DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4230

一种新型铸造高温钛合金的开发和性能研究

刘喜波[1,2],王　非[1,2],孙宏喆[1,2],徐　群[1,2],高福洋[1],李维廷[1,2]

(1. 中国船舶集团有限公司 第七二五研究所,河南 洛阳 471023;2. 洛阳双瑞精铸钛业有限公司,河南 洛阳 471023)

摘　要:为了满足航天领域高速飞行器650 ℃以上短时高温需求,开发了新型耐高温Ti700SR铸造钛合金,对比分析了两种成分的合金在不同温度下的力学性能和工艺性能。结果表明,铸造Ti700SR合金具有良好的室温和高温性能,可在650~750 ℃高温使用。成分含量低的2#合金室温强度和塑性匹配更好,工艺性能良好。2#合金的铸造流动性相当于TC4合金的83%,TIG拘束焊和补焊试板成型良好,在刚性拘束条件下的焊接裂纹倾向不明显,试板对接焊后双面成型良好,焊接系数超过0.9,制备的圆筒型铸件抗裂纹性较好。此外,Ti700SR合金和TA15钛板利用电子束对焊可实现异种钛材结合连接。

关键词:铸造;高温钛合金;工艺性能;组织形貌;焊接

中图分类号:TG146.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)03-0271-06

Development and Property Research on a New High-temperature Titanium Alloy

LIU Xibo[1,2], WANG Fei[1,2], SUN Hongzhe[1,2], XU Qun[1,2], GAO Fuyang[1], LI Weiting[1,2]

(1. CSSC Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China; 2. Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471023, China)

Abstract: To meet the short-term high-temperature requirements for high-speed aircraft in the aerospace industry, a new high-temperature Ti700SR cast titanium alloy was developed, and the mechanical properties under different temperatures and technology properties were compared for two kinds of component alloys. The results indicate that the Ti700SR cast alloy has good mechanical properties under room-temperature and high-temperature conditions and can be used in the 650~750 ℃ temperature range. The 2# alloy with the lower component has good matching room temperature strength and plasticity as well as technology properties. The casting fluidity of 2# alloy is equivalent to 83% that of the TC4 alloy. Both TIG restraint welding and repair welding of test plates result in excellent forming quality, with no significant cracking tendency under rigid constraint conditions. The butt-welded joints demonstrate perfect double-sided formation with complete penetration, achieving a welding coefficient exceeding 0.9. Additionally, the cylindrical castings prepared with 2# alloy displays good crack resistance performance. Furthermore, different titanium alloys, namely, Ti700SR and TA15 alloys, can be combined via electron beam welding.

Key words: cast; high-temperature titanium alloy; technology property; microstructure; welding

目前航空航天领域迫切需要能耐更高温度的钛材,一些新型高速飞行器在高超音速飞行时表面温度短时达到650~750 ℃,但现有的成熟高温钛合金不能满足需求,最高使用温度为650 ℃左右,如我国自主研制的Ti65合金、英国的IMI834、美国的Ti-1100和俄罗斯的BT36及BT41等,进一步提高工作温度受到蠕变、持久、组织稳定性和抗氧化等性能的限制[1-3]。世界各国研究的高温钛合金主要为Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si系,北京航空材料研究院、中科院金属所和西北有色院等单位对高温钛合金进行了大量的研究[4-9],但是这些高温钛合金的使用温度没有超过650 ℃。曾立英等[8]提出限制高温钛合金的主要障碍是高温下蠕变抗力急剧下降;王涛等[9]研究了TG6合金的锻造性能;岳颗[10]研究了金属所开发

收稿日期:2024-11-14

基金项目:河南省重大科技专项(3919025001)

作者简介:刘喜波,1976生,高级工程师.主要从事钛及钛合金材料研发与工艺技术开发方面的工作.Email: liuxibo1@126.com

引用格式:刘喜波,王非,孙宏喆,徐群,高福洋,李维廷.一种新型铸造高温钛合金的开发和性能研究[J].铸造技术,2025,46(3):271-276.

LIU X B, WANG F, SUN H Z, XU Q, GAO F Y, LI W T. Development and property research on a new high-temperature titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(3): 271-276.

