

7000系超高强铝合金的发展及其航天工程化应用展望

王群¹ 焦竞仪² 徐林栋¹ 匡格平¹ 刘彬¹ 谭指¹

(1 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

(2 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

文 摘 回顾了7000系超高强铝合金在国内外的发展历程,并简要概述了几种典型铝合金在我国运载火箭中的应用实例。结合当前7000系铝合金在我国航天结构系统工程化应用的实际情况,分析了存在的问题,并据此提出了值得关注的研究方向及相关建议。

关键词 7000系,发展历程,航天结构,工程化应用

中图分类号:TB31

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.01.002

Developing Trends of 7000 Series Ultra High Strength Aluminum Alloys and Application Projects in the Aerospace Engineering

WANG Qun¹ JIAO Jingyi² XU Lindong¹ KUANG Geping¹ LIU Bin¹ TAN Zhi¹

(1 Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

(2 Beijing Research Institute of Precise Mechanical and Electronic Control Equipment, Beijing 100076)

Abstract This article reviews the development history of 7000-series ultra-high strength aluminum alloys both domestically and internationally, and briefly outlines several application examples of typical aluminum alloys in China's carrier rockets. Based on the current status of engineering applications of 7000-series aluminum alloys in China's aerospace structural systems, this article analyzes the existing problems and accordingly proposes research directions and relevant suggestions that are worth paying attention to.

Key words 7000 Series, Development history, Aerospace structure, Engineering application

0 引言

7000系铝合金通常指的是以锌为主要合金元素,可通过热处理进行强化的铝合金,其化学成分主要包含Al-Zn-Mg-Cu元素组合^[1]。凭借其较高的比强度和优良的热加工性以及耐腐蚀性等特点,该系列合金在航空航天等工业领域得到了广泛应用。长期以来,全球的材料科学研究者对7000系超高强铝合金的研究给予了高度重视。他们通过优化合金成分设计,引入新型制备技术、成形加工工艺及热处理工艺^[2],成功研发出多种类型的超高强铝合金,极大地推动了这类材料在工业领域的工程化应用进程。本文综述7000系铝合金在航空航天领域的发展与应用现状,并结合航天应用的具体需求,针对典型铝合金进行详细介绍。最后,从满足航天结构系统发展需求的角度出发,旨在提出适用于航天结构工程化应用的主要研究方向与发展路径。

1 国内外7000铝合金发展概况

7000系铝合金的历史最早可追溯到20世纪20年代。德国科学家W. SANDER和K. L. MEISSNER发现经淬火时效后具有很高强度的Al-Zn-Mg合金^[3]。后续各国科工作者们在此基础上开展了大量的研发工作,1932年,L. J. WEBER提出了第一种以Al-Zn-Mg-Cu为基的新型铝合金(10%Zn-2%Mg-2%Cu-1%Mn)^[4],自此,7000系超高强铝合金的大门被推开,并迎来了快速发展的阶段。欧美等国家对7000系铝合金的研究起步较早,发展至今已有90多年的发展历程,7000系铝合金的研发背景最初主要用于航空、航天、航海等军事工业领域^[5],其中美国是超高强铝合金材料制备和生产的强国,以美国铝业公司(Alcoa)为首的国际超大型铝加工企业一直引领着各个阶段的发展前沿^[6],以美国为主的欧美7000铝合金发展的历程及应用情况,如表1所示。苏联在20世纪60~80年代期间也开发了一系列

收稿日期:2024-03-05

第一作者简介:王群,1987年出生,硕士,高级工程师,主要从事壳体及特殊功能结构设计工作。E-mail:wangqun_calt@163.com

高水平的7000系高强铝合金^[12-13],其牌号编写主要以 BXX 为主。具体的发展历程和相应合金的特点见表2。

表1 欧美7000系铝合金发展历程及特点简介

Tab. 1 Introduction to the development history and characteristics of European and American 7000 series aluminum alloy

