

高（超）强铝合金及其材料的发展

中南大学 张新明

一、高（超）强铝合金的国际发展趋势

- 1、高（超）强铝合金的发展历史及现状
- 2、高（超）强铝合金材料的发展趋势

二、高（超）强铝合金材料的国内发展现状

1、高（超）强铝合金材料的研究现状

- 2、高（超）强铝合金材料的工业化生产现状、能力及技术储备
- 3、高（超）强铝合金材料研制与生产中存在的瓶颈问题

三、高（超）强铝合金材料发展的建议

- 1、研发新型高（超）强铝合金，发展高综合性能均质制备技术
- 2、研制与生产高（超）强铝合金大规格材料的对策和措施
- 3、高（超）强铝合金材料发展路线建议

DOI: 10.11900/0412.1961.2013.00835

一、高（超）强铝合金的国际发展趋势

高强铝合金一般指含铜 2××× 系、含锌 7×××系铝合金，后者中的高锌、镁、铜合金亦称超强铝合金，它们总体上经历了五代发展。百年材料百年航空，一代材料一代飞机，一代材料一代装备，铝合金材料满足了不同时代飞机和武器装备的设计要求。现代铝合金材料朝着大规格、高均匀、高综合性能方向发展。

1、高（超）强铝合金的发展历史及现状

1906 年，德国学者 A.Wilm 发现了 Al-Cu-Mg 合金的沉淀硬化现象，并获得了时效强化铝合金的重要手段，使铝合金应用于航空领域成为可能，揭开了航空铝合金发展的序幕。在随后 100 多年的时间里，铝合金成为飞机的主要结构材料，一代材料一代飞机，有力地推动了航空事业的发展。迄今为止被广泛应用于航空工业的铝合金主要涉及两个系列，即 Al-Cu 系(2×××系)和 Al-Zn-Mg-Cu 系(7×××系)，其他系列的铝合金，如 Al-Mg-Si 系(6×××系)、Al-Li 合金等也有一定应用，但总体用量较少、应用范围有限。在航天领域，除上述系列外，还包括 3×××系、5xxx 系、8×××系铝合金，铁路交通领域还大量应用 5×××系铝合金。

高（超）强铝合金主要以航空需求为背景不断发展。随着飞机设计思想的不断创新，先进飞机的构件制造对铝合金材料提出了越来越高的要求，特别是现代飞机的轻量化、宽敞化、舒适化、长寿命、高可靠和低成本的发展需求，不断推动大规格高综合性能铝合金材料的发展。按照铝合金材料的发展历程，可将航空铝合金的发展整体划分为五代，即第一代高静强度铝合金，第二代高强耐蚀铝合金，第三代高强高韧铝合金，第四代超强高韧耐蚀、中强耐损伤铝合金，以及新一代高强高韧高淬透铝合金。各阶段铝合金的特征性能与特征微结构及典型代表如表 1 所示。

表 1 铝合金发展的特征性能、技术与特征微结构，以及典型合金

阶段时间	特征性能	技术与特征微结构	典型合金
第一代 1906~50's	高静强度	峰值时效；晶内共格、半共格纳米时效相	2024-T4 7075-T6 2618
第二代 ~60's	高强耐蚀	过时效；晶界析出相不连续分布	7075-T76/T74
第三代 70's ~80's	高强高韧耐蚀	高纯化，消除杂质相；过时效调控晶界相不连续分布	7475-T74 7050-T74 2618A/2519
	强烈的减重需求阶段	快速凝固、喷射沉积；铝锂强化相、耐热相、连续增强相	8009/8109(耐热) 1420/8090/2091(铝锂) 铝基复合材料
第四代 90's	超强高韧耐蚀 抗疲劳、高损伤容限	积分时效；晶界相不连续及晶间无沉淀带（PFZ）窄	7055/7150-T77 2524-T39
第五代 00~至今	高强高韧高淬透 高强高模高韧耐蚀	高效淬火，多级时效，界面协同调控综合性能；不同作用的多相微结构	7085-T76/T74(2002) 2099-T83(2003) 2022/2023(2004), 6156(2003)

二十世纪初至五十年代末，沉淀硬化的发现产生了第一代高静强度铝合金，满足了飞机最初阶段提高安全系数、减少结构重量和提高航程为目标的静强度设计需求。在此期间，首先发现，在 Al-Cu-Mg 系 (2×××系) 合金淬火过饱和固溶体时效析出高密度条状 Al_2Cu (θ' , 图 1a) 和 Al_2CuMg (S') 强化相，这些相有显著的沉淀硬化效果。在此基础上，研制了自然时效航空铝合金 2017、2014、2024 等。紧接着在 Al-Zn-Mg-Cu 系 (7×××系) 合金淬火-时效热处理中发现了球状 $MgZn_2$ (η' , 图 1b) 时效析出强化相具有显著的沉淀硬化作用，并研制了 7075T6(人工峰值时效)和 7178T6 等合金。2024T3、7075T6、7178T6 等合金构成了第一代航空高（超）强铝合金。这些合金对铝合金及其材料的发展和具有里程碑的意义。

上世纪六十年代，铝合金材料的疲劳和腐蚀失效引起的飞机失事促使飞机设计对高强铝合金提出了抗疲劳和耐腐蚀性能的要求。材料工作者在 7×××系铝合金中发明了过时效热处理技术，使晶界析出相不连续分布，降低合金强度、提高抗应力腐蚀性能，研制了 7075T73

合金材料，使得 7×××系合金除满足飞机设计静强度要求外，还满足了耐腐蚀性能的要求。为减小 T73 处理带来的较大强度损失，接着又研制成功了 7075T76 合金。7075T73、7075T76 合金成为第二代高（超）强耐腐蚀铝合金的代表。

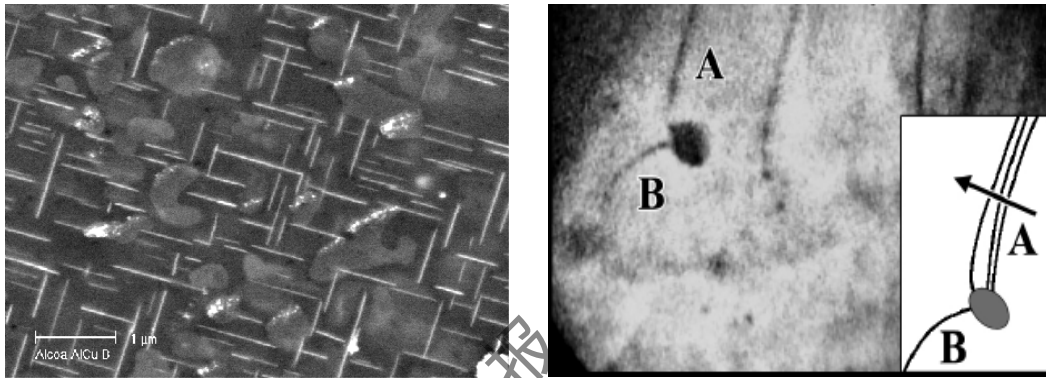


图 1 2000 系 (a) 和 7000 系 (b) 铝合金的典型沉淀强化相

上世纪七十年代，飞机安全设计对航空高（超）强铝合金提出了断裂韧性的要求。随着人们对 Fe、Si 杂质影响铝合金韧性规律研究的不断深入，为消减粗大初生相和过剩相，70 年代初期，美国首先成功研制了低杂质含量的 7475 合金，该合金具有高强度同时，也具有优异的断裂韧性。70 年代中期，随着对 Cr、Mn、Zr 等微合金化元素作用机理研究的不断深入，在美国海军和空军的支持下，Alcoa 公司研制了低杂质含量、并用 Zr 微合金化的 7050T74 合金，欧洲也研制了成分和性能与之相当的 7010T74 合金。用共格半共格的 Al_3Zr 相替代非共格的 Cr、Mn 弥散相，提高了阻止再结晶的效果。这些合金具有高的强度、抗应力腐蚀性能和断裂韧性。2×××系合金在 2024 的基础上，也通过降低 Fe、Si 杂质含量，提高合金纯度和冶金质量，研制了 2124、2224、2324 合金。合金纯化和微合金化理论和技术推动了第三代高强高韧铝合金的发展。

