

航空用高强高韧钢 16Co14Ni10Cr2Mo

A High-strength, High-toughness Steel 16Co14Ni10Cr2Mo Used in Aviation

北京航空材料研究所 古田 金建军 钟平 王红涛

Gu Tian Jin Jianjun Zhong Ping Wang Hongtao

(Beijing Institute of Aeronautical Materials)

〔摘要〕 研究了16Co14Ni10Cr2Mo钢的力学性能和工艺性能。16Co14Ni10Cr2Mo钢的良好综合性能优于现用一般超高强度钢，可广泛地用于航空受力结构件。

关键词：高强高韧钢 力学性能 工艺性能

〔Abstract〕 The mechanical properties and processing features of 16Co14Ni10Cr2Mo steel have been studied. 16Co14Ni10Cr2Mo steel is a kind of high purity, high strength and high toughness steel. It's excellent combination features are superior to any one of existence ultra-high-strength steels. All kinds of construction parts used in aircraft and engine could be made by this steel.

Keywords: high strength high toughnes steel mechanical property processing features

1 前言

高机动性、超音速巡航、多目标作战的第四代战斗机 F22 的问世，标志着航空技术又发展到了一个新阶段。这一阶段飞机的特点是高性能、长寿命和高可靠性。这种两高一长的特点，对结构材料提出了更高的要求。考虑到舰载机对抗蚀性的特殊要求，现有的结构材料，特别是中碳、低合金超高强度钢就无法满足新机的需要了。为了适应航空技术的发展，国外创制了 Hy180—AF1410—AerMet100 新的合金钢体系。这个钢系是低碳高合金二次硬化型超高强度钢系列。它的发展成功，完全建立在现代合金化理论和先进的冶炼技术之上。低碳、高合金二次硬化型超高强度钢的特点是断裂韧度高、抗应力腐蚀性能好、焊接性能优良。用损伤容限设计法设计出的重要受力件完全能满足新机的要求，因而倍受航空界的青睐。

着眼于新一代战斗机的需要和跟踪世界材料技术的发展，我们研制成功了高强高韧钢 16Co14Ni10Cr2Mo。兹将用抚顺钢厂提供的试验料测得的部分性能报告如下。

2 试验钢的成分

试验用料的主要化学成分列于表 1。

表 1 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的化学成分 wt%

元素	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Co
含量	0.16	0.02	0.01	0.001	0.0061	1.95	9.93	1.04	13.83
AMS 6527	0.15 ~ 0.19	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.005	≤ 0.008	1.80 ~ 2.20	9.50 ~ 10.50	0.90 ~ 1.10	13.5 ~ 14.50

将参考用规范 AMS6527 的主要成分规定也录于表中。由表 1 可以看出 16Co14Ni10Cr2Mo 的成分有如下特点：（1）碳量低，不大于 0.20%；（2）合金元素含量高，达 28%；（3）硫、磷含量低，S、P 含量要求在国内用钢的技术条件中是最低的。

3 试验钢的组织结构

16Co14Ni10Cr2Mo 钢使用状态的热处理制度是：

900℃×1h，空冷

680℃×6h，空冷

860℃×1h，油冷

—73℃×1h，空冷

510℃×5h，风冷

经过这种标准处理，16Co14Ni10Cr2Mo 钢的组织组成物有：

基体板条马氏体+M₂C+残余奥氏体+逆转变奥氏体+少量孪晶+少量 Fe₃C。透射电镜下马氏体的形态如图 1。强化相 M₂C 沿位错线分布如图 2。

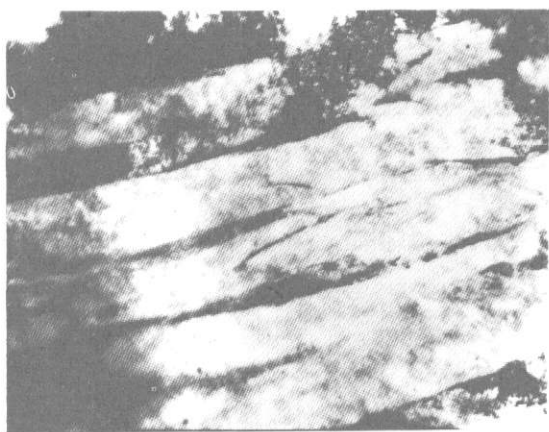
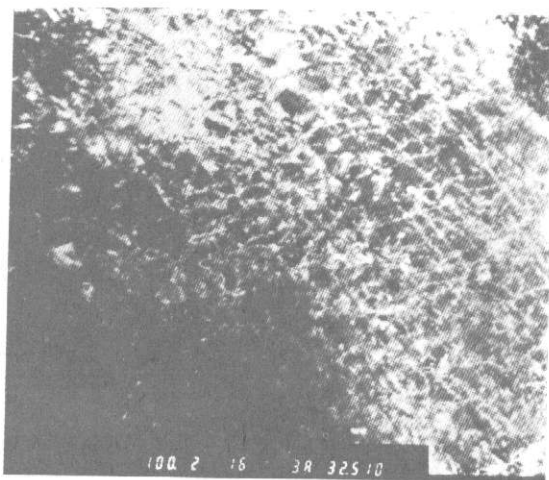


