



合金元素Nb与V对4J32奥氏体组织和膨胀性质的影响

王玉^{1a}, 黄丽^{2a}, 王福明²

(1 宝武特种冶金有限公司技术中心, 上海, 200940; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京, 100083; a. 这些作者在本文中贡献度相等)

摘要: 采用光学显微镜、扫描电子显微镜以及膨胀仪等方法, 研究了合金元素Nb与V对4J32合金组织均匀性和膨胀性质的影响。结果表明, 当Nb添加量为0.1%时, 对奥氏体晶界的钉扎作用不够显著, 试样出现晶粒异常长大的现象。而当Nb添加量分别达到0.3%与0.4%时, 试样晶粒显微组织均匀, 且平均粒径分别减小了24.6%与32.3%。V添加量分别达到0.3%与0.4%, 晶粒尺寸分别减小了14.4%与16.3%。Nb对超因瓦合金奥氏体晶粒尺寸的细化能力和显微组织的均匀化能力优于V。当Nb添加量达到0.4%时, NbC主要沿晶界分布, 当Nb添加量小于0.4%时, NbC在晶界内少量分布。NbC的析出数量和尺寸随着Nb含量的增加而增大。添加了Nb或V的试验合金的平均线膨胀系数 $\alpha_{20-100}^{\circ}\text{C} \leq 1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 满足使用要求。综合来说, Nb、V的添加量为0.3%的合金表现出良好的显微组织均匀性、晶粒细化和膨胀系数组合。

关键词: 超因瓦合金; Nb、V微合金化; 组织均匀化; 膨胀系数

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2024-00265 **中图分类号:** TG141

Effects of Alloy Elements Nb and V on the Microstructure and Expansion Property of 4J32 Austenite

Wang Yu^{1a}, Huang Li^{2a}, Wang Fuming²

(1 Technology Center, Baowu Special Metallurgy Co., Ltd., Shanghai, 200940, China; 2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; a. These authors contributed equally to this work)

Abstract: Using optical microscope, scanning electron microscope, and dilatometer etc, this work investigated the effects of alloy elements Nb and V on the austenite microstructure and expansion property of 4J32 alloy. The results indicated that when the addition amount of Nb was 0.1%, the pinning effect on the austenite grain boundaries was not apparent, and abnormal grains growth occurred in the specimens. However, when the addition amounts of Nb reached 0.3% and 0.4%, the microstructure of the specimens was homogeneous, and the average grain sizes decreased by 24.6% and 32.3%, respectively. When the addition amounts of V reached 0.3% and 0.4%, the grain sizes decreased by 14.4% and 16.3%, respectively. The refining ability of Nb on the austenite grains and the homogenization ability of the microstructure of the super Invar alloy were superior to those of V. When the addition amount of Nb reached 0.4%, NbC was mainly distributed along grain boundaries. When the addition amount of Nb was less than 0.4%, NbC distributed in a small amount within grains. The number and size of NbC precipitates increase with the increase in the Nb content. The average linear expansion coefficient $\alpha_{20-100}^{\circ}\text{C} \leq 1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ of the experimental alloys with the addition of Nb and V met the application requirements. Overall, the alloys with the addition amounts of 0.3% for both Nb and V showed a more appropriate combination of microstructure homogeneity, grain refinement, and expansion coefficient.

Key Words: Super Invar Alloy; Nb and V Microalloying; Homogenization of Structure; Expansion Coefficient

超因瓦合金4J32是Ni元素质量分数为32%的Fe-Ni-Co合金, 该合金因其卓越的低膨胀特性而备受关注, 近年来在电子器件、航天领域以及输电线路等行业应用非常广泛^[1-3]。为保证合金线性膨胀性能满足使用要求, 合金中需避免添加过量微合金元素, 但合金中无析出相导致在热加工过程中奥氏

体晶粒易发生粗化现象, 导致合金组织不均匀无法满足质量要求。因此, 在保证超因瓦合金具有较低膨胀系数的前提下, 开发新型合金成分体系, 有效优化4J32的组织均匀性, 成为国内外相关学者的研究重点。

在热变形过程中, Nb能够显著抑制奥氏体晶粒

的粗化和长大。通过细化晶粒实现显著的微观组织优化。此外, Nb的第二相主要是在高温条件下弥散析出, 其稳定的物理化学性质赋予材料显著的弥散强化能力^[4]。由于V在奥氏体中具有较高的溶解度, 并且作为一种强碳化物形成元素, 它能够在合金中发挥重要作用, 能够生成热稳定性高、熔点高且硬度优异的VC。VC在高温环境中长时间保温后仍能维持细小的尺寸, 表现出卓越的抑制晶粒长大能力, 因此, 材料的显微组织及其力学性能会受到显著的影响^[5]。王鑫等^[6]对NbC析出对超因瓦合金热膨胀性能的影响进行了详细研究, 研究表明, NbC的析出显著降低了4J32超因瓦合金的热膨胀系数。此外, 通过调节NbC的含量, 能够将该合金的膨胀系数降低至小于 $0.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。这说明通过严格控制添加元素的含量, 能够对合金的热膨胀系数加以合理控制, 并开发出具有优异加工特性和实际应用价值的高强度低膨胀因瓦合金。孙中华等^[7]对Nb元素对热轧Fe-36Ni因瓦合金显微组织和力学性能的影响进行了深入研究, 研究发现, Nb与合金中的碳(C)形成NbC颗粒, 这些颗粒通常以短棒状形式析出, 并且倾向于沿轧制方向聚集分布。随着析出NbC颗粒的数量增加及其尺寸的减小, 因瓦合金的力学性能得到了显著提升。奉亮等^[8]则研究了V元素对热轧因瓦合金组织和性能的影响, 发现添加0.14%C和0.63%V后, 因瓦合金热轧板的晶粒尺寸明显减小, 显微组织得到了显著细化, 且热膨胀系数保持在较低水平。