研发年度	牌号	特点其应用情况
1943	7075-T73	首次将 Al-Zn-Mg-Cu 合金推向工程化应用,成功应用于 B-29 轰炸机上 ^[7]
1954	7178-T651	该合金强度相比 7075-T6 提高了约 8%,主要为挤压件和薄壁;但断裂韧性较差,抗大气腐蚀性能较差;应用于波音 707、737 和 DC8 客机、B-52 轰炸机上
1954	7079	抗 SCR 显著提高,应用于 B-52 轰炸机起落架上,但其抗大气腐蚀性能较差,未被广泛应用
1968	7049	在 7001 合金基础上改良,进一步提高了韧性和抗应力腐蚀性能,合金的抗腐蚀性能比 7075 合金提高约 10% ^[8] 。被广泛应用于飞机机构件(机身壳体、机翼机梁、起落架和飞机座椅等)
1969	7475	在 7075 合金基础上研制出断裂韧度最高的合金;该合金首次应用在 F-16 和 C-58 飞机上
1971	7050	在 7075 的基础上,开发出强度、断裂韧性和抗应力腐蚀性能都更好的 7050 合金。被选用于 F-18 和 A6 入侵者飞机的承力构件上
1975	7010/7012	英国的加拿大 Alcoa 公司(Alcan)以添加 Zr 代替 Cr,开发出有较好的应力腐蚀性能的 7010 和 7012 合金,具有较好的抗 SCC 性能和较高的强度。克服了合金在铸造大铸锭时易产生裂纹的问题,提高了产品的成品率 ^[9]
1978	7150	在 7050 合金的基础上,调整其合金元素成分,成功研制出 7150 合金,并将其加工成 T651 及 T6151 态厚板和挤压件,用于制造波音 767、空客 A310 等飞机的机翼等结构 ^[10]
1993	7055	美国 Alcoa 公司在 7150 合金的基础上,由于极高的强度,号称王牌铝合金。1993 年申请专利。目前 7055-T77 制品已用于波音 777 客机的上翼蒙皮、机翼桁条和龙骨梁 ^[11]
1996	7040	法国 Pechiney Alcoa 公司成功开发了 7040 铝合金,强度高出 7050 厚板 10%,耐腐蚀性和断裂韧性上有了有一定提高,淬透性可以达到 220 mm
2002	7085	美国 Alcoa 公司研发出高淬透性、高强耐蚀性、高损伤容限的 7085 铝合金。与 7050-T7452 锻件相比,7085-T7452 锻件强度提高约 10%,韧度提高约 15%。已成功应用于波音 787 飞机,空客 A380 飞机的机翼、机梁等更重要承力部位

表2 苏联7000系铝合金发展历程及特点简介

Tab. 2 Introduction to the development history and characteristics of Soviet Union 7000 series aluminum alloy

研发年度	牌号	特点其应用情况
1948	B95	具有与 7050 基本相同的特点,主要应用于飞机结构件上
1956	B96π	合金化程度最高、强度极高(达到 650 MPa),抗应力腐蚀和剥落腐蚀性能低。应力集中敏感性较高。主要应用于核工业离心机、声纳结构件等
1957	B93	铸造和压力加工状态各向异性小,工艺性能好,具有最低的临界淬火冷却速度
1968	B96π-1	具有与 B96π 相似的特点,强度略高于 B96π T1 状态抗拉强度最高,T2、T3 状态的有中等断裂韧性和好的耐蚀性
1970	B96π-3	强度比 96π 和 B96π1 的低,塑性高 50%~100%,主要应用于挤压件飞机中等尺寸零件
	B93πч	工艺性能好,具有最低的临界淬火冷却速度,主要应用于飞机主起落架闸门的连杆操纵装置,机体构件,直升机旋翼夹头、起落撬和弹射座椅导轨
1971	B95πч	B95 改良型合金,断裂韧度比 B95 高,主要用于飞机翼蒙皮、桁条、起吊架等,如最早的苏-27 和苏-30 飞机
	B95oч	B95 改良型合金,断裂韧度比 B95πч 高,主要应用于飞机结构用锻件及蒙皮、桁条、隔框等,如最早的苏-27 和苏-30 飞机

我国 7000 系超高强铝合金的研发始于 20 世纪 60 年代,初期以仿制为主。彼时,我国航空工业及其他国防工业广泛采用的高强度铝合金主要包括与 B95 和 7075 合金性能相近的 LC4 (7A04) 及 LC9 (7A09) 合金^[14]。随后,我国仿制的美国典型合金有 7075、7001、7175、7050、7150 和 7055 等;仿制的苏联典型合金则包括 B95、B95πч、B96π 以及 B96π-1、