上世纪七十年代末至八十年代末，能源危机促使飞机设计向强烈减重方向发展，武器装备要求增加射程和提高有效载荷，对高比强度和高比模量材料的需求推动了铝锂合金的研制和应用。铝锂合金因其密度低、比模量高等特点，引起了材料工作者极大的兴趣。随着铝锂合金熔炼和铸造技术的发展，国外加强了第二代铝锂合金的研究。欧

美国家研制了第二代 Al-Li-Cu 系合金 2090、2091、8090、8091 等，俄罗斯则开发了密度更低的 Al-Li-Mg 系 1420、1421 等。1421 合金可以焊接使用。1420 和 1421 在俄罗斯军机和航天器上得到了较广泛的应用。

上世纪八十年代末至九十年代末，飞机的损伤容限设计对铝合金的裂纹扩展速率，以及断裂韧性、抗应力腐蚀和耐疲劳性能提出了综合要求。主合金成分优化和精密热处理调控技术，使合金在具有前三代微结构特征的基础上，消减无沉淀析出带宽度、组织进一步细化和均匀化，提高裂纹扩展阻力，产生了第四代 2×××系、7×××系高综合性能、高耐损伤容限铝合金。虽然 70 年代后期，Alcoa 联合 Boeing 公司研制了 7050 的改型合金 7150，但直到 80 年代，Alcoa 才成功研制了 7150T77 三级时效热处理技术，第一次实现在不牺牲合金强度的同时满足要求的断裂韧性和抗腐蚀性能的目标，使 7150 合金获得广泛的应用。7150T77 合金的研制成功是航空铝合金研究划时代的进步。随后发展的 7055T77 铝合金是目前使用的强度最高的航空铝合金。与美国铝业公司(Alcoa)7055 合金同期发展且性能相近的，还包括法国铝业公司的 7449 合金等。随着主合金成分优化和精确调控技术的发展，Alcoa 通过进一步降低 Fe、Si 等杂质含量、添加微合金化元素、调整主合金成分及采用先进的热处理制度等技术途径，成功研制了耐损伤的 2524T3 合金。超强高韧的 7055 合金和高耐损伤容限的 2524 铝合金是第四代航空铝合金的典型。

同时期，随着对 Al-Li-Cu 系合金的研究和微合金化技术的发展，美、俄等国开展了第三代铝锂合金的研究，俄罗斯主要开发了 1460 合金，美国主要开发了 Weldlite 系列合金和 2097、2197 铝锂合金，2097T861 合金已在 F-16 飞机的后机身隔框、中机身大梁上应用。2198T8×合金具有高强、高损伤容限及高热稳定性，良好的成形和焊接性能，是性能优良的第三代 Al-Li 合金。采用该合金可进一步减轻装备结构的重量，节约成本。厚至 152mm 的 2050T851 板材，性能不仅优于 7050T7451，而且密度更低，强度、韧性、疲劳裂纹扩展抗力及耐热性提高，替代 7050 合金可减重 5%。高（超）强铝合金宛如百花争艳的局面发展。

进入 21 世纪初，飞机技术上的先进性、经济性和舒适性设计，要求构件整体化、大型化，免去铆接和焊接，实现结构减重，提高安全性，对发展大规格/厚截面材料提出了需求，并要求铝合金具备超（高）强高韧高淬透性、高损伤容限和高成形性等高综合性能。

厚截面材料的高淬透性需求推动了高强高韧 7085、7185、7285 新一代铝合金的发展。与美国铝业公司(Alcoa)7085 合金同期发展且性能相近的，还有法国铝业公司的 7140 合金、德国爱励铝业公司的 7081 合金等。合金组织的高均匀性是高淬透材料设计与制备的难点和关键。

针对 A380 等大型飞机对提高 2×24 合金材料的强度和耐损伤性能的要求，美铝和法铝又相继研发出了具高强高损伤容限特性的 2026、2027 合金。其挤压件(12~82mm 厚)和板材(12~55mm 厚)较 2024 合金的性能分别提高 20~25%和 10%。

为了满足 A330/340/A380 等大型飞机的机身蒙皮、机翼壁板（蒙皮）的先进焊接（激光焊接、搅拌摩擦焊接）和蠕变时效成形制造要求，法铝研发了 Al-Mg-Si 系的 6056/6156、2022、2023 等铝合金，美铝也对 7055 铝合金进行了改进(7055-HDT)，使其适应上机翼壁板蠕变时效成形后所需的强度、韧性、耐蚀性和耐损伤的高综合性能要求。目前世界上最大的客机 A380 机翼整体上壁板采用超高强 7055 铝合金，长达 33m，最宽处达 2.8m，外型面具有双曲率气动要求，厚度在 3mm~28mm 内变化，内部加强筋条结构复杂。该结构极大地提高了机身的可靠性、耐久性、抗损伤容限和承载能力，使飞机服役年限提高到 40~50 年。尽管如此，美国、欧盟都还制定了进一步发展高服役性能与成形性能的铝合金的规划，拟发展大型整体框梁主承力结构件局部选择性增强、整体壁板构件蠕变时效成形的技术，以实现飞机减重增效的研发计划（如美国铝业公司-波音公司《航空 20/20 倡议》，欧盟的飞机整体构件制造计划等）。

铝合金中的微合金化在二十世纪九十年代以后引起了人们的极大兴趣。随着对 Zr、Sc 在铝合金中微合金化作用机理研究的不断深入，俄罗斯和美国都开发了一系列的含 Zr、Sc 的 5xxx 系（Al-Mg 系）2xxx 系、7xxx 系铝合金，并在战机、舰载机及航天器上得到广

泛应用。

值得特别指出的是，由于超音速飞机的发展，特别是军机的高速/高加速性能的不不断提升，航空耐热铝合金也一直在发展。代表性的合金是美国铝业公司二十世纪五十年代末期发展的 2618 (Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系) 和 2219 合金。后者在航天领域也大量应用，主要用做燃料储箱和火箭锻环。而 2219 和 2519 也被用作超音速飞机的多种构件、紧固件和蒙皮制造。八十年代中期，2219 发展形成 2519 合金。2519 合金被广泛用做两栖突击车的装甲。2618 铝合金至今在军机上仍在使⽤，也曾被欧洲协和式超音速客机大量采用，主要用于制造飞机的耐热蒙皮、耐热结构件等，以适应协和式超音速客机 2 马赫以上高速飞行时气动加热环境的要求。但随着协和式超音速客机退出航空客运市场，世界各航空制造大国短期内尚无发展新一代超音速客机和运输机的计划，因此民机对 Al-Cu- \times 系列耐热铝合金的需求有所减少，而超音速军机的制造与发展仍将对其有一定的需求量。

在上世纪 90 年代中期，由于 Ag 在 2 $\times\times\times$ 系铝合金中微合金化形成新的原子团簇或新相作用机理和效应的发现，成功研制了原型合金 C415、C417。该系合金具有很好的塑性和韧性，同时可在 200℃ 高温下长期使用。含有 0.15~0.6% 的 Ag，厚度达 152mm 的高损伤容限 2139T8 $\times\times$ 板材性能优于 2 \times 24T3 $\times\times$ 产品，且具有良好的耐热性能，在超音速军机上得了应用。最近的研究表明，Si 等作为微量元素，有望部分取代价格昂贵的 Ag，同样可使 Al-Cu 系合金获得良好的耐热性能，需值得特别关注。

