

2024、7075 铝合金冶金质量控制

北京航空材料研究所 焦成革 李春玉

本文讨论了工业生产条件下的 2024、7075 铝合金的冶金质量控制问题，并对工艺措施的改进提出了建议。

Metallurgy Quality Control of 2024 and 7075 Aluminium Alloys

Jiao Chengge Li Chunyu
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

The problems of metallurgy quality control of the aluminium alloys 2024、7075 under the conditions of industry production have been discussed. The improved process is also suggested.

一、引言

铝合金是目前航空工业所采用的主要结构材料之一，一般情况下占飞机用材的 70~80%，而 2024、7075 铝合金又占飞机用铝合金的绝大部分。它们广泛地用于制造飞机骨架、蒙皮、翼梁、隔框等重要受力构件；同时它们又具有良好的冷加工及热加工成型、连接等性能，在制造工艺及成本上占有明显优势。

2024、7075 铝合金分别为 Al-Cu-Mg 和 Al-Zn-Mg-Cu 系合金，与我国 60 年代中期研制的 LY12 的 LC9 合金为相同系列。但一般情况下，LY12、LC9 合金中化学成分 Fe、Si 杂质含量偏高，韧性和腐蚀性能偏低。

为适应航空工业的发展和对外贸易的需要，使干线民机材料立足国内，我们在东北轻合金加工厂生产了按照美国联邦（或美国宇航）标准要求验收的产品，工艺过程基本达到了国外同类材料的生产水准。

二、生产工艺过程及控制

1. 熔铸工艺及所控制的技术关键

以美国联邦规范所规定的合金成分范围为依据，按常规计算方法配料。所用一级废料量占 16% 左右，最多不超过 20%。东北轻合金加工厂在生产 LY12、LC9 时，所允许的 2 级废料量就有 30~35%。为避免稀土元素的引入，采用定点厂家生产的 A00 工业纯铝（99.70%）。在配料过程中采取的这些措施为合格材料的获得创造了条件。

熔炼工序的主要过程是：

投料→煤气炉熔化→加覆盖剂→铝液进入转炉浇包，加入精炼剂（KCl+NaCl+冰晶石）→转入电炉→扒渣、气体精炼→搅拌→转入静置炉→取样→调整成分→搅拌→气体精炼→扒渣→取样→出炉。烧铸工艺参数如表 1。

表 1 2024、7075 合金浇铸工艺参数

合金	速度 (mm/min)	浇铸温度 (℃)	水压 (Pa)
2024	90~95	700~710	1.2
7075	90	680~695	0.8~1.2

为清除或降低气体含量和夹杂物、提高合金的洁净度，在熔炼过程中严格进行精炼与净化。所采用的主要措施，除熔剂精炼之外，还有 2 次气体精炼。铝液从煤气炉进入烧包后，用 KCl+NaCl+Na₂AlF₆ 进行溶剂精炼，同时兼有覆盖效果；铝液转入电炉熔化室后，采用气体第 1 次精炼，同时在铝液进入静置室过程中采用迭坝工艺再次固体精炼，铝液完全进入静置炉后再次气体精炼。

固体熔剂与熔体的氧化膜及非金属夹杂物发生吸附、溶解和化学作用而实现净化，熔剂对除气、除渣有一定作用，对除渣效果更好。气体精炼时，氯气精炼的效果远优于氮气，但对人身有害。2024、7075 铝合金精炼中采用的是 20%Cl₂+80%N₂ 的混合气体，精炼时间一般为 15min 左右。

按东北轻合金加工厂生产 LY12、LC9 扁锭的工艺，一般情况下只进行 1 次气体精炼，而且不采用迭坝工艺。2024、7075 合金生产中采用了 2 次气体精炼工艺，有效地保证了材料的纯洁度，同时实际生产也证明这是方便可行的。

