

国外 近代变形铝合金 专集

洪永先 张君尧

王祝堂等 编译

冶金工业出版社

国外近代 变形铝合金专集

洪永先 张君尧 王祝堂 等编译

冶金工业出版社



**国外近代
变形铝合金专集**

洪永先 张君尧 王祝堂 等编译

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷38号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 20 3/8 字数 535 千字

1987年7月第一版 1987年7月第一次印刷

印数00,001~1,600册

统一书号: 15062·4477 定价5.80元

前 言

有色金属工业是我国重要的优势产业，有色金属是国防建设和经济发展的重要战略物资和基础材料。在有色金属中铝居于首位，国家已确定了优先发展铝的方针。

我国的变形铝合金，尤其是铸锭冶金变形铝合金，自建国以来，从无到有，持续发展，初步形成了较为完整的合金系列。但在振兴中华、大干“四化”的新形势下，现有的变形铝合金，难以满足经济发展的需要。就其品种质量而言，也与国外先进水平存在某些差距。

为适应“四化”建设的需要，促进铝工业更快发展，我们结合国内实际，选译了40篇国外有关资料汇集成这本《国外近代变形铝合金专集》，以供我国的同行们作为探索性的参考资料。本书主要取材于近几年国际有关学术会议论文、书刊或专刊，原作者大都是美、苏、英、法、西德、日、加、匈等国从事铝合金研究的著名专家。本书汇集了他们的近年成果，在一定程度上反映出现代变形铝合金的水平。全书按其内容归纳为以下六个部分。

第一部分是变形铝合金综合性述评，概括了近几年来该技术领域的发展情况，为探索变形铝合金今后的发展方向提供了重要的资料。

第二部分是铸锭冶金变形铝合金。介绍了Al-Cu-Mg系、Al-Cu-Mg-Fe-Ni系、Al-Mg系、Al-Mg-Si系、Al-Zn-Mg系、Al-Zn-Mg-Cu系合金近些年来所取得的成就和今后的发展远景。主要是研究冶金因素对铝合金组织和性能的影响；通过减少杂质(Fe、Si)含量、调整成分、加入微量元素和改进热处理工艺，控制材料组织，发展断裂韧性、抗应力腐蚀性能和抗疲劳性能好的新高强铝合金；发展热强度高、热稳定性能好的新耐热铝合金；发展强度和挤压性能有最佳搭配、可在挤压机上淬火、适合

18020

表面处理的建筑和结构工业用新合金；发展有较高强度、冲压成形性能好和抗压痕性能好的车身板材新合金。

第三部分是铝-锂系合金。为了使飞机结构轻量化和节能，最近几年对铝-锂系合金的发展又重新产生了很大的兴趣。锂是最轻的金属。向铝和铝合金中每添加1%的锂，其比重下降3%，弹性模量提高6%。一般添加量为2~3%，这样，比重可降低10%，弹性模量可提高25~30%。因此，不论发展轻质合金，还是发展高刚度、高弹性模量合金，都离不开这个合金系。所以本书作为单独一个部分，对铝-锂系合金进行介绍。其中有采用铸锭冶金方法的，也有采用粉末冶金方法的，美国正在开发急冷粉末冶金法。1985年，铝-锂合金将在美国投入工业生产。据报道，如果飞机制造广泛地采用铝-锂系合金，由于减轻重量，燃料消耗可减少一半。这样，不论是技术价值还是经济效益都是非常可观的。在铝-锂系合金铸锭冶金工艺上也取得了很大的进展。

第四部分是超塑性变形铝合金。铝合金的超塑性是超细晶超塑性，一般晶粒度在10微米左右。超塑性变形铝合金有许多优点。细晶组织能改善合金的各种性能，可以进一步发挥铝合金的潜力。细晶组织能实现超塑性变形，即用很小的应力，就能产生很大的变形，变形率可达1000~2000%或更大。这对金属的压力加工是很有实际意义的。变形阻力小，可省能，可用小吨位设备，节省设备投资和占地面积。由于塑性好，可生产复杂形状的制品，并且还可一次成形。这样不但能生产用一般工艺生产不了的制品，而且又简化了工艺过程。通过超塑性成形能制成整体部件，可免除联接工序，如焊接、铆接、螺接等，从而可增强制品的强度和表面质量。很多合金，其中也包括高强度铝合金，都能实现超塑性变形。因此，超塑性变形铝合金的发展，近些年来受到了很大的重视。