当今高（超）强铝合金材料的制备一般经过下列流程（图 2），流程的各个环节均会影响铝合金多相微结构组织的形成和演变，从而最终决定材料的性能及其均匀性。

成分设计→原材料提取→熔炼→熔体净化→半连续铸锭→铸锭均匀化处理→热塑性加工（轧制、挤压、锻造）→固溶处理→转移→淬火（辊底喷淋、连续带式喷淋、立式）→预变形（拉伸、压缩）→时效处理（单级时效、双级过时效、多级回归再时效）。

图 2 高（超）强铝合金材料生产（制备）的一般流程

高（超）强铝合金的重要特征微观组织为：在铝基体上弥散分布着凝固结晶形成的微米级结晶相、高温沉淀析出的亚微米或纳米尺度弥散相、时效析出的纳米尺度亚稳相；基体组织包括：固溶体、亚结构、晶界、无沉淀析出带、空位与位错等。多尺度的第二相和复杂结构基体决定了铝合金的性能（图3）。

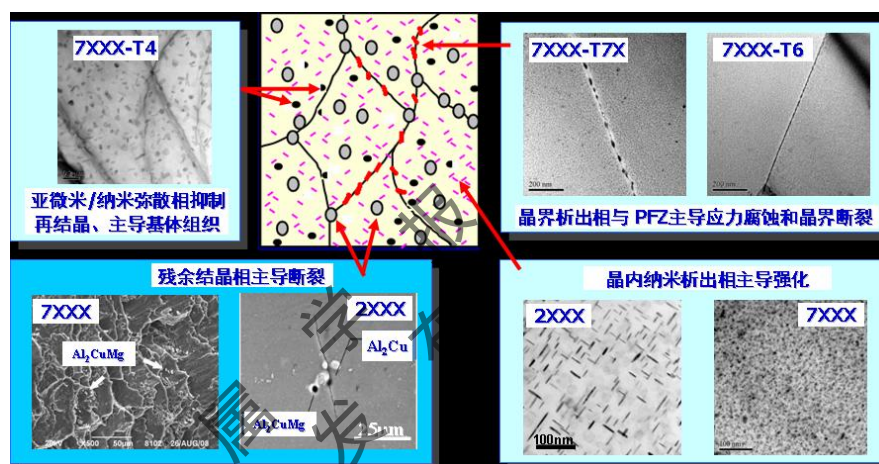


图3 高（超）强铝合金的特征组织及其对性能的影响

粗大初生相主导合金的断裂。微米尺度初生相是铝熔体凝固结晶时首先在熔体中形成，但在加工过程中不能消除。非平衡结晶相是熔体非平衡凝固结晶时形成的，主合金元素（Zn、Mg、Cu）不能完全进入铝基固溶体，以铝化物或共晶相形式存在于凝固组织中，经均匀化—形变—固溶热处理，可逐渐溶入铝基体中，剩余部分成为残余结晶相。铝熔体中 Fe、Si 杂质元素与铝形成不溶初生相、难溶非平衡结晶相，也是降低材料韧性的另一个重要原因。

弥散相抑制基体再结晶从而主导了基体组织、织构与晶界，对材料韧性、抗应力腐蚀性能产生协同影响。弥散相是铝熔体中过渡族元素或稀土元素在半连续铸锭中先固溶于铝基体，经均匀化热处理析出的亚微米或纳米尺度铝化物第二相。

晶内时效析出相主导合金的强韧化，晶界时效析出相主导合金的局部（应力）腐蚀开裂。纳米尺度时效亚稳相是合金固溶淬火后经时效处理沉淀析出所形成的第二相，随时效温度提高和时间延长，析出

相形态、结构及成分发生复杂变化。随着时效析出亚稳相数量提高，铝合金强度提高，但时效析出相相应地在晶界进一步富集，晶界断裂成为断裂的主导因素，合金的断裂韧性和耐蚀性（应力腐蚀抗力）降低。调控晶内、晶界时效析出状态，可在强度、韧性和耐应力腐蚀性能方面找到最佳点。

合金材料的塑性加工变形温度、变形程度和变形速度决定了基体组织的微结构特征，对材料的固溶和时效热处理将产生重要作用。

回顾高（超）强铝合金的发展历程，飞机与航天器的结构设计与高性能铝合金材料的发展相互促进，不断提高装备的结构效率和铝合金材料的性能。

2、高（超）强铝合金材料的发展趋势

研发大规格高综合性能铝合金材料是国际航空、航天、交通运输铝合金材料研究趋势。新型高（超）强铝合金的研发及现有材料性能的提升都与铝合金成分的创新设计相关，成分的确定需结合理论计算和实际经验的结果。大规格高性能铝合金材料的制备面临挑战，需要发展系列制备技术，以难达到组织细化、亚稳化、性能均匀化的目标。重点要发展大锭坯的高净化熔炼与均质铸造技术，大规格铝合金材料的均匀流变加工技术，组织性能均匀性的热处理精细调控技术。此外，为了减少或避免在制造过程中产生性能损失，材料制备与构件制造两者的融合很重要，需发展材料/构件一体化成形/成性制备加工技术。

（1）新一代高综合性能铝合金材料的研发

铝合金成分的创新设计需将相图与第一原理计算相结合，摆脱传统“炒菜式”的合金设计方法，以决定材料强度、韧性、模量、耐腐蚀、抗疲劳、耐损伤、耐热等性能的特征微结构为出发点，探明主合金成分元素总量及配比、微合金化元素的作用规律；将铸造、塑性加工及热处理过程中微观组织演化仿真模拟、成形有限元模拟与装备改进、以及性能评价系统相结合，建立材料制备过程的组织精细化调控原理与技术。总之，将理论计算、模拟和试验相结合，新牌号的研发与应

用所需时间可大大缩短，效率大幅提高。

7×××系铝合金材料的发展，需在发挥该系合金超强特性的基础上，保持或提高韧性、耐蚀性、抗疲劳性能等高综合性能以及高淬透性等工艺性能。

2×××系铝合金材料的发展，需在发挥该系合金高韧、抗疲劳特性的基础上，提升合金的强度、耐蚀性、耐热性能、耐损伤性能以及蠕变时效成形等工艺性能。

5×××系、6×××铝合金的发展，需在发挥该系列合金高耐蚀性能的基础上，提升强度、耐损伤性能及焊接等加工工艺性能。

Al-Li 合金的发展，需在发挥该系列合金高模量、低密度特性的基础上，提高韧性、耐蚀性、耐损伤性能和超塑性成形性能，降低各向异性。

(2) 大规格高性能铝合金材料的均质制备

高（超）强铝合金材料的合金化元素含量高、规格大，组织与性能的宏/细观不均匀性愈益显著，凝固、加工、热处理中流场、温度场、应力场的不均匀作用会造成大规格铸锭成分的宏观不均匀性及非平衡结晶相和杂质相等组织细观不均匀性、厚截面材料形变与再结晶组织的宏/细观不均匀性、热处理组织与残余应力的宏/细观不均匀性。需要研究合金成分引发的材料本质特性和制备环境引发的多场分布不均匀两方面作用规律与机理，寻求并确立宏/细观组织均匀化的熔铸、塑性加工、热处理等关键制备技术。

1) 高合金化大铸锭的高净化熔炼与均质铸造

大规格/厚截面高性能铝材需要首先能稳定地生产出高质量大铸锭。航空工业所需超高强度铝合金材料由于合金化程度高，结晶范围宽，氧化、吸气严重，易含气夹杂，成分宏/微分布均匀性难控制，铸造时极易开裂，成品率低。厚扁锭及大直径高合金化均质铸锭的熔炼、铸造技术一直是世界铝加工界关注的热点。

