

探索新强韧化机制 开拓超高强度钢新领域

赵振业, 李志, 刘天琦, 朱杰远

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

[摘要] 论述了超细化马氏体板条, 共格沉淀新强化相 (Laves相), M_2C 碳化物和残余-逆转变奥氏体向马氏体相变诱发塑性等强韧化机理, 用超纯洁熔炼、超均匀化及控制相变等工艺, 获得一种低碳-14Cr-12Co-5Mo-Me 新型超高强度、高塑性、高韧性不锈钢。

[关键词] 超高强度不锈钢; 马氏体板条; 强韧化机理

[中图分类号] TF762; TG142 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)09-0039-04

超高强度钢是上个世纪60年代后期材料科学最重大的成果之一。它以其最高强度和优良综合性能迅速成为航空、航天等高科技领域如飞机起落架、机翼大梁、火箭、导弹壳体和高精密传动等主承力构件的首选材料, 至今, 一直是材料科学前沿的重要部分和研究热点。近些年来, 海洋、潮湿等环境腐蚀对构件服役寿命和可靠性影响日益受到重视, 现有超高强度钢难以满足使用要求。因此, 研究和发展超高强度不锈钢成为超高强度钢学科发展的重要课题。

几十年来, 超高强度钢经历了低合金、中合金和高合金等几个发展阶段, 典型钢种及性能如表1所示。其中, Aermet 100 是上个世纪90年代研制成功的一种高合金超高强度钢^[1,2], 并用作F/A-18、F-22飞机起落架。该钢采用低碳马氏体和二次硬化机理设计, 具有更高的抗拉强度、断裂韧性和应力腐蚀性能。但与不锈钢相比, 其抗海洋、潮湿环境腐蚀能力仍有很大差别。不幸的是几十年来, 高强度不锈钢发展缓慢, 如表2所示, 至今尚未达到超高强度水平。早期研制的AFC-77钢虽抗拉强度达到1980 MPa^[3,4], 但断裂韧性 K_{Ic} 仅31 MPam^{1/2}, 冲击韧性 A_{kv} 仅5 J, 无法用作重要承力构件。

表1 典型超高强度钢及性能

Table 1 The typical ultra-high strength steels and properties

钢种	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ_5 / %	ψ / %	α_{ku} / $J \cdot (cm^2)^{-1}$	K_{Ic} / MPam ^{1/2}	K_{Isc} / MPam ^{1/2}
300M (美)	1900	1600	10	50	80	85	20
38Cr2Mo2VA (中)	1800	1600	10	50	60	65	40
Aermet100 (美)	1965	1724	14	65	$A_{kv}41J$	115	40
Aermet310 (美)	2172	1896	14	60	$A_{kv}27J$	71	

本研究获得一种超高强度高韧性不锈钢。研究结果有助于进一步认识超高强度钢的强韧化理论和发展新型合金。

1 超高强度高韧性不锈钢的理论和实验基础

超高强度钢中的强韧化机理包括有马氏体相变强化、碳元素间隙固溶和其它元素的固溶强化, 高位错密度强化、沉淀强化以及细化“有效晶粒”强化、应变诱发残余奥氏体转变马氏体强韧化等。多种强韧化机理的复合协调, 可不断获得新超高强度钢及其

优良的力学性能。超高强度不锈钢设计也是在这些理论基础上进行的。但是,由于不锈钢中含有高量铬,淬火温度显著高于一般超高强度钢,以致其相变特性及其热工艺方法上必须采用新思路才能取得合金及其性能的发展。

表2 典型高强度不锈钢及性能

Table 2 The typical high strength stainless steels and properties

钢种	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ_5 / %	ψ / %	α_{ku} / $J \cdot (cm^2)^{-1}$	K_{1c} / MPa $m^{1/2}$	K_{1sc} / MPa $m^{1/2}$
PH13-8Mo (美)	1470	1350	12	53	70	88	80
1Cr15Ni4Mo3N (俄)	1500	1150	17	56	120	-	-
Marval (法)	1566	1491	11	61	A_{KV50J}	137	-

超高强度不锈钢研究中主要采用了如下几种机理和热工艺实验:

选用合金体系、成分和马氏体相变控制热处理工艺,获得超细马氏体板条,实现 Hall-Petch 型强化;

