DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3136

热挤压工艺对211Z.1铝合金组织和性能的影响

车　云[1,3],张中可[2,3],门三泉[1,3],李　祥[1,3]

(1. 贵州华科铝材料工程技术研究有限公司,贵州 贵阳 550014; 2. 贵州科学院,贵州 贵阳 550001; 3. 贵州省铝材料工程技术研究中心,贵州 贵阳 550014)

摘　要:通过对211Z.1铝合金半连续水冷铸造棒热挤压加工后T6热处理,挤压材纵向晶粒被压扁拉长,脆硬相被挤碎,晶界上未固溶相破碎细化,分布均匀。铸造试样平均抗拉强度为476 MPa,挤压试样平均抗拉强度为524 MPa,挤压试样比铸造试样强度高出48 MPa,强度得到一定程度提高。铸造试样和挤压试样在NaCl+H_2O_2溶液中浸蚀6 h后强度分别下降了38、22 MPa,下降程度分别为7.98%、4.2%,伸长率下降程度分别为37.7%、11.5%,挤压试样力学性能的下降程度小于铸造试样。铸造试样的晶间腐蚀深度约为178 μm,挤压试样的腐蚀深度约为85 μm,晶间腐蚀等级分别为4级和3级,热挤压工艺提高了211Z.1铝合金抗晶间腐蚀能力。对211Z.1合金材料采用热挤压加工,能够得到综合性能更优的产品。

关键词:211Z.1铝合金;半连续水冷铸造;挤压工艺;微观组织;性能

中图分类号:TG379　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)12-1174-07

Effect of the Hot Extrusion Process on Microstructure and Properties of 211Z.1 Aluminium Alloy

CHE Yun[1,3], ZHANG Zhongke[2,3], MEN Sanquan[1,3], LI Xiang[1,3]

(1. Guizhou Huake Aluminum Materials Engineering Research Co., Ltd., Guiyang 550014, China; 2. Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China; 3. Guizhou Aluminum Materials Engineering Research Center, Guiyang 550014, China)

Abstract: Conclusions were drawn by analysing the 211Z.1 aluminium alloy direct chill semi-continuous casting sample and hot-extruded sample after T6 heat treatment. The longitudinal grain of the extruded sample is flattened and elongated, the brittle and hard phase is crushed, the unsolidly soluble phase on the grain boundary is broken, and the distribution is uniform. In terms of mechanical properties, the average tensile strength of the cast sample is 476 MPa, and that of the extruded sample is 524 MPa. The tensile of the extruded sample is 48 MPa higher than that of the cast sample, which proves that the strength has been improved to a certain extent. In the terms of corrosion resistance, after etching in NaCl+H_2O_2 solution for 6 h, the strength of the cast sample decreases by 38 MPa, and reduction degree is 7.98%, while those of the extruded samples are by 22 MPa and 4.2%. In addition, the elongation decreases by 37.7% and 11.5% respectively. The intergranular corrosion depth of the cast samples is approximately 178 μm, and the grade is 4, while that of the extruded samples is approximately 85 μm and grade 3. The comparative study shows that the mechanical properties, intergranular corrosion resistance and microstructure uniformity of the 211Z.1 aluminium alloy can be improved to some extent and the comprehensive properties will be improved by the hot extrusion process.

Key words: 211Z.1 aluminium alloy; direct chill semi-continuous casting; extrusion process; microstructure; properties

通过开展独特的合金成分设计、微观结构及强韧化机理研究和优化提高合金成形性能等工作,在铝合金高强韧多元微合金化,耐热、高强、高韧的协调统一,合金的流动性、充型性及抗裂性等技术方面取得了进展,成功开发了强度、韧性、硬度、耐热等多种性能指标达到较高水平的211Z.1“耐热高强韧铝合金”新材料。211Z.1铝合金是全国有色金属标准化技术委员会注册的新合金牌号,先后被《金属材

收稿日期:2023-05-31

基金项目:贵阳市科技计划([2022]5-16号);贵州省科技支撑计划([2023]一般320号)

作者简介:车　云,1967年生,学士,教授级高级工程师.主要从事高性能铝合金材料研究和产业化方面的工作.Email:cheyun@126.com

通讯作者:张中可,1969年生,硕士,研究员.研究方向为金属材料及其加工技术.Email: zhangzhke@126.com

引用格式:车云,张中可,门三泉,李祥.热挤压工艺对211Z.1铝合金组织和性能的影响[J].铸造技术,2024,45(12):1174-1180.
CHE Y, ZHANG Z K, MEN S Q, LI X. Effect of the hot extrusion process on microstructure and properties of 211Z.1 aluminium alloy [J]. Foundry Technology, 2024, 45(12): 1174-1180.

