

β 稳定元素 Mo 对 600 °C 高温钛合金组织和性能的影响

魏寿庸¹, 石卫民¹, 郭佳林¹, 王鼎春¹, 王清江², 朱绍祥², 刘建荣², 陈志勇²

(1. 宝钛集团有限公司, 宝鸡 721014;

2. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 探索 β 稳定元素 Mo 对 600 °C 高温钛合金组织和性能的影响。结果表明, 加入一定量 β 稳定元素 Mo 的 Ti60 合金综合性能优良, 具有较优的热强性、工艺塑性和热稳定性。但过量的 Mo 会在 β_T 内偏聚, 使得 Al 更多地固溶于 α 相中, 影响合金工艺塑性和热稳定等性能。不含 Mo 的 Ti60 合金因得不到复合强化, 合金的室温和 600 °C 高温拉伸强度低。

关键词: Ti60 合金; 高温钛合金; 组织; 性能; 钼

中图分类号: TG113.1

文献标志码: A

Effect of β stabilized element Mo on microstructure and mechanical properties of high temperature titanium alloy at 600 °C

WEI Shou-yong¹, SHI Wei-min¹, GUO Jia-lin¹, WANG Ding-chun¹, WANG Qing-jiang²,
ZHU Shao-xiang², LIU Jian-rong², CHEN Zhi-yong²

(1. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The effect of β stabilized element Mo on the microstructure and mechanical properties of Ti60 was discussed. The results show that high temperature titanium alloy with an appropriate amount of Mo has excellent comprehensive properties such as good hot strength, ductility and thermal stability. Due to clustering in β_T excessive addition of Mo has bad influence on the alloy's ductility and thermal stability.

Key words: Ti60 alloy; high temperature titanium alloy; microstructure; property; Mo

钛合金的比强度高、热强性和耐蚀性能好, 是航空航天的关键结构材料, 它作为高性能航空航天结构材料对于降低飞行器结构质量和提高结构效率、服役可靠性及延长寿命具有重要的作用。高温钛合金是目前世界各国研发热点之一。当前, 600 °C 高温钛合金的研发工作主要集中在 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si 系近 α 型合金上, 其中比较典型的有美、英的 IMI834、Ti-1100, 俄罗斯的 BT18Y, 以及中国的 Ti60、Ti600 和 TG6 等合金, 这些合金的主要化学成分数据如表 1^[1-6]所示。

从表 1 可以看出, 这些高温钛合金均含有足量的 α 稳定元素(包括 Al、Sn、Zr)和一定量同晶型 β 稳定

元素(包括 Mo、Nb、Ta)以及 Si。这些元素的复合强化作用, 使 Ti60 合金成为一种集固溶强化、细晶强化和弥散强化于一身的多元复合强化近 α 型高温钛合金^[7]。它与其他几种合金的区别是: Ti1100 和 Ti600(多含 0.1Y)合金成分相近, 均不含有 Nb、Ta; BT18Y 和 IMI834 合金不含 Ta; 而仅 TG6-1 合金不含 β 稳定元素 Mo。许多研究表明^[10-12], Mo 是一种强的 β 稳定元素, 可显著地影响高温钛合金的组织 and 性能; 该元素对在动载荷作用下合金的抗裂纹扩散阻力和塑性的贡献较锆、锡、铝大(Mo>Zr>Sn>Al); Mo 同时可以细化合金的显微组织, 在强化合金的同时对塑性影响

表 1 世界各国 600 °C 高温钛合金的化学成分^[1-6]

Table 1 Chemical composition of high temperature titanium alloy at 600 °C in the world^[1-6]