综上所述, 以往的研究主要集中在合金元素对因瓦合金显微组织及其性能的影响上。超因瓦合金中有5%的Co取代因瓦合金中的Ni, 进一步降低了线膨胀系数, 有关合金元素Nb、V如何影响超因瓦合金组织与膨胀性能的研究尚未见报导。

本研究将以此作为切入点, 在保证合金线性膨胀性能满足使用要求的前提下, 通过向4J32添加不

同含量的Nb、V, 并优化碳化物形成元素Nb、V的添加类型和含量, 研究Nb、V对4J32组织及热膨胀系数的影响, 以提高4J32超因瓦合金的组织均匀性, 为优化4J32超因瓦合金的成分, 提供了相关的理论依据和实验数据支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

合金元素Nb、V对4J32超因瓦合金的显微组织和力学性能产生了重要的影响。因此, 为了深入探讨Nb和V合金化对4J32超因瓦合金组织与性能的作用机理, 在尽可能不增加超因瓦合金低膨胀系数的前提下, 本研究采用微合金化方法, 设计了Nb和V微合金化的超因瓦合金。实验中, 4J32超因瓦合金通过高频真空感应熔炼炉在氩气保护气氛下进行熔炼制备, 并经锻造浇铸成钢锭, 锭重6 kg, 分别冶炼七炉Fe-Ni-Co合金试样, 根据Nb、V添加量的不同, 分别编号为1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]和7[#], 熔炼后得到的超因瓦合金钢锭的实际成分见表1。1[#]、2[#]和3[#]试验合金的Nb添加量分别为0.1%、0.3%和0.4%, 4[#]、5[#]和6[#]试验合金的V添加量分别为0.1%、0.3%和0.4%, 其他合金元素理论设计值相同, 但部分元素实测值有细微差别, 其中7[#]为常规4J32超因瓦合金, 不添加Nb和V, 设置为对照组。冶炼钢锭经1 200 °C保温2 h, 使合金元素充分均匀化, 在热轧试验机上将其按照30%变形量进行轧制变形, 轧成截面为30 mm×80 mm的扁锭, 在该过程中, 终轧温度设定为900 °C, 轧制变形完成后, 样品通过空冷方式降温至室温。随后, 进行退火处理, 具体为在850 °C下保温1 h, 再通过水冷迅速降温至室温, 得到可进行相关测试分析的试验合金。

1.2 试验方法

在4J32钢锭的宽度方向, 距离边缘约三分之一处, 金相试样沿轧制方向采用线切割方法制备。在经过研磨和抛光处理后, 使用由酒精、盐酸和双氧

表1 7种试验合金的化学成分(质量分数)

Table1 The chemical composition of the 7 experimental alloys

编号	C	Si	P	S	N	Ni	Co	Mn	Cu	Nb	V	Fe
1 [#]	0.024	0.09	0.004	0.003	0.001 4	32.66	3.93	0.40	0.72	0.1	/	
2 [#]	0.040	0.13	0.004	0.003	0.001 2	32.48	3.93	0.42	0.75	0.3	/	
3 [#]	0.038	0.12	0.004	0.003	0.001 2	32.62	3.93	0.39	0.68	0.4	/	
4 [#]	0.040	0.11	0.004	0.003	0.001 1	32.61	3.84	0.43	0.72	/	0.1	余
5 [#]	0.030	0.13	0.004	0.003	0.001 0	32.74	3.86	0.41	0.73	/	0.3	
6 [#]	0.030	0.11	0.004	0.003	0.001 1	33.16	3.89	0.42	0.75	/	0.4	
7 [#]	0.030	0.09	0.004	0.003	0.001 4	32.30	3.90	0.40	0.76	/	/	

水按2:1:1的比例混合而成的腐蚀液对试样进行腐蚀。最后,通过光学显微镜(OM)观察并分析腐蚀后的试样显微组织。利用 Thermo-Calc 软件中的 TCNI12 镍基数据库,对试验合金中的平衡相图、析出相组成和元素组成进行计算,了解合金中 Nb、V 的析出行为。由于没有 Ni 那么高的铁基合金的数据库,这种计算是一种参考;通过场发射扫描电子显微镜(ZEISS Gemini SEM300)及其配备的能谱分析仪(EDS),对析出相的形态特征与化学组成进行了详细分析。在 4 J32 钢锭心部位置平行于轧制方向用线切割截取膨胀测试试样(8 mm×8 mm×30 mm),将其于 800 °C 保温 1 h,空冷至室温,随后进行 320 °C×1 h 的退火处理,最后机加工成热膨胀试样(ϕ 6 mm×25 mm)。试验合金的热膨胀性能是通过 NETZSCH DIL 402C 型热膨胀仪进行测量的。测试过程中,温度范围设置为 20~100 °C,升温速率控制为 5 °C/min,实验环境采用氩气保护以避免氧化干扰。

2 试验结果分析及讨论

2.1 奥氏体晶粒分析

试验合金 7[#]、1[#]、2[#]和 3[#]的 OM 照片分别列于图 1(a)~(d),由图 1 可以看出,在室温下,试验合金的显微组织均为奥氏体;1[#]、2[#]和 3[#]试验合金基体中存在大量的孪晶,孪晶的产生是由于奥氏体具有低的层错能,进而在变形或者热处理过程中极易产生孪晶^[9]。由图 2 可得 7[#]、1[#]、2[#]和 3[#]试验合金观察面晶粒的平均直径分别为 131.6、137.1、99.1、89.1 μm ,7[#]试验合金的晶粒尺寸范围分布在 0~400 μm ,2[#]和 3[#]试验合金的晶粒尺寸集中在 250 μm 以下,占比分别为 96.9%、97.6%。可见试验合金 2[#]和 3[#]比 7[#]的显微组织分布更加均匀,平均粒径更小。

