

变形温度对异种钛合金电子束焊件 显微组织与力学性能的影响

谭立军¹, 姚泽坤¹, 秦 春¹, 郭鸿镇¹, 张建伟²

(1. 西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072;
2. 北京钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要: 研究等温和近等温锻造变形温度对电子束焊接的异种合金(Ti_2AlNb 金属间化合物与 TC11 两相钛合金)焊接界面的显微组织与接头拉伸性能的影响。采用 OM、SEM 对焊缝区组织及拉伸试样断口进行观察, 并对接头的拉伸性能进行研究。结果表明: 电子束焊接的 $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 异种合金焊接界面的显微组织和接头的拉伸性能对变形温度敏感, 在 950 °C 变形后, 位于焊缝一侧的 Ti_2AlNb 合金中 O 相的含量大大增加, 而位于焊缝另一侧的 TC11 合金为等轴 α 相和条状 α 相的混合组织, 但焊缝上仍可见到断续相连的晶界 α/α_2 相; 在 1 010 °C 变形后, TC11 合金具有魏氏体组织特征, 这时焊缝上的晶界 α/α_2 相完全断开; 经 950 °C 变形的试样在室温拉伸时, 在 Ti_2AlNb 合金中发生脆性断裂, 这与 O 相不易协调变形有关, 经 500 °C 高温拉伸时, 合金表现出较高的强度和较好的塑性, 这是由于焊接界面的 α/α_2 相颗粒较小, 断裂位置转移到 TC11 钛合金上所致; 经 1 010 °C 变形的试样表现出一定的强度, 但是塑性严重下降, 这与 TC11 钛合金的魏氏组织特征有关; 因此, 异种合金进行等温变形时, 须严格控制变形温度。

关键词: Ti_2AlNb 合金; 电子束焊接; 界面; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.4

文献标志码: A

Effects of deformation temperature on microstructure and mechanical properties of electron beam welded joint of dissimilar titanium alloys

TAN Li-jun¹, YAO Ze-kun¹, QIN Chun¹, GUO Hong-zhen¹, ZHANG Jian-wei²

(1. College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The effects of deformation temperature on the microstructure of welded interface and mechanical properties of joint by electron beam welded (EBW) dissimilar alloys were investigated. The microstructures of the weld and fractographs of samples were examined by OM and SEM. The results show that the microstructures of the welded interface are sensitive to the deformation temperature. After deformation at 950 °C, the O phase content increases significantly in the Ti_2AlNb alloy at one side of the weld, the microstructure consists of spherical and strip α phase in the TC11 alloy at the other side of the weld, but the grain boundaries α/α_2 phase present discontinuously at the weld. After deformation at 1 010 °C, the microstructure of the TC11 alloy shows Widmanstatten structure, however the grain boundaries α/α_2 phases are cut completely. For the samples deformed at 950 °C, during tensile tests at room-temperature, the brittle fracture takes place at Ti_2AlNb alloy, which is related with the inhomogeneous deformation of the O phase. The higher strength and better ductility is because α/α_2 phases are fine, the fracture transfers into TC11 titanium alloy in the tensile test at 500 °C. For the samples deformed at 1 010 °C, the ductility drop is related with Widmanstatten structure of TC11 alloy. The deformation temperature should be strictly controlled for the isothermal deformation of dissimilar materials joints.

Key words: Ti_2AlNb alloy; electron beam welding (EBW); interface; microstructure; mechanical property

近年来, Ti_2AlNb 合金由于其良好的综合力学性能引起越来越广泛的重视, 在航空工业中显示出极大的应用前景^[1]。然而, Ti_2AlNb 合金制品生产成本低, 且加工条件苛刻^[2]。如果将 Ti_2AlNb 合金与常规钛合金进行焊接制备某些构件, 不仅能降低生产成本, 而且能发挥两种合金各自性能方面的优势^[3]。

真空电子束焊接作为熔焊工艺中的一种, 由于具有高密度、无氧化等优点, 特别适合于钛合金的连接^[4-6]。国内外对钛合金及钛基金属间化合物的电子束焊接进行一定的研究, 结果表明, 通过电子束焊接工艺制备的异种钛合金焊件, 焊接接头完整, 但是焊缝组织普遍表现出较高的脆性^[7-12]。