中国知网 https://www.cnki.net

料力学性能手册》(第2版)、《新编有色金属材料手册》(第2版)、《实用金属材料手册》(第2版)收录。

围绕211Z.1铝合金新材料,前期开展了铸造性能[1]、相转变[2]、高温力学性能[3]、疲劳特性[4-5]、耐磨性能[6]、微观组织性能[7-8]等方面的研究。研究过程中发现211Z.1铝合金由于其凝固温度区间较宽,合金化元素较多,铸造不可避免地存在晶粒粗大、缩孔、疏松和针孔等铸造缺陷。如何解决这些问题,提高产品的综合性能,相关变形铝合金的生产工艺和学者的研究成果提供了解决问题的思路。

铸造工艺技术方面,采用铝合金半连续铸造生产工艺,所得铸锭产品结晶组织匀细、致密度高,气孔、夹杂、疏松等缺陷少,铝液回收率、铸锭成品率高,力学性能较好。Wiskel等[9]指出合金在凝固过程中由于受到半连续铸造结晶器壁和二次冷却水的强烈冷却作用,有效改善了合金凝固组织的形貌,获得细小的微观组织。陶健全等[10]研究指出铸造铝合金半连续铸棒不同部位的组织细小、均匀,半连续铸造工艺制备出的铸造铝合金具有较为优异的强韧性。朱庆丰等[11]指出半连续铸造是铝合金生产的关键环节,锭坯的冶金质量和成品率直接决定最终产品的质量和成品率。Luo等[12]开发了内冷场半连续铸造技术,通过在熔池内插入带水冷的金属管增加心部冷却,改善铸锭心部组织。Zhang等[13]将多个超声头置入大尺寸2219铝合金铸锭半连续铸造过程中取得了很好的晶粒细化效果。

挤压工艺技术方面,变形铝合金材料热挤压工艺可以减少铸造缺陷,细化晶粒,提高致密度。袁航等[14]指出铝合金在挤压加工的过程中始终处于强烈的三向压应力状态,通过改变坯料的挤压道次,可以有效消除铸锭内部缩松缩孔、成分偏析等缺陷,相较于铸造、机加工等方法,其内部组织质量更加致密优良。鲍文科等[15]对某7xxx铝合金热挤压试验后发现合金的抗拉强度达到了407 MPa,比铸态合金提高了104.5%。孙钊等[16]研究指出挤压温度和速度对金相组织都有较大的影响,随着挤压温度和挤压速度的提高,合金的未溶相逐步溶入基体中,达到固溶强化的效果。但当挤压温度过高和挤压速度过低时,合金中的纤维组织发生静态回复再结晶,同时又析出稳定的第二相。

211Z.1铝合金材料在推广应用过程中,反应出该材料耐腐蚀性能不强,特别是抗晶间腐蚀能力较弱。211Z.1铝合金材料属于Al-Cu系铸造合金,牟春[17]认为Al-Cu系合金晶间腐蚀的发生是由于晶界上析出了较铝元素更活泼的析出相,从而出现析出相的溶解,形成了腐蚀性更强的封闭环境,最终导致了晶间腐蚀的发生。杨武等[18]和苏景新等[19]很好地解释了Al-Cu合金的晶间腐蚀问题,铝合金典型的晶界模式常为沉淀相/溶质贫化区。通常铝合金的晶格本体、沉淀相和溶质贫化区之间的电化学行为相差很大,导致晶界比晶粒内部更易腐蚀、孔蚀或缝隙腐蚀发展为晶间腐蚀,形成深入合金组织的腐蚀沟。为提高211Z.1铝合金抗晶间腐蚀能力,使用轧制或挤出工艺制成的板材或棒材,由于晶粒被严重变形,晶间沉淀物/溶质贫化区形成了平行于表面的层状分布的活性阳极通道,在腐蚀产物楔入力的作用下,晶间腐蚀倾向于沿与表面平行的方向生长。丁惠麟等[20]指出挤压热处理可以有效减少气孔、缩松等铸造缺陷,使组织更加细密,抗晶间腐蚀能力得到提高。刘瑛等[21]研究指出随着预变形量的增加,合金晶间腐蚀性能由4级降至0级,抗晶间腐蚀能力增强。随着变形量增大,抗晶间腐蚀和剥落腐蚀的性能并非持续提高。陈康华等[22]研究指出7150铝合金变形程度为60%时抗晶间腐蚀性能最好,而变形程度为85%时,抗晶间腐蚀性能下降。