B96π-3 等^[15]。进入 20 世纪 90 年代后,高校、科研企业等单位在制备工艺、热处理工艺以及合金成分调整等方面展开了大量研究工作,取得了众多达到国际先进水平的成果。目前,以 7075、7175、7050 等为代表的 7000 系铝合金材料已逐步应用于航空航天领域,并实现了工程化应用^[16]。从国内外 7000 系超高强铝合金的发展历程来看,研究主要聚焦于合金成分、

热处理制度及成型工艺等几大核心领域。历经近一个世纪的发展,在合金成分调配方面,成分控制得到了显著优化,合金化程度持续提升,微量元素的添加也日趋丰富且合理;在热处理制度调控方面,技术经历了从T6单级时效向T73、T74、T76、T77等多级时效的演变,成功实现了强度与耐蚀性的协同增强;在成型工艺制备方面,则涌现出了半连续铸造工艺、低频电磁半连续铸造技术以及以喷射成形工艺为典范的快速冷凝成形技术,这些技术基本满足了各类高合金化7000系铝合金的制备需求。综合来看,通过精心调配合金成分、精细调控热处理制度以及不断创新成型工艺等手段,7000系铝合金在强度、断裂韧性、高淬透性和耐蚀性等方面实现了交错提升,这些性能之间相互促进,形成了螺旋式上升的态势。

2 典型铝合金在航天结构中的应用

航空航天是引领带动7000系高强铝合金发展的主要领域,7000系铝合金在我国航天运载火箭结构上也经历了从仿制到自主研发,再到前沿探索的发展历程和代际的更新换代^[17]。以下选取第三代和第四代典型7000系铝合金牌号,简述其在我国航天结构系统的应用探索情况。

2.1 7050 铝合金

在7075合金的基础上,美国Alcoa公司通过减少7075合金中的Fe、Si等杂质含量,调整Zn和Cu合金元素的配比,并引入锆元素替代铬,成功研发出强度更高、断裂韧性更佳、抗应力腐蚀性能更优的7050合金。这款合金被选用在F-18和A-6入侵者飞机的承力构件上^[18]。7050铝合金凭借高强高韧的特性,在航空航天、交通运输等领域的关键结构构件中得到了广泛应用。此类合金的半成品形态多样,包括棒材、型材、线材、预拉伸板材以及锻件。其中,预拉伸厚板产品具有加工后仍能保持整体平直、不易变形的特点,即便在不对称加工条件下亦如此。

目前,以西南铝等企业为代表,国内已攻克大规格铸锭制备、强变形轧制、强韧化热处理及残余应力控制等一系列关键技术,打破了欧美技术封锁,成功研制出覆盖全厚度范围的7050铝合金预拉伸超厚板,并建立了质量稳定的工业化制造技术体系。该材料已大量应用于我国CZ-5、CZ-7等运载火箭的桁条型材、对接框、接头及支架等结构部件。结合材料的淬透性和成型工艺,7050铝合金预拉伸板材的厚度选用范围可达6.5~200 mm,其室温力学性能和断裂韧度值可参见表3和表4。依据GB/T 37264—2018新材料技术成熟度等级划分标准,该材料在我国航天结构工程化应用上的技术成熟度预计可达到8级。

表3 7050铝合金的室温力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of 7050 aluminum alloy at room-temperature

供应状态	厚度/mm	取样方向	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A/\%$
T7451	5~100	L(纵向)	≥495	≥425	≥6
		LT(横向)	≥495	≥425	≥4
		ST(高向)	≥470	≥400	≥3
	100~200	L(纵向)	≥470	≥400	≥6
		LT(横向)	≥470	≥400	≥4
		ST(高向)	≥450	≥380	≥3

表4 7050铝合金的断裂韧度值

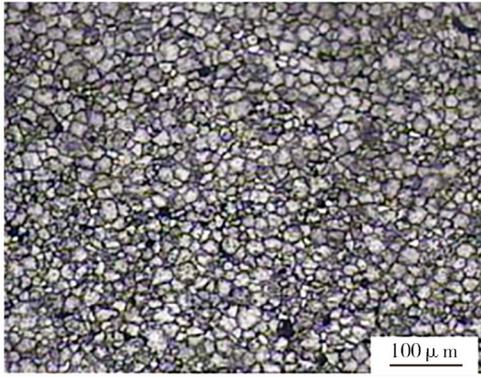
Tab. 4 Fracture toughness value of 7050 aluminum alloy