高净化铸坯。杂质与氢气含量越少越好，目前航空材料氢含量要求控制在不大于 $0.10\text{mL}/100\text{gAl}$ ，夹渣控制在 $0.02\text{mm}^2/\text{kg}$ (PodFa)，最大颗粒尺寸不超过 $3\mu\text{m}$ 的水平。

无热裂和冷裂，高成品率。厚度 600mm、直径 800mm 的 7××× 系铝合金大铸锭成品率要求高于 85%，整个厚度截面平均晶粒尺寸不大于 350 μ m，成分的宏观偏析小于 5%。

为此，需要对大锭凝固理论与过程进行深入研究，以预测铸锭的显微组织、表面特性、应力应变分布和变形规律；发展先进的铝熔体多级净化、细化晶粒的熔铸技术，如炉底电磁搅拌、恒温熔炼、电磁—超声复合外场铸造、油气混合润滑铸造、微震动铸造、矮结晶器铸造等技术。

2) 大规格坯锭的均匀流变塑性加工

在拥有大型设备的同时，需要开发相应的大规格坯锭的塑性加工工艺。针对 600~850mm 开口度、4000mm 宽以上的轧机，12500 吨、直径 600mm 以上的挤压机，40000~80000 吨的锻压机，不仅要保证板材、型材、锻件的几何尺寸、精度与表面质量，而且还要使塑性变形深入、均匀，要控制并得到预期的微观组织结构。为此，需要系统研究铝合金厚板的锻轧、角轧、非对称轧制，型材等温挤压，模锻件等温锻造等强应变塑性加工技术。

铝合金厚板高向性能低是国际铝加工界需要解决的难题。发展非对称内剪切轧制是一条值得研究的技术途径。德国科布伦茨研发的蛇形轧制技术，不同于平辊轧制与传统非对称轧制，能使厚板内外层同时经受均匀剪切变形，消除厚板中间层因变形不能深入而留下的不同组织，可大幅提高厚板高向组织与性能均匀性。此外，经蛇形轧制产生的剪切组织、织构组态，将会引起板材强韧性、耐蚀性、抗疲劳、耐损伤及成形加工性能的一系列变化，该技术的发展值得特别关注。

3) 大规格材料组织性能均匀性的热处理调控

大规格铝合金材料热处理的特点是：固溶处理过程中晶界、相界上的平衡相的不均匀析出，严重降低淬透性和材料性能，产生性能的短板效应；淬火内应力不均匀分布、淬透深度与残余应力的冷却速率控制方向相反，表面与芯部受热不均匀、多级时效制度调控难度大。

厚截面铝材即使采用预拉伸仍然存在残余应力的不均匀分布，宽幅薄板淬火后往往板型差、残余应力大，大型挤压型材淬火后形状扭曲、性能不均匀，超长中空型材立式淬火上、下性能不均匀。因此，

需深入研究厚板辊底固溶淬火—预拉伸、中空型材卧式连续淬火、锻件预压缩、薄板辊矫的淬透层深度与残余应力调控及板形控制技术。

尽管美铝公司研发的 T77 回归再时效技术在调控铝合金的强度、韧性与耐蚀性方面取得了巨大成功,但由于该技术时效温度改变窗口窄,难以解决多级时效过程中厚截面材料表层升/降温快于中心、第二相不均匀造成的宏/细观组织性能不均匀的难题,因此,需研发集温度、时间、外场等多因素产生积分效应的中厚板时效热处理技术。

(3) 高性能铝合金材料/构件成形/成性一体化制备加工

采用大规格铝合金材料制造整体构件,实现减重、材料利用率大幅度提高,材料与构件制造技术的融合趋势十分明显。但整体大构件的制造过程十分复杂,容易使材料性能在制造过程中损失,需发展专项材料/构件成形/成性一体化制备技术。

首先要研发具备高服役性能与成形性能的铝合金材料,在此基础上,发展框梁主承力结构件局部选择性增强、整体壁板构件蠕变时效成形、超塑性成形与固态扩散连接、激光焊接、搅动摩擦焊接等整体构件制造技术。

二、高(超)强铝合金材料的国内发展现状

我国高(超)强铝合金的研发主要受国内航空航天工程发展的牵引作用和国外高(超)强铝合金相关技术发展的推动作用,其发展也大致经历了五个阶段,并与国际差距逐渐缩小;形成了由研究院所、高校与企业相结合的研究群体,覆盖飞机设计、航天装备设计、材料设计与制备、构件设计制造和应用研究等方面。我国高(超)强铝合金研究的人才储备具有一定的基础。近些年,为了促进科技成果的转化、各部门、企业、研究院所和高校积极探索产学研用协同创新机制与体制;如“中国铝业联合实验室”、教育部“高性能铝材工程化研究基地”、“国家铝合金协同创新平台”等新的产学研用联合形式与机制。

我国不同时代研制和生产的高(超)强铝合金材料支撑了不同时代各型战机、导弹、卫星、飞船等的研制与批产,在高(超)强铝合金材料研发生产方面已有了丰富的生产技术与工艺积累,为保证国家

安全作出了重大贡献。随着大飞机、载人航天等重大工程的启动，通过从国外引进与消化吸收，并结合国内制造，基本上建成了具有国际先进水平的高（超）强铝合金材料生产的系列装备和加工基地。

我国铝材研发的总体基础比较薄弱。在大飞机工程启动以前，铝合金研究基本上是头痛医头、脚痛医脚的局面。我国铝合金牌号极少，规格非常有限。大飞机设计所需要生产的铝合金我国基本上没经过适航认证；且批量生产的产品质量不稳定，缺乏自己的航空标准；大规格厚截面产品性能不均匀性大。生产企业缺乏航空航天以及交通运输铝合金材料的研究力量，专业技术人才、装备条件薄弱，缺乏长远的研发规划。

目前，受熔体纯净化、厚截面材料均匀性调控的多级时效热处理装备及相关技术研发滞后的制约，大飞机等重大国家工程铝合金材料的研制与生产受到影响。铝合金纯洁度达不到要求，致使合金断裂韧性低、抗疲劳性能低，如 2524T3 状态合金性能很难达到设计要求。由于三级时效装备刚进入工程建设，大规格 7055T7751、7150T7751 板材还没能进行生产。我国铝锂合金的研究相当落后，缺乏铝锂合金的牌号设计技术，以及生产大规格型材、板材的装备与技术。

从铝合金材料的持续研发能力来看，我国急需要建设好高性能铝材工程化研究基地（平台），建立以市场经济为主导的科研与生产体制，减少甚至取消政府部门少数人的计划导向与安排，加强民机材料与国际接轨的适航认证、知识产权保护等战略研究，建立多部门会商、通报的全局市场运行机制。从长远来看，需规划新一代高（超）强铝合金及其材料制备关键技术创新的基础及应用基础研究。

1、高（超）强铝合金材料的研究现状

针对我国高（超）强铝合金材料的研究，以下从基础研究，应用基础研究，研究团队和人才储备方面进行简介。

（1）基础研究与应用基础研究发展现状

国家“973”项目基础研究紧密结合国家的需求背景，研究了高强

度铝合金以及高强耐蚀铝合金的基础问题。航空铝“973”项目研究高强高淬透、超强高韧高耐蚀、中（高）强高耐蚀耐损伤、高比强度高比模铝合金材料。我国铝合金研究主要结合大飞机工程，军口第三代、第四代型号工程展开，基本处于欧美 20 世纪 80 年代末的水平，其重要标志是第三代高纯铝合金已在歼 11B 上得到应用。我国高（超）强铝合金材料的研究发展历程与现状如表 2 示。