由此说明,在试验合金中添加 Nb 的含量达到 0.3% 时,可以细化晶粒尺寸,此外,Nb 的含量对奥氏体晶粒尺寸的减小具有显著作用,当 Nb 添加量分

别达到 0.3% 与 0.4% 时,对应的 2[#]和 3[#]试验合金的平均粒径相较于 7[#]试样分别减小了 24.6%、32.3%。由于 Nb 是一种强碳化物形成元素,因此,能够生成在高温条件下具有优异稳定性的 NbC 相。这些 NbC 颗粒通过钉扎效应有效抑制奥氏体晶粒的长大,并对晶界迁移产生显著限制作用,从而阻碍奥氏体的再结晶过程,最终实现晶粒的细化效果^[10-11]。在热轧过程中,第二相颗粒逐步析出并分布在奥氏体晶界或晶粒内部。这些颗粒的存在消耗了奥氏体晶粒动态再结晶所需的驱动力,从而有效地延缓了动态再结晶的发生^[12]。

然而,Nb 添加量为 0.1% 的 1[#]试样出现了明显的奥氏体晶粒异常长大的现象,结合图 2(e)中 1[#]试样的尺寸误差可以看出,1[#]试样的晶粒尺寸范围较大,为 0~750 μm ,最大晶粒尺寸可达 733 μm ,且大于 300 μm 的晶粒数量占比为 7.8%。这是由于 Nb 添加量太少,对奥氏体晶界的钉扎效果不够显著,被钉扎晶界的奥氏体晶粒尺寸明显减小,未被钉扎晶界的晶粒异常长大,并且,在轧制变形过程中析出的第二相颗粒对晶界迁移起到了阻碍作用,使得大晶粒吞噬小晶粒现象更容易发生,从而促进晶粒异常长大。但是当 Nb 添加量达到 0.3% 时,2[#]试样晶粒的显微组织分布已非常均匀,由此可以说明添加 0.3% 以上的 Nb 对试验合金的显微组织均匀化的效果显著。

图 3 为 7[#]、4[#]、5[#]和 6[#]号试验合金的 OM 图像,由图 3(a)~(d)可以看到,与其他试样相比,未添加 V 元素的 7[#]合金具有最大的晶粒尺寸。结合图 4 可以发现 7[#]、4[#]、5[#]和 6[#]号试验合金的晶粒尺寸主要分布在 50~150 μm ,平均晶粒尺寸分别为 131.6、124.1、112.6、110.2 μm ,其晶粒尺寸在 200 μm 以下的占比分别为 82.6%、84.5%、88.0% 和 88.5%。可以说明,随着 V 含量从 0 增加至 0.1%、0.3% 及 0.4%,试验合金的晶粒尺寸得到了进一步的细化,同时其显微组

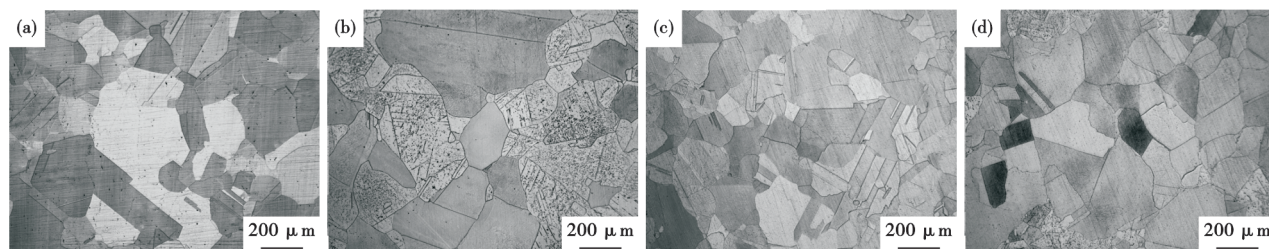


图 1 试验合金的组织照片:(a) 7[#],0 Nb;(b) 1[#],0.1% Nb;(c) 2[#],0.3% Nb;(d) 3[#],0.4% Nb

Fig. 1 The microstructure photographs of the experimental alloys : (a) 7[#], 0 Nb; (b) 1[#], 0.1% Nb; (c) 2[#], 0.3% Nb; (d) 3[#], 0.4% Nb