211Z.1作为一种新牌号的铸造铝合金材料,如何提高其综合性能,满足不同应用场景的市场需求。变形铝合金材料热挤压工艺可以减少铸造缺陷,细化晶粒,提高致密度,挤压材一般具有较高的强度、优良的韧性以及良好的综合性能。但211Z.1作为铸造铝合金材料属于沉淀强化型合金,主要通过固溶、时效从过饱和固溶体中析出沉淀相进行强化,热挤压工艺对该类铝合金组织和性能的影响尚不明确。本文借鉴变形铝合金材料的加工工艺和相关文献研究成果对其进行竖井半连续水冷铸造,铸造棒材热挤压加工制备出挤压棒材。从211Z.1铝合金铸造棒和热挤压棒材上取样进行固溶淬火和时效热处理,并对热处理后的铸造试样和挤压试样从组织结构、力学性能、晶间腐蚀3个方面进行了对比分析,探讨了热挤压工艺对211Z.1铝合金材料组织和性能的影响。

1　实验材料与方法

实验用211Z.1新型耐热高强韧铝合金材料[23]其主要成分见表1。实验合金经730 ℃熔炼后,竖井半连续水冷铸造成加工用的实心圆棒。一部分铸造棒直接取样进行热处理,采用T6热处理工艺:固溶(538±5) ℃×8 h,淬火后时效(175±5) ℃×6 h。另外一部分进行正向热挤压工艺加工,见图1。挤压筒温450 ℃,铸造棒温420~520 ℃,挤压速度为0.5~

中国知网　https://www.cnki.net

表 1 211Z.1 铝合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of 211Z.1 aluminium alloy

(mass fraction/%)

Alloy	Element/%													
	Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Zr	B[a]	C[a]	Cd	RE	Be	Else[b] Single	Else[b] Total	Al[c]
211Z.1	≤0.10	≤0.30	4.0~7.5	0.20~0.6	0.05~0.40	0.05~0.50	0.005~0.07	0.003~0.05	0.05~0.50	0.02~0.30	0.001~0.08	≤0.05	≤0.15	Bal.

a B、C 两种元素可只添加其中一种。

b 其他杂质指表中未列出或未规定数值的元素。

c 铝的质量分数为 100.00%与所有含量不小于 0.010%的元素含量总和的差值,求和前各元素数值要表示到 0.0X%。

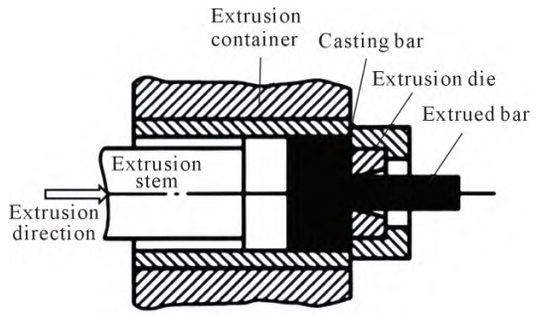

图 1 铝合金正向挤压示意图
Fig.1 Schematic diagram of aluminum alloy forward extrusion

1.0 m/min,挤压比 λ=20,挤压模为 ϕ16 mm。再对挤压棒材取样进行 T6 热处理：固溶 (538±5) ℃×5 h,淬火后时效处理(185±5) ℃×8 h。按 GB/T 7998-2005 要求对热处理后的铸造试样和挤压试样分别在 NaCl+H_2O_2 溶液中浸蚀 6 h。试样的力学性能采用 CMT5105 型万能材料试验机上进行拉伸试验,拉伸速率为 2 mm/s。切取试样经磨、抛光、腐蚀液为混酸(1.0%HF+1.5%HCl+2.5%HNO_3,体积分数)腐蚀,采用 OLYMPUS GX41 数字金相显微镜观察试样的微观组织结构。