表 2 我国高（超）强铝合金材料的研究发展历程与现状

阶段	需求	年代	技术推动	典型合金及应用
第一代	静强度	50~70 (国外: 1910~50 末)	沉淀硬化	7A04 (LC4) 2A12 (LY12) 广泛应用歼 5/6/7/8; 导弹、卫星
第二代	抗腐蚀	70~80 中 (国外: 60)	过时效	7A09-T73、T74 (7075-T73、T74) (LC9) 广泛应用歼 7/8; 导弹、卫星
第三代	高韧性 抗腐蚀	80 中~ 00 中 (国外: 60 末~70)	高纯化 锂强化、 轻量化	7475、2124、2324、7050 歼 10 飞机研制与批产需求
				7B04、2D70、2D12、2B06 和 5A90 (Al-Li) 歼 11B 批产需求
第四代	超强耐蚀 耐损伤	00~ (国外: 80 末~90)	精密热处理 锂强化 轻量化	7A55、2A97、2E12 (预研, 满足四代机 研制需求)
第五代	高淬透 综合性能	05~ (国外: 00~)	优化成分 大规格材料 均质制备	7050 (飞机改型与大运、大客研制需求) 7A85、7B85 (预研, 大飞机研制需求)

我国高（超）强铝合金材料基础研究的主要资助途径是自然科学基金项目、铝 973 计划项目，以及总装备部预研基金项目。应用基础研究的主要资助途径是 863 计划和国防科工局的型号配套项目。

近十年来，公开报道中几乎没有批准立项涉及铝合金成分设计创新的自然科学基金项目。这一方面说明我国申请者和项目主管部门对铝合金的源头创新缺乏积极性；另一方面也不得不承认一个客观事实，即航空铝合金从成分创新设计到应用需要大量的财力、人力投入，一般需十年以上的时间，单独依靠自然科学基金申请者个人的努力很难突破。

铝 973 计划人员和单位是我国铝合金材料基础研究的一支重要

力量。第一期铝 973 项目（1999-2004，提高铝材质量的基础研究）重点解决我国第一、二代铝材成形性与强韧性调控的基础问题。第二期铝 973（2005-2010，高性能铝材与铝资源高效利用的基础研究），在高性能铝材方面，重点解决第三代铝材纯净化、外场铸锭、形变热处理提高服役性能的基础问题。第三期铝 973 项目（2012-2016，航空高性能铝合金的基础研究）重点解决大飞机用新一代高综合性能大规格铝合金材料的成分、组织模式设计与均匀制备的基础问题；围绕飞机主体结构所需三类重要航空铝合金进行成分优化与创新，发展新一代高综合性能铝合金，解决大规格铝材性能均匀制备的原理与技术难题，满足我国航空工业持续发展的需求。

尽管如此，我国航空铝合金基础研究、应用基础研究等研发保障条件、运转机制与国外相比还有较大差距。欧美国家在新合金的关键技术取得突破后，根据材料研究的成熟度，能够利用先进的技术装备开展应用研究、工程化研究等一系列工作，所开发的新合金往往能设法在相应的飞机上获得应用，其“合金研制-工程化研究和应用-正式生产应用”的体系非常完备、有效，而我国铝合金的熔铸、挤压、轧制以及锻压设备虽然已基本具备保障条件，第三代和第四代铝合金的工程化研究以及应用研究也已启动，但缺乏材料的应用基础研究，以及高效运转的应用研究机制与体制。

（2）研究团队与人才储备

在国家产学研用科技政策的指引下，经过型号配套工程的产学研用协作、以及铝 973 计划项目的实施，形成了由高校、科研院所、企业相结合的研究群体，覆盖飞机设计、材料设计与制备、构件设计制造和应用性能研究各领域，主要有以下各具特色的研究群体。

中南大学拥有 200 多人的铝合金研究队伍，在铝合金相图计算与设计、材料性能-成分快速扫描测试、铝合金织构模拟与控制、材料制备技术与装备研发、铝合金工程应用等方面具有长期的工作积累，形成了高性能铝合金材料与应用研究的综合优势。

上海交通大学形成了电磁净化、脉动除气、雾化除气、陶瓷板过滤等铝合金纯净化新原理与新方法研究的学术团队，提出了利用熔体强电脉冲处理的组织细化方法。

东北大学形成了关于超高强铝合金电磁铸造的研究团队，致力于发展铝合金大规格电磁铸锭制备原理与方法。

北京航空航天大学的研究团队在铝合金微合金化、时效强化、腐蚀实验研究方面有长期的研究工作积累。

北京工业大学在铝合金研究方面已经形成了一支科研队伍，在铝合金微合金化的设计与材料制备方面有着良好的工作积累。

北京有色金属研究总院形成了关于超高强铝合金的强韧化和铸锭喷射沉积的技术团队，致力于高淬透性高强高韧铝合金的自主研发。

中科院金属研究所在铝合金组织结构的高分辨电子显微分析、疲劳损伤、断裂研究方面具有优势和专业人才。

中航工业北京航空材料研究院形成了关于航空铝合金服役性能检测分析与评价的团队，在耐损伤铝合金研究方面具有突出的优势。

沈飞、西飞、成飞、商飞等飞机设计研究院形成了我国航空铝合金应用的专业团队。航天一院、航天二院、航天 061 基地等都各具铝合金应用研究的特色。

中国铝业公司下属东北轻合金有限责任公司、西南铝业（集团）有限责任公司、西北铝业（集团）有限责任公司、西南铝加工有限公司等铝加工企业是中国高（超）强铝材的生产基地，形成了我国高性能铝材生产技术研发基地和团队。

从事高（超）强铝合金研究的队伍中包括了院士、千人计划引进人才，长江学者奖励计划特聘教授，国家杰出青年科学基金获得者，新世纪百千万人才计划国家级人选等一批老中青相结合的队伍，以中青年专家与研究人员为主。我国高（超）强铝合金研究的人才储备具有相当广泛的基础。

上述高校、科研院所和企业总体上形成了我国高（超）强铝合金材料研发的学科群，拥有有色金属领域的国家重点实验室（有色金属材料加工国家重点实验室、粉末冶金国家重点实验室、高性能复杂制造国家重点实验室）、国防重点实验室（轻质高强结构材料国防科技重点实验室）、国家工程研究中心（轻合金精密成形国家工程研究中心、粉末冶金国家工程研究中心）、国家级企业技术研究中心以及国

家 2011 铝合金协同创新平台，拥有一些国际先进水平的实验仪器和设备。

为了促进科技成果的转化，航空航天部门、铝材生产企业、研究院所和高校已建立了国家 2011 计划产学研用协同创新机制与体制。中国铝业公司与中南大学联合组建了“中国铝业联合实验室”，中国铝业公司投资 1 亿元用于在中南大学建设联合实验室和科研开发，重点开展基础理论和前瞻性、战略性关键技术的研究，共建重大技术研发与转移平台，直接解决国家和企业、经济和社会的重大需求，形成了从单一技术、单一项目、单一课题组的研究向整体性、长期性、战略性合作研究跨越的技术转移模式。

中南大学在教育部、财政部和湖南省政府的支持下，联合中铝公司、北京有色金属研究总院、北京航空材料研究院、北京航空制造工程研究所、商飞、沈飞、西飞及教育部相关航空铝合金研究的高校，构建了从合金设计、材料制备到构件制造的高性能铝材工程化研究基地。该基地包括相图计算、材料热力学计算、成形仿真模拟的系列软件与十万亿次计算平台，形成了 20 吨级先进水平熔铸试制生产线，4000 吨等温模锻、800 吨/2500 吨多功能挤压、1550mm 宽轧机等塑性变形工程化试制生产线，辊底式固溶—淬火、精密时效等热处理工程化试制线，以及真空罐时效成形、多能场搅拌焊接、高速铣削、化铣等高性能铝合金构件成形工程化试制线。