本文作者在前期研究中发现^[13], 电子束焊接的 $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 异种钛合金焊接接头显微组织不稳定, TC11 合金的侧热影响区为针状马氏体组织, Ti_2AlNb 的侧热影响区为 $B2$ 单相组织, 焊缝熔化区中颗粒状 O 相集中分布在晶界周围, 且焊缝组织晶粒粗大, 导致焊件冲击时发生沿晶解理断裂。因此, 对焊件进行等温热变形, 破碎粗大的晶界组织, 并稳定焊接接头显微组织, 有望改善焊件的综合力学性能。

本文作者对电子束焊接的 $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 异种钛合金焊件进行等温热变形。由于钛合金的显微组织和相应的力学性能对热变形温度十分敏感^[13], 且这两种母材合金有其各自的热变形温度区间, 因此, 旨在寻找两种合金的共同热变形温度区间, 并阐明不同热变形温度对该焊件显微组织与力学性能的影响, 寻找进一步提高焊接接头力学性能的途径, 为其实际应用提供工艺参考和理论依据。

1 实验

实验用 Ti_2AlNb 合金名义成分为 Ti-22Al-25Nb (摩尔分数, %), 为提高合金的焊接性能, 焊前在 (α_2+B2+O) 三相区进行 1 h 的固溶处理; TC11 合金焊前在 950 °C 进行 1 h 的固溶处理。两种合金试样尺寸均为 25 mm×25 mm×37 mm, 其中 25 mm×25 mm 表面为待焊界面, 焊前均用丙酮溶液清洗干净。焊接是在 KS55-G150 型真空电子束焊接机上完成的, 采用的焊接工艺参数如下: 加速电压 150 kV, 焊接电流 28 mA, 聚焦电流 2 170 mA, 焊接速率 8 mm/s。焊接完成后, 焊缝熔化区可以观察到大量 O 相颗粒, 基体为 $B2$ 相(见图 1)。

为了研究变形温度对 $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 异种合金焊接接头显微组织与接头拉伸性能的影响, 在

THP10-630A 可控应变速率液压机上分别进行 950、980 及 1 010 °C 等温和近等温压缩变形(模具温度为 950 °C), 采用的应变速率均为 $5.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、变形程度均为 40%, 变形前加热保温时间均为 20 min。变形完成后进行(950 °C, 1 h, AC)+(600 °C, 4 h, AC)的固溶及时效热处理。

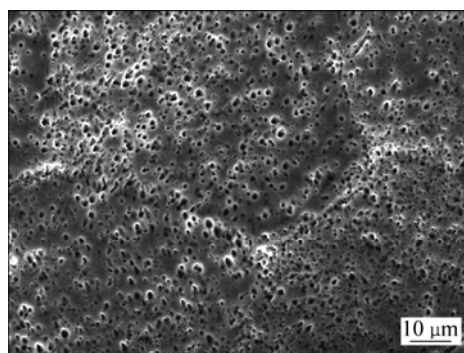


图 1 $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 焊件焊缝熔化区的 SEM 像

Fig.1 SEM image of as-welded fusion zone of $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ joint

为考察接头的结合强度, 对在各种温度下等温或近等温变形并按相同规范热处理后的 $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 双合金试样进行室温拉伸与高温拉伸(500 °C), 拉伸实验按照 HB5143-1996 标准执行。采用光学电镜(OM)进行显微组织观察, 采用扫描电镜(SEM)进行断口形貌分析。

2 结果与分析

2.1 界面显微组织随变形温度的变化规律

图 2~4 所示为 $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 焊件在不同温度变形并经过相同热处理后的显微组织。由图 2 可以看出, 在 950 °C 变形时, TC11 合金侧热影响区出现大量等轴 α 相, 焊缝组织晶界上的条状 O 相被破碎, 界内为细小的颗粒状 O 相, Ti_2AlNb 合金的显微组织为颗粒状 O 相与基体 $B2$ 相组成的等轴组织。由图 3 可看出, 在 980 °C 变形时, TC11 合金侧热影响区主要由条状 α 相组成, 焊缝组织为晶界上的短条状 O 相和晶内颗粒状 O 相分布在 $B2$ 相基体上, 母材 Ti_2AlNb 合金显微组织中既有拉长的条状 O 相, 又有颗粒状 O 相, 且基体 $B2$ 相的含量相对于 950 °C 变形时所得到的显微组织中 $B2$ 相含量有所增加。由图 4 可看出, 在 1 010 °C 变形时, 母材 TC11 合金完全魏氏体化, 变形后粗大的晶界条状 α 相仍然得以保留, 晶内条状 α 相平行排