供应状态	厚度/mm	取样方向	K_{IC} /MPa·m ^{1/2}
			L-T
T7451	5~100	L-T	≥28
		T-L	≥25
		S-L	≥23
	100~200	L-T	≥25
		T-L	≥23
		S-L	≥23

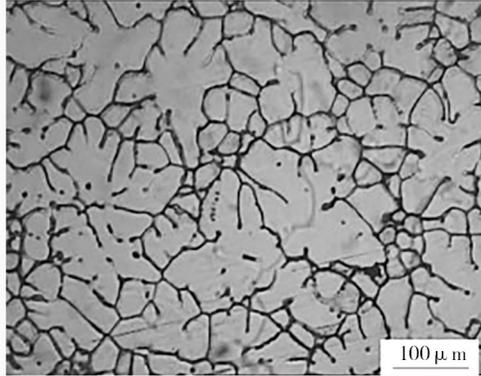
2.2 7055 铝合金

7055铝合金于20世纪90年代成功研制,它基于7150合金,通过提升Zn/Mg比值并进一步降低杂质含量,开发出了一种合金化程度更高、强度更强、综合性能更优的变形铝合金^[19]。1993年,美国Alcoa公司为其申请了专利。据美国军标记载,该合金的强度高达648 MPa,是当前应用中最高强度的铝合金。7055铝合金凭借其卓越的力学性能,备受航空航天结构的青睐。美国已将其板材成功应用于波音777飞机的上翼结构,同时将型材和锻件用于龙骨架、行李轨道及座椅轨道结构。此外,美国民兵3洲际导弹的第三级发动机喷管基体也采用了7055铝合金,而俄罗斯某中程固体导弹壳段则使用了与7055铝合金相当的B96α-3铝合金材料。

7055铝合金是一种超高锌含量的新型合金^[20],由于其高合金化特性,具有较强的淬火敏感性。据美国军标,7055铝合金的淬火厚度可达38 mm。采用传统半连续熔铸工艺时,容易产生宏观偏析及粗大的析出相,导致合金综合性能明显下降。相比之下,采用喷射成形工艺制备的7055铝合金,坯料成分均匀,组织细化,晶粒均匀细小且致密,避免了常见铸锭中的枝晶偏析和粗大的一次相及共晶问题^[21]。两种工艺的微观组织对比见图1。通过调整合金成分及热处理工艺^[22],喷射成形7055铝合金挤压板材的淬火厚度能达到120 mm甚至更高。



(a) 喷射成形



(b) 半连续铸造

图1 7055铝合金微观组织

Fig.1 Microstructure of 7055 aluminium alloy

该类合金的半成品主要包括板材、棒材、型材及锻件,广泛应用于我国运载火箭的承力桁条、承力支座以及轻质高强紧固件等关键零部件上。在工程化应用实践中,零部件毛坯的厚度通常建议不超过100 mm;对于厚度小于100 mm的喷射成形7055铝合金挤压板材,其室温力学性能可参见表5。当铸锭厚度过大时,表面与芯部的冷却速度差异显著,易导致铸锭内部产生较大的残余内应力,从而在后续的机加工过程中极易引发淬火开裂、加工变形等问题。图2展示了一个航天用零件在精加工后发现的微裂纹情况,经分析确认,7055铝合金零件表面的裂纹均为淬火裂纹^[23]。该合金因元素含量高、强度大,在淬火过程中容易产生较大的内应力,进而引发零件开裂。

淬火开裂与热处理工艺及粗加工零件的结构设计密切相关,因此需特别关注零件结构设计参数的优化以及淬火热处理等工艺参数的调整。在结构设

表5 喷射成形7055铝合金挤压板材室温力学性能

Tab.5 The mechanical properties of 7055 aluminium alloy extruded sheets by spray formed at room-temperature

供应状态	厚度/mm	取样方向	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%
T76	30~100	L	600~670	560~650	≥8
		LT	580~640	550~600	≥5
		ST	570~620	530~580	≥3

计方面,应消除尖角、锐边,优化圆角、底角设计,以避免结构刚度发生突变;在工艺方面,淬火参数需与热处理工艺参数相结合,适当增加稳定化处理,以平衡材料的强度与延伸率。同时,应优化加工工艺流程,精准识别并严格控制关键加工工艺参数,特别是加工的进给速度、进刀量等,以确保加工质量。