2 实验结果及讨论

2.1 铸造和挤压试样组织结构分析

图 2 是 211Z.1 铝合金半连续水冷铸造棒铸造试样和铸造棒热挤压加工后挤压试样在 T6 状态下的金相图。

图 2a 为铸造试样金相组织。试样晶粒大小较均匀,晶界平滑,晶界处有少量的大块未固溶相,基体中分布大量弥散质点(图中箭头所示),这些弥散质点EDS 分析发现 Al、Cu、Mn 的摩尔比为 20:2:3,与 T-$Al_{20}Cu_2Mn_3$ 相较为符合[24]。弥散分布在 α 固溶体中的 T 相,能改善合金的屈服强度和高温性能,T 相质点越细小，分布越均匀，对合金的强化效果越突出,性能越好[25]。图 2b 为挤压试样的横向截面金相组织。试样晶粒为大小不均匀的等轴晶,且晶界变得不明显,脆硬相被挤碎,其边界多平直,呈三角状或者四边形状,晶界相交处未发现大块未固溶相,基体可见细小弥散分布的 T 相质点(图中箭头所示)。

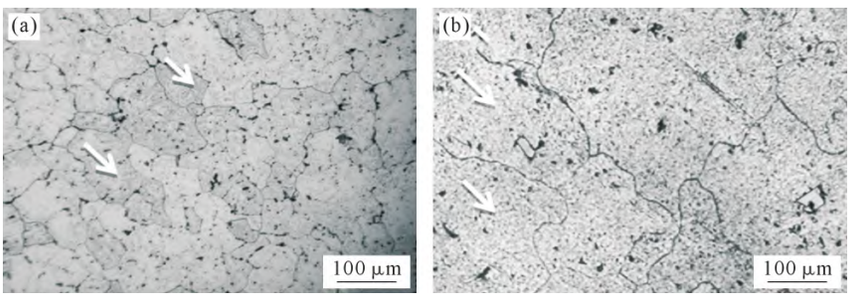

图 2 T6 状态下的金相图:(a) 铸造试样;(b) 挤压试样横截面
Fig.2 Metallographic diagram in T6 state: (a) as-cast sample; (b) cross-sectional of the extruded sample

图 3 是 211Z.1 铝合金半连续水冷铸造棒热挤压加工后 T6 热处理挤压试样纵截面的金相组织,纵向截面组织保留了挤压加工变形的典型特征。挤压纵向晶粒被压扁拉长，晶界相交处未发现大块未固溶相。合金在随后热处理过程中,发生了不完全再结晶,再结晶晶粒如图中箭头所示为等轴晶,晶粒细小。晶界上未固溶相破碎细化,分布均匀,均对力学性能的提高发挥了作用。

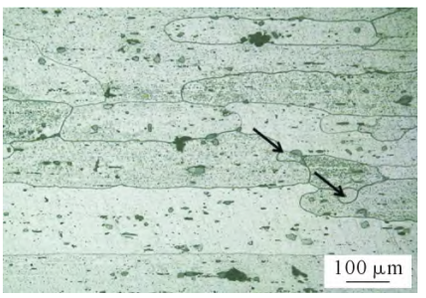

图 3 T6 热处理后、挤压试样在纵向截面的金相组织
Fig.3 Metallographic microstructure of extrued sample in longitudinal section after T6 heat treatment

中国知网 https://www.cnki.net

2.2 力学性能对比

铸造试样和挤压试样的常温拉伸性能见表 2。铸造试样的平均抗拉强度为 476 MPa，平均断后伸长率为 7.27 %；挤压试样的平均抗拉强度为 524 MPa，平均断后伸长率为 10.4 %。经挤压热处理后，挤压试样比铸造试样高出约 48 MPa，挤压试样的强度得到明显提高。究其原因，热挤压有助于去除铸棒内部缩孔、缩松、气孔等缺陷，提高了铸造棒材的致密度；同时还可以使晶界上一些粗大脆硬相在挤压过程中破碎成小的颗粒，并沿挤压方向分布。另一方面热挤压(较大程度的塑性变形)会增加金属内部的位错或者空位的密度，同时改变第二相的形状及分布，在后续的热处理过程中位错等形变时产生的缺陷会影响新相的形核动力学和分布，造成时效过程中的沉淀相发生改变[26]。

铸造试样和挤压试样的常温拉伸断口见图 4。图 4a 和 b 均是典型的延性断口特征，断口上布满大小不一的韧窝，属于韧窝断口。图 4b 中有明显的沿晶开裂特征，一些硬质相在挤压过程中破碎开裂，如图 4b 中箭头所示，在这些硬质相周围，韧窝明显较少，存在局部脆性断裂的特征，属于韧窝、沿晶混合型断口。