No.	Material type	Country	Chemical composition (mass fraction, %)							
			Al	Sn	Zr	Mo	Nb	Ta	Si	Y
1	Ti-1100	USA	5.7-6.3	2.4-3.4	3.5-4.5	0.25-0.75	—	—	0.2-0.6	
			6.0	2.7	4.0	0.4	—	—	0.35	
2	Ti600	China	6.0	2.8	4.0	0.5	—	—	0.40	0.1
3	BT18Y	Russia	6.2-7.3	2.0-3.0	3.5-4.5	0.4-1.0	0.5-1.5	—	0.1-0.25	
			6.5	2.5	4.0	0.7	1.0	—	0.15	
4	IMI834	UK	5.5-6.1	3.0-5.0	3.0-5.0	0.25-0.75	0.5-1.0	—	0.2-0.6	
			5.8	4.0	3.5	0.5	0.7	—	0.35	
5	Ti60	China	5.2-6.2	3.0-4.5	2.5-4.0	0.2-1.0	0.2-0.7	0.2-1.5	0.2-0.6	
6	TG6-1	China	5.8	4.0	3.5	0	0.68	1.86	0.39	

较少。

同晶型 β 稳定元素 Mo 是近 α 型高温钛合金的重要合金化元素,对高温钛合金的组织 and 性能具有较大的影响,开展 β 稳定元素 Mo 对高温钛合金组织和性能的影响研究工作,为进一步掌握它的影响规律提供根据。

渐减小,平均直径也逐渐减小, β_T 的含量增加, β_T 内部的片状次生 α 相也越来越细。对于在 β 相区热处理的合金组织中,Mo 对 β_T 中次生 α 相产生影响,即随着 Mo 含量的升高,次生 α 相越来越细,由次生 α 相组成的 α' 片束也越来越细。当 Mo 含量达到 3% 时, α' 片束已不明显,合金的显微组织成为接近“篮网”状了。

1 实验

实验所用材料的名义成分为 Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.4Nb-0.4Ta-0.4Si-xMo(质量分数),其中 Mo 含量分别为 0.4%、1.0%、2.0%、3.0%。合金铸锭经锻造-精锻-轧制成 d 20 mm 左右的棒材,棒材轧制在 $\alpha+\beta$ 相区完成。棒材经如下热处理后,检测其显微组织和测试两相区热处理材料的各项力学性能,并与主成分与 Ti60 合金相近且不含 Mo 元素的 TG6-1 合金的性能数据进行分析比较。

热处理制度: I ($(\beta_T-30\text{ }^{\circ}\text{C})$, 2 h, AC)+(700 °C, 2 h, AC); II ($(\beta_T+20\text{ }^{\circ}\text{C})$, 1 h, AC)+(700 °C, 2 h, AC)。

2 结果与分析

2.1 Mo 含量对合金显微组织的影响

图 1 和 2 所示为不同 Mo 含量合金经两种不同热处理后的显微组织对比。从图可以看出:对于在 $\alpha+\beta$ 相区热处理的合金,随着 Mo 含量增加,等轴 α 相的直径逐渐减小,当 Mo 含量大于 2% 时,等轴 α 相的等轴化程度降低,且多数由等轴状变为短棒状;随着 Mo 含量的增加,双态组织中等轴 α_p 相的体积分数逐

2.2 Mo 对合金室温力学性能的影响

Mo 是一种强的 β 稳定元素,不仅对高温钛合金的显微组织有较大的影响,而且对合金的室温力学性能的影响也十分显著。为更好地分析 Mo 元素的影响,将文献[6]介绍的一种成分相似而不含 Mo 的 TG6-1 合金的数据(如表 2)引入进行对比。Mo 对高温钛合金室温力学性能的影响见表 2 和图 3。

可以看出,随着 Mo 含量的增加,室温强度指标升高,Mo 含量每升高 1% 时,抗拉强度可提高 80 MPa 左右。不含 Mo 的 TG6-1 和含 0.4%Mo 的 Ti60 合金的强度也有较大的差别,TG6-1 和 Ti60 合金棒材的室温抗拉和屈服强度分别为 1 000 MPa、1 040 MPa 和 920 MPa、960 MPa。由于 TG6-1 合金棒材不含 Mo,强度指标偏低,未达到 600 °C 高温钛合金叶片棒材的技术要求水平。Mo 含量对塑性(A , Z)的影响与强度相反,当 Mo 含量小于 1% 时,伸长率和断面收缩率变化较小,这可能与 Mo 在 α 相的溶解度有关(Mo 在 α 相的溶解度 $<1\%$);当 Mo 含量超过 1%,合金的伸长率和断面收缩率开始明显降低,当 Mo 含量达到 3% 时,伸长率和断面收缩率分别从 15% 和 30% 左右降低到 10% 左右。合金塑性降低的原因是随着 Mo 含量的增加,合金显微组织 α_p 相中 Al 含量增加,提高了 α_p 相的 Al