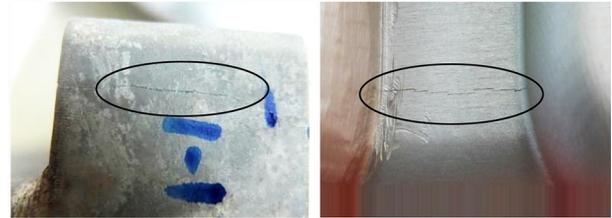


图2 喷射成形7055铝合金开裂现象

Fig.2 Cracking phenomenon in spray formed 7055 aluminium alloy

该材料在我国航天结构工程化应用上技术成熟度评估预计能达到6级,存在的问题主要表现在力学性能的批次稳定性差,有较大散差;材料的工艺性,尤其是机加工性能,有待进一步提高;此外,除了追求较高的力学性能外,还需进一步积累材料的冲击性能、断裂韧性、耐蚀性等综合性能数据。

2.3 7085铝合金

7085铝合金是由美国Alcoa公司于2002年注册推出的一款新型合金,具备高淬透性、优异的抗应力腐蚀性能及高抗疲劳性能等特点,其屈服强度较7050-T74钛合金高出15%以上,现已实现商业化生产,并于2009年被纳入美国航空标准(AMS)。该合金已成功应用于波音787飞机以及空客A380飞机的机翼、机梁等更为关键的承力部位^[24]。

当前,新型高强7085铝合金的研究主要聚焦于航空领域,并已获得了相对成熟的应用,其材料性能尤为注重抗疲劳性和耐腐蚀性。鉴于航天领域多为一次性发射任务,对材料的疲劳等性能要求相对较低,尤其是在箭体结构系统中,材料的力学性能常被发挥至极限状态,因此更强调材料具备超高的力学性能。为了适应航天箭体结构的特性,需针对超高强7085铝合金加强热处理工艺的优化,以期其力学性能相较于航空用7085铝合金提升10%以上。航天用7085铝合金锻环的室温力学性能见表6。

7085合金的淬火厚度最大可达到300 mm^[25],其

表6 7085铝合金锻环室温力学性能

Tab.6 The mechanical properties of 7085 aluminium alloy forges rings at room temperature

供应状态	厚度/mm	取样方向	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%
T76	50~120	环向	580~670	530~620	≥6.0
		轴向	560~630	500~570	≥4.5
		径向	550~620	480~540	≥4.0

淬火敏感性较低,同时展现出高强度和卓越的耐腐蚀性能,因此极为适用于研制运载火箭壳段锻环及大型承力锻件,涵盖2 m级(图3)、5 m级乃至10 m级等不同直径的锻环。作为下一代超高强铝合金材料的重要代表之一,7085合金具有显著优势。但随着锻件尺寸的增大,在制备大规格铝合金铸锭时,7085铝合金铸锭的心部与边部传热不均,易导致铸锭开裂^[26-27],且铸造缺陷明显增多,进而降低了铸锭的可加工性。因此,需特别重视铸坯制备工艺中的参数控制,以减少铸件毛坯的缺陷,提升产品后续的深加工成品率。



图3 7085铝合金大尺寸锻环

Fig. 3 Large-sized forged rings of 7085 aluminium alloy

该材料在我国航天结构工程化应用方面的技术成熟度预计可达5级。然而,存在的问题亦不容忽视:研究主要聚焦于热处理工艺、强化机理、微观组织及力学性能等基础领域^[28-32],对工程化应用的全面性评估尚显不足;针对大型锻件铸锭制备工艺、多向锻造工艺的形-性协同调控技术,以及淬火残余应力消减工艺,系统性的研究尚显匮乏;同时,全面且公认的行业标准引导亦有所缺失。

3 航天结构系统应用的展望

对于航天结构系统而言,轻质化结构始终是一个永恒的话题,而超高强7000系铝合金结构材料无疑将是未来航天领域应用与发展的必然趋势。当前,超高强7000系铝合金在工程化应用层面仍面临一些挑战,其合金配方与性能的研究尚处于实验室阶段,工程化应用技术的成熟度相对较低。因此,建议着重从以下几个方面开展基础性、持续性且富有创新性的研究工作,旨在将7000系铝合金的应用提升至一个全新的高度与水平。