2.3 铸造和挤压试样晶间腐蚀性能对比分析

211Z.1 铝合金具有高强、高韧等一系列优异的力学性能，但由于含 Cu 量较高，造成合金耐蚀性能下降，极易发生晶间腐蚀[27]。晶间腐蚀是金属材料在特定的腐蚀介质中沿着材料的晶粒边界(或晶界附近)发生腐蚀，使晶粒之间丧失结合力的一种腐蚀现象。按照 GB/T 7998-2005 的要求对铸造试样和挤压试样分别在 $NaCl+H_2O_2$ 溶液中浸蚀 6 h，进行静拉伸试验，得到的两种试样腐蚀后拉伸性能数据如表 3 所示。对比表 3 和表 2 发现，211Z.1 铸造试样和挤压试样腐蚀 6 h 后强度分别下降了 38、22 MPa，下降程度分别为 7.98%、4.2%，伸长率下降程度分别为 37.7%、11.5%。以上数据说明，经浸蚀后，挤压试样力学性能的下降程度小于铸造试样，挤压及其随后的热处理工艺对 211Z.1 合金的晶间腐蚀敏感性有了一定改善作用。

由于 Cl^- 具有很强的侵蚀性，它不仅可以做导电介质，还会破坏金属表面的保护膜。在氯化钠溶液

表 2 211Z.1 铝合金铸造试样和挤压试样在 T6 热处理状态下的拉伸性能

Tab.2 Tensile properties of 211Z.1 aluminium alloy as–cast and extruded samples under T6 heat treatment

State	No.	Yield strength/MPa	Arerage value/MPa	Tensile strength/MPa	Average value/MPa	Elongation%	Average value%
As-cast	1	381	392.7	465	476	7.1	7.27
	2	411		486		7.2	
	3	386		477		7.5	
Extruded	1	468	461	526	524	10	10.4
	2	454		521		10.4	
	3	460		525		10.8	

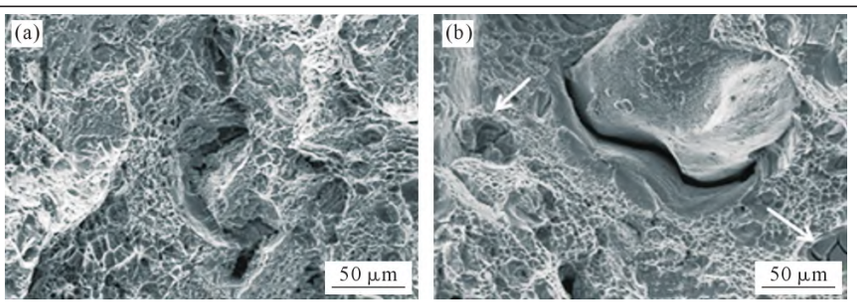

图 4 211Z.1 铝合金铸造试样和挤压试样在 T6 热处理状态下的拉伸断口形貌：(a) 铸造试样；(b) 挤压试样

Fig.4 Tensile fracture morphology of 211Z.1 aluminium alloy as-cast and extruded samples under T6 heat treatment: (a) as-cast; sample; (b) extruded sample

表 3 211Z.1 铝合金铸造试样和挤压试样 T6 热处理晶间腐蚀后拉伸性能

Tab.3 Tensile properties of 211Z.1 aluminium alloy as–cast and extruded samples after T6 heat treatment with intergranular corrosion

State	No.	Yield strength/MPa	Arerage value/MPa	Tensile strength/MPa	Average value/MPa	Elongation%	Average value%
As-cast	1	397	371	454	438	4.2	4.53
	2	375		445		4.1	
	3	341		415		5.3	
Extruded	1	440	442	501	502	8.5	9.2
	2	441		500		9.6	
	3	445		505		9.5	