运用二次硬化理论,选用合金成分组合和超均匀化热工艺,获得新二次硬化相并控制其超细化和均匀化分布;

利用残余-逆转变奥氏体向马氏体相变诱发塑性;

采用真空感应熔炼(VIM)+真空电弧重熔(VAR)双真空超纯洁熔炼,控制钢中S, P, O, N等杂质元素和夹杂物。

在此基础上,用容量100 kg的VIM+VAR炉获得一种低碳-14Cr-12Co-5Mo-Me系不锈钢。钢锭经1160℃加热和超均匀化热加工并锻成 $\phi 25$ mm和25 mm \times 50 mm棒材,再经各种控制马氏体相变热处理后进行拉伸、冲击、 K_{1c} 等力学性能试验。用透射电镜(TEM)进行微观组织分析,电子选区衍射(SAD)鉴别沉淀相,X射线法测定残余-逆转变奥氏体,用Q500MC图像仪测定马氏体板条和沉淀相尺寸等。

2 实验结果与分析

2.1 回火特性与力学性能

试验钢经不同温度淬火、回火后的硬度变化曲线示于图1。可以看到,淬火回火时出现二次硬化现象,并在540℃附近回火时显示峰值。按此热处

理制度获得的试验钢各项力学性能为:抗拉强度 $\sigma_b \sim 1915$ MPa,延伸率 $\delta_5 \sim 15\%$,断面收缩率 $\psi \sim 65\%$, $\alpha_{ku} \sim 82$ J/cm 2 , $K_{1c} \sim 119$ MPa $m^{1/2}$ 等。与表1中数据相比,接近于Aermet 100钢的综合力学性能。与表2中数据相比,实现了力学性能的大幅度提高,达到了超高强度高韧性。

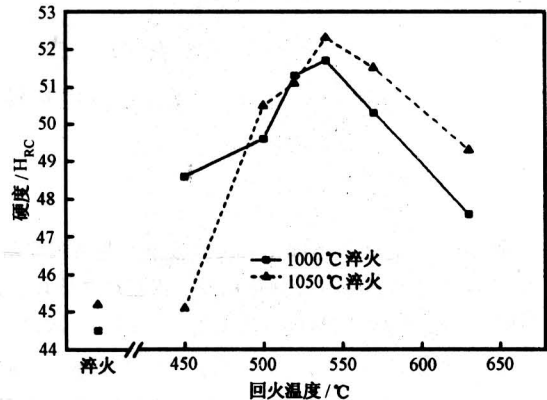


图1 硬度-回火温度曲线

Fig.1 Hardness-Tempering temperature curves

2.2 TEM 组织

不同温度回火后的 TEM 组织示于图2。

1050℃淬火后组织主要由纤细的马氏体板条、条间分布的少量奥氏体薄膜和高密度位错组成。540℃回火后高密度位错无明显变化,很难分辨出第二相沉淀。570℃回火组织明显不同,不仅位错密度较前者有明显降低,而且在马氏体板条内可看到针状和椭球状两种形态的沉淀相,另外还出现少量逆转变奥氏体。不同回火温度的组织特征变化可以解释图1中的回火硬度曲线特征。从图2a, 2c中可以看到,部分马氏体束中板条较宽且长,在其相邻束中板条窄而短。后者还具有沿长度方向被截断和变形特征。这说明马氏体相变是在不同温度下形成的。在较高温度下先形成的马氏体分割了原奥氏体晶粒并在其中造成应力-应变场。在较低温度下形成的马氏体束不仅尺寸变小,而且常有簇状变形孪晶特征。由于变形奥氏体及在较低温度下转变,马氏体相互冲撞而发生板条咬合和破碎细化,因而提高变形抗力和阻碍裂纹扩展,提高强度和断裂韧性。

用图像分析测得马氏体板条宽度结果示于图3,其中,宽度小于170 nm的板条约占65%。而Aermet100和1Cr15Ni4Mo3N钢的马氏体板条宽度分别约为280 nm和250 nm。按照Hall-Petch公式