(1)提升工艺制备能力是关键。鉴于7000系铝合金具有高合金化的特性,传统制坯工艺因凝固冷却速度的限制,往往导致合金内部易产生大量粗晶析出相。因此,需对传统工艺进行深度剖析,并针对关键技术难题展开攻关,特别是在快速凝固技术等

领域加强基础研究。力求解决铸锭一致性不佳、成本高昂、尺寸受限等瓶颈问题,从而提升铸锭的成分均匀性与整体质量,以满足航天系统对大尺寸、低成本、产品批次一致性和稳定性等方面的严格要求。

(2)优化热处理工艺体系。7000系铝合金通常需借助固溶时效热处理工艺来实现强度、韧性与耐腐蚀性的优化匹配。尽管国外对此类合金的热处理工艺已有专利保护,且相关详细报告鲜见于文献,但国内已广泛开展了一系列基础研究工作。7000系铝合金的热处理工艺经历了从单级时效,到T6峰值时效、T73、T74、T76等双级时效,再到T77三级时效(RRA)的探索与发展历程。尽管文献中可查的热处理工艺众多,但针对工程化应用的结合度尚显不足,特别是对于航天领域特定牌号、功能及性能需求的针对性研究仍显匮乏。因此,需紧密结合航天产品全生命周期的使用环境,围绕机加工工艺适应性、产品变形控制及综合性能等要求,深入研究多级固溶时效、均匀化及去应力等热处理工艺,以期揭示超高强7000系铝合金的强韧耐蚀机理,并探索与工程化应用相匹配的热处理工艺。

(3)提升材料成熟度。为加速7000系铝合金在航天系统领域的工程化应用进程,需立即着手开展材料成熟度评价工作。此项工作应着重考虑运载火箭全生命周期剖面下的材料需求,不仅涵盖拉伸等基本的力学性能,还需全面关注材料的综合性能表现,包括高低温下的力学性能、断裂韧性、冲击韧性、疲劳性能及贮存性能等;同时,要高度重视材料的环境适应性,具体评估其在极端环境下长期服役的稳定性,以及对抗应力腐蚀、霉菌腐蚀、盐雾腐蚀、晶间腐蚀和湿热腐蚀等性能的能力;此外,还应细致考察材料的工艺性,如热成形、锻造及加工等方面的工艺适应性,以期进一步推进材料的成熟度提升。

(4)确立权威的行业标准。尽管关于7000系铝合金的研究报道众多,但缺乏具有权威性的行业标准来进行引导和规范。各研究院所与工业部门各自为政,这在很大程度上限制了该材料在航天领域的广泛应用与有效推广。因此,工业部门应迅速发挥引领作用,着手制定权威的行业标准,从顶层设计上明确工程化要求,以提升产品质量,并促进产学研的深度协作与持续发展。

(5)降低产品成本是关键。7000系铝合金虽性能卓越,但其制造成本却相对较高。在全球航天市场竞争日趋白热化的当下,实现低成本不仅能够助力7000系铝合金在航天产业中进一步拓展市场份额,还能反哺技术创新与迭代,成为加速推动7000系铝合金工程化应用的重要举措。