图1 16Co14Ni10Cr2Mo 板条马氏体 48000×

图2 M₂C 沿位错线分布 80000×

低碳板条马氏体强度高、韧性好；沿位错分布的M₂C有效钉扎位错，使位错移动困难，但不降低变形能力，所以整个组织表现为又强又韧，这就是说，16Co14Ni10Cr2Mo钢具备良好的组织因素。

4 试验钢的力学性能

4.1 室温拉伸和冲击性能

经过上述的标准热处理，或将淬火温度由860℃改为830℃并由油冷改为风冷，16Co14Ni10Cr2Mo钢都具有良好的强度、塑性和冲击韧性配合，这种配合在国内现用钢种中是最好的。具体数据列于表2。

4.2 低温性能

冶金系统和航空材料研究单位都对16Co14Ni10Cr2Mo钢进行了深入的低温性能研究。为

了减少试验误差对分析问题的干扰，谨将资料[1, 2]的数据报导出来。表3列出了16Co14Ni10Cr2Mo钢的低温拉伸、冲击、断裂韧性K_{IC}和动态断裂韧性K_{Id}。由表3可以看出，16Co14Ni10Cr2Mo钢的低温性能非常好，在-196℃的液氮温度，抗拉强度已大于2000MPa，此时的面缩率仍在60%以上，而动态断裂韧性为76MPa√m。比较16Co14Ni10Cr2Mo和300M钢的K_{IC}知，在-140℃以上，前者的K_{IC}值为后者的2~2.6倍^[1,3,4]。冲击韧性α_k值更是突出，-196℃时仍有105J/cm²，这一数值对一般超高强度钢来说，在室温下都很难达到。数值分析和断口观察表明，16Co14Ni10Cr2Mo钢的韧-脆转变温度在-100~-140℃范围内。在我国气候条件下和高空低温下使用该钢一般是安全的。

表2 16Co14Ni10Cr2Mo钢的拉伸和冲击性能

淬火处理	σ _{0.2}	σ _b	δ ₅	ψ	α _{ku}
	MPa		%		J/cm ²
860℃油冷	1600	1740	14	70	160
830℃风冷	1530	1740	16	70	130
AMS6527	≥1482	≥1620	≥12	≥60	—

表3 16Co14Ni10Cr2Mo钢的低温性能^[1,2]

试验温度℃	σ _{0.2}	σ _b	δ	ψ	α _k	K _{IC}	K _{Id}
	MPa		%			MPa ^{1/2}	MPa ^{1/2}
20	1520.0	1653.0	13.5	67.4	171.0	186.0	—
-20	1574.0	1687.2	13.7	65.6	154.6	146.3	—
-60	1677.2	1747.5	13.9	64.9	145.5	128.5	—
-100	1712.4	1793.9	12.8	63.5	141.0	93.2	78.4
-140	1789.7	1840.4	12.8	63.4	133.1	56.6	—
-196	1923.4	2013.8	12.7	60.4	105.0	27.1	76.08

4.3 中温性能

16Co14Ni10Cr2Mo钢因含Mo、Cr和Co、Ni合金元素很高，中温性能优良，表4列出了室温至500℃的瞬时性能数据。由表4可知，在500℃以下，拉伸和冲击综合性能优于现时常用中温钢38Cr2MoV和H-11。400℃时100h的持久强度为1210MPa。这一水平不比H-11等逊色。因此，16Co14Ni10Cr2Mo特别适用于发动机附近的飞机受力框架和部分发动机受力构件。