中国知网 https://www.cnki.net

浸蚀过程中，Cl^- 造成 $Al(OH)_3$ 的局部溶解，导致在致密的氧化膜上出现细小的裂缝，腐蚀介质便会通过裂缝渗入到铝合金基体中，促使腐蚀不断向金属内部发展，从而加速基体的腐蚀。铸造试样和挤压试样在 $NaCl+H_2O_2$ 溶液中浸蚀 6 h 后的金相组织如图 5 所示。铸造试样(图 5a)的晶间腐蚀从合金表面开始，沿晶界向内部以网状形式扩展，被腐蚀的晶界有腐蚀沟形成，且腐蚀严重的地方有晶粒脱落。挤压试样(图 5b)网状的晶间腐蚀延伸较浅，且有沿着试样表面横向扩展的趋势。铸造试样的晶间腐蚀深度约为 178 μm，挤压试样的最大腐蚀深度约为 85 μm，根据腐蚀程度进行评级，铸造试样和挤压试样的晶间腐蚀等级分别为 4 级和 3 级，挤压热处理后 211Z.1 铝合金材料的抗晶间腐蚀性能得到一定程度的提高。

晶间腐蚀深度和浸蚀前后的强度变化都说明了挤压试样的抗晶间腐蚀性能得到了一定程度的改善。分析其原因，一方面由于热挤压作用在晶内引入大量位错，使得晶内沉淀相数目增加，且弥散分布，沿晶界析出的沉淀相数量相应地就会较少，同时挤压作用会使晶界上的大块硬质相破碎，促进其固溶溶解，降低晶粒内部以及晶粒边缘与晶界的成分偏析，提高了材料的耐蚀性。另一方面由于挤压作用使晶粒沿挤压方向被压扁拉长，分布于晶界的大块未固溶沉淀相被挤碎成较小的颗粒，沿晶界分布，破坏了晶界无沉淀析出带(precipitation free zone, PFZ)的连续性，使得连续的腐蚀通道被破坏。而铸造试样的 PFZ 呈连续、较长的带状分布，晶间腐蚀后易于形成较长且连续的腐蚀通道。根据李慧中等[28]相关研究结论，塑性变形还可以使 PFZ 的宽度变窄，降低晶内与晶界的电位差，因而提高了211Z.1 铝合金材料的抗晶间腐蚀性能。

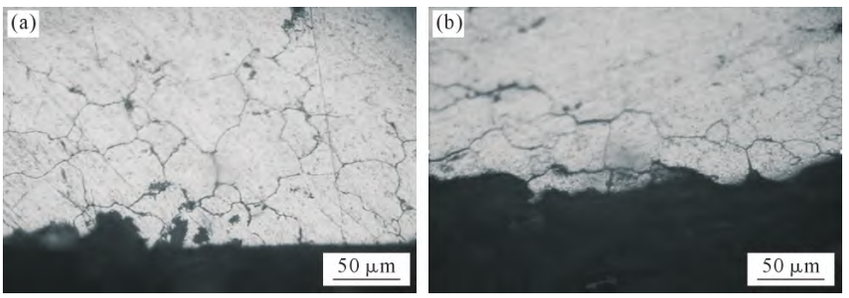

图 5 211Z.1 合金晶间腐蚀形貌：(a) 铸造试样；(b) 挤压试样

Fig.5 Intergranular corrosion morphology of 211Z.1 alloy: (a) as-cast sample; (b) extruded sample

3 结论

(1)热挤压工艺使 211Z.1 铝合金晶粒沿挤压纵向被压扁拉长，脆硬相被挤碎，晶界的大块未固溶沉淀相被挤碎成较小的颗粒，沿晶界分布，分布均匀。

(2)211Z.1 铝合金材料 T6 热处理工艺下，铸造试样平均抗拉强度为 476 MPa，挤压试样平均抗拉强度为 524 MPa，挤压试样比铸造试样强度高出 48 MPa，强度得到明显提高。铸造试样和挤压试样分别在 $NaCl+H_2O_2$ 溶液中浸蚀 6 h 后强度分别下降了 38、22 MPa，下降程度分别为 7.98%、4.2%，伸长率下降程度分别为 37.7%、11.5%，挤压试样力学性能的下降程度小于铸造试样。

(3)211Z.1 铝合金材料铸造试样的晶间腐蚀深度约为 178 μm，挤压试样的腐蚀深度约为 85 μm，铸造试样和挤压试样晶间腐蚀等级分别为 4 级和 3 级。热挤压后 211Z.1 铝合金材料的抗晶间腐蚀性能得到一定程度的提高。

参考文献：

[1] 张中可，车云，门三泉. 211Z.1 铝合金铸造缺陷及其对性能的影响[J]. 铸造技术，2015, 36(2): 536-538.
ZHANG Z K, CHE Y, MEN S Q. Casting defects of 211Z.1 Al-alloy and their impact on performance[J]. Foundry Technology, 2015, 36(2): 536-538.