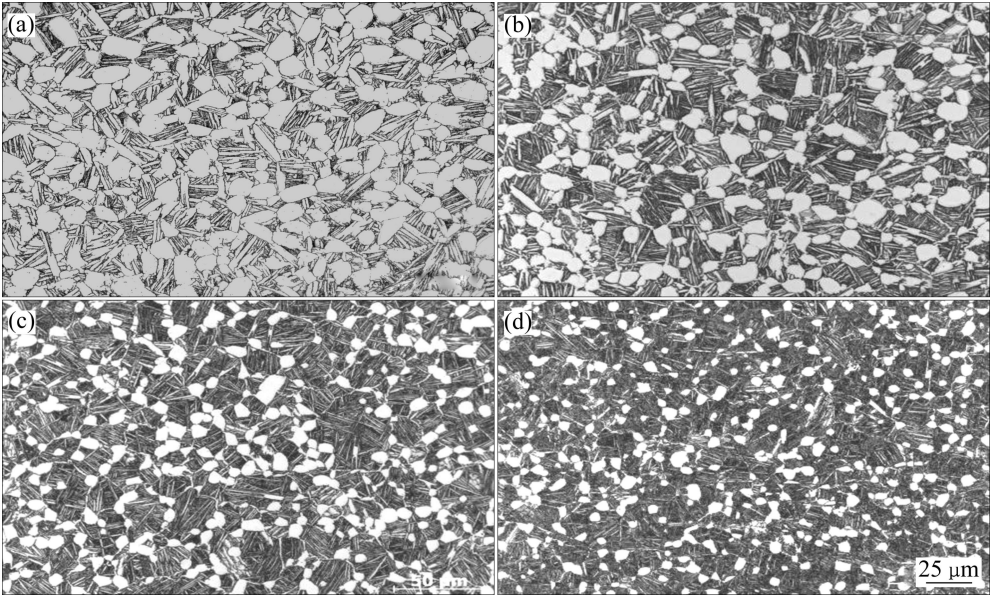


图 1 不同 Mo 含量合金经热处理制度 I 后的显微组织

Fig. 1 Microstructures of titanium alloy with different Mo contents after heating treatment scheme I : (a) 0.4% Mo; (b) 1.0% Mo; (c) 2.0% Mo; (d) 3.0% Mo