列, 焊缝组织中出现大量的 α_2 相, 少量晶界 α 相得以保留, 母材 Ti_2AlNb 合金晶界上析出大量颗粒状 α_2 相^[14]。

2.2 接头的拉伸性能测试

表 1 所列为不同温度下变形并经过相同热处理后焊件的室温及高温拉伸力学性能。需要说明的是, 950 °C 下变形的试样进行室温拉伸时在 Ti_2AlNb 合金侧基体上发生脆性断裂; 其它试样拉伸时均断裂在 TC11 合金基体上。由表 1 可见, $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 焊件的室温拉伸强度对其显微组织变化敏感, 在较低温度下变形后, 焊件拉伸时发生脆性断裂, 随着变形温度的提高, 焊件逐渐表现出较高的强度和较好的塑性, 进一步提高变形温度时, 焊件强度变化较小, 但是塑性明显下

降。焊件的高温力学性能则表现为: 热变形温度越低, 焊件强度越高, 塑性越好。且可以明显看出, 在 950 °C 下变形和在 980 °C 下变形时, 变形后的试样力学性能差别不大; 而在 1 010 °C 下变形后的试样力学性能明显下降。

2.3 焊件的断口形貌分析

图 5 所示为不同温度下变形并经过相同热处理后 $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 焊件的室温拉伸断口形貌。由图 5 (a) 可见, 在 950 °C 下变形的焊件拉伸断口为典型的脆性断口, 断口表面分布着较浅的解理台阶。在 980 °C 变形后的焊件拉伸时在 TC11 合金基体上发生断裂, 断口为典型的韧性断口, 其表面分布着大量的等轴韧窝, 说明焊接接头强度较高, 且焊件整体塑性较好 (见图

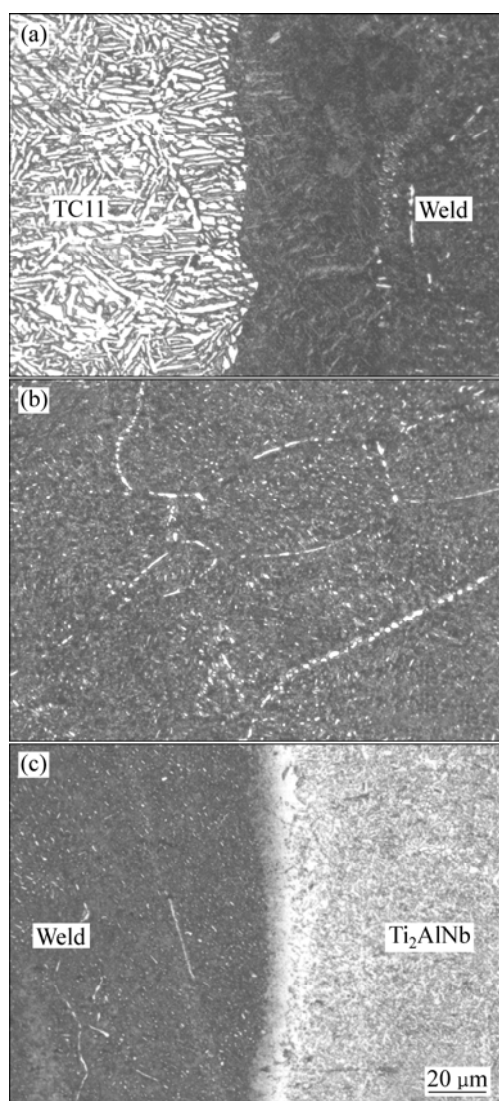


图 2 950 °C 下变形并热处理后焊接接头部位的显微组织
Fig.2 Microstructures of joint after hot deformation at 950 °C followed by heat treatment: (a) Interface of TC11 alloy and weld; (b) Weld; (c) Interface of Ti_2AlNb alloy and weld