[2] 吴玉丰，刘克家，张中可，李谦，付伟英. 热性能分析对一种Al-Cu 合金的相转变研究[J]. 上海金属，2013, 35(3): 27-30.
WU Y F, LIU K J, ZHANG Z K, LI Q, FU Y W. Research on phase transition of an Al-Cu alloy by thermal analysis[J]. Shanghai Metals, 2013, 35(3): 27-30.

[3] 张中可，车云，门三泉，李祥. Al-Cu-Mn 铸造合金的高温力学性能研究[J]. 热加工工艺，2012, 41(19): 8-10.
ZHANG Z K, CHE Y, MEN S Q, LI X. Research of high temperature mechanical properties for Al-Cu-Mn casting alloy [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(19): 8-10.

[4] ZHANG X M, MAO J, CHE Y, ZHANG Z K. Investigations on the fatigue property of the high-strength and toughness 211Z casting aluminium alloy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 423-426: 197-201.

[5] 黄朝文，梁益龙，杨明，徐平伟，李祥，梁宇. 211Z.X 耐热高强韧铝合金的疲劳特性[J]. 金属热处理，2013, 38(2): 43-47.
HUANG C W, LIANG Y L, YANG M, XU P W, LI X, LIANG Y. Fatigue properties of 211Z.X heat-resisting high strength and toughness aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38 (2): 43-47.

[6] 张中可，车云，门三泉. ZL211 铝合金耐磨性能和磨损机制研究

中国知网 https://www.cnki.net

[J]. 热加工工艺，2015, 44(4): 63-65.
ZHANG Z K,CHE Y, MEN S Q. Wear resistance and wear mechanism of ZL211 alloy[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(4): 63-65.

[7] 张晓敏，毛健，车云，张中可. 淬火水温对 Al-Cu-Mn 高强铸造合金性能的影响[J]. 热加工工艺，2011, 40(20): 147-149.
ZHANG X M, MAO J, CHE Y, ZHANG Z K. Influence of quenching water temperature on mechanical property of high strength cast Al-Cu-Mn alloy[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(20): 147-149.

[8] 陈新梦. Al-Cu-Mn 高强铝合金的时效析出相[J]. 特种铸造及有色合金，2014, 34(10): 1114-1116.
CHEN X M. Aging precipitates in Al-Cu-Mn high strength aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(10): 1114-1116.

[9] WISKEL J B, COCKCROFL S L. Heat-flow-based analysis of surface crack formation during the start up of the direct chill casting process: Part I. Development of the inverse heat transfer model[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1996, 27: 119-127.

[10] 陶健全，王修涛，陈喜栋，孙际鹏，王茂川，王艳彬，向林. 铸造铝合金半连续铸棒组织与性能均匀性研究[J]. 精密成形工程，2022, 14(8): 155-159.
TAO J Q, WANG X T, CHEN X D, SUN J P, WANG M C, WANG Y B, XIANG L. Mechanical and microstructural homogeneity of semi-continuous casting aluminum alloy bars[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(8): 155-159.

[11] 朱庆丰，程龙，王睿，赵志浩，左玉波，崔建忠. 铝合金圆铸锭竖直半连续铸造技术的发展[J]. 轻合金加工技术，2022, 50(6): 1-12, 20.
ZHU Q F, CHENG L, WANG R, ZHAO Z H, ZUO Y B, CUI J Z. Development of vertical DC casting technology for aluminum alloy round ingot[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2022, 50(6): 1-12, 20.

[12] LUO Y J, ZHANG Z F. Numerical modeling of annular electromagnetic stirring with intercooling in direct chill casting of 7005 aluminum alloy billet[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2019, 29(1): 81-87.

[13] ZHANG L, LI X Q, LI R Q, JIANG R P, ZHANG L H. Effects of high-intensity ultrasound on the microstructures and mechanical properties of ultra-large 2219 Al alloy ingot[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 763: 138154.

[14] 袁航，陆政，孙刚，李国爱，高文理. 7xxx 铝合金挤压技术及设备研究现状[J]. 航空制造技术，2022, 65(8): 84-92, 106.
YUAN H, LU Z, SUN G, LI G A, GAO W L. Research status of 7xxx aluminum alloy extrusion technology and equipment [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(8): 84-92, 106.