中国知网　https://www.cnki.net

的 Ti65 合金 600~650 ℃的蠕变行为与机制；王冰等[11]指出平衡热强度和热稳定性是目前高温钛合金发展的最主要问题。另外，铸造钛合金与同牌号的加工钛合金成分有一定的差异，600 ℃及其以上温度使用的高温铸造钛合金未见相关报道，对于高温钛合金的铸造和焊接性能缺乏深入研究。本文通过优化设计，开发了一种 Ti-Al-Zr-Mo-Nb-Si 系新型耐高温铸造 Ti700SR 钛合金，重点对合金的力学性能、组织形貌和工艺性能进行了对比研究。

1 实验材料与方法

洛阳双瑞精铸钛业公司生产的 Ti700SR 铸件，合金成分(质量分数，%)为：6.0~7.5Al、3~5Zr、1.0~2.5Nb、0.5~1.5Mo、0.1~0.3Si、0.01~0.15C、≤0.15O。在此基础上设计和熔炼了合金元素成分有差异的 Ti700SR 合金，1# 成分为 Ti-7.2Al-4.3Zr-2.3Nb-1.3Mo-0.28Si-0.1C-0.057O，2# 成分为 Ti-6.8Al-3.5Zr-1.4Nb-0.9Mo-0.21Si-0.04C-0.068O。使用 2 次真空自耗电弧炉熔炼 200 kg 铸锭，浇铸成圆筒、试棒、试板和流动性试样。力学性能试样为ϕ10 mm×70 mm，蠕变试样为ϕ10 mm×130 mm。使用 OLYMPUS 金相显微镜和 JEM-2100 透射电子显微镜对焊接试板进行微观组织观察，使用 INSTRON5587 拉伸试验机进行力学性能和弹性模量的检测，使用水浸重量对比法测试密度，用激光导热仪 LFA457 进行比热容和热扩散系数测量。焊接前对试板(宽 250 mm×长 300 mm)进行除油、酸洗去除表面氧化，先用砂纸将待焊接焊缝处的氧化膜打磨干净露出金属光泽，清水冲洗后烘干，然后用酒精或丙酮清洗后吹干，随后进行焊接。

2 实验结果及讨论

2.1 铸造 Ti700SR 合金组织和力学性能分析

钛合金中铝当量和钼当量计算[2]如下式所示：

$$[Al]_{当量}=Al+Sn/3+Zr/6+10O \quad (1)$$

$$[Mo]_{当量}=Mo+Ta/4+Nb/3.3+W/2+V/1.4+Cr/0.6+Mn/0.6+Fe/0.5+Co/0.9+Ni/0.8 \quad (2)$$

1# 和 2# 成分的 Ti700SR 合金铝当量分别为 8.5 和 7.9，钼当量分别为 1.9 和 1.4。成熟高温钛合金的铝当量一般小于 9，不容易出现 α_2 相，可以保证优良的热稳定[6]；为了实现最佳的高低温性能匹配，应保持较低的钼当量(2 以下)，减少对蠕变有害的 β 稳定元素[12]。

将铸态 1# 和 2# 试样进行热等静压后，室温和高温性能及短时高温持久与蠕变性能见表 1。1# 合金的室温强度更高，高温性能更好，2# 合金强度则偏低一些，高温性能有降低，但 2# 合金的室温塑性更好；2# 合金在 650、700 和 750 ℃，应力不低于 320、250 和 180 MPa 条件下，持久时间均在 0.9 h 以上，蠕变断裂的伸长率较小，而 1# 合金高温持久与蠕变性能更好。

Ti700SR-2# 合金的组织形貌见图 1，由晶界初生 α 和包含次生层片状 α 的转变 β 组成。其中转变 β 尺寸较为粗大，内部的次生层片状 α 宽度较宽，存在较为明显的取向一致性束域(图 1a)；原始 β 晶粒尺寸达到数百微米，室温下形成多片层的 a 相组织，每个原始晶粒内包含若干集束(宽度 2~30 μm)，同一集束内片层的晶体取向大致相同(图 1b)。

