DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.6018

固溶时效处理对 Ti62F 合金冲击性能和拉伸性能的影响

莫安军[1],曾　菁[1],闵　武[1,2],陈家豪[2],魏明刚[1],余胜峰[1],谢小川[1]

(1.中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司,四川 德阳 618013;2. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室,陕西 西安 710072)

摘　要:Ti62F 合金因化学成分、相稳定性以及相变温度区间等差异,难以直接沿用钛合金传统热处理经验。基于此,选取锻造 Ti62F 钛合金开展了固溶时效处理(SAT)、室温拉伸、冲击试验以及 SEM 断口分析,旨在明确热处理对 Ti62F 力学性能的影响。结果表明,SAT 温度升高可提升韧性,但在 650 ℃×4 h 时效条件下,固溶温度自 840 ℃升至 880 ℃后,解离面、撕裂棱等脆性特征明显,合金屈服强度降低;而在 880 ℃×2 h 固溶条件下,时效温度从 630 ℃升至 670 ℃时以韧性断裂为主,韧性增加明显,但屈服强度和抗拉强度均下降;SAT 时间延长均会使韧性下降,但固溶时间增加会提升强度和伸长率,时效时间过长则降低;此外,减小试样尺寸导致冷速加快,引起大范围解离面脆性断裂特征显现,韧性降低,但断口韧窝细化和组织均匀化提升了强度和伸长率。

关键词:钛合金;固溶时效处理;冲击性能;拉伸性能;断口

中图分类号:TG146.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2026)10-1193-10

Effect of Solution Aging Treatment on the Impact Properties and Tensile Properties of Ti62F Alloy

MO Anjun[1], ZENG Jing[1], MIN Wu[1,2], CHEN Jiahao[2], WEI Minggang[1], YU Shengfeng[1], XIE Xiaochuan[1]

(1. China National Erzhong Group Deyang Wanhang Die Forging Co., Ltd., Deyang 618013, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Due to its unique chemical composition, phase stability, and phase transformation temperature range, Ti62F alloys cannot be directly treated using conventional heat treatment processes established for traditional titanium alloys. On this basis, a forged Ti62F titanium alloy was investigated through solution and aging treatment (SAT), room-temperature tensile testing, impact testing, and SEM fractography, aiming to elucidate the effects of heat treatment on its mechanical properties. The results indicate that increasing the SAT temperature enhances toughness. However, when the sample is aged at 650 ℃ for 4 h, increasing the solution temperature from 840 ℃ to 880 ℃ leads to pronounced brittle fracture features, including cleavage facets and tear ridges, accompanied by a reduction in yield strength. Under the solution condition of 880 ℃ for 2 h, increasing the aging temperature from 630 ℃ to 670 ℃ results in predominantly ductile fracture and a significant increase in toughness, albeit with decreases in both yield strength and tensile strength. Extending the duration of SAT consistently reduces toughness; however, extending the solution time improves both strength and elongation, whereas excessive aging time decreases them. Furthermore, reducing the sample size accelerates the cooling rate, inducing extensive brittle fracture characterized by cleavage facets and diminished toughness. Nevertheless, the refinement of the dimples on the fracture surface and the homogenization of the microstructure contribute to enhanced strength and elongation.

Key words: titanium alloy; solution aging treatment; impact performance; tensile properties; fracture

收稿日期: 2026-02-06

作者简介: 莫安军,1982 年生,博士,正高级工程师. 主要从事航空模锻件热成型工艺研究工作. Email: moanjun@163.com

通信作者: 陈家豪,1994 年生,硕士,工程师. 研究方向为钛合金塑性成形及数值仿真. Email: batboychen56@163.com

引用格式: 莫安军,曾菁,闵武,陈家豪,魏明刚,余胜峰,谢小川. 固溶时效处理对 Ti62F 合金冲击性能和拉伸性能的影响[J]. 铸造技术,2026, 47(10): 1193-1202.

MO A J, ZENG J, MIN W, CHEN J H, WEI M G, YU S F, XIE X H. Effect of solution aging treatment on the impact properties and tensile properties of Ti62F alloy[J]. Foundry Technology, 2026, 47(10): 1193-1202.

中国知网　https://www.cnki.net

钛合金凭借其高比强度以及良好的服役性能等优点，成为制造航空航天、深海工程等军工领域飞机机身承力结构、深海装备耐压壳体的重要结构材料[1-3]。然而，航空航天技术的不断发展，使得新一代装备的性能要求不断提高，这对钛合金的工艺设计和组织性能调控提出了更为严苛的要求[4-5]。

固溶时效处理(solution aging treatment, SAT)是改善钛合金显微组织和提升力学性能的有效手段，王若飞等[2]发现由于SAT产生的高含量片状α相和较长网篮组织会形成曲折裂纹扩展路径，克服裂纹扩展阻力需更多能量，进而有效提高了Ti62A合金的冲击吸收能与断裂韧性。Gong等[6]则发现经SAT后形成层状α相结构的Ti60合金断裂韧性得到了显著提升，从平均46.35 MPa·$m^{1/2}$提高至74.56 MPa·$m^{1/2}$。Chandravanshi等[7]研究了Ti-1100合金和0.1%(质量分数)硼改性Ti-1100合金(Ti-1100-0.1B)在不同SAT制度下的断裂韧性，发现由于硼改性合金中存在易开裂的TiB晶须，其断裂韧性总是低于Ti-1100合金，同样的现象在TC4合金中也存在[8]。Kang等[9]发现SAT可以消除烧结态Ti-48Al-2Cr-2Nb材料中的块状γ晶粒并形成全层状组织，同时得益于Ti_2AlC相的弥散强化，其强度和断裂伸长率相较于烧结态分别提高了9.7%和0.8%。显然，对于常用的钛合金体系，传统SAT制度研究已基本建立了较为完整的“热处理工艺–力学性能”关联体系[2,5,10]。然而，由于化学成分、相稳定性、热传导特性以及相变温度区间的差异，Ti62F作为一种新型α+β双相钛合金，难以直接沿用传统热处理经验。此外，由于材料尺寸的影响，通常在热加工及冷却过程中存在明显温度梯度、应变分布不均以及残余应力累积等问题，对材料机械性能势必产生影响[11-12]。

因此，本研究旨在探究SAT对Ti62F钛合金力学性能变化的影响，并重点分析其断口形貌特征，揭示力学性能与断口形貌之间的内在关联，为Ti62F钛合金的材料优化提供理论依据和数据支撑，以期为航空钛合金结构件的长寿命使役性能提供坚实参考。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验所用基材由中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司提供，为同一批次型号的Ti-Al-Mo系锻态Ti62F双相钛合金(该合金化学成分中O、N、H、杂质元素含量均小于0.3%)，其初始组织如图1所示，主要由等轴α相与β基体组成，在β基体中存在着大量细小的α片状组织。经金相法测得的β相变点为920 ℃。