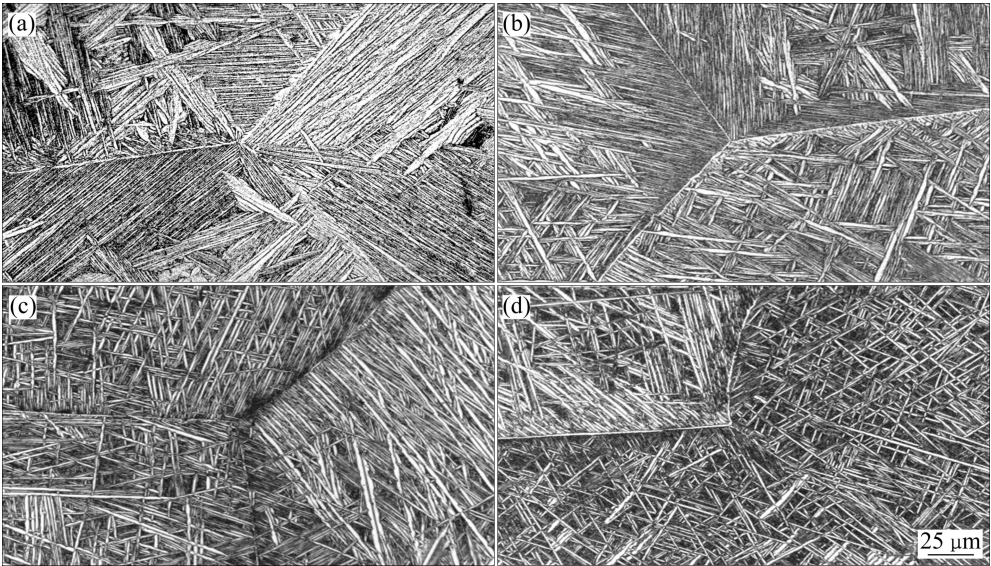


图 2 不同 Mo 含量合金经热处理制度 II 后的显微组织

Fig. 2 Microstructures of titanium alloy with different Mo contents after heating treatment scheme II : (a) 0.4% Mo; (b) 1.0% Mo; (c) 2.0% Mo; (d) 3.0% Mo

表 2 Ti60 和 TG6-1 合金的室温拉伸性能^[6-7]

Table 2 Tensile properties of Ti60 and TG6-1 alloys at room temperature ^[6-7]						
Material	w(Mo)/%	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	Remarks
TG6-1	0	1 000	917	14.0	28.0	Processed by $\alpha+\beta$ forging and heat treatment
Ti60	0.4	1 040	960	15.3	29.0	
Standard requirement		1 030	930	8.0	17.0	

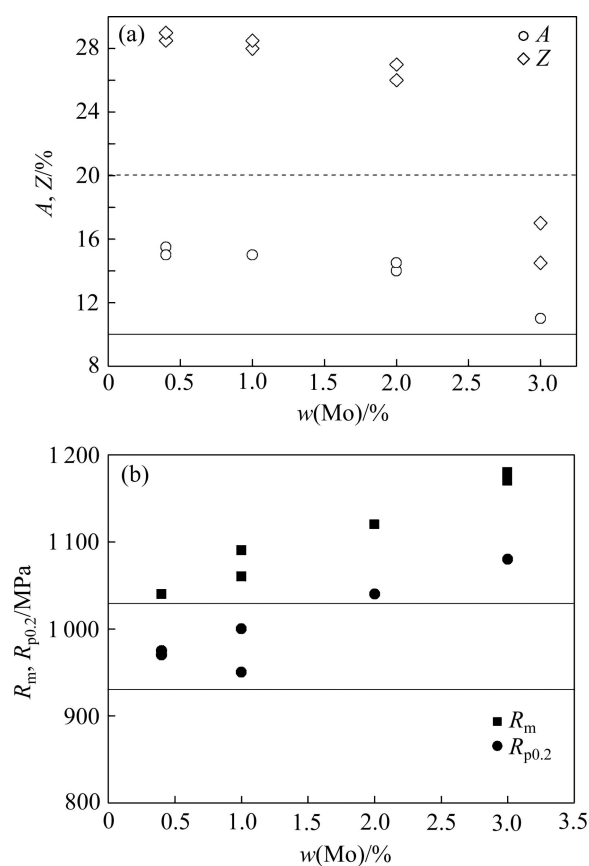


图 3 Mo 对 Ti60 合金室温拉伸性能的影响(经过热处理 I)
Fig. 3 Effect of Mo on room-temperature tensile property of Ti60 alloy after heating treatment scheme I

当量。Al 当量的升高使得 α_p 相中 α_2 相析出的体积分数增加。由于 α_2 相为有序的脆性相, 随着 α_2 相体积分数的增加, 材料的塑性(A, Z)明显降低。

2.3 Mo 含量对合金 600 °C 拉伸性能的影响

表 3 所列不同 Mo 含量高温钛合金(TG6-1)的 600 °C 拉伸性能。

从表可以看出, 随着合金中 Mo 含量的增加, 合金的 600 °C 高温强度指标升高, 而塑性有所增加, 但不含 Mo 的 TG6-1 合金棒材的高温强度和屈服强度也略偏低。这不难看出 β 稳定元素 Mo 是一种重要的合金元素, 含有一定量的 β 稳定元素 Mo, 不仅能提高合金的室温强度, 而且还可改善高温钛合金的综合性能, 不含 Mo 的合金容易造成室温和高温强度指标偏低。