第五部分是粉末冶金变形铝合金。粉末冶金方法可以实现快速凝固。通过快速凝固，能大大缩短晶体长大时间，细化晶粒，能极大地增大过饱和度，增大合金化极限，消除偏析。有些在固

态下基本不溶解的元素，在液态下却能溶解，并在快速凝固过程中能均匀地弥散在粉粒中，形成非平衡的亚稳定相，能提高强度和韧性。快速凝固还能抑制对机械性能和腐蚀性能有害的平衡相析出。

粉粒有大的表面-体积比，粉粒越细，表面-体积比越大，在粉粒表面上产生的强化物越多。通过机械摩擦在粉粒的表面上容易产生细小的氧化物，从而产生氧化物弥散强化，同样也能产生碳化物强化和基本上不溶解的弥散体。通过球磨对每个粉粒进行的冷加工能引起高的位错强化。在粉末压实时，其晶粒（亚晶粒）比加工大铸锭时所得到的细小，可产生细晶粒强化。因此，粉末冶金可以实现多种强化的叠加。用粉末冶金法可以生产出疲劳性能、抗腐蚀和抗应力腐蚀开裂性能、室温和高温性能、以及韧性更高的变形铝合金。

今后，在通过铸锭冶金来改进合金所取得的成果逐渐减少的情况下，粉末冶金变形铝合金在一些应用场合，有取代铸锭冶金变形铝合金的趋势。

第六部分是铝基复合材料。铝基复合材料既有铝合金的长处，又有增强材料的优点，所以有很高的强度，很高的弹性模量，很好的耐热、耐磨、耐腐蚀性能，热膨胀系数小，对环境的稳定性强。一般铝合金的弹性模量为70~75千兆帕，而铝基复合材料可达120~300千兆帕。

目前，铝基复合材料有铝-硼纤维、铝-碳纤维、铝-氧化铝纤维等复合材料。许多铝合金都能作复合材料的基体。

今后，在航空与航天、动力与运输制造业和其他技术领域中，在结构材料上将会出现使用铝基复合材料的重大改革时期。所有科学技术发达的国家在设计新一代飞行器时，都在扩大铝基复合材料的应用，与使用其他金属结构相比，其自重平均可减少26%。预计在现代军用飞机中使用铝基复合材料，结构重量可减少20%，将来军用飞机的结构重量可减少30%~35%，客机的结构重量可减少20%。预计在军用和民用飞机结构中铝基复合材料

的使用量到1990年将会增加到8~30%。看来航空与航天工业必然越来越多地使用铝基复合材料。

我国变形铝合金研制工作，正处于新的历史时期的开始。传统铝合金的研制工作已基本完成，外国有的传统合金，我国基本上也有。如果停留在已有的基础上或者向前发展得缓慢，那不仅要使我国铝合金材料的发展落于时代的后面，更主要的是要严重影响使用铝材部门的技术发展，使先进技术由于没有材料保证而不能很快发展。

我们选译本书，是为了在一定的程度上反映工业发达国家在变形铝合金发展方面所取得的成就与今后的主要发展方向及目标，为我国铝合金事业的发展提供一些参考资料。但由于我们水平有限，本书中所选的文章不一定是最合适的，翻译的质量也是不够高的，希望读者提出批评指正。