2、高（超）强铝合金材料的工业化生产现状、能力及技术储备

我国高（超）强铝合金材料的工业化生产技术是在伴随着我国航空航天工业的成长、在仿制前苏联和美国同类材料产品的基础上发展起来的，不同时代研制和生产的铝合金材料支撑了不同时代各型号武器装备的研制与批产，为保证国防安全作出了重要贡献。在航空铝合金材料生产方面也已有了一定的生产技术与工艺积累；随着大飞机等重大航空工程的启动，通过从国外引进与消化吸收再创新，并结合国内制造，基本上建成了具有国际先进水平的系列装备。

我国通过针对高（超）强铝合金材料的基础研究、应用基础研究与各型号配套的材料研制与生产工作的开展，对航空航天铝合金材

料的制备技术有了一定的储备,拥有 300 余项高性能铝合金材料的专利技术。

(1) 工业化生产现状、能力

几十年来,我国在铝合金材料的研究和开发方面取得了很大的进展,形成了第一代、第二代、第三代铝合金批量生产的能力,研发了如 LC4、LC9、LY12、2A12、2A16、7A04、7B04、7A50、7B50 等系列合金材料,形成了这些材料的系列热处理状态。以三代机歼 11B 飞机为例,所用铝合金材料多属第三代高纯高耐蚀铝合金材料,其铝合金材料已全面国产化,形成了战机批量生产需要的供货能力。首次实现国产高纯铝合金在型号上的批量应用,提高了国产航空铝合金生产、应用的整体水平,加速了国产航空铝合金的更新换代,丰富了战机用先进材料体系。

大飞机工程所需高性能大规格第三代、第四代铝合金以及新一代高淬透性铝合金材料的研制与生产以东北轻、西南铝、西北铝、南南铝等企业为核心,正在组织攻关,典型的大规格 7050 铝合金铸锭,圆锭直径可达 800mm,扁锭厚可达 600mm;典型的超厚 7050T7451 铝合金预拉伸板厚度已突破 150mm;2219 铝合金圆锭可达 1320mm;典型的 7085 合金自由锻件,厚度可达 300mm。但这些材料的性能不均匀性大、残余应力大,批次生产性能波动大,有待继续研究解决。

在装备方面,我国基本上建成了航空航天工程所需大规格高性能铝合金材料生产的系列装备。针对航空铝合金中厚板材料、大型整体模锻件生产装备能力不足的情况,通过从国外引进与消化吸收再创新,并结合国内制造,分别在东北轻、西南铝和南南铝建设了宽 4300mm、3950mm、4100mm,开口度 800mm、600mm 和 850mm 的热轧机;6000 吨、12000 吨以及 10000 吨预拉伸机;在二重建设了 8 万吨锻压机;西南铝已拥有 12500 吨挤压机和 40000 吨锻压机,西北铝建立了 4500 吨反向挤压机,南南铝已建立了 40 米长的辊低式淬火炉和 38 米长三级时效炉,我国基本上形成了具有国际先进水平的大规格高性能铝合金材料生产的系列装备。此外,许多部门和地方政府与企业也加快了在高(超)强铝合金材料生产方面的投资,出现了高(超)强铝合金中厚板生产百花齐放的局面,但也需防范各类企业

将来可能出现的无序竞争。

(2) 技术储备

我国通过针对涉及航空航天、交通运输用铝合金材料的基础研究、应用基础研究与各型号配套的材料研制与生产工作的开展，对高（超）强铝合金材料的制备技术有了一定的储备，拥有 300 余项高性能铝合金材料的专利技术。主要体现在以下几个方面：

1) 高综合性能铝合金材料的特征微结构设计及调控技术。通过对不同服役性能铝合金材料的特征微结构设计，探求多相多级强韧化和界面的协同作用，自主设计和研发了典型的高强度高韧耐蚀、高强度高韧抗疲劳以及高强度高韧耐热的几种高综合性能铝合金原型。

2) 铝及铝合金高效洁净化原理与技术。在提高铝及铝合金熔体洁净度方面，研究了铝液中非金属杂质的组成，揭示了 Fe、Si 杂质与铝形成的金属间化合物及随温度的析出、长大规律；将原铝熔体的金属杂质降低 1 倍， $10\mu\text{m}$ 以上非金属夹渣去除率达到 80% 以上，氢含量可控制在 $0.10\text{mL}/100\text{gAl}$ ；建立了高效在线净化和过滤的铝熔体新型洁净化技术，可以满足超强耐蚀抗疲劳铝合金对熔体质量的要求，为研发以纯净化为特征的高性能铝合金打下了必备的基础。

3) 发展了高性能铝合金的电磁、超声、振动等多外场调控铸锭技术。解决了大规格铸锭开裂难题，为开展凝固组织均匀性调控打下了必备基础。

4) 建立了高性能铝合金多级均匀化与固溶热处理技术。使弥散相均匀分布，减少再结晶分数，为开展细观组织均匀性、提高材料的韧性和耐蚀性调控打下了基础。

5) 建立了中厚板喷淋淬火—预拉伸消减残余应力技术。为高均匀性大规格材料消减残余应力打下了基础，以提高材料的韧性、耐蚀性和成品加工率。

6) 建立了高强铝析出相形成、演变规律及其强韧化调控技术，研发了多种国家急需的高（超）强铝合金材料。发展了强应变及回归时效、高温预时效等时效热处理创新原理与技术；建立了合金成分、杂质元素以及制备工艺参数与合金性能的关系规律。解决了“11 号工程”、核工业、遥感卫星、神舟飞船等对高性能铝合金材料的急需。

3、高（超）强铝合金材料研制与生产中存在的瓶颈问题

综观我国高（超）强铝合金材料的发展历程，基本上走的是跟踪仿制国外铝合金材料发展的路径。同时，受研制、生产装备条件制约，直至 20 世纪 90 年代末期，我国高（超）强铝合金材料的研制水平与国外的差距至少在 10 年以上，而生产能力及水平的差距至少在 25 年以上。进入 21 世纪以来的 10 年间，伴随着我国综合国力的增强、科技投入的加大，在广大科技人员的不懈努力下，我国先进铝合金材料的研制与国外的差距已迅速缩小，随着大飞机等科技专项的启动，生产装备水平正在迅速提升。目前，存在的紧迫问题是我国大飞机所需的高性能铝合金材料的综合性能和均匀性不能满足设计要求，研制与生产中存在的瓶颈问题有以下几方面。

1) 生产国外新牌号合金的材料存在知识产权问题，如 7055、7085、2524 等铝合金。

2) 熔体纯净化技术及装备整体上尚未达到国际先进水平。熔炼是制备高综合性能铝合金材料的第一步，熔体品质将产生强烈的冶金遗传影响。我国大飞机工程选用的都是 20 世纪 90 年代发展起来的、当前主流的第三代、第四代高纯净化航空铝合金材料，对熔体的纯净化指标要求相当高，代表了当今铝合金材料生产的最高水平。虽然大飞机工程所需先进航空铝合金材料的配套工作已经启动，但是高合金化铝合金熔体中气体含量、夹杂含量、夹杂物的大小与国外同类产品相比，仍然偏高，偏大，且不稳定，成为制约我国高综合性能铝合金稳定生产的熔炼装备及相关技术的瓶颈。

