的 MPt 无法回溶,而回归过 程又需要有溶质元素重新溶进基体中,这时小尺寸的 MPt 就充当溶质元素被基体溶解。但 160 ℃的回归温 度较低,回归程度不高,导致两种预时效处理后的合 金在回归处理后仍有大量 MPt 残留。

传统 RRA 处理工艺通常采用 T6 峰值时效作为预 时效制度,若采用低温回归处理就会导致在这一过程 中一部分尺寸较大的晶内析出相很难回溶,且极易长 大,形成大块的沉淀相,影响合金力学性能。

图 5 所示为不同预时效处理的合金再经低温 RRA 处理后的 TEM 像。由图 5 可看出,再时效后合金的 强度再次提高,其主要原因是因为在回归处理时合金 中的一部分尺寸较小的 MPt 重新溶入基体当中,再时 效后细小的 MPt 重新析出形成;而另一些较大的 MPt 在回归处理时并没有回溶,在再时效过程中继续长大, 甚至一些 MPt 由 η'相转变成 η 相也同时影响了合金强 度。同时,完全断开的 GBP 在腐蚀过程中能阻碍阳极 通道的形成,有利于提高合金的抗腐蚀性能,数据上 表现为电导率的增大^[15,18]。



图 5 不同预时效处理再经 RRA 处理((160 ℃, 2 h)+(120 ℃, 24 h))后合金的 TEM 像

Fig. 5 TEM images of alloy after RRA treatment ((160 $^{\circ}$ C, 2 h) and (120 $^{\circ}$ C, 24 h)) with different pre-aging treatments: (a) (120 $^{\circ}$ C, 16 h); (b) (120 $^{\circ}$ C, 24 h)

从图 5 中可以发现, 经 RRA 处理后的晶界处的 晶界析出相 η 粗大, 呈断续状分布。从图 5(a)欠时效 RRA 的 TEM 像中可以发现,再时效后晶内重新析出 了细小、均匀、弥散分布的 MPt,且析出相尺寸约在 5 nm 以内。而 T6 峰值时效预处理状态下的合金经低 温 RRA 处理后,其晶内的部分 MPt 出现粗化、长大 的现象,这些粗化、长大的强化相造成合金元素的大 量消耗,致使在这些大块强化相的周围或附近出现了 一些强化相稀疏区,这时的合金虽然在力学性能上能 保持在一个较高的等级上,但仍不及欠预时效低温 RRA 处理后合金晶内的强化相弥散且无大尺寸相的 特点(见图 5(b))。

图 6 所示为传统高温 RRA 处理后合金 TEM 像。 对比图 5 可以发现,虽然传统的高温 RRA 可有效增 加 GBP 的离散程度,提高合金的耐蚀性能,但峰值时 效预处理使得合金在传统高温 RRA 之后晶内仍残留 大尺寸 MPt,这些大尺寸 MPt 同样是由于 T6 峰值时 效预处理时产生的,而在高温回归过程中,虽然较高 的回归温度可以在很大程度上回溶这种粗大相,但仍 会有一部分残留,以致再时效后这些粗大相长大、消



图 6 传统高温(200 ℃)RRA 处理后合金 TEM 像 Fig. 6 TEM images of alloy after conventional hightemperature (200 ℃) RRA treatment

耗合金中的溶质元素,影响合金的强度。

从图 5 和 6 中还可以发现,合金低温 RRA 处理 后,晶界处的 PFZ 尺寸较大,约为 15~20 nm,并且 欠预时效的合金略宽于峰值时效预处理后的合金。 PFZ 的作用在合金中的作用一直存在争议,就本实验 的结果来看,较宽的 PFZ 有助于改善合金伸长率和抗 腐蚀性能,这点与一些研究者^[19-20]的研究结论基本一 致。

4 结论

1) 采用(120 ℃, 16 h)欠时效预处理和 160 ℃低温 回归再时效处理后,可有效改善 7075 合金的强度与抗 腐蚀性能,处理后的合金抗拉强度、屈服强度、伸长 率和电导率分别为 773 MPa、724 MPa、8.8%和 37.2%(IACS),力学性能高于 T6 峰值时效和传统低温 与高温 RRA 处理,耐蚀性能接近传统高温 RRA 处理 后的小尺寸试样水平。