编 译 者

一九八四年十二月

目 录

前言

第一部分 变形铝合金发展综述..... 1

八十年代结构铝材

〔美〕 R.F. 西门兹, M.K. 古埃斯..... 3

航空与航天工业用的新型铝合金

〔美〕 E.C. 伯克21

在地平线上出现的新的铝合金

〔美〕 J.C. 比坦斯40

第二部分 铸锭冶金变形铝合金.....47

改进杜拉铝性能的途径

〔苏〕 A. 德里茨等.....49

苏联变形铝合金1163

〔苏〕 JI.H. 列希涅尔60

热强变形铝合金及其发展远景

〔苏〕 O.A. 罗玛诺娃65

新发展的汽车车身板5XXX系铝合金

〔日〕 宇野 等.....73

6000系中高挤压性能合金

〔法〕 D. 马希弗80

6000系里的中强挤压铝合金

〔法〕 D. 马希弗, P. 费弗雷97

Al-Zn-Mg系变形铝合金的发展趋势

〔苏〕 B.И. 耶拉金等 108

建筑型材中强Al-Zn-Mg合金

〔匈〕 K. 巴尼兹, L. 维特利斯 122

一种铝合金制品的生产方法

〔美〕 W.E. 奎斯特, M.V. 哈特	128
新的可热处理强化变形铝合金——7475	
美国铝业公司	143
高强度变形铝合金	
〔苏〕 E.A. 特卡钦科等	150
冶金因素对高强度铝合金产品的影响	
〔美〕 D.S. 索姆普桑	158
影响铝合金断裂韧性的冶金因素	
〔美〕 G.T. 哈亨, A.R. 罗塞菲耳德	191
铝合金的应力腐蚀开裂	
〔美〕 M.O. 斯佩德	223
第三部分 铝-锂系变形铝合金	275
铝-锂合金的发展	
〔美〕 E.S. 鲍尔穆斯, R. 施米特	277
Al-Li-X合金概论	
〔美〕 T.H. 小桑德斯	298
弥散铝-锂合金	
〔美〕 R.O. 贝奇	303
合金化元素在铝-锂-X系中的作用及其性能的影响	
〔美〕 F.W. 盖尔	310
粉末冶金及铸锭冶金Al-Li-X合金的显微组织及 拉伸性能的比较	
〔美〕 A. 吉斯勒等	332
急冷凝固的2000系Al-Li合金的组织与性能	
〔美〕 N.J. 格兰特等	359
Al-3% (重量) Li、Al-4.2% (重量) Mg及Al-3% (重量) Li-2% (重量) Mg合金的高温氧化研究	
〔英〕 D.J. 菲尔德等	375
显微组织对Al-Li、Al-Li-Mn、Al-Li-Mg及 Al-Li-Cu合金在3.5%NaCl溶液中腐蚀的影响	

〔美〕 P.尼斯卡内等	396
第四部分 超塑性变形铝合金	427
超塑性铝合金研究和应用的进展	
〔英〕 R.格里梅斯等	429
细晶超塑性铝合金的特性	
〔美〕 N.E.帕通等	436
新的超塑性薄板铝合金	
〔加〕 D.M.穆尔, L.R.莫里斯	450
第五部分 粉末冶金变形铝合金	463
高强度用途的铝粉末冶金工艺综述	
〔美〕 J.R.皮肯斯	465
快速急冷铝粉末冶金材料生产方法	
〔美〕 R.E.马林杰尔	501
先进的粉末冶金铝合金与复合材料	
〔美〕 W.B.利萨戈, B.A.斯坦	512
用粉末冶金法生产的高强度工业铝合金	
〔美〕 D.P.沃斯	529
航空与航天工业用的高温铝合金	
〔美〕 W.M.格里菲思等	542
X7091 (CT-91) 铝合金粉末预成型压制	
〔美〕 J.T.莫甘	558
机械合金化的铝合金	
〔美〕 R.D.斯塞尔伦, S.J.多纳奇	572
航空与航天用的变形粉末冶金铝合金	
美国阿尔科铝公司	577
粉末冶金在未来的铝基轻型结构材料生产中的应用	
〔联邦德国〕 G.魏尔特	586
第六部分 铝基复合材料	597
金属基复合材料的现状和发展前景	
〔苏〕 C.E.萨利别科夫, B.Φ.斯特罗卡诺娃	599

碳纤维增强铝基复合材料的机械性能	
〔日〕 大仓等	610
B ₄ C/B和SiC/B 增强铝材	
〔法〕 H.O. 利斯, 〔联邦德国〕 P. 费斯特	621
附录	640
计量单位换算系数	640