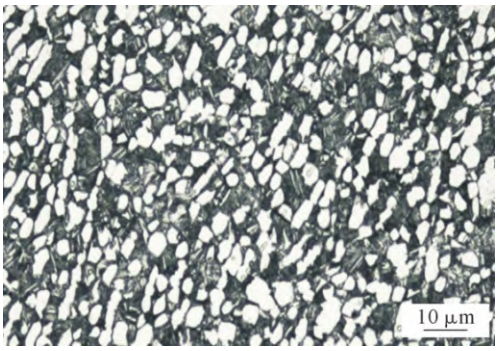


图1 Ti62F钛合金初始组织
Fig.1 Initial microstructure of Ti62F titanium alloy

1.2 实验方法

双相区固溶处理可得到综合指标较优的强度—韧性组合性能[3]，故本研究依据实际生产情况，在低于β相变温度时每隔20 ℃取一组固溶温度，直至800 ℃，时效温度则选取550~750 ℃的相对温和范围。而为了探究不同SAT条件下工艺和材料尺寸对材料性能及断口微观结构特征的影响，基于实际生产情况采用表1和2中的热处理制度进行整体热处理后取样，所有的试样在SAT结束后均为空冷(AC)，随后进行室温拉伸、冲击性能等力学性能测试以及断口形貌观察。

表1 Ti62F钛合金的不同SAT工艺
Tab.1 Various SAT processes for Ti62F titanium alloy

Number	Solution treatment	Aging treatment	Number	Solution treatment	Aging treatment
1-1	840 ℃×2 h	650 ℃×4 h	3-1	880 ℃×2 h	630 ℃×4 h
1-2	860 ℃×2 h		3-2		670 ℃×4 h
1-3	880 ℃×2 h		3-3		650 ℃×18 h
2-1	880 ℃×4 h				

表2 Ti62F钛合金进行SAT时的不同试样尺寸
Tab.2 Different sample sizes of Ti62F titanium alloy during SAT

Number	SAT	Specimen size
4-1	880 ℃×2 h+650 ℃×4 h	250 mm×250 mm×250 mm
4-2		250 mm×160 mm×160 mm
4-3		250 mm×160 mm×90 mm

室温冲击性能测试在NI750摆锤式冲击试验机上进行，其中锤刃半径选择2 mm，冲击能量750 J，实验环境温度约为23 ℃。冲击试样则按照GB/T 229-2020[13]制备，采用标准U型缺口，具体尺寸如图2a所示。冲击试验采用单摆冲击方式，试样横放在两支座之间，冲击端面对准缺口中心。试验前所有试样均在室温下进行状态平衡，不进行额外热处理或表面修整。

中国知网 https://www.cnki.net

室温拉伸在 SUNS-UTM5105X 拉伸机上进行，并按 GB/T 228.1-2021[14]制作拉伸试样，具体尺寸如图 2b 所示。通过室温拉伸实验获得抗拉强度、屈服强度、伸长率等室温力学性能指标，室温拉伸实验速率控制在 1 mm/min。为观测室温拉伸断口及冲击断口的形貌，采用 Sigma 360 型场发射扫描电子显微镜(SEM)进行观察。

2　实验结果及讨论

2.1　固溶/时效温度对材料性能的影响

表 3 为不同工艺条件下 Ti62F 合金力学性能对比。基于表 3，图 3 展示了固溶温度及时效温度对 Ti62F 钛合金冲击性能及拉伸性能的影响规律，KU_2 为冲击吸收能，其中实心点线图代表了不同固溶温度(Number：1-1, 1-2 和 1-3)，空心点线图则代表了不同时效温度(Number：3-1, 1-3 和 3-2)。随着固溶/时效温度的升高，合金韧性在整体上均表现为增加趋势，并且时效温度对促进韧性提升更具积极作用，从 630 ℃时 58 J 升至 670 ℃时 64 J，其增幅比率为 0.15 J/℃。此外，随着固溶温度的升高，由于晶粒粗化和硬质 α 相比例降低引起的弱化与固溶强化之间存在相互竞争，合金抗拉强度先降后升，屈服强度逐渐降低，但伸长率变化不明显，这与TA4 合金表现出相似的规律[15]。然而，当时效温度从 630 ℃升至 670 ℃时，屈服强度和抗拉强度均明显下降，其最大降幅分别为 2.98%和 2.41%；冲击吸收能和伸长率则明显上升，其最大增幅分别为 10.34%和 9.38%。这归因于析出相的晶粒粗化对位错运动和微观结构形变的调控作用减弱，引起强度下降和塑性增加[16]。

表3 不同工艺条件下Ti62F合金力学性能对比
Tab.3 Comparison of the mechanical properties of Ti62F alloy under different processing conditions

Number	Impact absorption, KU_2/J	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%
1-1	58	982	1 042	16.0
1-2	56	981	1 033	16.0
1-3	62	973	1 041	16.0
2-1	56	992	1 059	16.5
3-1	58	999	1 061	16.0
3-2	64	970	1 036	17.5
3-3	57	966	1 025	15.5
4-1	71	910	965	15.0
4-2	70	937	996	16.5
4-3	62	952	1 013	17.0

图 4 为 Ti62F 钛合金在不同固溶温度下的冲击断口。由图可知，冲击断裂方式主要以塑性断裂为主，断口表现为“准解理+韧窝”的混合断口，存在韧窝、微孔、孔洞以及撕裂棱等微观特征。其中，在 840 ℃时断口中存在大量由于显微空洞形核长大、连接形成的分布均匀的小韧窝，未见明显撕裂棱，表现出较好的韧性[17]；当温度升至 860 ℃时，由于组织中 α 相含量降低引起韧窝数量明显减少[18]，且晶粒粗大，断口呈现出鹅卵石状形貌，此时脆性断裂倾向增加，宏观上合金表现出较差的冲击性能；随着温度持续升高，在 880 ℃时存在大量细小和少量粗大的韧窝，韧窝周围存在大量撕裂棱，为典型的韧窝聚合型延性断裂特征，韧性明显增加[19]。

图 5 为 Ti62F 钛合金在不同时效温度下的冲击断口。结合图 4c 和 f 可以看出，随着时效温度的升高，解理面逐渐消失，出现大量细小和少量大尺寸韧窝，韧性极佳，且撕裂棱更明显。在较高的时效温度下，Ti62F 钛合金的塑性提高，断裂过程中发生了更多的塑性变形。较大的韧窝通常与更高的延展性和更强的冲击韧性相关，表明高温时效可以显著改善合金的冲击性能和断裂行为。然而，较高的时效温度也意味着次生 α 相的粗化会持续降低合金的强度[16,20]。

拉伸断口微观形貌反映了合金的强塑性，从图 6 中可以发现，不同固溶温度下的拉伸断口均以等轴状韧窝为主要形貌，存在少量撕裂状韧窝，表明拉伸过程中合金受拉伸应力和撕裂应力作用出现了明显的塑性变形。微孔作为导致合金表现出极佳塑性