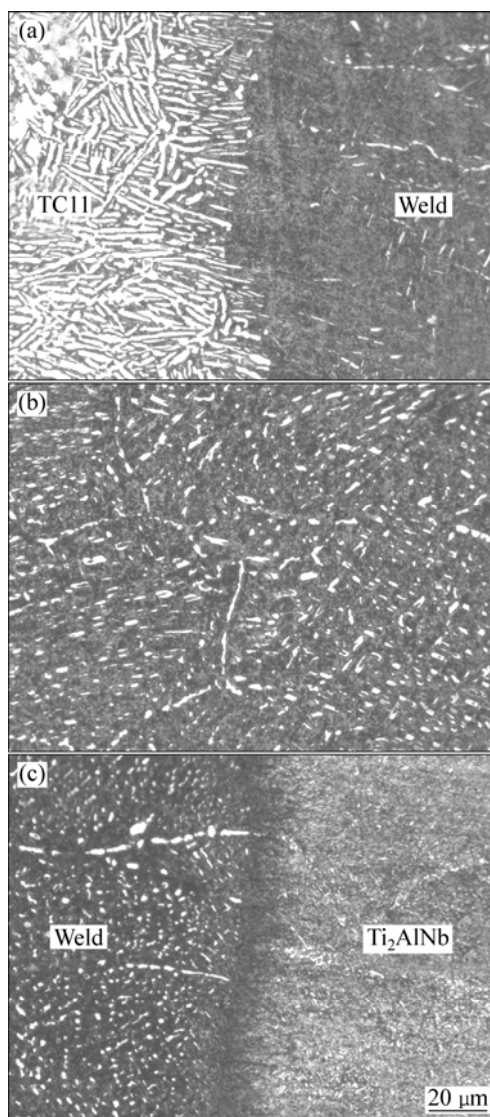


图 3 980 °C 下变形并热处理后焊接接头的显微组织
Fig.3 Microstructures of joint after hot deformation at 980 °C followed by heat treatment: (a) Interface of TC11 alloy and weld; (b) Weld; (c) Interface of Ti_2AlNb alloy and weld

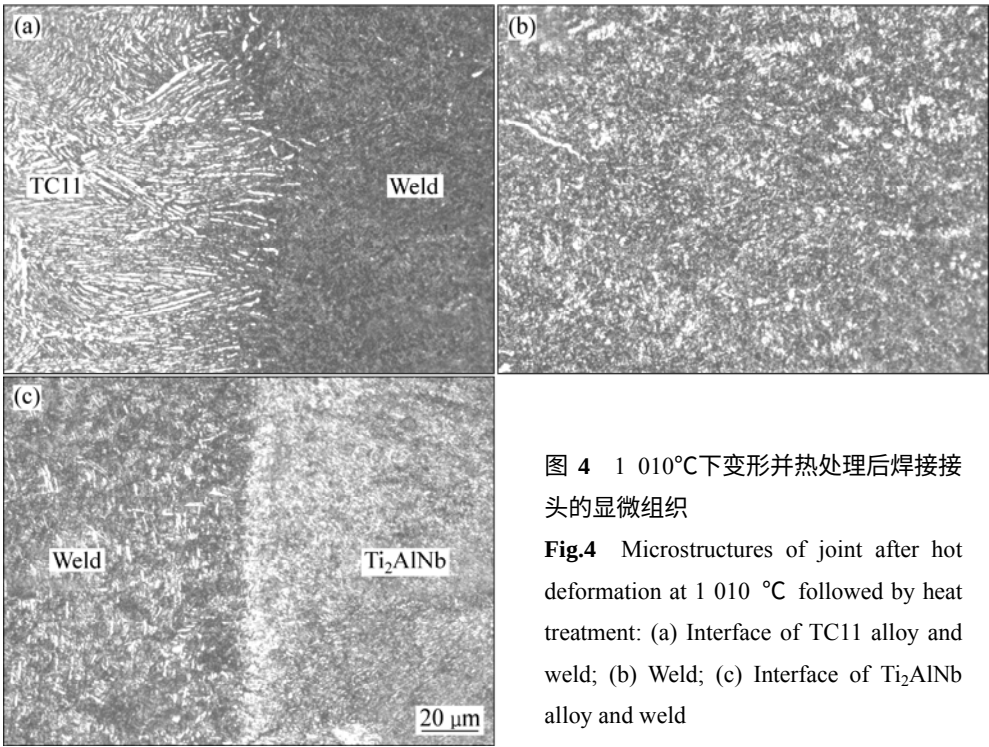


图 4 1 010℃下变形并热处理后焊接接头的显微组织

Fig.4 Microstructures of joint after hot deformation at 1 010 °C followed by heat treatment: (a) Interface of TC11 alloy and weld; (b) Weld; (c) Interface of Ti₂AlNb alloy and weld