3) 厚截面高（超）强高韧耐蚀铝合金材料组织性能均匀性调控的多级时效精密热处理装备及相关技术缺乏。时效是制备铝合金材料的最后工序，影响强度、韧性、耐蚀性及抗疲劳性能，甚至淬透性等工艺性能的第二相析出行为均由此工序调节。国际上大飞机都将超强高韧耐蚀铝合金作为上机翼主壁板的首选，材料规格大、强度性能指标要求高（如 A380 的上机翼主壁板长达 33m，最宽处达 2.8m，拉伸极限强度 615MPa，是目前应用的强度指标最高的铸锭冶金形变铝合金），大规格超强高韧耐蚀铝合金厚板集大规格高性能的综合性能高

要求于一体，需采用 T77 三级时效热处理工艺才能实现。美国铝业公司(Alcon)是当前全世界拥有 T77 热处理工业化生产装备的企业，国际上各大飞机制造商所需要的 7×××系铝合金 T77 状态高端产品目前由该公司提供。我国大飞机工程及后续型号要摆脱关键材料受制于人的被动局面，有待解决多级时效精密控制热处理生产装备及相关技术的瓶颈。

4)材料制备技术及工艺研究缺乏系统性，产品质量稳定性差，不能适应适航认证要求。近年来我国引进新建许多生产装备的消化吸收工作尚未全面完成，相关的工艺技术还未形成体系；一部分大型关键生产装备尚需 1~2 年的时间才能建成。同时，对适航认证相关的前期投入准备不足，尚未建立完整适用的管理体系、知识产权战略体系。我国大飞机工程及后续型号的铝合金材料体系与国际接轨，有待解决材料制备技术及工艺研究系统性缺乏，产品质量稳定性差，不能满足适航认证要求的瓶颈。

5)工程化研究缺失严重阻碍新一代高（超）强铝合金与制备技术的持续创新能力。铝合金研究造成国内外差距的一个重要原因是缺失工程化研究，未形成集“高性能铝合金实验研制-关键制备技术研发-工程化研究”为一体的完整创新链。新合金研发不少，真正得到应用的很少，材料的成熟度低，质量和性能的稳定性差，没能形成自己的材料体系与系统工艺技术及规范，导致我国许多高（超）强铝合金材料不能自主生产供货，严重影响我国经济发展与国防建设。突破工程化技术是目前发展高（超）强铝合金材料产业的当务之急。

三、高（超）强铝合金材料发展的建议

国际航空业竞争的焦点是保障飞机高可靠、轻量化与长寿命；武器装备也是要求轻量化和高可靠。当前，我国铝合金材料存在的主要问题是综合性能和大规格材料的均匀性不能满足设计要求，新一代铝合金的研制滞后。因此，我国铝合金材料的发展首先应按照材料自身的发展规律，结合国家战略需求目标，确定其发展方向。我们的研究工作跟踪仿制的同时，要勇于超越；坚持产学研用紧密结合，针对研制和生产中遇到的瓶颈问题，尽快建立市场主导的研究平台。应改

革政府部门主导的科技立项和奖励制度以及平台建设的官僚体系。

1、研发新型高（超）强铝合金，发展高综合性能均质制备技术

根据我国铝合金材料研发的现实，结合国际上高（超）强铝合金材料发展的趋势，我国铝合金材料发展的战略目标应涉及两个方面：一是制备出重大工程急需的高综合性能大规格均质材料；二是研发未来发展飞机、高铁及装备所需新一代铝合金材料（如高强高韧高淬透、超强高韧耐蚀、高耐损伤等用于飞机主体结构的铝合金）。

为了实现上述战略目标，必需发展宏/细观组织性能均匀的成分设计与大规格材料均质制备技术，以及材料/构件成形性一体化制备技术。具体涉及以下几个方面。

1)铝合金材料集成设计原理与技术。摆脱传统的“炒菜式”合金成分设计方法，以影响铝合金材料强度、韧性、模量、耐蚀性、抗疲劳、耐损伤等性能的特征微结构为出发点，将相图计算与第一原理计算、铸造与热加工过程中微观组织演化模拟、成形有限元模拟集成起来，并与装备设计与虚拟制造和性能评价系统相结合。通过理论计算、模拟和有限的试验，研发出针对极端服役环境的铝合金新成分与制备技术。这将极大地强化铝合金研发的科学依据，加快新合金研发与应用进程。重点发展高综合性能2xxx、7xxx铝合金、高强高韧高比模低密度的铝锂合金，以及层状混杂铝基复合材料。

2)铝合金高洁净化技术。通过降低Fe、Si等杂质含量，提高合金纯度以及洁净化熔体，提高铝合金的断裂韧度、疲劳性能、耐蚀性能等。Fe、Si杂质的降低量需根据服役性能要求确定。多级除气除渣净化熔体。目前航空材料氢含量需控制在0.10ml/100gAl以下，夹渣控制在 $0.02\text{mm}^2/\text{kg}$ (PodFa)，最大颗粒尺寸不超过 $3\mu\text{m}$ 。

3)大规格高性能铝合金材料均匀化制备技术。借助4米以上的大型轧机，10000吨以上的挤压机，30000吨以上的锻造机，采用强应变塑性变形、等温挤压、等温锻造等技术生产厚截面的大规格板材、大型复杂结构挤压件和锻件，满足构件制造的需求。

4)铝合金组织性能均匀化的热处理技术。首先，通过分级均匀处理减少或消除非平衡结晶相，均匀化成分，使弥散相细小均匀共格均

匀析出。通过分级固溶处理控制再结晶分数，形成具有亚结构的纤维状组织。分级淬火强化表面换热，提高表面与芯部均匀冷却效率，提高淬透深度。对于厚截面材料，表面与芯部升温与降温的速度不同，利用时间和温度对析出的影响规律，通过多级时效（包括积分时效）调控厚截面材料组织和性能的均匀性。因此，要深入研究中厚板辊底式固溶淬火—预拉伸、中空型材连续淬火、锻件预压缩、薄板拉矫的淬透层深度与残余应力协调控制技术。

5)材料/构件成形性一体化制备技术。采用大规格铝合金材料制造整体构件可实现减重和提高可靠性，材料成本和利用率大幅度提高。但大规格高性能铝合金复杂构件的制造过程十分复杂，容易使材料性能在制造过程中难保证。为此，一方面需要采用精密模锻、等温挤压、激光焊接、搅拌摩擦焊等先进的整体构件塑性加工、连接技术，另一方面，也需发展材料/构件一体化制造的新技术，如飞机制造大型整体框梁主承力结构件局部选择性增强、整体壁板蠕变时效成形、复杂构件的超塑性成形与扩散连接等。

2、研制与生产高（超）强铝合金大规格材料的对策和措施

(1) 尽快突破铝合金材料工业化制备的熔体高净化与多级时效精密热处理技术。

针对大飞机等重大工程铝合金材料的研制与生产中遇到的技术瓶颈：熔体纯净化指标整体尚未达到设计要求；厚截面超强高韧耐蚀铝合金材料组织性能均匀性调控的多级时效精密热处理装备及生产技术缺失。材料残余应力的检测、分析与消减方法与技术离航空工程要求相差甚远。但是，国内有多家高校、研究院所及企业又有一定的前期研究基础，因此，建议根据前期已经形成的基础研究、工艺研究及装备条件基础，尽快给予市场扶植并推广应用。

(2) 加速研发新一代高（超）强铝合金材料。

在我国航空航天、交通运输业发展面临结构减重、节能降耗的迫

切需求形势下，对铝合金材料科学与工程提出了前所未有的挑战。创造新一代高综合性能铝合金材料所需的理论有的已超越了当前对材料科学的认识深度，这是我国铝合金材料工作者面临的难题，也是继续创新的目标。我国在新一代高（超）强铝合金研究方面表现出了很好的势头和研究结果，建议尽快与生产企业和应用部门相结合，协同创新材料的研发、制备与应用。