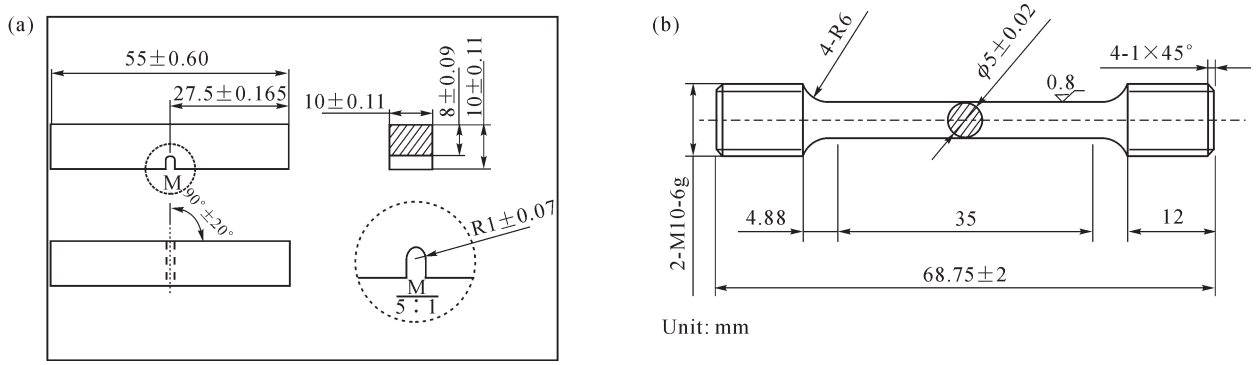


图 2　室温冲击及拉伸试样尺寸：(a) 室温冲击试样；(b) 拉伸试样
Fig.2　Specimen size for room-temperature impact and tensile tests: (a) room-temperature impact sample; (b) tensile sample

中国知网　https://www.cnki.net

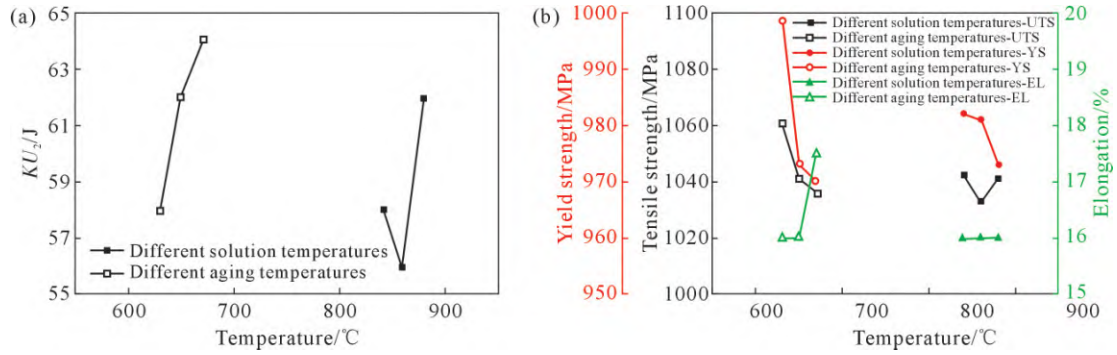


图 3 固溶温度及时效温度对材料性能的影响:(a) **冲击吸收能**;(b) **强度和塑性**

Fig.3 Effects of the solution temperature and aging temperature on the properties of the material: (a) impact absorption energy; (b) strength and plasticity

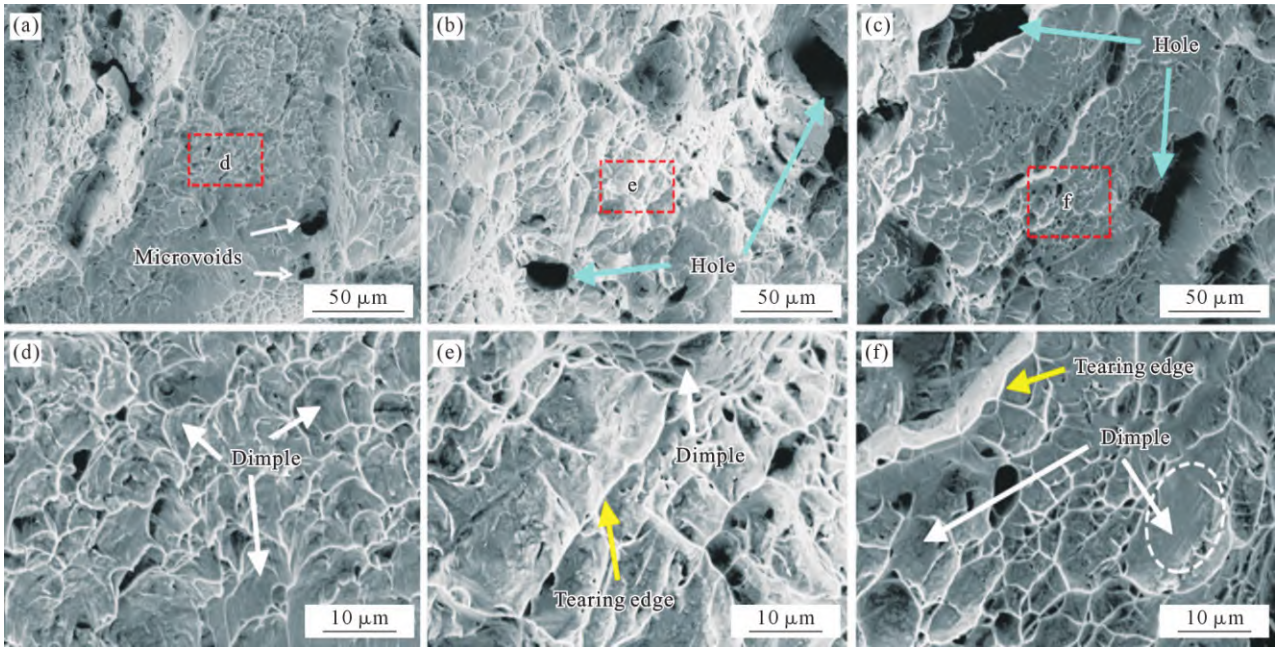


图 4 不同固溶温度下冲击断口形貌:(a, d) 840 ℃×2 h +650 ℃×4 h; (b, e) 860 ℃×2 h +650 ℃×4 h; (c, f) 880 ℃×2 h +650 ℃×4 h

Fig.4 Morphology of impact fracture at different solution temperatures: (a, d) 840 ℃×2 h +650 ℃×4 h; (b, e) 860 ℃×2 h +650 ℃×4 h; (c, f) 880 ℃×2 h +650 ℃×4 h