2.4 Mo 含量对蠕变和热稳定性的影响

Mo 含量对合金蠕变和热稳定性的影响见图 4。从图 4 可见, 随着 Mo 含量增加, 合金的热稳定性迅速

表 3 不同 Mo 含量高温钛合金 TG6-1 的 600 °C 拉伸性能
Table 3 Tensile properties at 600 °C of high temperature alloy TG6-1 with different Mo content

$w(\text{Mo})/\%$	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
0	617	502	27.0	49
0.4	647	517	22.5	45
1.0	667	550	23.0	53
2.0	722	610	23.0	58
3.0	982	655	24.0	61
Standard requirement	600	500	10	20

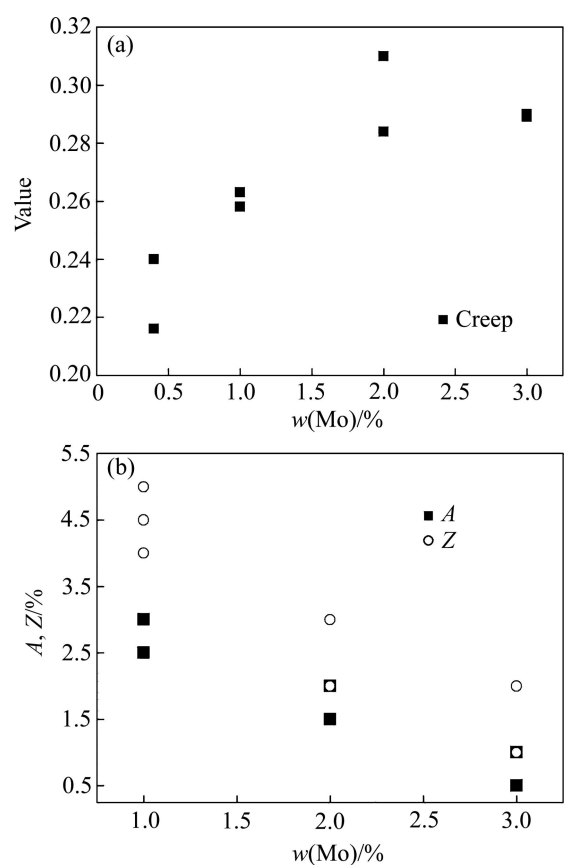


图 4 Mo 含量对合金蠕变和热稳定性的影响
Fig. 4 Effect of Mo content on creep property and thermal stability: (a) 600 °C, σ 160 MPa, 100 h; (b) 600 °C, 100 h, thermal stability

降低, 当 Mo 的含量为 3% 时, 材料已接近脆断。这是由于试样经过 600 °C、100 h 热暴露后, 一方面试样表面氧化或表面富氧层降低了材料塑性; 另一方面, 随着 Mo 含量增加, α_p 相中的 Al 当量增加, 在试样热暴露过程中 α_2 相在 α_p 相中不断析出, 增加了 α_p 相的脆性, 使得材料的塑性显著下降。从图中还可以看出,

当 Mo 含量小于 1% 时, 合金的蠕变抗力较高, 蠕变性能较佳; 但当 Mo 含量超过 1% 时, 随着 Mo 含量增加, 合金的蠕变残余变形明显增大, 蠕变抗力急剧降低。因此, 为了保证高温钛合金的热稳定性和热强性、提高合金的综合性能, 高温钛合金中 Mo 元素的含量应控制在适当的范围内, 以不高于 1.0% 为佳。

综上所述, 同晶型 β 稳定元素 Mo 是 600 °C 高温钛合金的重要元素, 它对合金的组织 and 性能有着显著的影响, 含有一定量的 Mo 元素是必不可少的, 适量添加 β 稳定元素 Mo 可提高和保证合金的综合性能。

3 结论

元素 Mo 是高温钛合金的重要强化元素之一, 它显著影响高温钛合金的显微组织和性能, 含有适量同晶型 β 稳定元素 Mo 的高温钛合金(Ti60)可获得优良的综合性能。但随着合金中 Mo 含量的增加, 过量(如大于 1%)的 Mo 会在 β_T 相内偏聚, 使得 Al 更多地固溶于 α 相中, 增加形成有序 α_2 的倾向, 降低高温钛合金的综合性能。不含 Mo 的合金由于得不到复合合金化, 合金的室温和高温(600 °C)拉伸性能偏低, 未能达到技术条件要求的水平。