2) 对比峰值时效(120 ℃, 24 h)预处理,以(120 ℃, 16 h)欠时效作为 RRA 处理过程中的预时效处理可有 效控制合金中大尺寸析出相的形成,从而保证在低温 回归过程中细小强化相的有效回溶,为再时效过程中 回溶元素的再次析出奠定基础。

3) 经欠时效预处理和低温回归后的合金,其晶内 的强化相回溶较为明显,与常规 RRA 处理同期状态 相比,较少出现大尺寸析出相。再时效后,晶内相尺 寸较小,且晶界无析出带较宽。合金在保持较高强度 基础上,改善合金伸长率和抗腐蚀性能,使得合金综 合性能优良。

REFERENCES

- HU T, MA K, TOPPING T D, SCHOENUNG J M, LAVERNIA
 F. Precipitation phenomena in an ultrafine-grained Al alloy[J]. Acta Materialia, 2013, 61(6): 2163–2178.
- [2] 张纪帅,陈志国,任杰克,陈继强,魏 祥,方 亮.新型热机械处理对 Al-Zn-Mg-Cu 合金显微组织与性能的影响[J].中国有色金属学报,2015,25(4):910-917.
 ZHANG Ji-shuai, CHEN Zhi-guo, REN Jie-ke, CHEN Ji-qiang, WEI Xiang, FANG Liang. Effect of new thermomechanical treatment on microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(4): 910-917.
 [3] 湛利华,贾树峰,张 姣. 电脉冲时效对 7075 铝合金组织和
- [5] 滋利平, 页树暉, 张 效. 电脉冲时效对 7075 钻音壶组织和 性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(3): 600-605. ZHAN Li-hua, JIA Shu-feng, ZHANG Jiao. Influence of electrical impulse aging on microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(3): 600-605.
- [4] GEORGE S L, KNUTSEN R D. Composition segregation in semi-solid metal cast AA7075 aluminium alloy[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(11): 4716–4725.
- [5] JEYAKUMAR M, KUMAR S, GUPTA G S. Microstructure and properties of the spray-formed and extruded 7075 Al alloy[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010, 25(8): 777–785.
- [6] 刘 斌, 汪明朴, 雷 前, 段雨露, 刘林贤, 虞红春. 喷射沉 积法制备 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金的显微组织与性能[J]. 中国有 色金属学报, 2015, 25(7): 1773-1780.

LIU Bin, WANG Ming-pu, LEI Qian, DUAN Yu-lu, LIU Lin-xian, YU Hong-chun. Microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy prepared by spray deposition method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(7): 1773–1780.

- [7] SILVA G, RIVOLTA B, GEROSA R, DERUDI U. Study of the SCC behavior of 7075 aluminum alloy after one-step aging at 163 °C[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(1): 210–214.
- [8] RICKER R E, LEE E U, TAYLOR R, LEI C, PREGGER B, LIPNICKAS E. Chloride ion activity and susceptibility of Al alloys 7075-T6 and 5083-H131 to stress corrosion cracking[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(3): 1353–1364.
- [9] FOOLADFAR H, HASNEMI B, YOUNESI M. The effect of the surface treating and high-temperature aging on the strength and SCC susceptibility of 7075 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(6): 852–859.
- [10] ARNOLD E M, SCHUBBE J J, MORAN P J, BAYLES R A.

Comparison of SCC thresholds and environmentally assisted cracking in 7050-T7451 aluminum plate[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(11): 2480–2486.

- [11] 孙擎擎,董朋轩,孙睿吉,陈启元,陈康华.时效制度对挤压
 Al-6.2Zn-2.3Mg-2.3Cu 铝合金电化学腐蚀性能的影响[J].中
 国有色金属学报,2015,25(4):866-874.
 SUN Qing-qing, DONG Peng-xuan, SUN Rui-ji, CHEN Qi-yuan, CHEN Kang-hua. Effect of ageing process on electrochemical corrosion property of extruded Al-6.2Zn-2.3Mg-2.3Cu aluminium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(4): 866-874.
- [12] CINA B M. Reducing the susceptibility of alloys, particularly aluminium alloys, to stress corrosion cracking. US Patent: 3856584[P]. 1974–12–24.
- [13] 李荣德,苏睿明,曲迎东.喷射成形 7075 合金回归再时效处 理的组织和抗应力腐蚀性能[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 22-29.