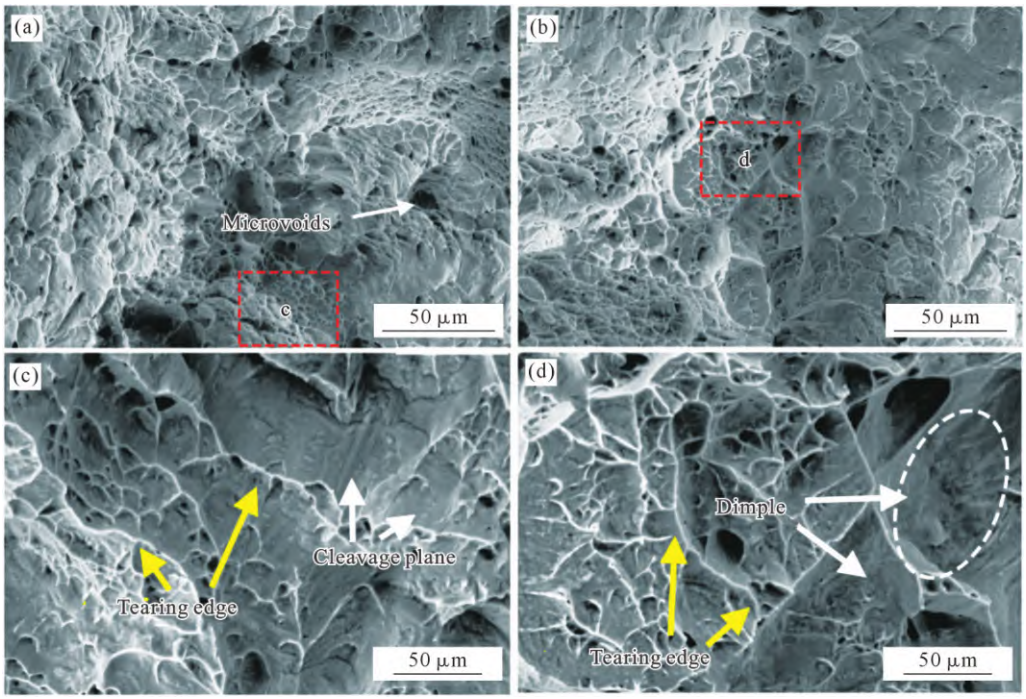


图 5 不同时效温度下冲击断口形貌:(a, c) 880 ℃×2 h +630 ℃×4 h; (b, d) 880 ℃×2 h +670 ℃×4 h

Fig.5 Morphology of impact fracture at different aging temperatures: (a, c) 880 ℃×2 h +630 ℃×4 h; (b, d) 880 ℃×2 h +670 ℃×4 h

中国知网 https://www.cnki.net

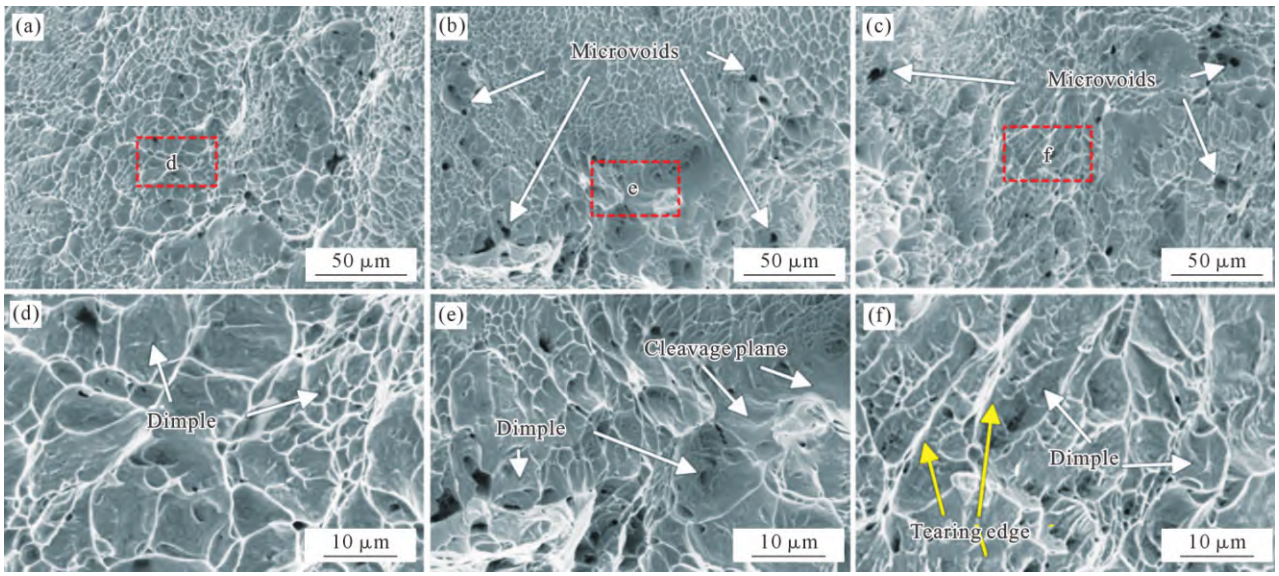


图 6　不同固溶温度下拉伸断口形貌：(a, d) 840 ℃×2 h +650 ℃×4 h; (b, e) 860 ℃×2 h +650 ℃×4 h; (c, f) 880 ℃×2 h +650 ℃×4 h

Fig.6　Morphology of tensile fracture at different solution temperatures: (a, d) 840 ℃×2 h +650 ℃×4 h; (b, e) 860 ℃×2 h +650 ℃×4 h; (c, f) 880 ℃×2 h +650 ℃×4 h

性能的重要原因[16]，随着固溶温度的升高，微孔数量先增后减，因此在 860 ℃时合金伸长率明显更高。然而，固溶温度的持续升高也引发了解理面与撕裂棱等表征脆性断裂特征形貌的显现，从整体上导致合金强度出现一定程度的下降。

图 7 为不同时效温度下合金的拉伸断口。结合图 6c 和 f 可以看出，韧窝随时效温度的升高而逐渐加深，塑性逐渐增加[21]，尤其是在 670 ℃时韧窝尺寸明显增大，其边界也更清晰，存在明显的“大韧窝套小韧窝”形貌。然而，随着时效温度的升高，韧窝数量明显减小，出现撕裂棱以及解理面等形貌，同时由于晶粒粗化造成拉伸过程中孔洞的形成，综合导致合金整体强度持续降低。

2.2　固溶/时效时间对材料性能的影响

固溶/时效时间对冲击吸收能的影响如图 8a 所示，发现当固溶/时效时间增加时均会导致冲击吸收能出现降低，尤其当固溶时间增加时降低程度更显著，从 62 J 下降至 56 J，其降幅比率是时效时间的 10 倍，这是由于初生 α 相在高温固溶时随时间增加而部分长大为块状 α 相[22]，而温和的时效处理过程中初生 α 相的尺寸变化通常很小[5]，粗化的硬质 α 相晶粒使冲击变形时晶界处易形成应力集中，导致