2# 合金透射电镜组织内可见排列较整齐的亚晶粒细长束集，宽度一般为 10 μm 以下，晶界或亚晶界上有一些弥散析出相(图 2a)，结果表明析出相主

表 1 Ti700SR 合金力学性能
Tab.1 Mechanical properties of the Ti700SR alloy

Alloy	Temperature	Strength			Stress rupture property		Creep property	
		R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A/%	Stress/MPa	Time/h	Stress/MPa	A/%
1#	RT	990~1 042	904~948	6.5~13.0	-	-	-	-
	600 ℃	555~610	447~495	13~18	400	12.7~19.6	400	0.4~0.7
	650 ℃	520~555	420~460	15~28	340	3.1~8.9	340	0.7~1.2
	700 ℃	435~465	335~380	20.5~38.0	290	0.9~2.2	250	3.1~5.7
	750 ℃	355~365	277~288	25~30	-	-	-	-
2#	RT	902~932	807~823	11.5~14.5	-	-	-	-
	550 ℃	563~585	454~461	14.0~16.5	-	-	-	-
	600 ℃	524~563	415~460	13.5~18.0	400	4.0~4.7	400	0.7~1.2
	650 ℃	502~528	405~429	12~18	320	2.7~3.6	340	1.5~1.8
	700 ℃	424~458	313~355	15~27	250	0.9~1.5	250	3.7~5.9
	750 ℃	330~370	259~288	13~29	180	0.9~1.4	180	4.1~14.2

中国知网 https://www.cnki.net

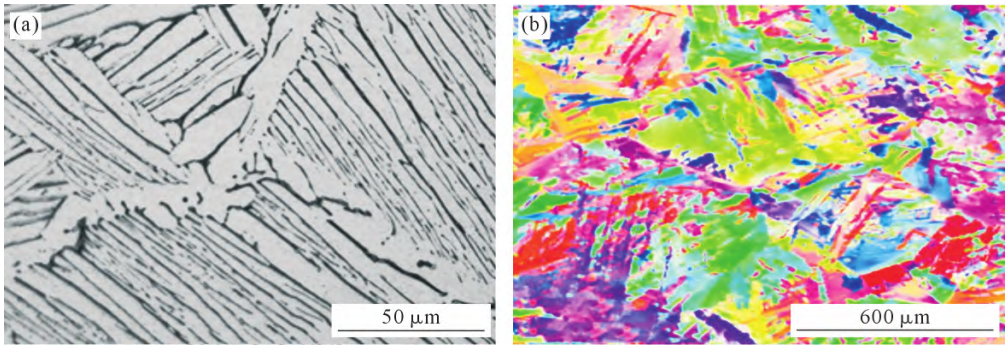

图 1 铸造+热等静压态 Ti700SR-2# 合金组织形貌:(a) 微观组织;(b) EBSD 形貌

Fig.1 Microstructures of the cast+HIP Ti700SR-2# alloy: (a) microstructure; (b) EBSD microstructure

要为(Ti, Zr)$_5$Si$_3$ 硅化物相(图 2b),析出相有利于提升合金的高温抗蠕变性能。类似的 Ti-Al-Sn-Zr-Nb-W-Si 系近 α 型高温钛合金(TNW700)的分析显示[5],高温钛合金中以 SiZr 相为主,还有 Ti$_3$Al、TiAl$_3$ 和 TiC 等化合物,TiC 的析出起到钉扎作用[13],阻碍塑性变形。

表 2 为 2# 合金的物理性能,相变点为1 010 ℃,相变温度较高的钛材一般高温稳定性较好;作为铸造合金要有良好的工艺性能,测试密度、比热容、收缩系数和膨胀系数等,其结果列于表 2 中,为模具设计和焊接提供工艺参考。

表 2 2# 合金物理性能

Tab.2 Physical properties of 2# alloy

Property	Value
Phase transformation point	1 010 ℃
Density	4.47 g/cm^3
Poisson's ratio	0.33
Elastic modulus	120 GPa
Room temperature specific heat capacity	0.53 J/(g·K)
700 ℃ specific heat capacity	0.68 J/(g·K)
750 ℃ specific heat capacity	0.71 J/(g·K)
25~750 ℃ linear thermal expansion coefficient	11.26×10^{-6} ℃$^{-1}$

2.2 铸造 Ti700SR 合金工艺性能

作为耐高温铸造钛合金,不仅要有良好的高低温性能,还要有较好的工艺性能,包括铸造性能、抗裂性能和焊接性能等[14-15]。

通过测试钛合金熔液的流动长度来表征铸造性能,根据不同壁厚铸件中裂纹情况可以更直观地分析铸造性能[16-17],测试装置示意图和流动性结果见图 3。同样条件下,ZTC4 合金流动性长度约 407 mm,Ti700SR 合金 1# 和 2# 流动长度分别为 233 和 340 mm,