4.4 缺口拉伸性能

缺口拉伸性能见表5，表中数据为5个试样的平均值。由表可知，16Co14Ni10Cr2Mo钢没有缺口敏感性，

应力集中系数由 3 增大到 5 时 $\sigma_{\text{th}}/\sigma_b$ 比值不变, 足见 16Co14Ni10Cr2Mo 在这方面的良好性能。

表 4 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的中温性能

钢号	16Co14Ni10Cr2Mo		38Cr2Mo2V		H-11	
试验温度, °C	σ_b MPa	α_k J/cm ²	σ_b MPa	α_k J/cm ²	σ_b MPa	α_k J/cm ²
20	1740	160	1695	62	1790	61
200	1590	173	1620	81	1645	
300	1545	183	1530	95	1540	
400	1460	170	1420	90	1450	
500	1240	170	1295	93	1290	

注: ①数据出自资料 [5]

②数据主要出自 [6]

表 5 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的缺口拉伸性能

序号	缺口根部 半径, mm	应力集中系数 kt	σ_{th} MPa	$\sigma_{\text{th}}/\sigma_b$
1	0.50	3	2533	1.454
3	0.24	4	2540	1.457
2	0.15	5	2533	1.454

4.5 室温断裂韧度 K_{IC} 和抗应力腐蚀性能

16Co14Ni10Cr2Mo 钢具有很高的断裂韧度和优良的抗应力腐蚀性能。为便于比较, 表 6 列出了 16Co14Ni10Cr2Mo 和其它 9 种常用超高强度钢的 K_{IC} 和 K_{ISCC} 数据。

表 6 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的室温 K_{IC} 和 K_{ISCC}

钢的牌号	$\sigma_{0.2}$ MPa	取样方向	K_{IC}	K_{ISCC}	备注
			MPa \sqrt{m}		
16Co14Ni10Cr	1585	L-T	185	84.5	860℃ 油冷
2Mo	1585	T-L (φ140)	153	82.6	830℃ 风冷
30CrMnSiNi2A	1220	T-L	62.8	14.6	
40CrMnSiMoVA	1565	L-T	85.7	17.8	
4340	1690	L-T	55.8	15.4	
300M	1635	L-T	84.0	16.4/23.0	
H-11	1210		59.0	33.0	
18Ni (250)	1740		79.4	53.6	
15-5PH			81.6	61.0	
PH13-8Mo			81.0	81.0	
AFC-77	1480		61.3	39.0	

由这些数据可以看出, 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的室温 K_{IC} 和 K_{ISCC} 分别为同类其它钢的 2 倍和 4 倍。

4.6 疲劳性能

16Co14Ni10Cr2Mo 钢拉-拉 (压) 疲劳强度极限同其它钢的比较见表 7, 裂纹扩展速率比较见图 3。由表可以看出, 在相同抗拉强度条件下, 16Co14Ni10Cr2Mo 钢比 30CrMnSiNi2A 和 GC-4 钢的疲劳强度高。在抗拉强度比 300M 低约 200MPa 的前提下, 二者具有几乎相同的疲劳强度。由图 3 可知, 在 3.5% NaCl 水溶液中, 16Co14Ni10Cr2Mo 钢具有最慢的裂纹扩展速率 da/dN [7]。

表 7 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的疲劳强度 σ_b (MPa)

应力集中系数 Kt	应力比 R	本试 验钢	30CrMn- SiNi2A	GC-4	300M
1	-1	818	—	718	890
	0.06	1296	1108 (0.1)	1065	1165
	0.5	1662	—	—	1600
3	-1	350	—	256	415
	0.06	579	481	427 (0.1)	560
	0.5	691	531	—	710
σ_b (MPa)		1740	1767	1896	1965

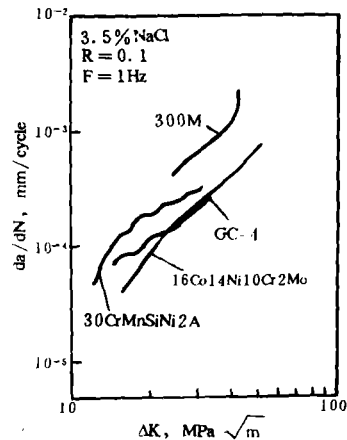


图 3 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的 da/dN 与其他钢的比较

5 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的工艺性能

5.1 焊接性能

5.1.1 裂纹倾向

按“结构钢焊接裂纹倾向性试验方法”, 用丁字形试样同时与 30CrMnSiA、30CrMnSi2A 和 40CrMnSiMoVA 钢进行对比, 结果 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的裂纹倾向性