$\sigma_s = \sigma_i + K_y d^{-1/2}$, 晶粒尺寸 d 越小, 塑性变形抗力或强化效果越显著。经修正后的 Nalyer^[5] 公式 $\sigma_s = \sigma_i + K_y d_m^{-1}$ 中, d_m 为有效晶粒马氏体板条束尺寸。同样也说明束尺寸越小, 强化效果越大, 而且与 d_m^{-1} 呈线性关系。 $d_m = 2/\pi \{ \omega \ln [\text{tg}$

$(0.5 \arccos \omega/d_p + \pi/4)] + \pi/2 d_p - d_p \arccos \omega/d_p \}$ 中, 马氏体板条宽度 ω 和长度 d_p 是表征板条束尺寸的基本参数。可以认为马氏体板条尺寸是最基本的有效晶粒, 超细马氏体板条是主要的强化因子。

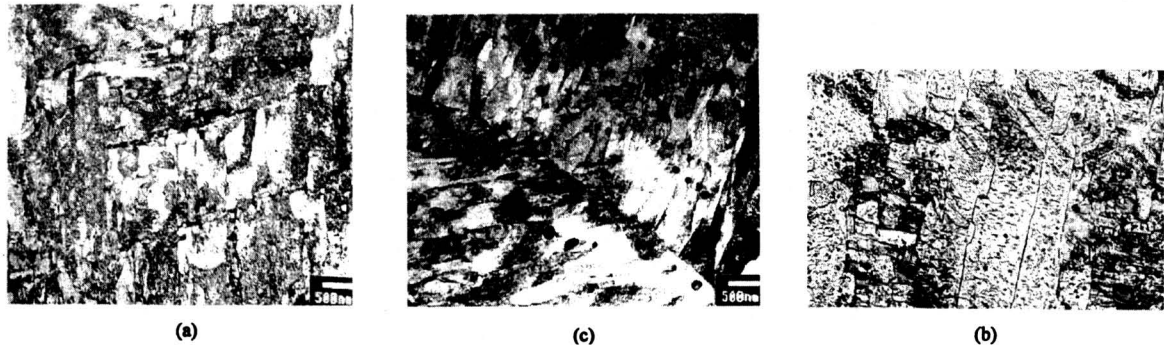


图 2 TEM 组织

Fig.2 TEM Micrographs

(a) —1050℃ 淬火; (b) —540℃ 回火; (c) —570℃ 回火

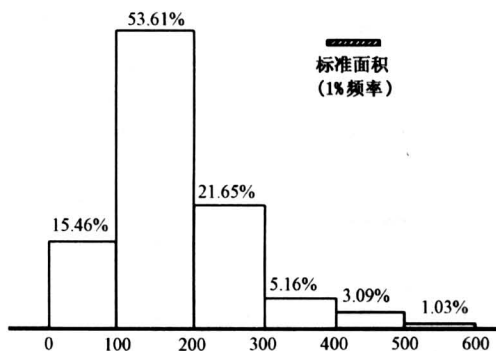


图 3 马氏体板条宽度频率分布

Fig.3 Frequency-Width distribute diagram for Martensitic laths

晶粒尺寸与冲击韧性转变温度关系用 $\beta T_c(K) = \ln B - \ln C - \ln d^{-1/2}$ 表示, 其中, β , B 和 C 为常数, d 越小, 塑-脆转变温度 T_c 越低, 韧性越好。晶粒尺寸与裂纹扩展临界应力关系 $\sigma_f \approx (2G \cdot \nu_p / K_y) d^{-1/2}$ 表明^[5], 比界面能 ν_p 一定时, d 越小, 临界应力 σ_f 越高, 塑性越好。同样, 作为最基本有效晶粒的马氏体板条细化是增加塑性和韧性的主要因子。