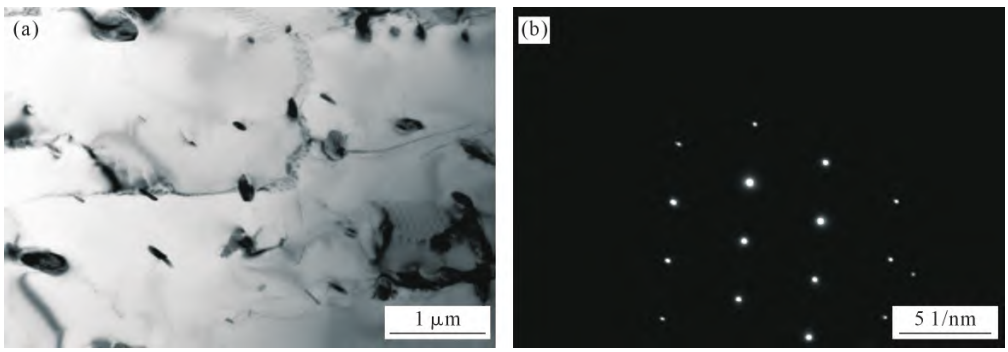

图 2 2# 合金 TEM 照片:(a) 微观组织;(b) 衍射斑点

Fig.2 TEM images of the 2# alloy: (a) microstructure; (b) diffraction pattern

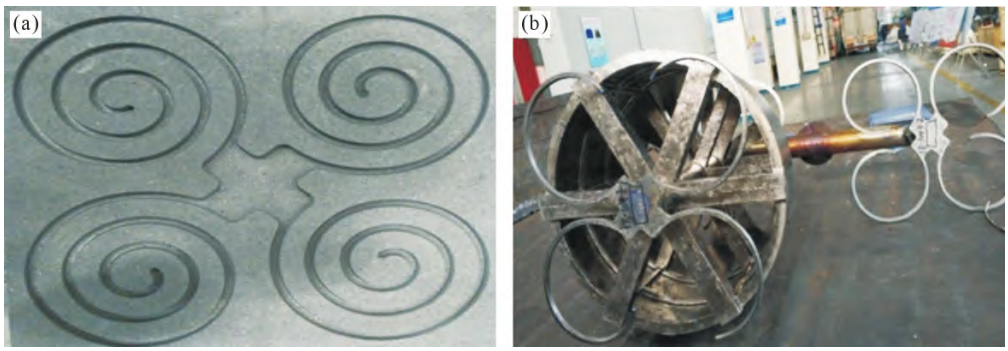

图 3 铸造流动性示意图和铸造测试:(a) 铸造流动性示意图;(b) 流动性和铸造充型性测试

Fig.3 Diagram of the casting fluidity and the casting test: (a) diagram of the casting fluidity; (b) casting fluidity and casting filling tests

中国知网 https://www.cnki.net

2# 合金的铸造充型性能更好；铸造壁厚 4~8 mm、直径 400~500 mm 的圆筒型铸件，1#成分裂纹转多(4 条，长度<30 mm)，特别是薄壁区域裂纹更明显(3 条)，适宜于制备中厚壁厚的铸件；2# 成分制备的圆筒型铸件有深度不超过 2 mm 的少量浅表裂纹 (2 条，长度<15 mm)，除中厚壁厚铸件外，也能铸造壁厚不超过 5 mm 的薄壁铸件。对比分析，2# 成分综合性能更好，适宜于复杂结构的铸件制备。

钨极氩弧焊(tungsten inert gas welding, TIG)作为一种非熔化极电弧方法，具有焊接过程稳定、焊接适应性好、焊接质量高等特点，在钛合金焊接中得到了广泛应用[18]，是钛材最为常用的焊接和补焊方法。这里重点分析 2# 成分的焊接与补焊性能。

图 4 是拘束焊+补焊后 Ti700SR-2# 合金试板外观和截面形貌，使用锯切方式解剖焊缝。对接头坡口用机械方法加工[19]，采用双面焊，坡口角度不超过 25°以减少焊接应力，焊接电流降低到 150 A 以下，减少焊接热输入从而减少硅化物析出；补焊后试板表面成型良好，未见裂纹、夹杂、咬边等焊接缺陷，焊缝表面呈银白色，未发生氧化等现象，焊缝鱼鳞纹细腻、光滑，表面着色和内部 X 射线探伤未发现缺陷；焊缝背面无裂纹产生，说明材料具有良好的抗裂性，在刚性拘束条件下焊接裂纹倾向不明显。