第 一 部 分

变形铝合金发展综述

八十年代结构铝材

〔美〕 R. F. 西门兹 M. K. 古埃斯

洪永先 译 张君尧 校

摘要 加工技术和合金化方法的发展, 导致了铝合金性能的改善, 增加了新型铝合金在亚音速和超音速飞机上的应用潜力。洛克希德-加利福尼亚公司的工程师们认为, 在现代和未来的飞机上, 除了新型复合材料和钛合金之外, 新型铝合金则是很有前途的材料。受到很大注意的合金有高强度耐蚀的7050合金、高强度CT90、CT91和9051粉末合金, 还有亚音速飞机使用的铝-锂合金。粉末合金、铝-锂合金和机械合金化合金, 考虑用在超音速飞机的高温部件方面。

一、亚音速飞机用的铝合金

改善飞机结构的强度/重量比始终是飞机工业最主要的控制目标。改善铝合金强度的研究工作特别着重改善合金的耐久性, 其中包括耐损伤和耐腐蚀性能^[1]。

商业运输机上广泛应用的两种铝合金是2024和7075。2024主要用来制做具有很高耐损伤性能的部件, 如飞机蒙皮, 而7075广泛地用来制做锻件及主要承受压应力的结构件(如上翼面)。虽然更高强度的铝合金已问世多年, 而这两种材料还仍然用作运输机结构的主要支撑件。因为更高强度的其它铝合金在韧性或应力腐蚀方面不够好。7178-T6和7079-T6就是在使用中遇到问题的明显例子。7075在某些用途中也产生过应力腐蚀开裂(SCC), 但是把过时效作为提高横晶粒方向抗应力腐蚀开裂性能的方法, 在特殊设计应用中是非常成功的。

1. 性能和冶金的关系

主要发展目标是获得超过 2024 和 7075 的高强度，而不降低耐久性能。最近十年来，由于铝工艺发展的结果，出现了许多实现这个方法。例如，在普通铸锭冶金材料中，通过减少杂质，控制可溶相和其它宏观与微观组织形态，提高了断裂韧性^[2]。

更确切地说，韧性是通过控制与杂质元素如铁和硅有关的粒子和某些金属间化合物而获得改善的，铁和硅可形成完全不溶解的粒子，而某些金属间化合物仅部分溶解。许多研究表明，这些粒子的大小和分布对韧性是很重要的，因为这些粒子在应力作用下容易断裂，从而提供了优先开裂的途径。

此外，为了控制再结晶而加入的Cr和Mn形成弥散粒子可导致在这些粒子附近形成显微空隙，从而对韧性产生有害的影响。发现用Zr代替Cr或Mn能提供较好一些的抗裂纹扩展性能。

对合金化和断裂韧性作出主要贡献的因素当然是由主要合金化元素组成的硬化析出粒子。例如，在7XXX型的一些合金中，可用控制金属加工、固溶处理、淬火和时效来避免产生有害组织，如晶界析出物和宽的无析出区，它们促进晶间断裂和促成低的韧性。

合金化学成分的改进、形变热处理、粉末冶金技术和快速凝固（RSR），是发展高强度、高韧性铝合金的一些有效的补充方法。

2. 现在的和改进的铝合金

在图 1 中比较了用各种高强度铝合金制做的候选的上机翼蒙皮和厚板制品的强度性能（其中包括一些改进的状态和较新的合金）。比较表明，除7150之外，强度性能仅与原有合金7075-T6的相等或者还低些。然而在图 2 中对韧性和应力腐蚀性能的比较中，却显示出这些性能有所改进^[3,4]。