据此, 超细马氏体板条是超高强度、高塑性、高韧性的主要原因和机理。

用 TEM 电子选区衍射技术和李春志提出的矩

阵法^[6,7]分析了马氏体板条中的两种形态沉淀相。研究证明针状相为密排六方 (hcp) 点阵结构的 M_2C 碳化物, 它与马氏体 (M) 基体的取向关系为: $(011)_M // (0001)_{M_2C}$, $[100]_M // [2\bar{1}\bar{1}0]_{M_2C}$, 这是二次硬化钢中典型强化相, 已有很多研究。研究证明, 椭球状相为 hcp 点阵结构的 Fe_2Mo 型 Laves 相 (L)^[8]。它与马氏体基体的取向关系为 $(112)_M // (0001)_L$, $[\bar{1}\bar{1}1]_M // [110]_L$ 。以往的研究中认为 Laves 相是 600℃ 以上长时间回火产物和钢脆化的原因。表 3 中给出了 Laves 相、 M_2C 碳化物与马氏体基体点阵的错配度数据^[8,9]。用图像仪测量 M_2C 和 Laves 相质点随回火温度升高而尺寸增大的结果示于表 4。540℃ 回火后在高放大倍数下隐约可见两种形态相的析出。

按照沉淀质点共格应变场和位错应变场交互作用, 或位错通过共格应变场产生强化效应, 其切应力增量 $\Delta\tau = K\epsilon^{3/2} f^{1/2} (r_0/b)^{1/2}$ 关系式, 强化效果与点阵原子错配度 ϵ 、质点体积分数 f 和质点半径 r_0 相关。 M_2C , Laves 相的共格应变场发展充分时出现回火硬化峰值。分析图 1 中数据可以得出, 如果认为马氏体相变和超细化板条、固溶强化、位错强化等强化因子使硬度达到 $H_{RC} 45.2$, 则 M_2C , Laves 相共格沉淀使硬度提高到 $H_{RC} 52.3$, 成为获得超高强度的又一强化机理。

表3 Laves相, M_2C 及马氏体基体间的错配度
Table 3 Lattice mismatch degree between Laves phase, M_2C carbide and Martensitic matrix

Laves相		M_2C	
取向	错配度/%	取向	错配度/%
$[\bar{1}\bar{1}1]_M//[110]_L$	4.95	$[100]_M//[2\bar{1}\bar{1}0]_{M_2C}$	1.48
$[3\bar{1}\bar{1}]_M//[010]_L$	9.06	$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]_M//[1\bar{2}\bar{1}0]_{M_2C}$	16.25
$[\bar{1}3\bar{1}]_M//[1\bar{1}0]_L$		$[\bar{1}\bar{1}1]_M//[1\bar{1}20]_{M_2C}$	
$[112]_M//[001]_L$	5.91	$[011]_M//[0001]_{M_2C}$	17.98
$[1\bar{1}0]_M//[210]_L$	1.08		

表4 不同温度回火后 M_2C 及Laves相的粒度

Table 4 Particle size of M_2C and Laves phase at different tempering temperatures

相		540℃回火	570℃回火	630℃回火
M_2C	长度/nm	20~30	50~70	60~80
	直径/nm	2~3	6~8	30~60
Laves	直径/nm	1.5~2.5	10~20	30~60

用X射线衍射法测得钢中残余-逆转变奥氏体(A)量与空冷淬火、冰冷和不同温度回火等热处理状态的关系如表5所示。可以看出,540℃回火后组织中出现少量逆转变奥氏体。研究^[10]得出,在裂纹扩展前沿奥氏体向马氏体转变可由于吸收大量能量,显著松弛裂纹尖端的三向应力场,延缓裂纹扩展而提高断裂韧性。这是获得超高强度高韧性的第三个机理。

表5 奥氏体量与热处理条件的关系

Table 5 Austenitic volume function at heat treatment conditions

状态	A/%
淬火	4.1
冰冷处理	2.5
500℃回火	2.1
520℃回火	3.8
540℃回火	3.9

上述理论分析和各种试验证明,在超纯洁熔炼和超均匀化加工基础上获得的组织状态和多种强韧

化机理使钢达到超高强度、高塑性、高韧性等优良综合力学性能。

3 结论

1) 用双真空超纯洁熔炼、超均匀热加工工艺方法初步探索出一种低碳-14Cr-12Co-5Mo-Me系控制相转变超高强度高韧性不锈钢,力学性能可达到 $\sigma_b \sim 1915$ MPa, $\sigma_{0.2} \sim 1521$ MPa, $\delta_5 \sim 15\%$, $\psi \sim 65\%$, $\alpha_{kv} \sim 82$ J/cm², $K_{Ic} \sim 119$ MPam^{1/2}等;