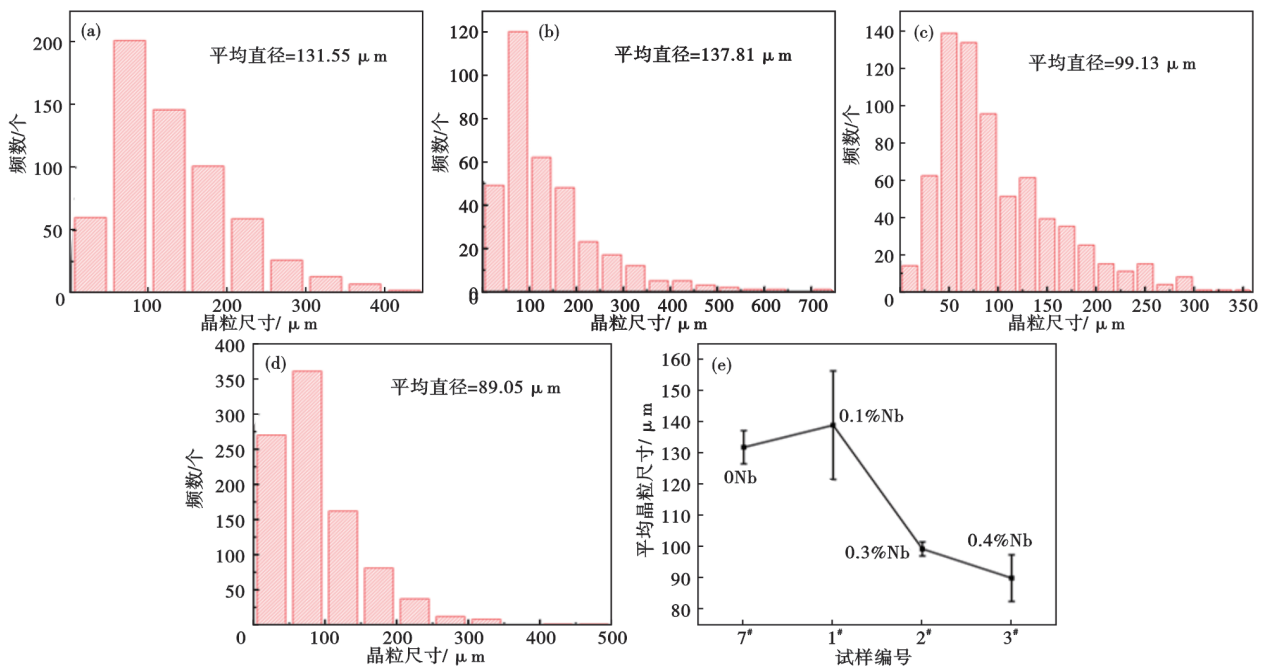


图2 试验合金的尺寸分布图:(a) 7#, 0 Nb;(b) 1#, 0.1% Nb;(c) 2#, 0.3% Nb;(d) 3#, 0.4% Nb;(e) 平均晶粒尺寸图

Fig. 2 The size distributions of the experimental alloys : (a) 7#, 0 Nb; (b) 1#, 0.1% Nb; (c) 2#, 0.3% Nb; (d) 3#, 0.4% Nb; (e) average grain size graph

织也表现出更为均匀的特征,说明V含量对减小奥氏体晶粒尺寸有较大影响,当V添加量分别达到0.1%、0.3%和0.4%,晶粒尺寸分别减小了5.7%、14.4%和16.3%。

钒在奥氏体中的溶解度较高,且作为一种强碳化物形成元素,能够与碳结合,生成细小且稳定的VC颗粒。这些VC颗粒在高温条件下能够保持均匀的弥散分布,且具备优良的热稳定性,避免了聚集和长大现象,从而有效抑制了奥氏体晶粒的进一步生长。通过这种机制,钒对材料的微观组织及热膨胀性能影响显著。

2.2 析出相

Thermo-Calc被广泛用于计算体系的相平衡、相的数量及组成。由图5可以看出,Nb添加量为0.1%、0.3%和0.4%时,NbC相析出温度分别为

1 170 °C、1 290 °C和1 320 °C,NbC相在850 °C(退火温度)的析出量分别为 1.13×10^{-3} 、 2.94×10^{-3} 和 3.10×10^{-3} 。随着元素Nb在试验合金中的含量增加,NbC相析出温度也随之升高(温度升幅为12.8%),析出量也明显增加(析出量增幅为174.3%),且适当提高Nb含量有利于生成NbC相。根据有效钉扎状态下,临界晶粒直径 D_c 与第二相粒子之间的关系式 $D_c = 0.34r/f$ (f 为第二相粒子体积百分数, r 为第二相粒子半径)可以得到, D_c 随着 f 的增大而减小^[13-15]。因此,试验合金的奥氏体晶粒尺寸随着NbC析出量的增加而减小。

7#超因瓦合金中未添加合金元素,因此,热处理过程中不会出现第二相颗粒析出的情况。然而,在1#、2#和3#试验合金中添加Nb元素后,热处理时碳化物易于生成,其中部分碳化物会固溶于基体,另一

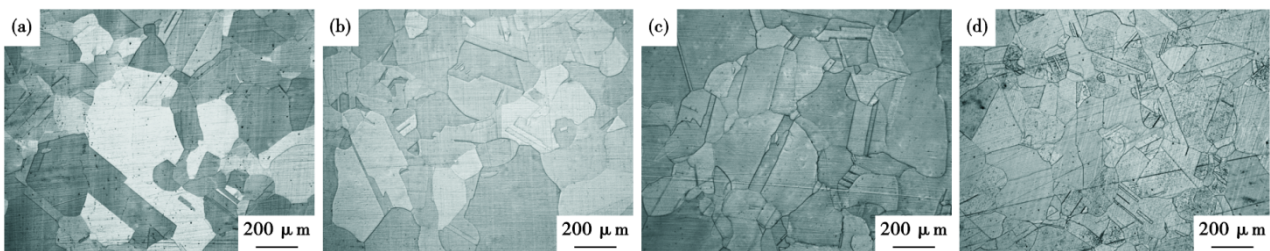


图3 试验合金的组织照片:(a) 7#, 0 V;(b) 4#, 0.1% V;(c) 5#, 0.3% V;(d) 6#, 0.4% V

Fig. 3 The microstructure photographs of the experimental alloys : (a) 7#, 0 V; (b) 4#, 0.1% V; (c) 5#, 0.3% V; (d) 6#, 0.4% V