对 Ti700SR 合金试板加工斜 Y 坡口对接试件，采用手工焊施焊的焊缝如图 5 所示，试板双面成型良好，焊缝区域内、外部均未发现焊接裂纹、夹杂、咬边等缺陷，焊缝表面呈银白色，未发生氧化等现象，焊缝鱼鳞纹细腻、光滑，无损着色检验合格，满足 NB/T 47013 标准 I 级合格要求，X 射线探伤合格；焊道清晰可见，焊缝底部为较薄的大晶粒，焊缝上部有部分粗大柱状晶，焊接接头冶金结合良好，没有明显的气孔、裂纹、夹杂等缺陷。

Ti700SR-2# 合金试板对焊后，对接头进行不同温度拉伸性能测试，结果见表 3。焊接接头室温拉伸性能超过母材的 90%，高温性能为母材的 85%以上，高温下在焊缝位置断裂，与高温下焊缝结合性能弱于基体有关。

表3 Ti700SR合金补焊接头性能

Tab.3 Properties of repaired weld joints of Ti700SR alloys

Temperature	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	Fracture position
RT	852, 866	773, 788	Base metal
600 ℃	446, 463	386, 402	Base metal
650 ℃	431, 433	359, 369	Base metal
700 ℃	406, 408, 413	297, 303, 311	Base/Weld seam/Base
750 ℃	340, 354, 357	241, 247, 249	Weld seam

Ti700SR 合金二次补焊后焊缝及热影响区组织有所粗化，微观无缺陷(图 6)。对图 3 中圆筒型铸件的缺陷打磨挖除后补焊，不超过 2 次补焊可消除裂纹等缺陷，获得合格的内外部质量。制备壁厚 3~10 mm×650~800 mm(直径)×1 500 mm(长度)的大型耐高温铸件，效果良好，可实现整体成型，铸件表

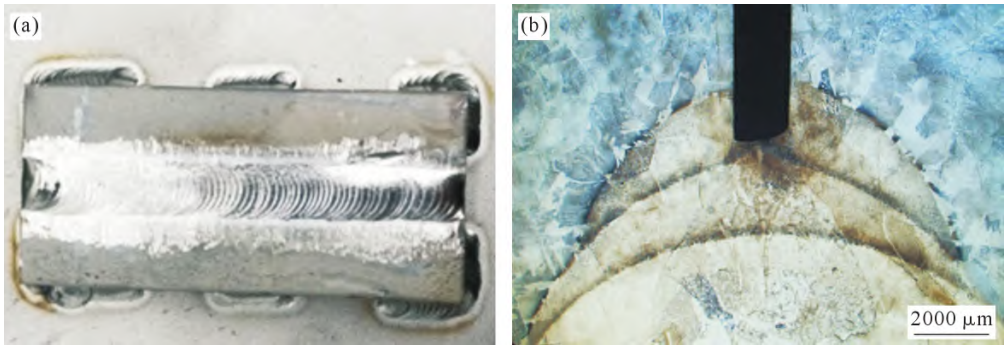

图 4 2# 合金试板拘束焊及补焊后形貌：(a) 拘束焊+补焊；(b) 截面形貌(黑宽缝为锯切造成)

Fig.4 Morphology of the 2# alloy restraint welding and butt-welding joints: (a) restraint welding and butt-welding joints; (b) cross-sectional microstructure (cutting causing black slits)

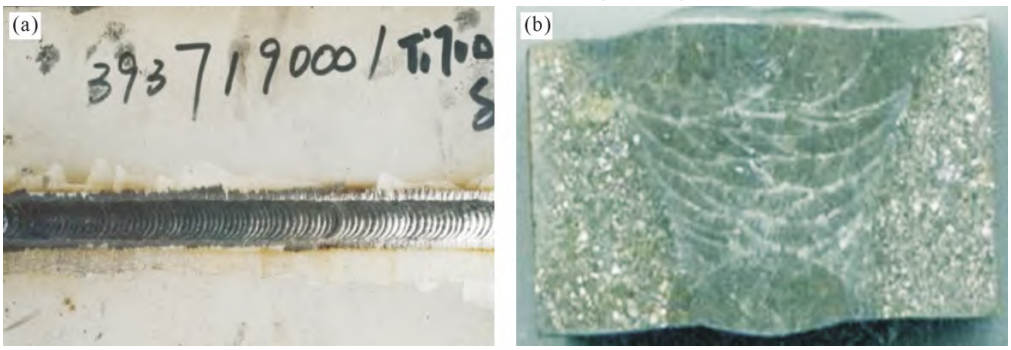

图 5 2# 合金试板对接焊缝形貌：(a) TIG 补焊外观；(b) 焊缝断面形貌

Fig.5 Butt-welding joint morphology of the 2# alloy plate: (a) TIG welding; (b) cross-sectional morphology of the joint