为一级,其他钢分别为二级和三级,说明 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的可焊性非常好。

5.1.2 冷丝钨极氩弧焊性能

将冷丝钨极氩弧焊获得的坯料按第 3 节的制度热处理,测得的焊接接头性能列于表 8。由表 8 可知,接头综合性能良好,强度 σ_b 为基体强度的 90% 以上,冲击值只损失了 20%^[8]。这样的接头性能是一般超高强度钢所达不到的。

表 8 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的焊接接头强度

试样	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ_5	ψ	α_k J/cm ²
	MPa		%		
焊接接头	1639	1690	9.9	61.7	119.6
基体	1582	1714	14.3	68.5	150.6

5.2 热处理工艺性能

16Co14Ni10Cr2Mo 钢淬火加热前的组织基本为马氏体。在真空炉中加热后油冷过程中组织变化不太大,所以引起的变形和翘曲应当较小。为了验证这种想法,加工了一种大型盲孔试样,试样截面变化较大,形状较复杂。在真空炉中加热到 860℃,保温 2.5h 后淬油。淬火前后测量试样的尺寸和形状变化。试验数据表明,四个试样的长度无变化,即试样既不伸长也不缩短; $\phi 127\text{mm}$ 截面对 $\phi 45\text{mm}$ 截面的跳动量变化极小,08 号试样几乎无变化,也就是说试样不发生翘曲。由此可以得出结论,16Co14Ni10Cr2Mo 钢淬火后基本不变形或者说变形极小。这对保证零件质量和提高合格率都极有利。

6 结论

(1) 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的硫、磷含量很低,为高纯、高强、高韧钢。

(2) 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的综合性能很好,在室温抗拉强度典型值约 1740MPa 的条件下,冲击韧性 α_k 值高达 130~160J/cm²。

(3) 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的室温断裂韧性 K_{Ic} 和在 3.5% NaCl 水溶液中的断裂韧性 K_{Isc} 很高,分别约为常用低合金超高强度钢的 2 倍和 4 倍。

(4) 16Co14Ni10Cr2Mo 钢无缺口敏感性。

(5) 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的抗疲劳性能很好,疲劳裂纹扩展速率比常用超高强度钢低。

(6) 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的中、低温性能优良,应

用范围很广。

(7) 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的可焊性好,焊接裂纹倾向性为一级;冷丝钨极氩弧焊的接头强度为基体的 90% 以上。

(8) 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的热处理工艺性能好,淬火后基本不变形。

参考文献

- 唐振庭. 16Co14Ni10Cr2Mo 钢低温性能及断裂机制研究. 北京航空航天大学, 1995. 8 (内部资料)
- 唐振庭. 16Co14Ni10Cr2Mo 钢动态断裂韧性研究. 北京航空航天大学, 1995. 8, (内部资料)
- 621 研究所. 300M 钢性能数据手册, 1991
- 唐振庭. 300M 钢断裂机制的研究, 北京航空航天大学, 1989, (内部资料)
- 中国航空材料手册. 中国标准出版社, 1989
- 美国军用手册, 航空与航天飞行器结构用金属材料与元件, 1983. 6
- 陈美英. 16Co14Ni10Cr2Mo 钢腐蚀疲劳裂纹扩展特性的研究, 1995, (621 所内部资料)
- 胡广文等. 16Co14Ni10Cr2Mo 钢焊接性及工艺研究, 1995, (621 所内部资料)

采用电子束加热工艺加速 钛合金扩散焊接过程

钛合金的扩散接是一项容易进行但是相对较慢的焊接技术,因为通常必须将整个零件及其夹具加热到一定温度,而在冷却的时候,散热就会要花大量的时间。英国焊接学会的研究工作表明:采用电子束局部加热介面区域可大大加速工艺过程。采用局部加热时,因为热传导较快,升温及冷却的时间将会缩短。电子束工艺很灵活,可以同时焊接几个件,降低了能耗,而且还可以在相变温度以下完成。

据称,该工艺已用于 Ti-6Al-4V 合金及几种 γ -TiAl 金属间化合物包括 Ti-48Al-2Cr-2Nb、Ti-48Al-2Mn-2Nb 的扩散焊接。另外,它还能用于不同类型钛合金的焊接。焊接区域的显微组织与传统扩散焊区的显微组织基本相同。

(张宏伟)