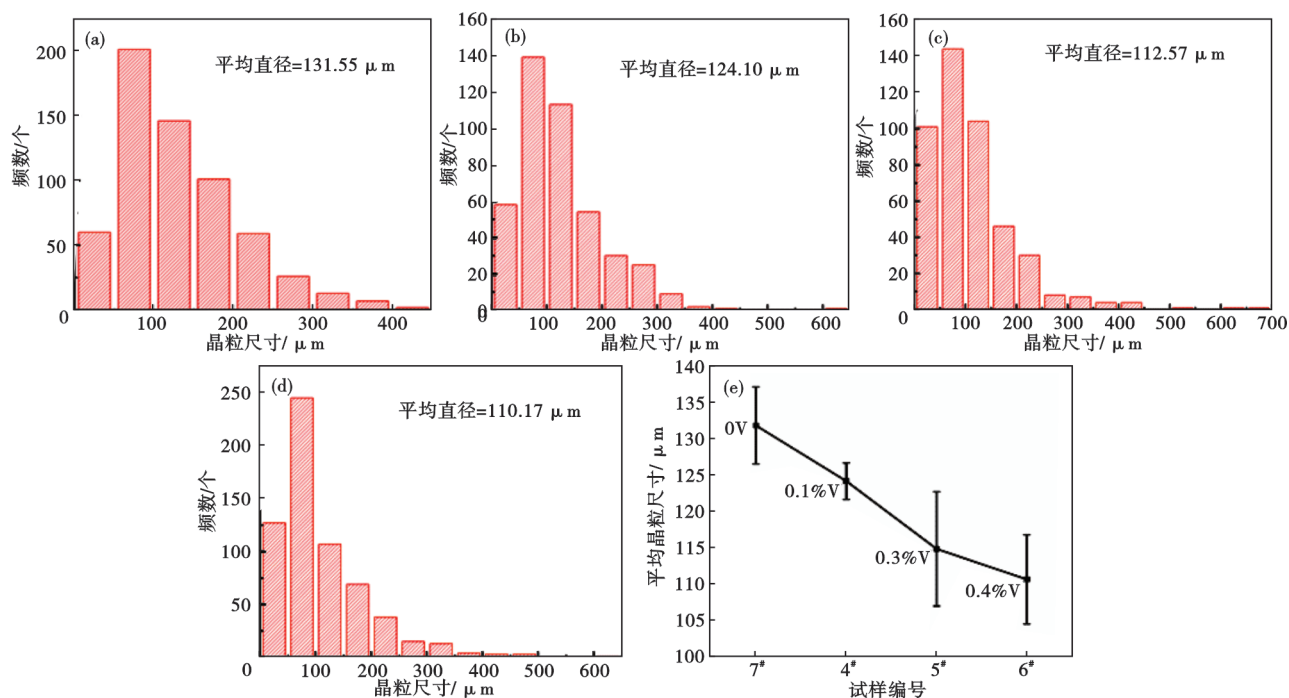


图 4 试验合金的尺寸分布图:(a) 7[#], 0 V ;(b) 4[#], 0.1% V ;(c) 5[#], 0.3% V ;(d) 6[#], 0.4% V ;(e) 平均晶粒尺寸图

Fig. 4 The size distributions of the experimental alloys : (a) 7[#], 0 V ; (b) 4[#], 0.1% V ; (c) 5[#], 0.3% V ; (d) 6[#], 0.4% V ; (e) average grain size graph

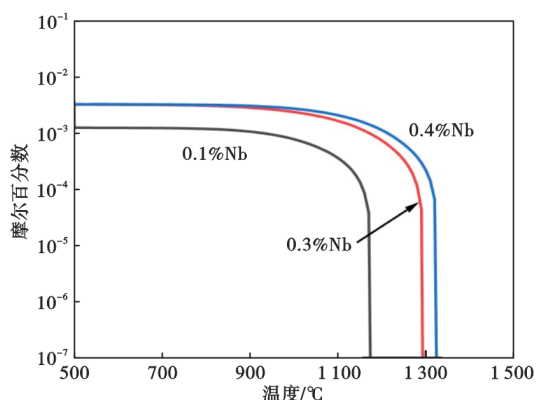


图 5 试验合金中 NbC 析出相图

Fig. 5 NbC precipitation diagram of the experimental alloys

部分会以第二相粒子的形态析出。因此,利用扫描电镜(SEM)对含 Nb 的 1[#]、2[#]和 3[#]试验合金的析出相形貌进行观察和分析,其典型微观形貌和能谱分析图如图 6-7 所示,根据能谱结果可以确定第二相颗粒为析出物 NbC, NbC 颗粒呈椭球形、短棒状和圆形分布于基体中,当 Nb 添加量达到 0.4% 时, NbC 主要沿晶界分布,当 Nb 添加量小于 0.4% 时, NbC 在晶界内少量分布,并且析出的 NbC 颗粒的数量也随着 Nb 含量的增加而增加, NbC 尺寸也相应增大。

Nb 作为一种强碳化物形成元素,在温度降低时更容易在奥氏体中析出 NbC 型碳化物。这些 NbC

颗粒能够通过钉扎位错和晶界来限制其运动,从而有效抑制再结晶过程的发生,晶粒尺寸越小,析出的碳化物粒子数量越多,钉扎效果越好,完成再结晶过程所需的时间就越长,从而达到阻止奥氏体晶粒长大的良好效果^[16-17]。

由图 8 可以看出, V 添加量为 0.1%、0.3% 和 0.4% 时, VC 析出温度分别为 1 010 °C、1 090 °C 和 1 120 °C, VC 相在退火温度 850 °C 的析出量分别为 2.16×10^{-4} 、 3.35×10^{-4} 和 4.37×10^{-4} , 析出量增幅为 102.3%, 可见 V 的添加量对 VC 的析出量有较大影响。