中国知网 https://www.cnki.net

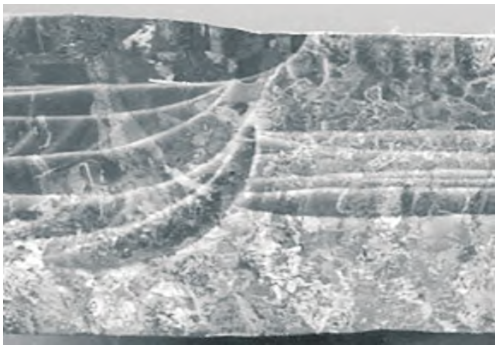

图 6 Ti700SR 合金试板二次补焊后截面外观
Fig.6 Cross-sectional morphology of the Ti700SR alloy plate after secondary repair welding

面和内部质量合格。

4 mm 厚的 Ti700SR 试样和 TA15 钛板电子束对接接头宏观形貌如图 7 所示，由于电子束焊接热输入小，焊接金属冷速极快，热影响区较窄；焊缝形成了杯子状，整个焊缝沿接头中心线较对称分布，无焊接缺陷。由于两侧母材成分不同，晶粒尺寸存在差异，右侧 Ti700SR 为铸造组织因此晶粒粗大，而左侧 TA15 板材为轧制组织，晶粒较为细小。

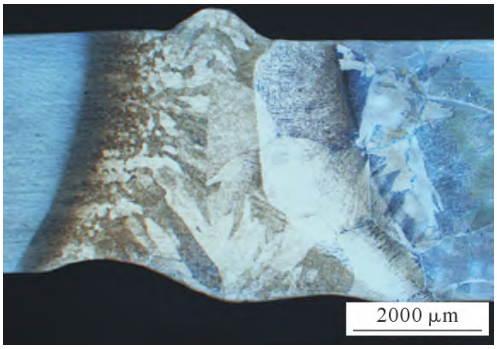

图 7 Ti700SR 和 TA15 钛板的电子束对接焊缝形貌
Fig.7 Electron beam welding joint morphology of the Ti700SR and TA15 alloys

2.3 讨论

在 Ti700SR 高温钛合金的成分设计中，综合利用了合金强化、微合金化和析出强度等手段提高高温性能。相变温度提高到 1 010 ℃，添加较多 Al 元素改善热强性，利用中性元素 Zr 提高强度并改善硅化物弥散析出及焊接性，少量添加 β 相稳定元素Nb 和 Mo 并提高抗氧化性，添加 Si 后主要以有序 α_2 相与 $(Ti, Zr)_5Si_3$ 或 $(Ti, Zr)_6Si_3$ 化合物的形式存在[20-21]，硅化物不连续析出于 β 相或 α/β 相界上，对位错运动产生阻碍作用，能显著提高抗蠕变性能，少量的 Si 和 C 形成高熔点析出物从而提高耐热性和抗蠕变性能[9,22]，但会影响塑性和焊接性能。经过成分优化设计和测试，1# 成分的 Ti700SR 合金铝当量和钼当量更高，虽然室温强度和高温性能更好，但是铸造充型性更低、裂纹倾向更大，而合金含量更低的 2# 成分，室温强塑性匹配较好，高温性能良好，铸造性能和可焊接性能良好，因此 2# 成分 Ti700SR 合金的综合性能更好，更适用于高温钛合金铸件制备。

3 结论

(1)新型耐高温 Ti700SR 合金具有良好的室温和耐高温性能，室温强度超过 900 MPa，700 ℃强度超过 420 MPa、750 ℃强度超过 330 MPa，650~750 ℃持久性能和蠕变性能良好，合金材料可在 650~750 ℃高温使用。