参考文献

- [1] 潘复生,张丁非. 铝合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006:59.
- PAN F S, ZHANG D F. Application of Aluminum Alloy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006:59.
- [2] 张王军,李云,吴玉娜,等. 超高强7XXX系铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 现代交通与冶金材料,2023,3(3):52-59.
- ZHANG W J, LI Y, WU Y N. et al. A critical review of the state-of-the-art of ultra-high strength 7XXX aluminum alloys [J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2023,3(3):52-59.
- [3] 宁爱林,曾苏民,莫亚武,等. 超高强铝合金的回顾与展望[J]. 邵阳学院学报,2003,2(5):90-92.
- NING A L, ZENG S M, MO Y W, et al. The review and prospect for super-high strength aluminum alloys [J]. Journal of Shaoyang University, 2003,2(5):90-92.
- [4] 朱玉桂. 喷射成形7475铝合金组织和性能的研究[D]. 上海交通大学,2010.
- ZHU Y G. Study on Microstructure and Mechanical Properties of 7475 Aluminum Alloys by Spray Forming [D]. Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [5] 国家发展和改革委员会高技术产业司,中国材料研究学会. 中国新材料产业发展报告2009[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- C-MRS NDRC HTID. China's New Material Industry Development Report [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [6] 涂洵,吴浩,曾春芳. 7000系铝合金中国专利分析[J]. 有色冶金设计与研究,2017,38(6):61-64.
- TU X, WU H, ZENG C F. Analysis of patents of 7000 series aluminum alloy in China [J]. Nonferrous Metals Engineering and Research, 2017,38(6):61-64.
- [7] 王涛,尹志民. 高强变形铝合金的研究现状和发展趋势[J]. 稀有金属,2006,30(2):197-202.
- WANG T, YIN Z M. Research status and development trend of ultra-high strength aluminum alloys [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006,30(2):197-202.
- [8] 陈送义. 7085高强铝合金锻造成形和组织性能研究[D]. 中南大学,2013.
- CHEN S Y. Studies on Forging Forming Microstructure and Properties of High-strength 7085 Aluminum Alloy [D]. Central South University, 2013.
- [9] WARRINGTON D, MCCARTNEY D G. Hot-cracking in aluminium alloys 7050 and 7010-A comparative study [J]. Cast Metals, 1991,3(4):202-208.
- [10] 冯春,刘志义,宁爱林. 超高强铝合金RRA热处理工艺的研究进展[J]. 材料导报,2006,20(4):98-101.
- FENG C, LIU Z Y, NING A L. Research and progress in retrogression and reaging treatment of super-high strength aluminum alloy [J]. Materials Review, 2006,20(4):98-101.
- [11] DAVID A L, RAY M H. Aluminum alloy development efforts for compression dominated structure of aircraft [J]. Light Metal Age, 1991,2(9):11-15.
- [12] 张君尧. 航空结构用高纯高韧性铝合金的进展[J]. 轻金属,1994(6):54-63.
- ZHANG J Y. The progress of high-purity and high-toughness aluminum alloy for aerospace structures [J]. Light Metals, 1994(6):54-63.
- [13] [苏]弗里德良杰尔ИИ著,姚毅中译. 变形结构铝合金[M]. 重庆:科学技术出版社重庆分社,1989.
- [Soviet Union] FRIEDRICH Heumann Edited, YAO Yizhong Translated. Wrought structural aluminum alloy [M]. Chongqing: Chongqing Branch of Science and Technology Press, 1989.
- [14] 吴一雷,李永伟,张强俊. 超高强度铝合金的发展与应用[J]. 航空材料学报,1994,14(1):49-55.
- WU Y L, LI Y W, ZHANG Q J. Development and application of super-high strength aluminum alloys [J]. Journal of Aeronautical Materials, 1994,14(1):49-55.
- [15] 田福泉,李念奎,崔建忠. 超高强铝合金强韧化的发展过程及方向[J]. 轻合金加工技术,2005,33(2):1-9.
- TIAN F Q, LI N K, CUI J Z. Research and development of ultra high strength aluminum alloys [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2005,33(2):1-9.
- [16] 王国辉,曾杜娟,刘观日,等. 中国下一代运载火箭结构技术发展方向与关键技术分析[J]. 宇航总体技术,2021,5(5):1-11.
- WANG G H, ZENG D J, LIU G R, et al. Development direction and key technology analysis for china's next generation launch vehicles structure [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021,5(5):1-11.
- [17] 王群,王婧超,李雄魁,等. 航天用轻质结构材料研究进展及应用需求[J]. 宇航材料工艺,2017,47(1):1-4.
- WANG Q, WANG J C, LI X K, et al. Research progress and application requirements of lightweight structure materials for aerospace applications [J]. Aerospace Materials & Technology, 2017,47(1):1-4.
- [18] WILLIAMS J C, STARKE E A. Progress in structural materials for aerospace systems [J]. Acta Material, 2003, 51(19):5775-5799.
- [19] 牟春,温庆红,林顺岩,等. 7055(7A55)铝合金研究进展[J]. 铝加工,2021(6):3-8.
- MOU C, WEN Q H, LIN S Y, et al. Research progress of 7055(7A55) aluminum alloy [J]. Aluminium Fabrication, 2021(6):3-8.
- [20] 陈康华,刘红卫,刘允中. 强化固溶对7055铝合金力学性能和断裂行为的影响[J]. 中南工业大学学报(自然科学版),2000,31(6):528-531.
- CHEN K H, LIU H W, LIU Y Z. The effect of promotively-solutionizing treatment on the mechanical properties and fracture of ultra high strength 7055 aluminum alloys [J]. Journal of

Central South University of Technology (Natural Science), 2000, 31(6):528-531.