（3）建立市场主导的铝合金材料研发模式，推动和加快高性能铝合金材料产业化技术的发展

我国铝合金材料研究以前总是需求牵引，按需求临时下达任务，即缺乏全局性战略部署与总体规划，也没有按市场经济运作建立创新体系，致使能完成任务的人和单位拿不到项目。考虑国内外铝合金研究的发展经验，根据铝合金材料自身发展规律和我国重大工程的需求，建议尽快建立市场主导的铝合金材料研发模式，引入竞争机制，谁先有结果扶植谁，不断激励我国铝合金材料研究的创新能力建设。

（4）研究适航认证过程中的知识产权突破战略和保护战略，使民用航空铝合金材料体系与国际接轨。

研究适航认证过程中的民机材料合格供应商资质申请与认定的工作，组织航空铝合金材料研制与生产企业开展设备认证与产品认证的调研工作，按要求积累相应的资料和数据，使我国的产品尽快进入世界市场。

3、高（超）强铝合金材料发展路线建议

1) 继续在研的航空航天用先进铝合金材料的工程化与产业化研究，加强针对现有装备的工艺技术机理研究，确保产品质量的均匀性、稳定性能够满足国家重大工程装备与构件研制和未来批量生产的市场需求，特别是要满足 C919 飞机的适航认证的要求。

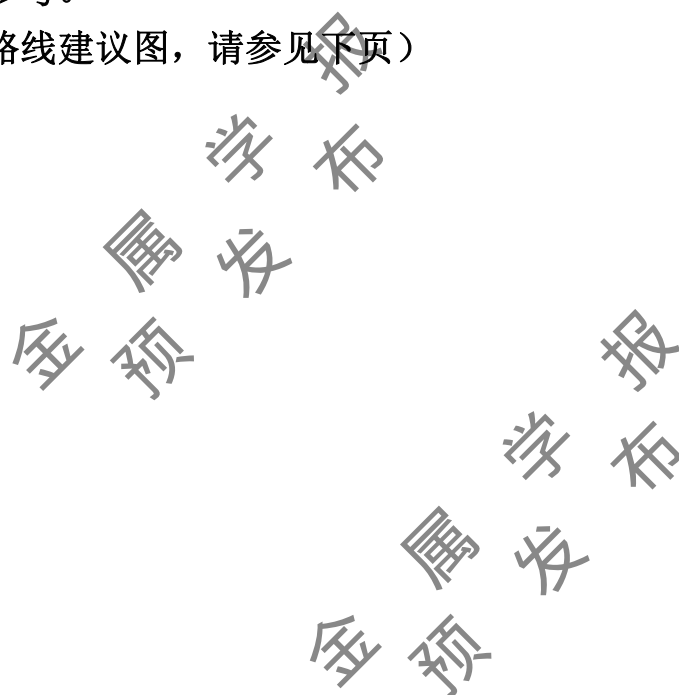
2) 重视新一代铝合金的前沿性、基础性研究工作布局，在对国际上的航空铝合金材料发展思路、知识产权情况深入分析和把握的前提下，明确目标，集中力量抢占未来发展的若干技术关键制高点。

3) 高度重视民用航空铝合金材料的适航认证和知识产权保护战略研究工作，确定军用、民用材料的保密策略，逐步建立军、民兼顾的我国铝合金材料体系。

4) 航空铝合金产业属于技术门槛高、综合集成度高、资本密集性产业，而全世界的市场空间则十分有限，需要制定相关政策，利用市场的调节与激励机制支持优势企业和科研单位，避免不必要的立项支持；以航空铝合金材料的制备技术为平台，提升和发展我国的铝加工业。

综上所述，我国高（超）强铝合金材料发展路线建议，如图 4 所示，仅供参考。

（发展路线建议图，请参见下页）



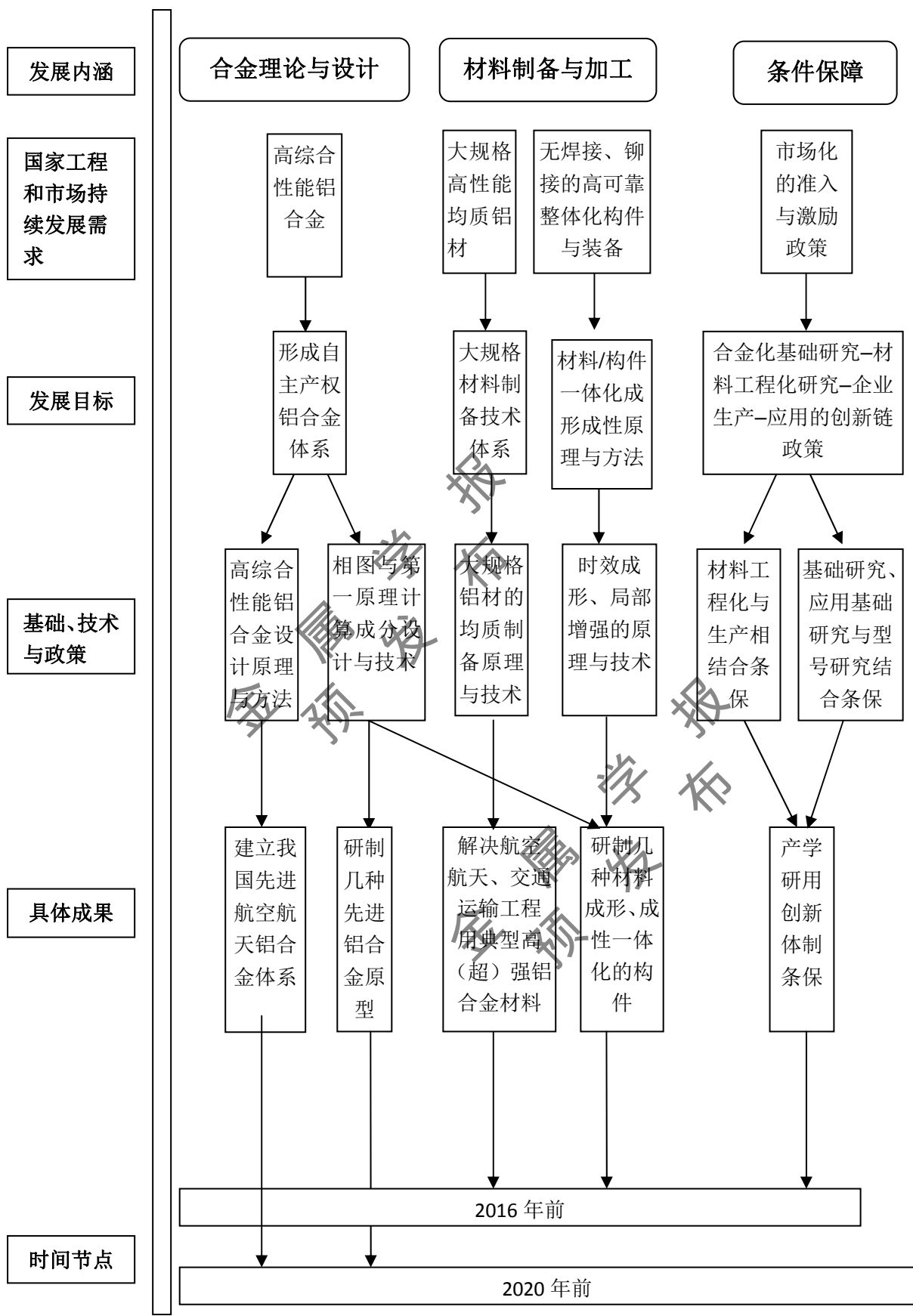


图 4 我国高（超）强铝合金材料发展路线图（建议）