2) 初步探索出超细化马氏体板条、共格沉淀的新强化相Laves相和 M_2C 碳化物、少量残余-逆转变奥氏体向马氏体相塑诱发塑性等新强韧化机理;

3) 首次把不锈钢提升到超高强度高韧性,开拓了一个超高强度钢新领域——超高强度不锈钢。

参考文献

- [1] Lee E U. Corrosion behavior of landing gear steels [R], AD-A285862
- [2] Dahl J M, Novotny P M. Airframe and landing gear alloy [J]. Advanced Materials & processes, 1999, (3): 23~25
- [3] Manson S S. Aerospace structure metals handbook [M], vol.2, Ferrous alloy AFC-77 [H]. 1974
- [4] Chandahok V K, Dulis E J, Kasak A. Development of new and useful elevated-temperature steels for aircraft applications [R]. ASD-TR-61-386
- [5] 赵振业. 合金钢设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999, 57~94
- [6] 李春志. 电子衍射谱分析中的一种有效方法 [J]. 物理学报, 1979, 28 (3): 314~323
- [7] 李春志. 分析几种常见电子衍射图的计算机程序 [J]. 金属学报, 1985, 21 (4): B233~240
- [8] 赵振业, 李春志, 李志, 等. 一种超高强度不锈钢齿轮钢强化相研究 [J]. 航空材料学报, 2003, 23 (1): 1~6
- [9] 凌斌. 高合金超高强度钢的微观组织及强韧化机理的研究 [D]. 北京: 北京航空材料研究院. 1996
- [10] Antolovich S D, Singh B. On the toughness increment associated with the Austenite to Martensite phase transformation in TRIP steels [J]. Metal Trans, 1971, 2 (8): 2135~2141

(下转第54页)

- [8] Van Nee R D J. Spread-spectrum code and carrier synchronization errors caused by multipath and interference [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29 (4): 1359~1365
- [9] Merphy T, Snow R. GPS multipath on large commercial air transport air frame [J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 1996, 43 (4): 297~406
- [10] Tranquilla J M, Carr J P, Al-Rizzo H M. Analysis of choke ring ground plane for multipath control in global positioning system application [J]. *IEEE Trans on AP*, 1994, 42 (7): 905~911
- [11] Breivik K, Forssell B, Kee C, et al. Estimation of multipath error in GPS pseudorange measurement [J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 1997, 44 (1): 43~52
- [12] 宋茂忠. GPS多径误差特性与抗多径方法 [J]. *南京航空航天大学学报*, 1999, 31 (增刊): 27~33
- [13] 宋茂忠. 用加权几何精度因子选星的GPS抗多径定位方法 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2000, 32 (5): 510~515

Study of Existing Problems and Solution in Vehicle Monitoring System

Zhu Zhuangsheng, Wan Dejun, Wang Qing, Zhang Xiaoguo

(Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] The purpose of this paper was providing some experience and ready reference for people who could design a utile and abroad popular GPS vehicle monitoring system. The author demonstrated some problems existing in the vehicle monitoring system, such as digital map model errors lead to map matching errors; telecommunication system information lag results in vehicle real time position error and global position system multipath error affects vehicle position. The authors had provided some schemes for solving the problems, e. g. GIS/DR protocol for solving telecommunication system information lag, nerve cell for solving global position system multipath. Experiment showed that the solution schemes had eliminated the system errors. The solution schemes had been applied to some projects, and had acquired very good application effect.

[Key words] GPS; digital map; vehicle monitoring system; telecommunication system

(cont. from p. 42)

Studying the New Strength-toughen Mechanisms, Developing a New Field of Ultra-high Steel

Zhao Zhenye, Li Zhi, Liu Tianqi, Zhu Jieyuan

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

[Abstract] The new strength-toughen mechanisms, such as super fine Martensitic laths, new strength phases, Laves phase and M_2C carbide, precipitated coherence with Martensitic matrix and the VIM + VAR double vacuum melting with super pureness, super homogenization hotwork, controlled Martensite transformation heat treatment techniques have been investigated. By means of them a new type of low carbon stainless steel, 14Cr-12Co-5Mo-Me, with ultra-high strength, high plasticity and high toughness was obtained.

[Key words] ultra-high strength stainless steel; Martensitic lath; strength-toughen mechanism