在 4[#]、5[#]和 6[#]试验合金中,添加了 V 元素,作为一种强碳化物形成元素, V 能够生成稳定性较高的碳化物,并且这些碳化物在析出后聚集和长大的速度较慢。为此,采用扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)对含 V 的 4[#]、5[#]和 6[#]试验合金中的析出相进行了观察与分析,如图 9 所示。上述热力学结果显示,添加了 0.1%V 的 4[#]试验合金在 1010 °C 时析出了 VC,但在 SEM 和透射电镜(TEM)中并未检测到单独的钒碳化物,原因可能是添加量为 0.1% 的 V 的析出物尺寸过小,在仪器上检测不到。5[#]和 6[#]试验合金中的钒碳化物根据能谱结果可以确定为 VC, VC 颗粒呈椭球形分布于奥氏体晶界和晶内。当钒元素

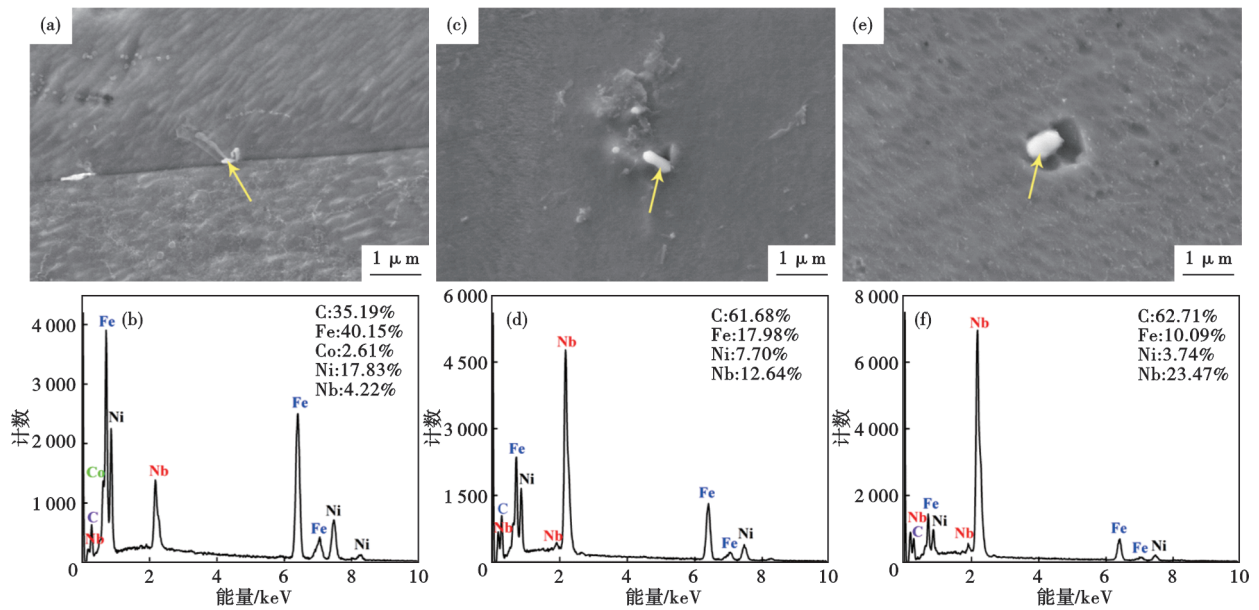


图 6 试验合金析出相形貌及 EDS 能谱: (a)(b) 1#, 0.1% Nb; (c)(d) 2#, 0.3% Nb; (e)(f) 3#, 0.4% Nb

Fig. 6 The morphologies and EDS spectra of the precipitates in the experimental alloys : (a)(b) 1#, 0.1% Nb; (c)(d) 2#, 0.3% Nb; (e)(f) 3#, 0.4% Nb

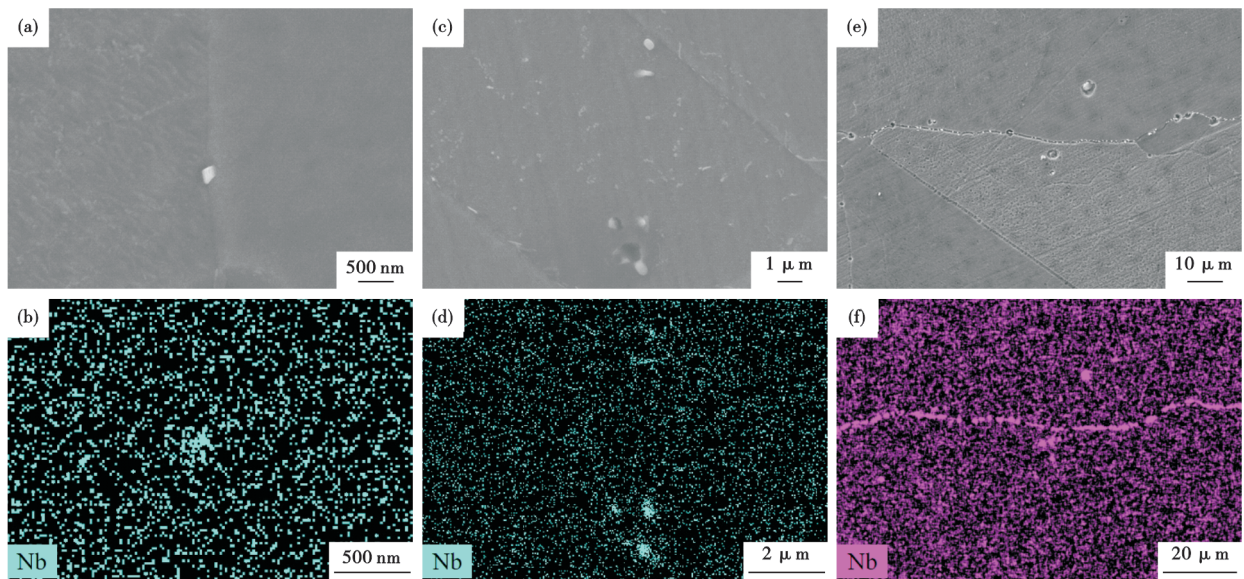


图 7 试验合金析出相 EDS 能谱: (a)(b) 1#, 0.1% Nb; (c)(d) 2#, 0.3% Nb; (e)(f) 3#, 0.4% Nb

Fig. 7 The EDS spectra of the precipitates in the experimental alloys : (a)(b) 1#, 0.1% Nb; (c)(d) 2#, 0.3% Nb; (e)(f) 3#, 0.4% Nb