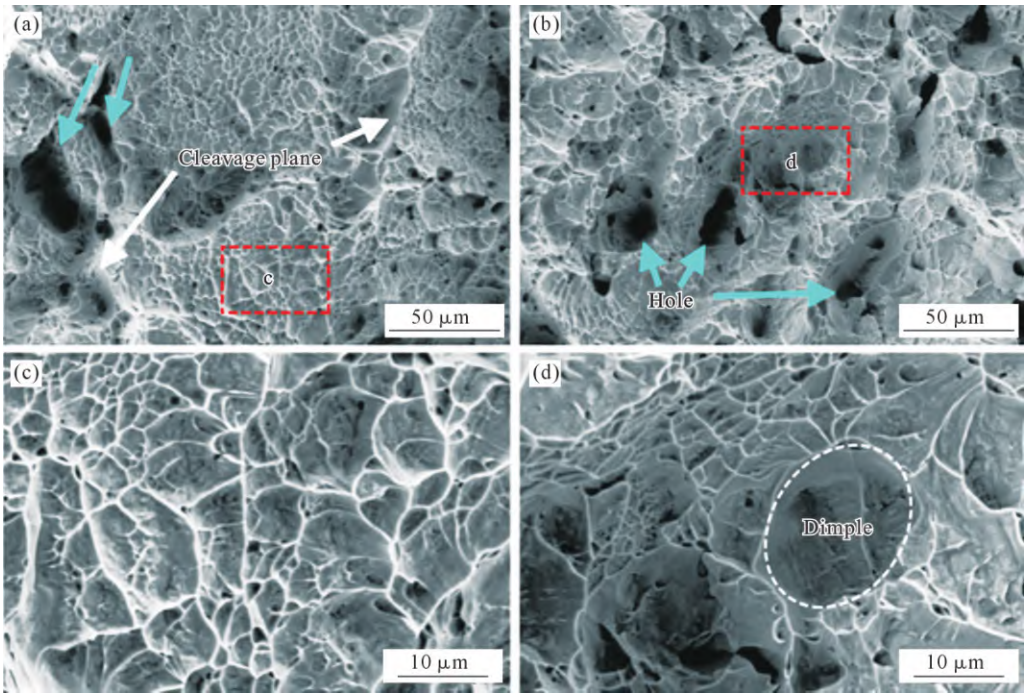


图 7　不同时效温度下拉伸断口形貌：(a, c) 880 ℃×2 h +630 ℃×4 h; (b, d) 880 ℃×2 h +670 ℃×4 h

Fig.7　Morphology of tensile fracture at different aging temperatures: (a, c) 880 ℃×2 h +630 ℃×4 h; (b, d) 880 ℃×2 h +670 ℃×4 h

中国知网　https://www.cnki.net

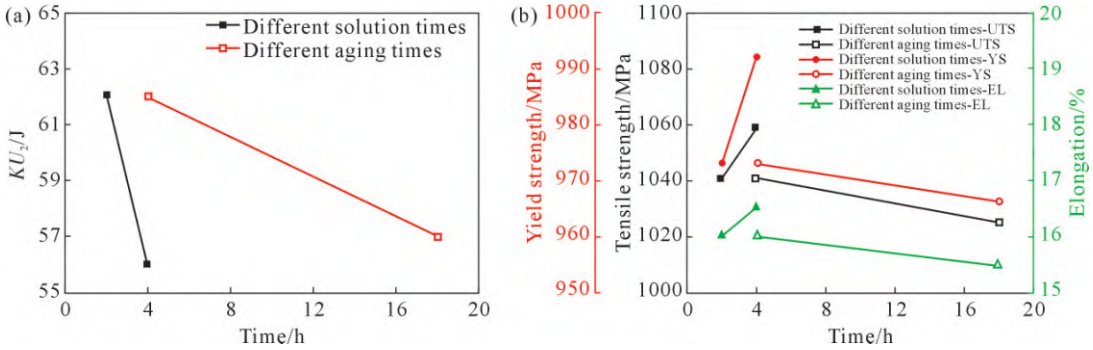


图 8 固溶时间以及时效时间对材料性能的影响：(a) 冲击吸收能；(b) 强度和塑性

Fig.8 Effects of solution time and aging time on the performance of the material: (a) impact absorption energy; (b) strength and plasticity

裂纹沿晶扩展，韧性降低。这表明了固溶时间相较于时效时间对合金韧性的影响更大。

固溶 4 h 后合金韧性虽比 2 h 要低，但从图 8b 中可以发现合金强塑性却明显提高，此时固溶强化占据主导作用，使得合金整体性能优异。对于 Ti62F 钛合金来说，固溶处理时产生的亚稳相将在时效时发生分解，通过析出细小弥散的次生 α 相起到弥散强化的效果[5]，但长时间时效处理意味着次生相的粗化，以致于强化效果被削弱，因此从图 8b 中可以看到经 18 h 后合金的强度和伸长率均呈降低变化。总体而言，相较于固溶 2 h 的高韧性和低强塑性，合金固溶 4 h 后整体性能更好，而时效 18 h 相较于时效 4 h 后的整体性能更差。

图 9 为 Ti62F 钛合金在 880 ℃×4 h 固溶、650 ℃×4 h 时效后的断口形貌，其中图 9b 为图 9a 的局部放大图，图 9d 为图 9c 的局部放大图。对比固溶时间 2 h 的冲击断口形貌(图 4c 和 f)，当固溶时间为 4 h 时(图 9a 和 b)，可以发现细小韧窝在局部区域集中，撕裂棱不明显且出现更多平坦反光的解理面，韧性较低，这与 α 相析出相粗化以及过固溶有关[22]。而相较于图 6c 和 f 中的拉伸断口形貌特征，在图 9c 和 d 中不仅有着较多的微孔，还存在分布更为密集的等轴状韧窝，撕裂棱明显消失。更多清晰可见的韧窝边界说明合金在拉伸载荷下发生了充分、均匀的塑性变形，此时合金表现出更高的塑性。

对于时效时间的影响，图 10 展示了 Ti62F 钛合金在 880 ℃×2 h 固溶、650 ℃×18 h 时效后的断口形貌。可以发现，在图 10a 和 b 中有着与图 4c 和 f 中几乎一样的微观形貌，均存在孔洞以及大量细小和少量粗大的韧窝，但有明显的解理面，说明时效时间增加会促使脆性断裂，韧性有所下降。而对比拉伸断口形貌，即图 10c 和 d 和图 6c 和 f，随着时效时间

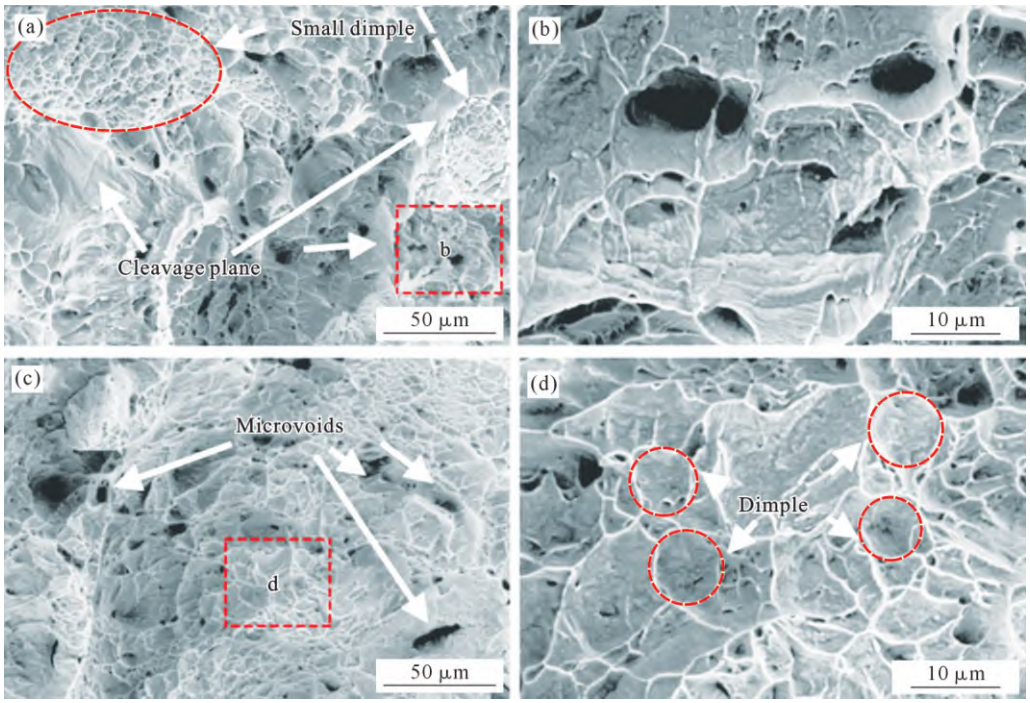


图 9 880 ℃×4 h + 650 ℃×4 h 热处理后的断口形貌：(a, b) 冲击断口；(c, d) 拉伸断口

Fig.9 Morphology of fracture after heat treated at 880 ℃×4 h + 650 ℃×4 h: (a, b) impact fracture; (c, d) tensile fracture