[15] 鲍文科，高世阳，刘均波，魏文庆，张丽娜. 热挤压及固溶对 Al-7Zn-2.5Mg-2.5Cu 高强铝合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺，2020, 49(19): 105-107.
BAO W K, GAO S Y, LIU J B, WEI W Q, ZHANG L N. Effects of hot extrusion and solid solution on microstructure and properties of Al-7Zn-2.5Mg-2.5Cu high strength aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(19): 105-107.

[16] 孙钊，周伟，白文全，王玉文. 挤压工艺对 7046 铝合金型材组织与性能的影响[J]. 轻合金加工技术，2021, 49(8): 29-33.
SUN Z, ZHOU W, BAI W Q, WANG Y W. Effect of extrusion process on microstructure and properties of 7046 aluminum alloy profiles[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2021, 49(8): 29-33.

[17] 牟春. Al-Cu-Mg 系高强铝合金的晶间腐蚀[J]. 铝加工，2017(6): 22-24.
MU C. Intergranular corrosion of Al-Cu-Mg high-strength aluminum alloy[J]. Aluminium Fabrication, 2017(6): 22-24.

[18] 杨武，顾濬祥，黎樵桑，肖京先. 金属的局部腐蚀[M]. 北京：化学工业出版社，1995.

[19] 苏景新，张昭，曹发和，张鉴清，曹楚南. 铝合金的晶间腐蚀与剥蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报，2005(3): 187-192.
SU J X, ZHANG Z, CAO F H, ZHANG J Q, CAO C N. Review on the intergranular corrosion and exfoliation corrosion of aluminum alloys[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005(3): 187-192.

[20] 丁惠麟，辛智华. 实用铝、铜及其合金金相热处理和失效分析[M]. 北京：机械工业出版社，2008.

[21] 刘瑛，张新明，刘波，李慧中，高慧. 预变形量对 2519 铝合金抗晶间腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报，2006(9): 1545-1550.
LIU Y, ZHANG X M, LIU B, LI H Z, GAO H. Effect of degree of predeformation on corrosion resistance of 2519 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006(9): 1545-1550.

[22] 陈康华，陈送义，彭国胜，方华婵，肖代红. 变形程度对 7150 铝合金再结晶及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2010, 30(2): 103-107, 91.
CHEN K H, CHEN S Y, PENG G S, FANG H C, XIAO D H. Effect of deformation rate on recrystallization and properties of 7150 aluminum alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(2): 103-107, 91.

[23] 中国有色金属工业协会. 耐热高强韧铸件用铝合金锭：GB/T 29434-2012[S]. 北京：中国标准出版社，2013.
China Non-Ferrous Metals Industry Association. Aluminum alloy ingots for high strength and toughness castings with heat resisting: GB/T 29434-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

[24] 张中可，魏晓，车云，沈振菊，门三泉. 热处理对 211Z.1 铝合金组织及相结构的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2015, 35(9): 995-998.
ZHANG Z K, WEI X, CHE Y, SHEN Z J, MEN S Q. Effect of heat treatment on the microstructures of aluminum alloy 211Z.1[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(9): 995-998.

[25] 张宝昌. 有色金属及其热处理[M]. 西安：西北工业大学出版社，1993.

[26] 程羽，郭生武，郭成，陈金德. 热挤压对颗粒增强金属基复合材料组织和性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程，2000(2): 31-34.
CHENG Y, GUO S U, GUO C, CHEN J D. Effect of hot extrusion on microstructures and properties of Al matrix composites reinforced by SiC particles [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2000(2): 31-34.

[27] 王芝秀，李海，顾建华，宋仁国，郑子樵. Cu 含量对 Al-Mg-Si-Cu 合金微观组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报，2012, 22(12):

中国知网 https://www.cnki.net

3348-3355.
WANG Z X, LI H, GU J H, SONG R G, ZHENG Z Q. Effect of Cu content on microstructures and properties of Al-Mg-Si-Cu alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22 (12): 3348-3355.
[28] 李慧中,张新明,陈明安,周卓平. 热处理制度对 2519 铝合金晶间腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报,2005(1): 20-23, 101.
LI H Z, ZHANG X M, CHEN M A, ZHOU Z P. Effect of heat treatment on microstructure tensile strength and intergranular corrosion of 2519 aluminum alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005(1): 20-23, 101.

中国知网 https://www.cnki.net