与合金中的碳元素结合,形成纳米尺寸的钒析出相时,这些析出相能够有效地钉扎奥氏体晶界,从而在再结晶过程中有效抑制奥氏体晶粒的进一步长大,从而促进室温下组织的细化。

VC 颗粒对合金基体起到钉扎位错的作用,是因为试验合金经热轧后的冷却过程中会有 VC 颗粒析出,VC 颗粒在材料中起到了钉扎晶界的作用。钉扎应力通过抵消推动晶界移动的驱动力,限制了晶界

的运动,从而有效地防止了晶粒在再结晶过程中的长大,促进了晶粒的细化。

由上述结果可得,V 对超因瓦合金奥氏体晶粒尺寸的细化能力和显微组织的均匀化能力不如 Nb,相比于 V 添加,Nb 的添加使试样的显微组织更为细小,且有更多的第二相粒子析出。

2.3 膨胀性质

利用热膨胀仪对上述不同成份的试验合金进

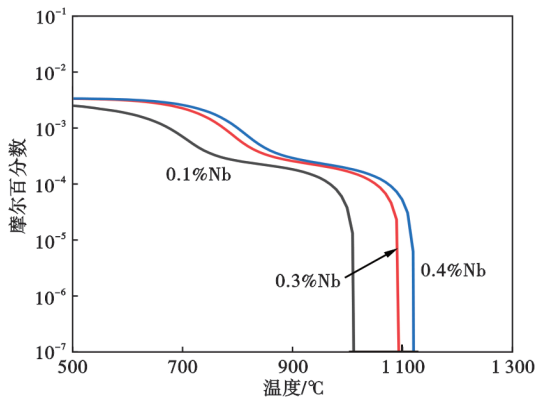


图8 试验合金中VC析出相图

Fig. 8 VC precipitation diagram in the experimental alloys

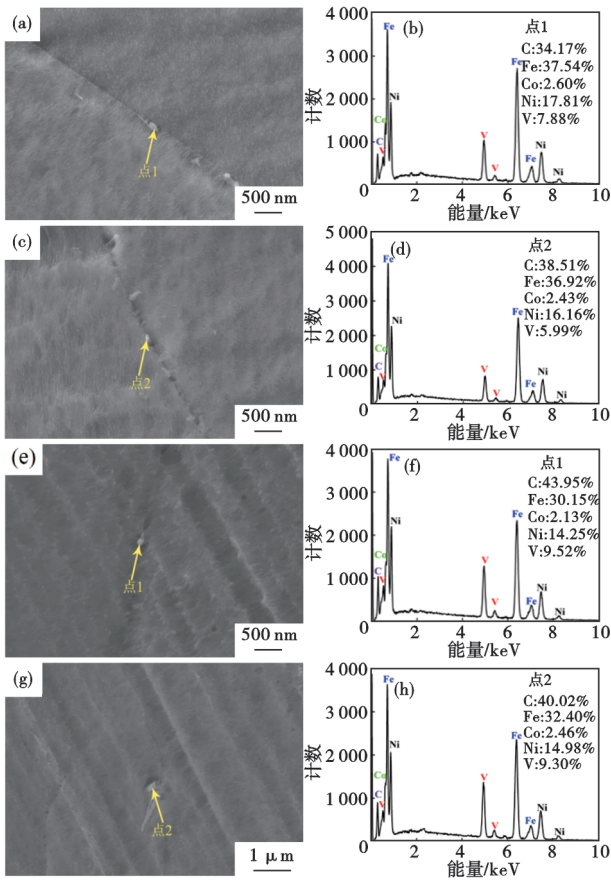


图9 试验合金的析出相形貌及EDS能谱:(a~d) 5#, 0.3% V; (e~h) 6#, 0.4% V

Fig. 9 The morphologies and EDS spectra of precipitates in the experimental alloys: (a-d) 5#, 0.3% V; (e-h) 6#, 0.4% V

行线膨胀系数测量,测试温度范围为20~100 °C,得到表2所示合金的平均线膨胀系数检测结果。相比于添加V的4#、5#和6#合金,未添加V的7#超因瓦合金具有最低的线膨胀系数,且V的添加量越多,平均线膨胀系数越大,如图10所示,据研究发现,大量的V和C溶解在基体中是导致其平均线膨胀系数增大

的原因^[18]。

由于添加Nb的1#、2#和3#合金中的Co含量大于7#合金,因此,其平均线膨胀系数均比7#合金小,如图10。文献[6]的结果表明Nb通过与合金中的C元素结合,形成NbC沉淀析出,净化合金基体,具有降低合金膨胀系数的效果。2#合金中Cu含量最高,NbC析出数量较多且Nb含量适中,因此,2#合金的平均线膨胀系数最小。陈知伟等^[19]研究了元素Co、Cu对Fe-36%Ni因瓦合金热膨胀系数的影响,结果发现,Co、Cu元素的添加提高了因瓦合金材料的居里点,扩大了反常热膨胀效应的温度范围,从而降低了材料的热膨胀系数。经检测的试验合金的平均线膨胀系数 $\alpha_{20-100\text{ °C}} \leq 1.0 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 满足使用要求。综合来说,Nb、V的添加量为0.3%的合金表现出较为合适的显微组织均匀性、晶粒细化和膨胀系数组合。