铝液静置 7~12min，大部分非金属夹杂物即可沉到炉底。为尽量减少 Al₂O₃ 颗粒，以达到减少氢含量的目的，2024、7075 合金熔炼过程中采用的静置时间都为 30min。保证 2024、7075 合金材料质量的另一个比较重要的措施是采用陶瓷过滤器及多层多道玻璃丝网阻挡过滤。陶瓷过滤器是由刚质多孔陶瓷管组成的滤筒、滤箱与加热器和控制板组成的过滤装置。用完的滤管可以方便地取出放入。7075 合金熔铸时采用的是多道玻璃丝网过滤。将玻璃丝网安装在铸造作业线上金属液流的落差处及铸造流盘和结晶

器的金属液穴里，实行多道阻挡，具有成本低廉、使用方便、效果较好的特点。

根据上述工艺参数,分别获得了尺寸为: 255mm×1500mm×5680mm 的 2024 铸锭 2 根; 尺寸为 300mm×1200mm×5500mm 的 7075 铸锭 4 根, 其化学成分结果如表 2 所示。从表中可见, 其化学成分完全符合美国联邦标准的验收要求。

气体分析结果表明, 2024 铸锭中 $H_2<0.0927\text{ppm}$; 7075 两个炉次的铸锭中 H_2 的含量都低于 0.18ppm。这些结果都为获得符合美国联邦标准的产品打下了良好基础。

2. 热轧和热处理工艺及解决的技术关键

2024、7075 合金铸块分别进行 485~470℃、24h 的均匀化处理后进行轧制变形。板材轧制采用中温轧制, 厚板为预拉伸板, 其主要工艺见图 1。热轧温度如表 3 所示。热轧采用 4 辊可逆轧机。在轧制过程中, 最初几道变形量一般为 15%左右, 当变形深入到轧件中心后, 道次加工率为 45%以上。预拉伸变形量控制在 1.5~3.0%之间, 成品经 100%验收后包装。

(1) 板材尺寸公差的控制

铝合金板材的尺寸公差, ANSI H352 (M) -1982 和 GB3194-82 分别有规定。对于厚度小于 10mm 厚的板, 中国标准比美国标准严, 对于 >10mm 的板材美国标准严于中国标准。但美国为正、负公差。中国薄板为负公差, 因此, 在生产中控制了正、负公差, 达到了 ANSI 关于薄板的要求。

即: 1.6 ± 0.14 及 1.8 ± 0.12 (薄板)

(2) 包铝薄板包铝层厚的选择

包铝层厚对薄板的性能有显著的影响,特别是 7075 类高强度铝合金板材,虽然 7075 与 LC9 合金成分基本一致,但由于包铝层厚度不同,使性能有差别。表 4 列出国内外在这方面标准上存在的差异。国内生产包铝层完全是按 GB167 执行, 为满足联邦标准的要求, 特别准备了表 5 所示的包铝层。

(3) 热处理制度选择与工艺控制

薄厚板的热处理制度完全以 MIL-H-6088F 为依据, 具体工艺如表 6。与国内标准相比, 2024 合金的淬火温度低于国内航标 (495~503℃), 在 T6 状态时效时, 时效温度低于国内标准, 时效时间长于国内标准 (135~145℃/16h)。

严格控制温度精度:淬火盐浴池温控制在 $X_{-2}^{+3}\text{℃}$ 或 $X\pm$

2℃; 用坑式风循环电阻炉时效时, 尽量将温度控制在 $X_{-2}^{+3}\text{℃}$,最大波动不超过 $X\pm5\text{℃}$ 。盐浴固溶处理时, 保温时间从炉料加入盐池温度回升至定温后开始计时。时效过程中, 采取热炉装料, 同时除正常控温及测温仪表外, 在板材中同时安插两支热电偶实测金属温度。在一般国内生产中, 没有明确金属温度为测量依据, 为满足 MIL-H-6088F 的要求, 我们采取了这种方法。

表 3 板材轧制温度

合金	铸块加热温度 (℃)	始轧温度 (℃)	终轧温度 (℃)	中温压延 (℃)
2024	370~410	390	357	<230
7075	370~410	390	350~360	<230