中国知网 https://www.cnki.net

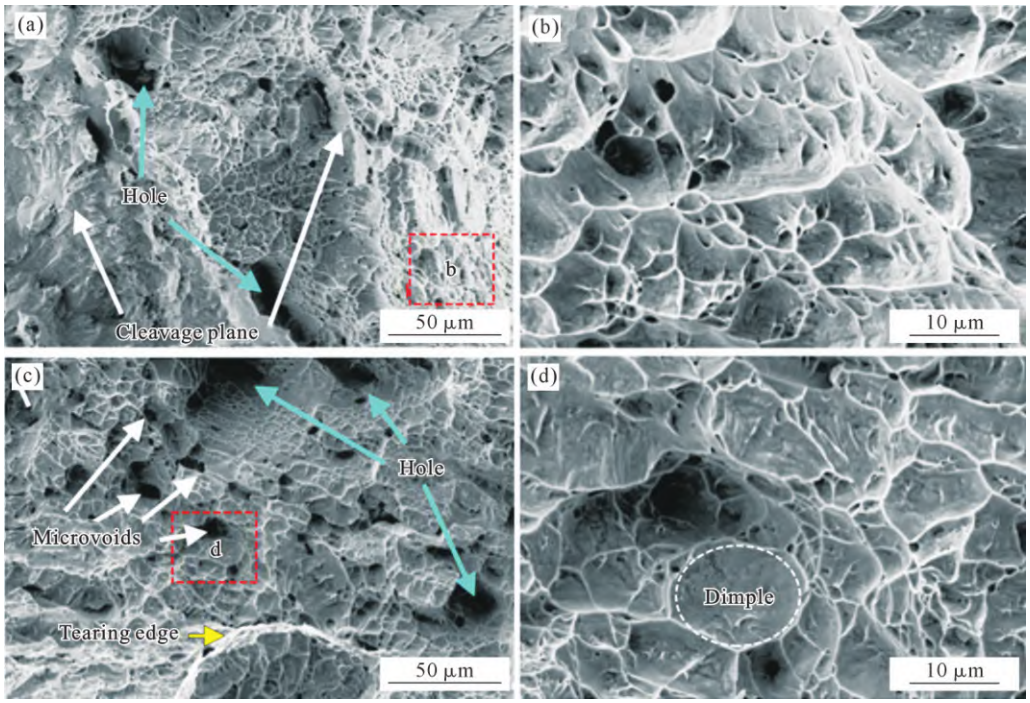


图 10　880 ℃×2 h + 650 ℃×18 h 热处理后的断口形貌：(a, b) 冲击断口；(c, d) 拉伸断口

Fig.10　Morphology of fracture after heat treated at 880 ℃×2 h + 650 ℃×18 h: (a, b) impact fracture; (c, d) tensile fracture

增加，微孔数量显著增多，孔洞出现，撕裂棱聚集明显，同时由于次生相粗化导致拉伸断口中形成了尺寸不一、孤立的大韧窝，此时合金整体的强塑性降低[23]。

2.3　热处理试样尺寸对材料性能的影响

通常情况下，试样在进行热处理过程中，心部与表面的热处理状态因热传导的影响产生差异，从而引起试样组织和性能的不均匀性[11,24-25]。图 11 显示了在 880 ℃×2 h 固溶、650 ℃×4 h 时效条件下，不同尺寸的试样的性能变化趋势，编号从 4-1 到 4-3 的试样尺寸逐渐减小。可以发现的是，随着尺寸减小，试样在冷却过程中内外的温度趋于一致。但试样尺寸越大，心部冷速越小，有充足的时间使冷却析出的片层长大，粗大的片层能有效偏转裂纹，增加裂纹扩展路径，消耗更多冲击能量，因此编号 4-1 的韧性最

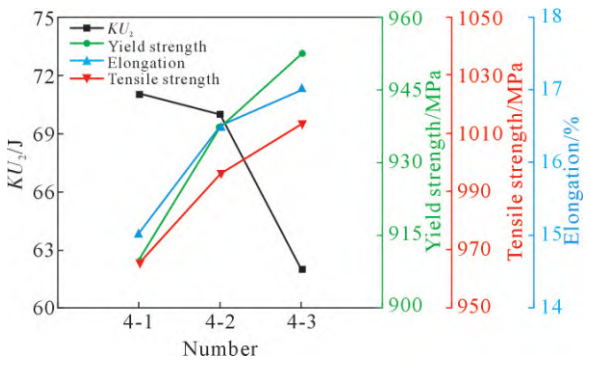


图 11　在 880 ℃×2 h +650 ℃×4 h 条件下试样尺寸对材料性能的影响

Fig.11　Effect of sample size on the properties of the material under the condition of 880 ℃×2 h +650 ℃×4 h

好，编号 4-3 相比 4-1 明显降低，最大降幅 14.52%。此外，屈服强度、抗拉强度以及伸长率均随着试样尺寸减小而增加，这是由于试样尺寸减小有利于其组织的均匀性增加[25]，使得合金在受力时能够更均匀地分散应力，从而提升其屈服强度和抗拉强度。同时，均匀的组织也使得材料在塑性变形过程中能够更协调地变形，表现出较好的伸长率。

图 12 为不同热处理试样尺寸在同一热处理制度下的冲击断口。不同试样的冲击断口中均存在韧窝，呈现典型的韧性断裂形貌特征，其中试样尺寸较大时以密集、较深的韧窝为主，可以看到清晰的韧窝边界，随着尺寸减少，韧窝稀疏、较浅，出现大范围的解理面，韧性逐渐降低。

图 13 展示了不同热处理试样尺寸在同一热处理制度下的拉伸断口。试样尺寸较大意味着冷却时次生相有足够时间粗化，组织细化和固溶强化的效果较低，拉伸时则形成粗大、不均匀的韧窝。可以发现，随着试样尺寸减小，韧窝变得愈发细小、密集，这反映了合金强度的提升，且韧性降低。

3　结论

(1)随着固溶/时效温度升高，冲击断口呈典型韧窝聚合型延性断裂特征，韧性在整体上均表现为增加趋势。其中时效温度对提升韧性更积极，从 630 ℃时 58 J 升至 670 ℃时 64 J，增加了 10.34%，增幅比率为 0.15 J/℃，但屈服强度与抗拉强度分别下降 2.98%和 2.41%。固溶温度升高则使得解理面与撕裂