表2 试验合金平均线膨胀系数检测结果

Table 2 The test results of the average linear expansion coefficients of the experimental alloys

编号	检测温度/°C	平均线膨胀系数 $\alpha / (\times 10^{-6}, \text{°C}^{-1})$
1#	20~100	0.513 0
2#	20~100	0.464 0
3#	20~100	0.603 5
4#	20~100	0.713 0
5#	20~100	0.797 5
6#	20~100	0.945 5
7#	20~100	0.630 5

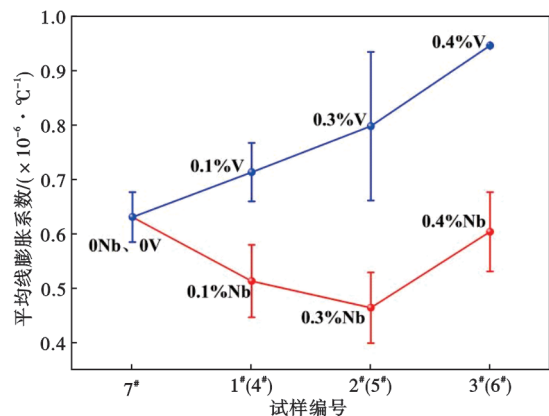


图10 试验合金平均线膨胀系数变化图

Fig. 10 The variation diagram of the average linear expansion coefficients of the experimental alloys

3 结论

1)当Nb添加量为0.1%时,对奥氏体晶界的钉

扎作用不够显著,试样出现晶粒异常长大的现象。而当 Nb 添加量分别达到 0.3% 与 0.4% 时,试样晶粒显微组织均匀,晶粒尺寸显著减小,平均粒径分别减小了 24.6% 与 32.3%。V 含量对减小奥氏体晶粒尺寸有较大影响,V 添加量分别达到 0.3% 与 0.4%,晶粒尺寸分别减小了 14.4% 与 16.3%。Nb 对超因瓦合金奥氏体晶粒尺寸的细化能力和显微组织的均匀化能力优于 V。

参考文献

- [1] Inaba M, Teshima K, Higashinakagawa E, et al. Development of an Invar (Fe-36Ni) shadow mask for color cathode ray tubes [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1988, 35 (10): 1721-1729.
- [2] Shiga M. Invar alloys[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 1996, 1(3): 340-348.
- [3] Van Schilfhaarde M, Abrikosov I A, Johansson B. Origin of the Invar effect in iron - nickel alloys [J]. Nature, 1999, 400 (6739): 46-49.
- [4] 刘 帅,王福明,李永亮. 微合金元素 Nb 和 Ti 对高强工程结构钢低温冲击性能的影响[J]. 工程科学学报, 2018, 40(S1): 41-46.
- [5] 杨 泉,栗克建,胡 瑜,等. VC 析出对 Fe-Ni-Co 因瓦合金显微组织和性能的影响[J]. 金属功能材料, 2024, 31(1): 80-87.
- [6] 王 鑫,张建福,张羊换,等. NbC 析出对超因瓦合金膨胀性能影响[J]. 稀有金属, 2009, 33(5): 670-674.
- [7] 孙中华,孙道柱,刘 洁,等. 合金元素对热轧 Fe-36Ni 因瓦合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(4): 87-92.
- [8] 奉 亮,樊轩宇,陈继武,等. 钒对热轧因瓦合金组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(6): 206-211.
- [9] Zheng J J, Li C S, He S, et al. Deformation behavior of Fe-36Ni steel during cryogenic (123-173 K) rolling[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2016, 23(5): 447-452.
- [10] 王 超,党文静,崔 征,等. 合金化元素 Nb 对 4 J36 性能的影响[J]. 有色金属工程, 2017, 7(6): 13-16+29.
- [11] 韩 伏,文 辉,朱守欣,等. Q420C 角钢钒钛微合金化工艺研究[J]. 现代交通与冶金材料, 2023, 3(1): 58-64.
- [12] Rehman M K, Zurob H S. A novel approach to model static recrystallization of austenite during hot rolling of Nb microalloyed steel. part I: Precipitate-free case[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(4): 1862-1871.
- [13] Zener C. Private communication to CS Smith J. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1949, 175: 15-51.
- [14] Hillert M. On the theory of normal and abnormal grain growth[J]. Acta Metallurgica, 1965, 13(3): 227-238.
- [15] Gladman T, Pickering F B. Grain-coarsening of austenite[J]. The Iron and Steel Institute of Japan, 1967, 205: 653-664.
- [16] 田 帅,张雪凌,刘振宝,等. Nb 微合金化对 Cr-Co-Ni-Mo 系超高强度不锈钢腐蚀疲劳性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45 (1): 103-110.
- [17] 马 涛,李佳祺,徐鹏飞,等. Nb 对 Fe-Mn-Al-C 低密度钢显微组织及耐蚀性的影响[J]. 中国冶金, 2024, 34(4): 127-137.
- [18] Nakama K, Sugita K, Shirai Y. Effect of MC type carbides on age hardness and thermal expansion of Fe-36wt% Ni-0.2wt% C alloy [J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2013, 2(6): 383-387.
- [19] 陈知伟,朱 斌,胡 瑜,等. 元素 Co、Cu 对 Fe-36%Ni 因瓦合金热膨胀系数的影响[J]. 大型铸锻件, 2023, (5): 1-3+23.