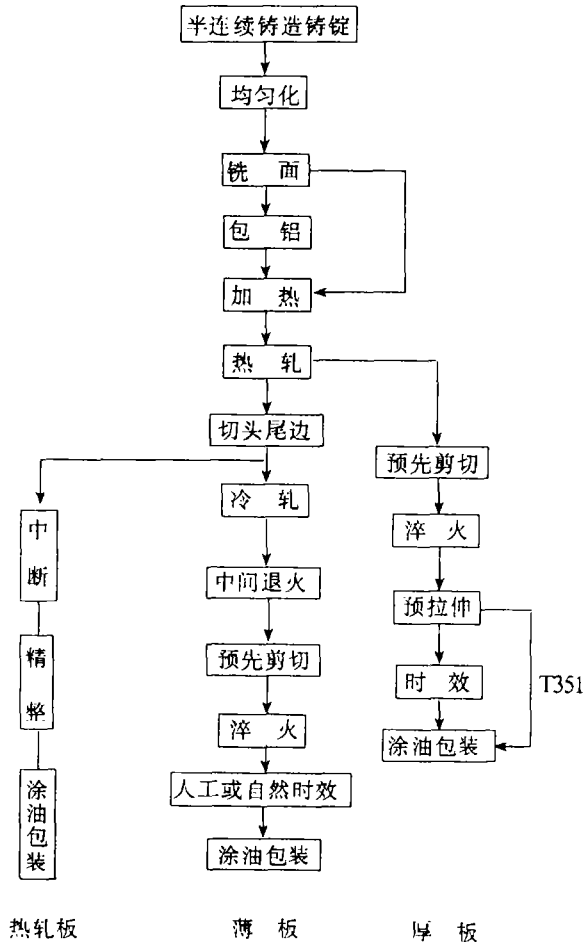


图 1 板材生产采用的工艺路线

表 2-1 2024 铝合金成分标准值与分析结果

	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti
QQ-A-250 / 5F 标准	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	<0.50	<0.50	<0.25	<0.10	<0.15
分析结果	4.62	1.63	0.57	0.20	0.10	<0.10	<0.05	

表 2-2 7075 铝合金成分标准值与分析结果

	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si
QQ-A-250 / 13E	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.18~0.35	<0.30	<0.50	<0.05
分析结果	5.07	2.43	1.35	0.17	0.07	0.21	0.09

表 4 联邦标准与国际在包铝层厚规定的差异

2024 (QQ-A-250 / 5F)		7075 (QQ-A-250 / 13E)		GBn 167-82	
层厚 (mm)	每面平均包 铝厚度不少 于其厚度的 百分数	层厚 (mm)	每面平均包 铝厚度不少 于其厚度的 百分数	层厚 (mm)	每面平均包 铝厚度不少 于其厚度的 百分数
<1.6	4	1.6	3.2	<2.5	4.0
>1.6	2	> 1.6~4.7	2	>2.5	2.0
>1.6	2	>4.8	1.2*		

* >12.7mm的厚板，每面平均包铝层厚度的最大值为板厚的8%。

表 5 2024、7075 合金所用包铝层

合 金	成品厚(mm)	包铝板厚	铸块厚(mm)	包铝材料
2024	1.4±0.12	13.5~14.0	245	LB1
2024	1.8±0.12	6.5~7.0	245	LB1
7075	1.4±0.12	14.0~14.5	290	LB2
7075	1.8±0.12	7.6~8.0	290	LB2

表 6 2024、7075 合金热处理制度

合 金	厚度	固溶处理	时 效
2024T3	1.4mm	496 ⁺³ ₋₀ ℃ / 20min	—
	1.6mm	496 ⁺³ ₋₀ ℃ / 25min	—
7075T6	1.4mm	470±2℃ / 20min	120±5℃ / 24h
	1.6mm	470±2℃ / 25min	—
2024T351	14mm	496 ⁺³ ₋₀ ℃ / 60min	120±5℃ / 24h
	25mm	496 ⁺³ ₋₀ ℃ / 65min	—
7075T651	8mm	470 ⁺³ ₋₀ ℃ / 50min	—