[21] 张永安,熊柏青,韦强,等. 喷射成形制备 Al-Zn-Mg-Cu 系高强高韧铝合金的研究[J]. 稀有金属, 2002, 26(6): 425-428.

ZHANG Y A, XIONG B Q, WEI Q, et al. Research on ultra-high strength Al-Zn-Mg-Cu alloys with spray forming [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2002, 26(6): 425-428.

[22] 周洪刚,袁伍丰,舒兵,等. 热处理工艺参数对 7055 铝合金组织和性能的影响[J]. 新技术新工艺, 2021(8): 66-70.

ZHOU H G, YUAN W F, SHU B, et al. Effect of heat treatment process parameters on microstructure and properties of 7055 aluminum alloy [J]. New Technology and New Process, 2021(8): 66-70.

[23] 袁建宇,逢锦程,韩露. 7055 铝合金零件开裂原因与预防[J]. 失效分析与预防, 2018, 13(2): 102-107.

YUAN J Y, PANG J C, HAN L. Analysis and prevention of cracks in 7055 aluminum alloy parts [J]. Failure Analysis and Prevention, 2018, 13(2): 102-107.

[24] 陈文. 先进铝合金在 A380 上的应用[J]. 航空维修与工程, 2005(2): 40-41.

CHEN W. Application of advanced aluminum alloys in A380 structures [J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2005(2): 40-41.

[25] 熊柏青,李锡武,张永安,等. 新型高强韧低淬火敏感性 Al-7.5Zn-1.65Mg-1.4Cu-0.12Zr 合金[J]. 中国有色金属学报, 2009(9): 1539-1547.

XIONG B Q, LI X W, ZHANG Y A, et al. Novel Al-7.5Zn-1.65Mg-1.4Cu-0.12Zr alloys with high strength high toughness and low quench sensitivity [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009(9): 1539-1547.

[26] 刘文义,胡小会,李军. 7085 超高强铝合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 45(2): 1-5.

LIU W Y, HU X H, LI J. Research and development of 7085 super-high strength aluminum alloys [J]. Hot Working

Technology, 2020, 45(2): 1-5.

[27] 李安庆,张立华,蒋日鹏,等. 冷却速度及超声振动协同作用对 7085 铝合金凝固组织及力学性能的影响[J]. 材料工程, 2021(8): 63-71.

LI A Q, ZHANG L H, JIANG R P, et al. Effect of cooling speed and ultrasonic vibration on solidification structure and mechanical properties of 7085 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2021(8): 63-71.

[28] 刘俊伶. 热处理对 7075 铝合金微切削表面完整性及耐腐蚀性的影响[D]. 烟台:烟台大学, 2023.

LIU J L. Effect of Heat Treatment on Surface Integrity and Corrosion Resistance of 7075 Aluminum Alloy Micromachined [D]. Yantai: Yantai University, 2023.

[29] 姚未怡,卜恒勇. 7000 系铝合金热变形行为综述[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(11): 18-26.

YAO W Y, BU H Y. Review on hot deformation behavior of 7000 series aluminum alloys [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(11): 18-26.

[30] 曾翠婷. 三级时效处理对 7XXX 系铝合金组织与性能的影响[J]. 铝加工, 2021(4): 15-18.

ZENG C T. Effects of retrogression and reaging on microstructures and properties of 7XXX series aluminum alloy [J]. Aluminium Fabrication, 2021(4): 15-18.

[31] 董浩,周华,罗鹏,等. 时效工艺对新型超高强高韧 7A56 铝合金厚板组织和性能的影响[J]. 铝加工, 2023(6): 20-25.

DONG H, ZHOU H, LUO K, et al. Effect of aging process on microstructures and properties of 7A56 aluminum alloy thick plate [J]. Aluminium Fabrication, 2023(6): 20-25.

[32] 祁清文,卜恒勇,黎琴. 7000 系铝合金固溶时效过程中微观组织变化的研究进展[J]. 金属热处理, 2024, 49(2): 244-251.

QI Q W, BU H Y, LI Q. Research progress on change of microstructure of 7000 series aluminum alloy during solution treatment and aging [J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(2): 244-251.