表 1 不同热变形温度下 Ti₂AlNb/TC11 异种钛合金焊件的室温及高温拉伸性能

Table 1 Room-temperature and high-temperature tensile properties of joints after hot deformation at different temperatures					
Tensile test temperature	Deformation temperature/°C	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Area reduction/%
Room temperature	950	600	—	—	—
	980	1 140	1 100	11.5	38.5
	1010	1 070	1 040	8.0	19.0
500 °C	950	815	665	14.0	51.0
	980	795	650	12.0	48.0
	1 010	710	625	11.5	36.0

5(b))。在 1 010 °C 变形后, 焊件拉伸断口为典型的韧脆混合断口, 其表面既有大量的非等轴韧窝, 又有少量的解理台阶(见图 5(c))。以上断口形貌说明, 随着热变形温度的升高, 焊件塑性变高, 但是进一步提高变形温度时, 焊件塑性会有所降低。

3 讨论

本文作者研究的变形温度对电子束焊接的 Ti₂AlNb/TC11 异种合金焊件结合界面显微组织与接头拉伸性能的影响表明, 在相同规范的热处理制度下, Ti₂AlNb/TC11 异种合金焊件焊区各部位的显微组织

对变形温度非常敏感。在 950 °C 变形时, 焊件各部位(不管是焊缝还是两侧不同合金基体)储存的畸变能高, 对于 TC11 合金, 此时处于再结晶高峰, 成核址较多, 本应得到细小的 α 相颗粒, 但由于变形量仍不足以完全破碎那些较粗大的 α 条, 故得到的是由条状 α 和等轴 α 组成的混合组织; Ti₂AlNb 合金, 处于再结晶温度的下限, 再结晶成核有限, 已成核的颗粒也不会长大, 虽然 O 相粒子细小, 但由于受变形量的限制, 原始的 β 晶界仍隐约可见, 又由于变形温度和热处理温度均处于 Ti₂AlNb 合金的($O+B2$)两相区, 导致 Ti₂AlNb 合金中 O 相含量增加, 室温拉伸时, O 相之间变形不易协调, 裂纹极易在 $O/B2$ 相界面上形成并高速扩展, 使合金室温拉伸时易发生解理断裂^[15], 这

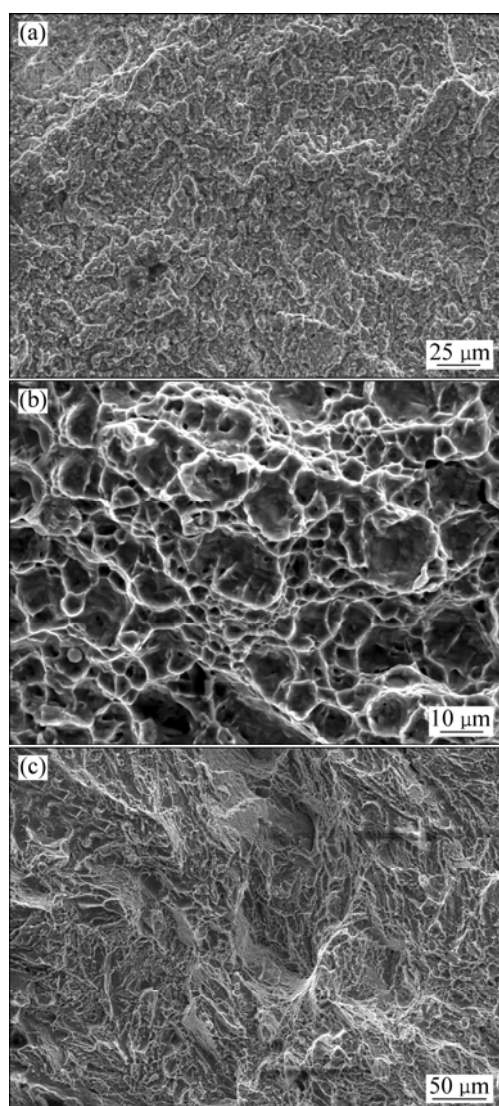


图 5 不同热变形温度下 $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 异种钛合金焊件室温拉伸断口形貌