表 7 MIL-H-6088F 所规定的淬火转移时间

厚度(mm)	淬火转移时间	厚度(mm)	淬火转移时间
<0.41	5s	0.81~2.3	10s
0.43~0.79	7s	>23	15s

淬火转移时间的改善：淬火转移时间 (quench delay time) 过长会引起制品的力学性能降低，但国内除航标外，无统一规定。一般冶金厂，在生产过程中都控制在30s左右。而 MIL-H-6088F 对淬火转移时间有严格的规定，如表 7 所示。在 2024、7075 合金的生产中，使所有批次的合金的淬火转移时间都小于 18~20s；其中最好的达到 15s，大大缩短了原 LY12、LC9 合金的淬火转移时间。

厚板预拉伸变形：为克服以往预拉伸变形量过大的缺点，在预拉伸变形之前首先校直。淬火至拉伸间隔时间控制在 4h 之内，最长不超过 6h。预拉伸变形量大于 1.5%，最大不超过 3%，2024、7075 合金的生产结果为 1.8~2.0%之间，与英国板的变形量相近。

三、结 语

按照联邦标准验收，我们获得了在工业化生产条件下

化学成分发与性能合格的 2024、7075 合金，同时，整个工艺过程也是基本按照美国标准控制的，在熔炼制度、热处理、包铝层厚、尺寸公差等方面都改变了以往的传统习惯。在许多工艺措施方面仍然可以进一步改善，如在熔炼过程中可以引入电磁搅拌、旋转喷气浮选净化（即 SNIF 法）和 MINT 法，以便更为有效地净化材料、减少杂质，特别是降低气体含量。在轧制过程中可改为冷轧板，即热轧后卷卷，预先退火再冷轧的办法，使工艺过程与国外相一致，同时在可能的情况下通过改造淬火起落装置可以进一步缩短淬火转移时间。

参加本工作的还有魏久祥、刘存玉、张禄山、姚俊臣等同志，感谢东北轻合金加工厂工程技术人员对本工作的支持与帮助。

* * * * *

第四届全国有色金属应用技术 交流会在沈阳召开

由中国机械工程学会材料学会有色金属应用专业委员会、中国兵工学会金属材料学会等五学会联合举办的第四届全国有色金属应用技术交流会、第一届全国铝锂合金开发应用研讨会及铝铜废旧金属回收与应用座谈会三会议于 1991 年 9 月 23~26 日在沈阳同时召开，来自全国 36 个单位 15 个省市自治区的 83 位代表出席了会议。会议共收到各类学术论文 74 篇，有 57 篇论文分别在三个分组上作了交流，会议评出优秀论文 19 篇，并颁发了优秀论文证书。

本次会议是一次全国性的、在有色金属应用技术领域内学术性强、内容广泛的会议，对于推动有色金属在国民经济各部门的扩大应用有积极的作用。会议邀请刘伯操、周瑞发等六位同志分别做了《铝锂合金的发展与应用概况》、《新材料的发展趋势》等专题报告。

与会代表认为，这次大会内容丰富，涉及有色金属研究与应用的各个领域，有一定的推广应用价值。通过学术交流和讨论，会议认为，铝锂合金作为一种低密度、高模量的新型铝合金在国内外引起了极大的兴趣，近几年来我国在该方面的研究已取得可喜成果，但由于铝锂合金本身的特性，从试验室研究转到工业性生产有许多技术关键需要研究和突破，建议上级领导部门和材料生产部门尽快安排和组织工业性生产的熔铸技术的研究和设备的研究，尽早为使用部门提供铝锂合金材料。

我国在 50~60 年代生产的军事装备和机械产品即将大批退役和淘汰，大量有色金属需要回收和再生利用，解决好这一问题对充分利用资源，提高经济效益有重大意义，与会代表认为做好我国废旧有色金属回收和再生利用是刻不容缓的大事，希望国家有关部门予以充分的重视。

会议期间，有关学会的负责同志就举办第五届全国有色金属应用技术交流会的问题进行了协商讨论。

(祝印兰)