(2)合金元素含量低的 2#Ti700SR 合金具有更好的工艺铸造性和焊接性，流动性能约为铸造 TC4 合金的 83%，可用于各种壁厚的铸件制备；2# 合金具有良好的抗裂性，试板刚性拘束条件下 TIG 焊接裂纹倾向不明显，焊接双面成型良好，一次补焊和二次补焊后内外质量合格，焊接系数不低于 0.9，可制备大型复杂薄壁耐高温钛铸件。

(3)Ti700SR 和 TA15 钛合金通过电子束焊接成型可实现异种钛材牢固结合。

参考文献：

[1] 蔡建明，弭光宝，高帆，黄浩，曹京霞，黄旭，曹春晓. 航空发动机用先进高温钛合金材料技术研究与发展[J]. 材料工程，2016, 44(8): 1-10.
CAI J M, MI G B, GAO F, HUANG H, CAO J X, HUANG X, CAO C X. Research and development of some advanced high temperature titanium alloys for aero-engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(8): 1-10.

[2] 曹京霞，弭光宝，蔡建明，高帆，周毅，黄旭，曹春晓. 高温钛合金制造技术研究进展[J]. 钛工业进展，2018, 35(1): 1-8.
CAO J X, MI G B, CAI J M, GAO F, ZHOU Y, HUANG X, CAO C X. Progress on manufacturing technology of high temperature titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35(1): 1-8.

[3] 李四清，王旭，邓雨亭，黄旭. 固溶温度对 IMI834 钛合金锻件组织和性能的影响[J]. 航空制造技术，2019, 62(19): 47-52.
LI S Q, WANG X, DENG Y T, HUANG X. Effect of solid solution temperature on microstructure and properties of IMl834 titanium alloy forging[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(19): 47-52.

[4] 李雅迪，弭光宝，李培杰，黄旭，张学军. 增材制造 600 ℃高温钛合金组织特征及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程，2022, 51(7): 2507-2518.
LI Y D，MI G B，LI P J，HUANG X, ZHANG X J. Microstructure and mechanical properties of 600 ℃ high temperature titanium alloy fabricated by additive manufacturing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(7): 2507-2518.

[5] 姚罡，付明杰. TNW700 高温钛合金热过程中的相组织变化分析[J]. 材料导报，2018, 32(10): 3584-3589.
YAO G, FU M J. Analysis of phase change in the thermal process of TNW700 high-temperature titanium alloy[J]. Materials Re-

中国知网 https://www.cnki.net

ports , 2018, 32(10): 3584-3589.

[6] 蔡建明 , 曹春晓 . 新一代 600 ℃高温钛合金材料的合金设计及应用展望[J]. 航空材料学报 , 2014, 34(4): 27-36.
CAI J M, CAO C X. Alloy design and application expectation of a new generation 600 ℃ high temperature titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 27-36.

[7] 王清江 , 刘建荣 , 杨锐 . 高温钛合金的现状与前景[J]. 航空材料学报 , 2014, 34(4): 1-26.
WANG Q J, LIU J R, YANG R. High temperature titanium alloys: Status and perspective[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 1-26.

[8] 曾立英 , 赵永庆 , 洪权 , 毛小南 , 戚运莲 . 600 ℃高温钛合金的研发[J]. 钛工业进展 , 2012, 29(5): 1-5.
ZENG L Y, ZHAO Y Q, HONG Q, MAO X N, QI Y L. Research and development of high temperature titanium alloys at 600 ℃[J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29(5): 1-5.

[9] 王涛 , 郭鸿镇 , 张永强 , 姚泽坤 , 谭立军 . 热锻温度对 TG6 高温钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报 , 2010, 46(8): 913-920.
WANG T, GUO H Z, ZHANG Y Q, YAO Z K, TAN L J. Effects of hot forging temperature on microstructure and mechanical property of TG6 high temperature titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(8): 913-920.

[10] 岳颗 . Ti65 合金显微组织及关键高温力学性能[D]. 合肥 : 中国科学技术大学 , 2019.
YUE K. Study on microstructure and key mechanical properties at high temperature of Ti65 alloy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.

[11] 王冰 , 相志磊 , 周宗熠 , 申高亮 , 黄景存 , 韩竞俞 , 王安东 , 陈子勇 . 耐 600 ℃及以上高温钛合金研究进展[J]. 钢铁钒钛 , 2024, 45(2): 42-50, 71.
WANG B, XIANG Z L, ZHOU Z Y, SHEN G L, HUANG J C, HAN J Y, WANG A D, CHEN Z Y. Research status and prospect of titanium alloys resistant to high temperature of 600 ℃and above [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2024, 45(2): 42-50, 71.