Fig.5 Fractographs of room-temperature tensile specimens after hot deformation at different temperatures: (a) 950 °C; (b) 980 °C; (c) 1010 °C

也是室温拉伸时,断裂发身在这一侧的原因。高温拉伸时, Ti_2AlNb 合金中 α 相和基体 $B2$ 相均有所“软化”,位错也较易开动并进行滑移,裂纹不易萌生,但在500 °C下,TC11合金的强度远不及 Ti_2AlNb 合金的,故必然在此处发生断裂,此时的拉伸强度和塑性反映的是TC11合金的强度和塑性。 α 相和基体 $B2$ 相均有所“软化”,位错也较易开动并进行滑移,裂纹不易萌生,焊件在TC11合金基体上发生断裂,并表现出较高的强度和较好的塑性,这是由于TC11合金母材在该温度变形后显微组织最为细小。

随着热变形温度的提高(980 °C),母材TC11合金

中部分等轴 α 相在加热及保温过程中转变为 β 相,部分在变形过程中随金属流动变成条状,形成纤维组织。随后进行热处理时,这种纤维组织具有强烈的组织遗传性,只有少数具有极高位错密度的部位如三角晶界能得到再结晶等轴 α 相,而其它部位主要为条状 α 相,因此,条状 α 相数量增加。在该变形温度下, Ti_2AlNb 合金中塑性相 $B2$ 含量也相应增加,焊缝组织中晶界 α 相有所破碎,再结晶所需的能量也得到满足,大部分原始 β 晶界得以消除,焊件整体表现出较好的室温拉伸和高温拉伸综合力学性能。当变形温度处于 Ti_2AlNb 合金的(α_2+B2)两相区(1010 °C)时,TC11合金已转变成魏氏体组织,在变形及热处理期间,虽然晶内 α 条受到变形晶粒的挤压,发生一定程度的弯折,但仍保留魏氏体组织特征,这种组织使合金强度下降不多,但是导致塑性严重下降。

4 结论

1) 热变形温度对电子束焊接的 $\text{Ti}_2\text{AlNb}/\text{TC11}$ 异种钛合金焊件显微组织和力学性能有着重要影响:在950 °C变形后,母材TC11合金侧显微组织为等轴组织,母材 Ti_2AlNb 合金中塑性 $B2$ 相含量较少,室温拉伸时 α 相之间变形不容易协调,这样可能导致焊件发生脆性断裂。

2) 在1010 °C变形后, Ti_2AlNb 合金在晶界上析出大量 α_2 相,TC11合金为魏氏体组织,焊件表现出较高的强度,但是塑性较差,在TC11合金侧以混合机制发生断裂。

3) 当在980 °C进行变形后, Ti_2AlNb 合金中软硬相比比例适中,显微组织均匀且细小,TC11合金为双态组织,焊件表现出良好的室温及高温拉伸力学性能。

4) 对异种钛合金焊件进行等温热变形时,变形温度应严格控制在两种母材合金的热变形温度交叉区间内进行。

REFERENCES

- [1] 李世琼, 张建伟, 程云君, 梁晓波. Ti_3Al 和 Ti_2AlNb 基金属化合物结构材料研究现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(增刊 3): 104-109.
LI Shi-qiong, ZHANG Jian-wei, CHENG Yun-jun, LIANG Xiao-bo. Current status on development of Ti_3Al and Ti_2AlNb intermetallic structural materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(Supplement 3): 104-109.
- [2] NANDY T K, BANERJEE D. Deformation mechanisms in the α