REFERENCES

- [1] SCOTT W W, BOYER R, COLLINGS E W. Materials properties handbook: Titanium alloys[M]. ASM International, 1994: 411-439.
- [2] 李成功. 航空航天材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 7-120.
LI Cheng-gong. Aerospace materials[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 7-120.
- [3] 魏寿庸, 何 瑜, 王青江, 刘羽寅. 俄航空发动机用高温钛合金发展综述[J]. 航空发动机, 2005, 31(1): 52-54.
WEI Shou-yong, HE Yu, WANG Qing-jiang, LIU Yu-yin. Development of the aero-engine heat-resisting titanium alloys in Russia[J]. Aviaeroengine, 2005, 31(1): 52-54.
- [4] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化工出版社, 2005: 145-151.
ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, BAI Chen-guang. Titanium alloy and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 145-151.
- [5] 赵永庆. 高温钛合金研究[J]. 钛工业进展, 2001, 18(1): 33-39.
ZHAO Yong-qing. Study of high temperature titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2001, 18(1): 33-39.
- [6] 蔡建明, 李臻熙, 黄 旭, 李四清, 郝孟一, 曹春晓. 一种高蠕变抗力的高温钛合金: 中国, 200510068116.x[P]. 2006-05-17.
- [7] 魏寿庸, 石卫民, 王鼎春, 王清江, 陈志勇, 刘建荣. 600 °C 高温钛合金(Ti60)的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s801-s806.
WEI Shou-yong, SHI Wei-min, WANG Ding-chun, CHEN Zhi-yong, LIU Jian-rong. Microstructure and mechanical properties of high temperature titanium alloy Ti60 at 600 °C[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s801-s806.
- [8] 石卫民, 王青江, 刘建荣, 魏寿庸, 李献民, 王鼎春. Ti60 高温钛合金环材组织与性能的研究[J]. 钛工业进展, 2010, 27(1): 32-34.
SHI Wei-min, WANG Qing-jiang, LIU Jian-rong, WEI Shou-yong, LI Xian-min, WANG Ding-chun. Microstructure and mechanical properties of Ti60 alloy ring material[J]. Titanium Industry Progress, 2010, 27(1): 32-34.
- [9] 王宝善, 贾蔚菊, 渠维猛, 俞汉清, 周义刚, 曾卫东, 王青江. 锻造工艺对 Ti60 合金锻饼组织和性能影响[J]. 钛工业进展, 2011, 28(1): 8-10.
WANG Bao-shan, JIA Wei-ju, QU Wei-meng, YU Han-qing, ZHOU Yi-gang, ZENG Wei-dong, WANG Qing-jiang. Influence of forging processes on microstructure and mechanical properties of Ti60 alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2011, 28(1): 8-10.
- [10] 卢金文, 赵永庆, 葛 鹏, 周 伟. 合金元素 Mo 对钛合金相析出行为的影响[J]. 钛工业进展, 2012, 29(2): 10-13.
LU Jin-wen, ZHAO Yong-qing, GE Peng, ZHOU Wei. Influence of Mo on the precipitation behavior of titanium alloy phase[J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29(2): 10-13.
- [11] 麻西群, 孙巧艳, 曹伟产, 井晓天, 于振涛. α 钛合金在室温和低温的冲击韧性[J]. 稀有金属快报, 2006, 26(5): 18-21.
MA Xi-qun, SUN Qiao-yan, CAO Wei-chan, JING Xiao-tian, YU Zhen-tao. Research on α -titanium alloys under impact load at 293 K and cryogenics 77 K[J]. Rare Metals Letters, 2006, 26(5): 18-21.
- [12] 张久来. 添加少量 β 稳定元素对钛室温拉伸性能影响[J]. 稀有金属, 1997, 21: 48-52.
ZHANG Jiu-lai. Effect of little β stabilize element on room-temperature tensile property of titanium[J]. Rare Metals, 1997, 21: 48-52.

(编辑 袁赛前)