在考虑结构的耐久性时，抗剥落腐蚀性能也是很重要的。图 3 示出了在加速剥落腐蚀试验中这些合金性能的比较。

3. 7050合金性能的改进

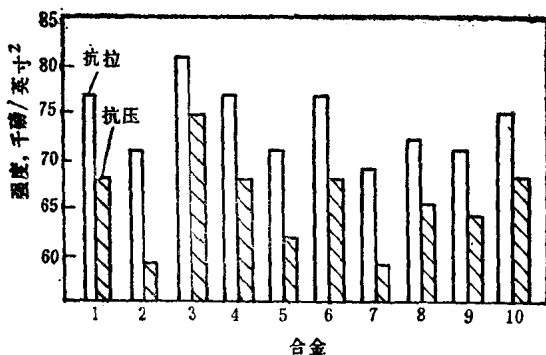


图 1 0.500到1.00英寸厚板试验性的设计性能

1—7075-T6; 2—7075-T76; 3—7150 T6; 4—7050-T76; 5—7050-T736; 6—7475-T6; 7—7475-T76; 8—CT91TE69; 9—CT91TE70; 10—CT90TE71

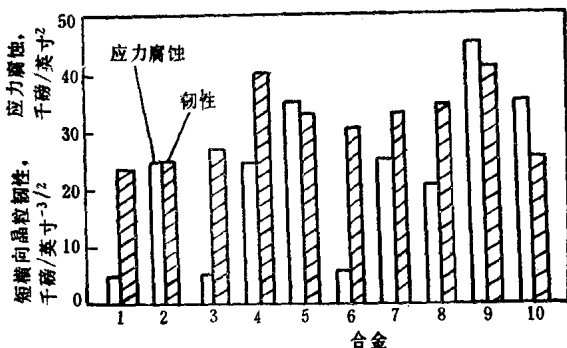


图 2 0.500到1.00英寸厚板试验性的设计性能

1—7075-T6; 2—7075-T76; 3—7150-T6; 4—7050-T76; 5—7050-T736; 6—7475-T6; 7—7475-T76; 8—CT91TE69; 9—CT91 TE70; 10—CT90TE71

图 4 清楚地说明了在抗疲劳裂纹扩展性能和韧性方面7050-T7E73挤压件比7075-T6的优越。这些曲线都是根据文献〔5〕的数据绘制的，并且在相等的抗拉强度水平下对两个合金进行比较。在本研究计划中试验的7050合金材料表明，通过运用合金化

MA87-TE78

7075-T76

7475-T76

7075-T6

7050-T76

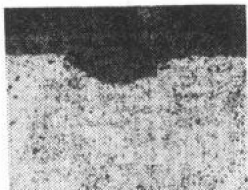
MA87-TE69

7150-T6

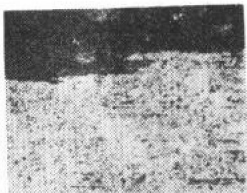
7050-T738

MA87-TE71

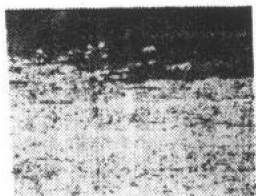
7475-T6



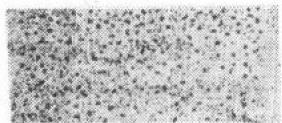
容许的表面坑蚀—100×
横断面



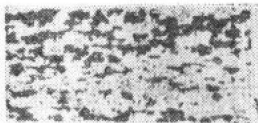
晶间/剥落腐蚀, 隔绝面
有可容许的轻度腐蚀—100×
横断面



不可容许的剥落腐蚀/脱
层腐蚀—100×横断面



未剥落腐蚀表面



可容许的剥落腐蚀表面

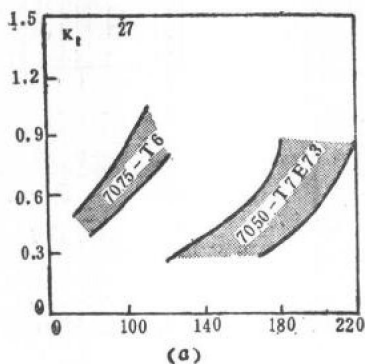


不可容许的剥落腐蚀表面

图 3 抗剥落腐蚀性能的比较

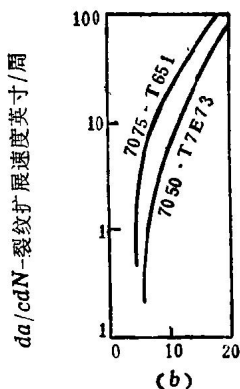
飞行谱飞行疲劳

缺口裂纹长度, 英寸



数千小时

裂纹扩展速度



ΔK , 千磅·英寸^{-3/2}

图 4 7075-T6和7050-T7E73的疲劳、