[12] LU J W, GE P, ZHAO Y Q. Recent deveIopment of effect mechanism of alloying eIements in titanium alloy design [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(4): 775-779.

[13] 张尚洲 , 刘高峰 , 王广东 , 刘子全 , 杨锐 . 碳对高温钛合金组织稳定性的影响[J]. 材料热处理学报 , 2009, 30(5): 149-153.
ZHANG S Z, LIU G F, WANG G D, LIU Z Q, YANG R. Effect of carbon on microstructural stability of high-temperature titanium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30 (5): 149-153.

[14] 杨学东 , 陈丽萍 , 常崇礼 , 张志正 , 王波 , 陈春和 . 船用 ZTi60 合金的铸造性及其铸件力学性能术[J]. 金属学报 , 2002, 38(z1): 339-340.
YANG X D, CHEN L P, CHANG C L, ZHANG Z Z, WANG B, CHEN C H. Castability of marine ZTi60 titanium alloy and mechanical properties of its casting[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(z1): 339-340.

[15] 李广东 , 石岳良 . 铸造钛合金补焊技术研究进展[J]. 精密成型工程 , 2018, 10(3): 105-109.
LI G D, SHI Y L. Progress in research on cast titanium alloy welding repair[J]. Journal of Netshape Forming Engineering , 2018, 10(3): 105-109.

[16] 王晓林 , 王韦琪 , 赵芳利 , 毛麒 , 苏海军 , 王磊华 . 新型高温钛合金 BTi-62421s 的铸造性能及力学性能[J]. 铸造 , 2014, 63(9): 948-950.
WANG X L, WANG W Q, ZHAO F L, MAO Q, SU H J, WANG L H. Casting and mechanical properties of new high-Temperature BTi-62421 titanium alloy [J]. Foundry , 2014, 63(9): 948-950.

[17] 张亮 . 铸造 Ti-6Al-4V 钛合金流动性研究[J]. 特种铸造及有色合金 , 2017, 37(10): 1100-1101.
ZHANG L. Fluidity of cast titanium Ti-6Al-4V alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(10): 1100-1101.

[18] 李伟东 , 史许娜 , 刘茵琪 , 田永武 . 酸洗对钛合金熔模铸件性能的影响[J]. 铸造技术 , 2020, 41(2): 129-131.
LI W D, SHI X N, LIU Y Q, TIAN Y W. Effect of pickling on the properties of titanium alloy investment casting[J]. Foundry Technology , 2020, 41(2): 129-131.

[19] 梅文佳 , 张云浩 , 高福洋 , 闫飞昊 , 余巍 , 蒋鹏 , 朱乐乐 , 刘茵琪 . Ti700sr 高温钛合金 TIG 焊接接头组织及性能研究[J]. 材料开发与应用 , 2021, 36(4): 72-75.
MEI W J, ZHANG Y H, GAO F Y, YAN F H, YU W, JIANG P, ZHU L L, LIU Y Q. Research on microstructure and properties of Ti700sr high-temperature titanium alloy TIG welded joint[J]. Development and Application of Materials, 2021, 36(4): 72-75.

[20] 惠松骁 , 张翥 , 萧今声 , 袁冠森 . 高温钛合金热稳定性研究进展— Ⅰ .组织稳定性[J]. 稀有金属 , 1999, 23(2): 125-130.
HUI S X , ZHANG Z , XIAO J S , YUAN G S. Progress of research on thermal stability of high temperature titanium alloys — I. Metallurgical stability[J]. Chinese Journal of Rare Metals , 1999, 23(2): 125-130.

[21] RAKACHANDRA C , SINGH A K , SARMA G M K. Microstructural characterization of near-α titanium alloy Ti-6Al-4Sn-4Zr-0.70Nb-0.50Mo-0.40Si[J]. Metallurgical Transactiuons A, 1993, 24: 1273-1279.

[22] 张尚洲 , 徐惠忠 , 刘子全 , 刘羽寅 , 杨锐 . 碳含量对 Ti-60 合金时效过程中硅化物的影响[J]. 材料研究学报 , 2005, 19(5): 499-505.
ZHANG S Z, XU H Z, LIU Z Q, LIU Y Y, YANG R. Effect of carbon on silicide precipitates during ageing of Ti-60 titanium alloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2005, 19(5): 499-505.

中国知网 https://www.cnki.net