中国知网　https://www.cnki.net

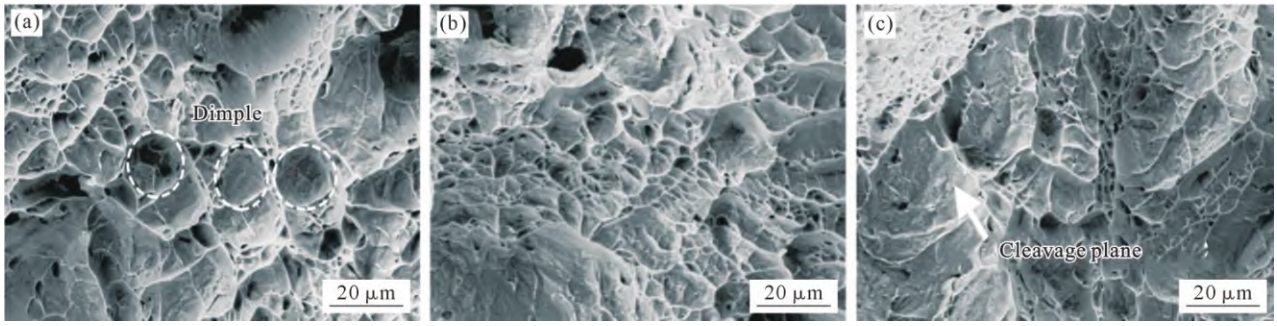


图 12 Ti62F 钛合金不同试样尺寸在 880 ℃×2 h +650 ℃×4 h 后的冲击断口:(a) 4-1; (b) 4-2; (c) 4-3

Fig.12 Impact fracture of Ti62F alloys with different sample sizes after 880 ℃×2 h +650 ℃×4 h: (a) 4-1; (b) 4-2; (c) 4-3

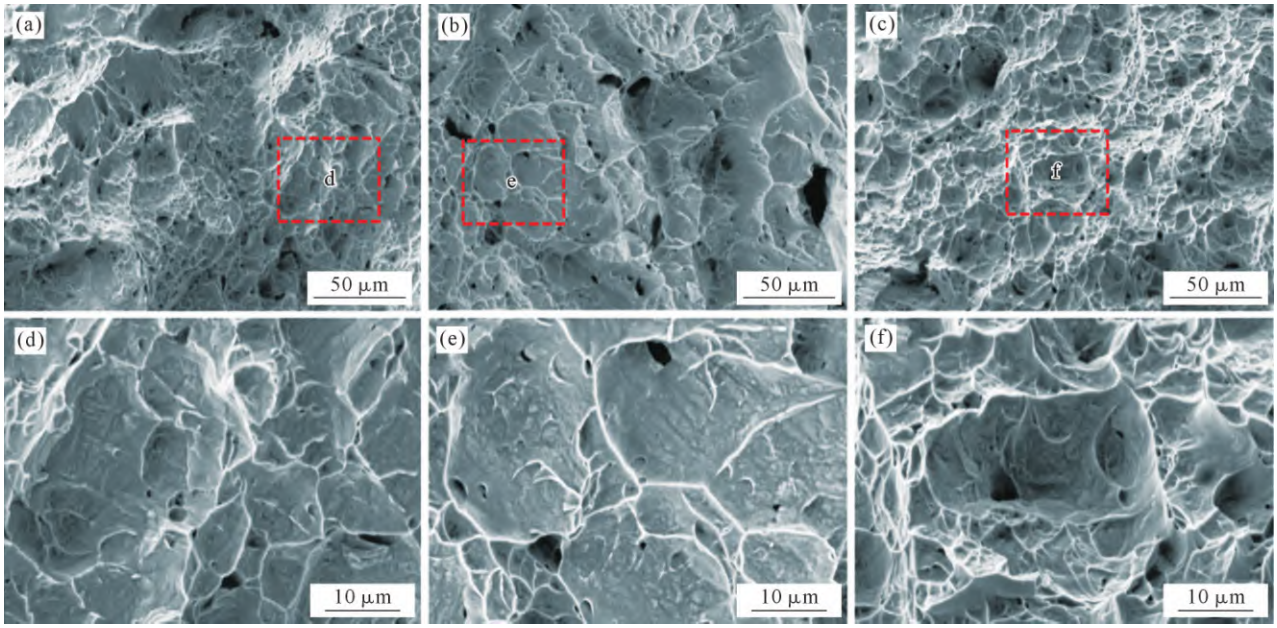


图 13 Ti62F 钛合金不同试样尺寸在 880 ℃×2 h +650 ℃×4 h 后的拉伸断口:(a, d) 4-1; (b, e) 4-2; (c, f) 4-3

Fig.13 Tensile fracture of Ti62F alloy with different sample sizes after 880 ℃×2 h +650 ℃×4 h: (a, d) 4-1; (b, e) 4-2; (c, f) 4-3

棱等脆性特征明显,合金抗拉强度先降后升、屈服强度降低,伸长率变化不明显。

(2)随着固溶/时效时间增加,合金韧性均下降,尤其当固溶时间增加时韧性降低程度更显著,其降幅比率是时效时间的 10 倍。当固溶时间增加,合金脆性特征不明显,与固溶 2 h 后高韧性、低强塑性的状态相比,4 h 固溶后其强度和伸长率均明显提升,整体性能更优;相较于时效 4 h,时效 18 h 后合金断口中形成尺寸不一、孤立的大韧窝,但撕裂棱明显,其强度和伸长率均呈降低变化。

(3)随着试样尺寸的减小,冲击断口中解理面等脆性特征明显增多,韧性降低,其最大降幅为14.52%;同时,在拉伸断口中则布满了细小的韧窝,且组织趋于均匀化,合金屈服强度、抗拉强度以及伸长率均呈增加变化。

(4)由于缺乏系统的显微组织表征,尚且未能建立明确的工艺–组织–性能完整构效关系,而提供的热处理工艺参数对 Ti62F 合金性能影响的规律以及断口特征的分析,为后续深入研究 Ti62F 合金的性能优化提供重要的参考依据。

参考文献:

[1] LI W Y, CHEN Z Y, LIU J R, ZHU S X, SUI G X, WANG Q J. Rolling texture and its effect on tensile property of a near-α titanium alloy Ti60 plate[J] Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(5): 790-798.

[2] 王若飞,傅开,张欢,张晓龙,段晓辉,李巍,王永梅. 固溶时效对 Ti62A 钛合金准 β 锻后组织性能的影响[J]. 锻造与冲压,2024 (15): 68-72.

[3] SANTHOSH R, GEETHA M, NAGESWARA RAO M. Recent developments in heat treatment of beta titanium alloys for aerospace applications [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2017, 70(7): 1681-1688.

[4] DAYNES S, LIFTON J, LU W F, WEI J, FEIH S. Fracture toughness characteristics of additively manufactured Ti-6Al-4V lattices [J]. European Journal of Mechanics, A/Solids, 2021, 86: 104170.