- phase[J]. Intermetallics, 2000, 8(9/11): 1269–1282.
- [3] SUN Z, KARPPI R. The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 59(3): 257–267.
- [4] THREADGILL P L. The prospects for joining titanium aluminides[J]. Mater Sci Eng A, 1995, 192/193(Part 2): 640–646.
- [5] 吴会强, 冯吉才, 何景山, 张秉刚. 焊接工艺对 Ti_3Al 高铌合金电子束焊接接头显微组织和显微硬度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1313–1317.
- WU Hui-qiang, FENG Ji-cai, HE Jing-shan, ZHANG Bing-gang. Microstructure evolution of high Nb containing Ti_3Al based alloy electron beam welding joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(8): 1313–1317.
- [6] 胡美娟, 刘金合. 12 mm 厚钛合金平板电子束焊接的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(10): 1622–1626.
- HU Mei-juan, LIU Jin-he. Numerical simulation for electron beam welding of 12 mm-thickness titanium alloy plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(10): 1622–1626.
- [7] 姚泽坤, 张梅琳, 梁新民, 郭鸿镇. 热力耦合作用对 TAC-1B 和 TC11 合金焊接界面硬度和显微组织的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(2): 125–128.
- YAO Ze-kun, ZHANG Mei-lin, LIANG Xin-min, GUO Hong-zhen. Influence of heat and force coupling action on microhardness and microstructures at weld seam of TAC-1B-TC11 alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(2): 125–128.
- [8] 姚泽坤, 梁新民, 郭鸿镇, 陈绍楷, 张会. 热力因素对合金元素在 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC4 焊接界面上扩散规律的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 36(6): 907–911.
- YAO Ze-kun, LIANG Xin-min, GUO Hong-zhen, CHEN Shao-kai, ZHANG Hui. Effect of hot and force factors on the microhardness and elements diffusion at Ti_3Al /TC4 seam[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 36(6): 907–911.
- [9] ZHANG Hong-tao, HE Peng, FENG Ji-cai, WU Hui-qiang. Interfacial microstructure and strength of the dissimilar joint Ti_3Al /TC4 welded by the electron beam process[J]. Mater Sci Eng A, 2006, 425(1/2): 255–259.
- [10] 高峻, 姚泽坤, 梁新民, 刘莹莹, 郭鸿镇. 近等温锻造对 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC4 双合金界面连接强度与组织的影响[J]. 航空材料学报, 2008, 28(2): 14–18.
- GAO Jun, YAO Ze-kun, LIANG Xin-min, LIU Ying-ying, GUO Hong-zhen. Effect of hot-die forging on interfacial strength and microstructure at welded seam of Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC4 dual alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(2): 14–18.
- [11] 姚泽坤, 刘莹莹, 高峻, 谭立军, 郭鸿镇, 曹京霞. 近等温变形对 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 双合金焊接界面拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊 3): 166–170.
- YAO Ze-kun, LIU Ying-ying, GAO Jun, TAN Li-jun, GUO Hong-zhen, CAO Jing-xia. Effect of near isothermal deformation on tensile properties of welding interface of Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/-TC11 dual alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(Supple 3): 166–170.
- [12] 刘莹莹, 姚泽坤, 高峻, 杨航航, 郭鸿镇, 曹京霞. 近等温锻造对 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo/TC11 双合金电子束焊接界面显微硬度的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊 3): 795–798.
- LIU Ying-ying, YAO Ze-kun, GAO Jun, YANG Hang-hang, GUO Hong-zhen, CAO Jing-xia. Influence of near isothermal forging on the microhardness of welding interface of Ti-24Al-15-Nb-1.5Mo/TC11 dual alloy welded by electron beam[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(Supple 3): 795–798.
- [13] 谭立军, 姚泽坤, 周伟, 郭鸿镇, 赵严. 热力作用对电子束焊件显微组织与力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2010(2): 130–134.
- TAN Li-jun, YAO Ze-kun, ZHOU Wei, GUO Hong-zhen, ZHAO Yan. Influence of hot work on microstructures and mechanical properties of electron beam weldment[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010(2): 130–134.
- [14] BOEHLERT C J, MAJUMDAR B S, SEETHARAMAN V, MIRACLE D B. The Microstructural evolution in Ti-Al-Nb O+Bcc orthorhombic alloys[J]. Metall Mater Trans A, 1999, 30: 2305–2323.
- [15] BOEHLERT C J. The tensile behavior of Ti-Al-Nb O+Bcc orthorhombic alloys[J]. Metall Mater Trans A, 2001, 32: 1977–1988.

(编辑 龙怀中)