LI Rong-de, SU Rui-ming, QU Ying-dong. Microstructure and stress corrosion cracking of a spray forming 7075 alloy after retrogression and re-ageing treatment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 22–29.

- [14] PENG G, CHEN K, CHEN S, FANG H. Influence of repetitious-RRA treatment on the strength and SCC resistance of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(12): 4014–4018.
- [15] REDA Y, ABDEL-KARIM R, ELMAHALLAWI I. Improvements in mechanical and stress corrosion cracking properties in Al-alloy 7075 via retrogression and reaging[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 485(1): 468–475.
- [16] 黄兰萍,陈康华,李 松,宋 旼. 高温预析出后 7055 铝合 金局部腐蚀性能和时效硬化[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(9): 1628-1633.
 HUANG Lan-ping, CHEN Kang-hua, LI SONG, SONG Min. Influence of high-temperature pre-precipitation on local corrosion behaviors and ageing harden of 7055 aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(9): 1628-1633.
 [17] 宋丰轩,张新明,刘胜胆,韩念梅,花 隆. 时效对 7050 铝
 - 7] 朱平利, 水斛切, 外加泡, 种龙肉, 化 座. 町丸村 7000 出 合金预拉伸板抗腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(3): 645-651. SONG Feng-xuan, ZHANG Xin-ming, LIU Sheng-dan, HAN Nian-mei, HUA Long. Effect of aging on corrosion resistance of 7050 aluminum alloy pre-stretching plate[J]. The Chinese
- [18] WANG D, NI D R, MA Z Y. Effect of pre-strain and two-step aging on microstructure and stress corrosion cracking of 7050 alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 494(1): 360–366.

Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(3): 645-651.

[19] JIANG H, FAULKNER R G. Modelling of grain boundary segregation, precipitation and precipitate-free zones of high strength aluminium alloys— I. The model[J]. Acta Materialia, 1996, 44(5): 1857–1864. [20] JIANG H, FAULKNER R G. Modelling of grain boundary segregation, precipitation and precipitate-free zones of high strength aluminium alloys—II. Application of the models[J]. Acta Materialia, 1996, 44(5): 1865–1871.

Low-temperature retrogression of spray formed 7075 alloy

SU Rui-ming, QU Ying-dong, LI Xiang, YOU Jun-hua, LI Rong-de

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The effects of low-temperature retrogression in RRA on the microstructure, mechanical and conductivity properties of spray formed 7075 aluminum alloy with different pre-aging treatments were investigated by transmission electron microscopy, extension and conductivity tests. The results show that, pre-aging treatment (at 120 $^{\circ}$ C for 16 h) is more beneficial for the re-dissolution of precipitates in matrix than peak aging (T6, at 120 $^{\circ}$ C for 24 h) at low-temperature (160 $^{\circ}$ C) retrogression, and the grain boundary precipitates are interrupted after RRA treatment. After pre-aging at 120 $^{\circ}$ C for 16 h and RRA treatment, the tensile strength, yield strength, elongation and conductivity of the alloy are 773 MPa, 724 MPa, 8.8% and 37.2%(IACS), respectively. The mechanical properties are higher than those after T6 or conventional RRA treatment (neither low-temperature or high-temperature) and the conductivity is close to the small sample after conventional high-temperature RRA treatment. This process is fitted for large workpiece in industrial heat treatment.

Key words: 7075 Al alloy; spray forming; re-aging; low-temperature retrogression; pre-aging; conductivity

Foundation item: Project(515774167) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (LT2015020) supported by Innovative Research Team in University of Liaoning Province, China

Received date: 2015-10-27; **Accepted date:** 2016-04-08 **Corresponding author:** QU Ying-dong; Tel: +86-13889375206; E-mail: LX843352624@163.com

(编辑 李艳红)