[5] 米磊,张晨辉,何忝锜,和蓉,樊江昆,薛祥义. TC21 钛合金固溶时效处理对合金强韧化性能的影响[J]. 铸造技术,2023, 44(10): 929-934.

MI L, ZHANG C H, HE T Q, HE R, FAN J K, XUE X Y. Effect of solid solution and aging treatment on the strength and

中国知网 https://www.cnki.net

toughness of TC21 titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2023, 44(10): 929-934.

[6] GONG Z, DONG S L, CHEN Z Y, QU Y D, CHEN R R, LI G L, ZHANG W, NA R Y. Effect of solution-aging treatment on microstructure and high temperature fracture toughness of Ti60 alloy rolled sheet[J]. Materials Characterization, 2025, 221: 114771.

[7] CHANDRAVANSHI V K, BHATTACHARJEE A, KAMAT S V, NANDY T K. Influence of thermomechanical processing and heat treatments on microstructure, tensile properties and fracture toughness of Ti-1100-0.1B alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 589: 336-345.

[8] SEN I, RAMAMURTY U. Elastic modulus of Ti-6Al-4V-*x*B alloys with B up to 0.55 wt.%[J]. Scripta Materialia, 2010, 62(1): 37-40.

[9] KANG X, PU Z N, ZHENG M M, WU J P, XIANG J, WU F F, LIU C Z. Optimization of microstructure and high-temperature mechanical properties of Ti4822/Ti_2AlC composites through multiple solution-aging treatments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1008: 176862.

[10] **李强，范浩南，谭长生，景建元，梁志，朱露，张国君. 固溶时效处理对** TC4 **钛合金头盔挂片组织性能的影响**[J]. **兵器材料科学与工程**，2025, 48(5): 87-92, 113.
LI Q, FAN H N, TAN C S, JING J Y, LIANG Z, ZHU L, ZHANG G J. Effect of solution aging treatment on microstructure and properties of TC4 helmet hanger[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2025, 48(5): 87-92, 113.

[11] **李滋亮，刘剑桥，任森栋，李索，邓德安. 尺寸因素对** SUS304 **不锈钢残余应力和焊接变形的影响**[J]. **机械工程学报**，2018, 54(10): 59-67.
LI Z L, LIU J Q, REN S D, LI S, DENG D A. Influences of dimension factors on residual stress and welding distortion in SUS304 stainless steel butt joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 59-67.

[12] **张赛军，龚小龙，李健强，周驰，袁宁. 尺寸效应下的紫铜薄板力学性能试验研究**[J]. **华南理工大学学报(自然科学版)**，2016, 44(10): 8-14.
ZHANG S J, GONG X L, LI J Q, ZHOU C, YUAN N. Experimental investigation into mechanical properties of copper sheet with size effects[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition) 2016, 44(10): 8-14.

[13] **全国钢标准化技术委员会. 金属材料夏比摆锤冲击试验方法：**GB/T 229-2020[S]. **北京：中国标准出版社**，2020.
National Steel Standardization Technical Committee. Metallic materials-Charpy pendulum impact test method: GB/T 229-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

[14] **全国钢标准化技术委员会. 金属材料 拉伸试验 第** 1 **部分：室温试验方法：**GB/T 228.1-2021[S]. **北京：中国标准出版社**，2021.
National Steel Standardization Technical Committee. Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

[15] **沈济民，徐志成. 固溶时效热处理对医疗器械用** TA4 **合金组织与性能的影响**[J]. **铸造技术**，2016, 37(3): 441-444.
SHEN J M, XU Z C. Effect of solid solution & aging heat treatment on microstructure and properties of titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2016, 37(3): 441-444.

[16] LI G C, CHENG X, WANG H M. Microstructure and property of laser additive manufactured alloy Ti-6Al-2V-1.5Mo-0.5Zr-0.3Si after aged at different temperatures[J]. Rare Metals, 2024, 43, 2275-2281.

[17] **刘畅，董月成，方志刚，王莹，郭艳华，常辉，周廉. 新型高强韧** Ti-Al-Fe-B **系钛合金组织和性能研究**[J]. **稀有金属材料与工程**，2020, 49(5): 1607-1613.
LIU C, DONG Y C, FANG Z G, WANG Y, GUO Y H, CHANG H, ZHOU L. Microstructure evolution and mechanical properties of new Ti-Al-Fe-B titanium alloy with high strength and ductility[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(5): 1607-1613.

[18] HUANG Y, GAO H, NIX W D, HUTCHINSON J W. Mechanism-based strain gradient plasticity - II. Analysis[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2000, 48(1): 99-128.

[19] **胡蕾，夏冬，郑亚星，王烨. 退火温度对** TA5 **钛合金板冲击性能和冲击断口形貌的影响**[J]. **热处理**，2025, 40(2): 34-37.
HU L, XIA D, ZHENG Y X, WANG Y. Effect of annealing temperatures on impact property and morphology of impact fracture for TA5 titanium alloy plate[J]. Heat Treatment, 2025, 40(2): 34-37.

[20] **刘娣，刘小花，张晨辉，张利军，周中波. 时效工艺对** TB3 **钛合金丝材组织及力学性能的影响**[J]. **铸造技术**，2017, 38(11): 2616-2618.
LIU D, LIU X H, ZHANG C H, ZHANG L J, ZHOU Z B. Effect of aging process on microstructure and mechanical properties of TB3 titanium alloy wire[J]. Foundry Technology, 2017, 38(11): 2616-2618.

[21] **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研究**[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.

[22] **朱宁远，陈世豪，廖强，陈秋明，赖文坤，左寿彬. 固溶时效处理对** TC11 **钛合金显微组织和硬度的影响**[J]. **金属热处理**，2022, 47(12): 62-66.
ZHU N Y, CHEN S H, LIAO Q, CHEN Q M, LAI W K, ZUO S B. Effect of solution treatment and aging on microstructure and hardness of TC11 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(12): 62-66.

[23] **贾蔚菊，曾卫东，张尧武，周义刚. 热处理对** Ti60 **合金组织及性能的影响**[J]. **中国有色金属学报**，2010, 20(11): 2136-2141.
JIA W J, ZENG W D, ZHANG X W, ZHOU Y G. Effects of heat treatment on microstructure and properties of Ti60 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(11): 2136-2141.

[24] **侯娟，代斌斌，闵师领，刘慧，蒋梦蕾，杨帆. 尺寸设计对选区激光熔化** 304L **不锈钢显微组织与性能的影响**[J]. **金属学报**，2023, 59(5): 623-635.
HOU J, DAI B B, MIN S L, LIU H, JIANG M L, YANG F. Influence of size design on microstructure and properties of 304L stainless steel by selective laser melting[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(5): 623-635.

[25] **王思倩，张忠和，王飞宇，邹鹏，于广义，刘业超. 尺寸因素对**

中国知网 https://www.cnki.net

35CrMoV 钢力学性能影响的试验研究[J]. 热处理技术与装备, 2019, 40(2): 58-61.

WANG S Q, ZHANG Z H, WANG F Y, ZOU P, YU G Y, LIU Y C. Study on influence of dimension factor on the mechanical properties of 35CrMoV steel[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2019, 40(2): 58-61.

(责任编辑:杨浩雪)

中国知网 https://www.cnki.net