

# 航空用新型超高强度钢 16NiCo

北京航空材料研究所 古田 金建军 钟平 王洪涛

16NiCo 是可焊接超高强度钢,主要成分是 0.16C-2Cr-10Ni-1Mo-14Co。靠二次硬化获得所需强度。使用状态下的基体组织为板条马氏体,主要强化相是沿位错线分布的  $M_2C$ 。力学性能的典型值为抗拉强度  $\sigma_b$  1740MPa,断裂韧性  $K_{IC}$  值为  $153MPa \sqrt{m}$ ,  $K_{ISCC}$  值为  $82MPa \sqrt{m}$ 。工艺性能良好,可用于制造受力接头、平尾大轴、着陆钩和起落架零件。

**关键词:** 超高强度钢, 16NiCo

## A New Ultra-HighStrength Steel 16NiCo for Aerospace Application

Gu Tian Jin Jianjun Zhong Ping Wang Hongtao

(Beijing Institute of Aeronautical Materials)

A highly alloyed secondary hardening steel 16NiCo has been studying for more than three years. The optimum alloy composition of the steel should be 0.16C-2Cr-10Ni-1Mo-14Co. After quenching and aging, the microstructure is composed of highly dislocated lath martensite, a small amounts of interlath retained austenite and twinning, and some carbides which strengthening the alloy. This steel possessed excellent combined mechanical properties, the typical mechanical values are as follows: the ultimate strength of 1740MPa, the plane fracture toughness  $K_{IC}$  of  $153MPa \sqrt{m}$  and and the  $K_{ISCC}$  of  $82MPa \sqrt{m}$ . 16NiCo met the requirements of aerospace application, and could be widely used to manufacture the critical joints, horizontal stabilator shaft, arresting hooks and carrier-based aircraft landing gears, etc.

**Keywords:** Ultra-Highstrength steel, 16NiCo

### 一、前言

从损伤容限设计角度看,目前正在使用的各种超高强度钢都不符合新机发展的需要。例如,现在常用的低合金超高强度钢 4340、D6AC、300M、GC-4、35NCD16 和 30CrMnSiNiA 以及中合金超高强度钢 H-11 等,强度很高,但断裂韧性  $K_{IC}$  值太低,不满足损伤容限设计的起码要求;而且应力腐蚀性能差,焊接性能不好,不利于制造结构复杂的受力件。现用的高合金超高强度钢 M250 等 18Ni 型钢,其强度和断裂韧性尚好,但它们存在着一些缺点,如弹性模量低,在技术条件规定的范围内成分波动对性能影响很大,各向异性明显等。根据上述情况,我们同冶金部门一起试制成功了 16NiCo 高合金二次硬化钢。它的强度高,断裂韧度高,抗应力腐蚀性能好,焊接等工艺性能优良,能满足损伤容限设计的要求,是一个理想的优秀钢种。16NiCo 的试制成功开

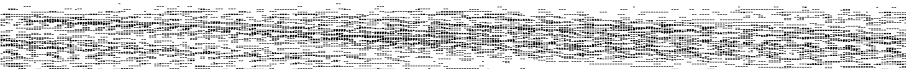
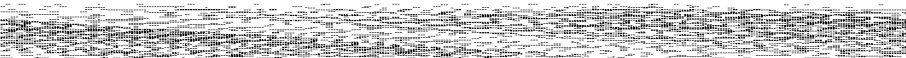
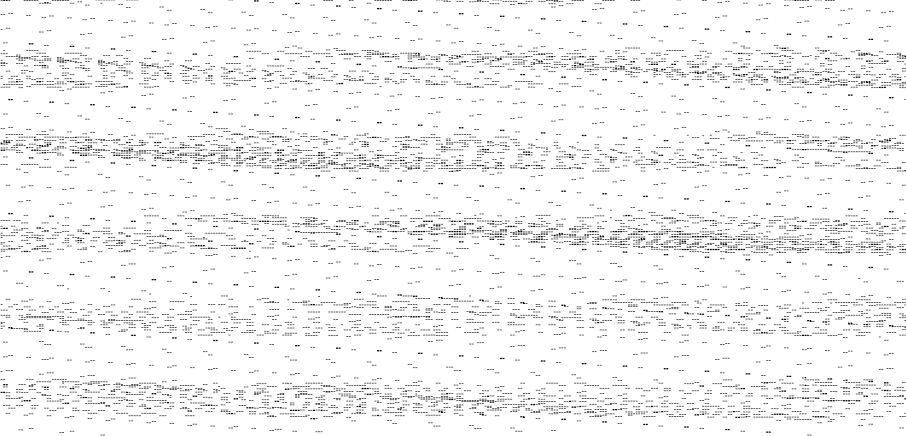
创了我国超高强度钢生产和使用的新时代。

### 二、试验用料和 16NiCo 钢的合金化

试验用料是抚顺钢厂用真空感应和真空自耗炼就的  $\phi 140mm$  和 20mm 钢棒。炉号是 2H210083,化学成分见表 1。

16NiCo 钢的成分设计综合运用了现代冶金理论。碳含量是决定钢的强度的最重要的因素。在设计钢的碳含量时,考虑了下列几个方面:(1)新钢种靠二次硬化获得最终的高强度,碳含量必须达到一定的水平;(2)新钢种必须是高韧钢,淬火后只有低碳马氏体才具有高韧性,因此碳含量又不能太高;(3)业已证明,板条马氏体具有高的韧性,碳含量只有在 0.40% 以下的低碳范围才能有把握地获得板条马氏体;(4)碳是强烈降低焊接性能的元素,为了保证良好的焊接性能,碳含量应尽量压低。综合考虑上述各点并经试炼后,16NiCo 的碳





昂的代价去力追求高的抗应力腐蚀性能。这一点也是16NiCo 钢站住脚的重要原因之一。

5. 疲劳性能

16NiCo 钢的疲劳性能好，缺口疲劳性能尤好。图 6 是 16NiCo 同几种常用超高强度钢缺口疲劳的对比曲线。由图可知，在应力集中系数  $K_t=3$ ，应力比  $R=0.06$

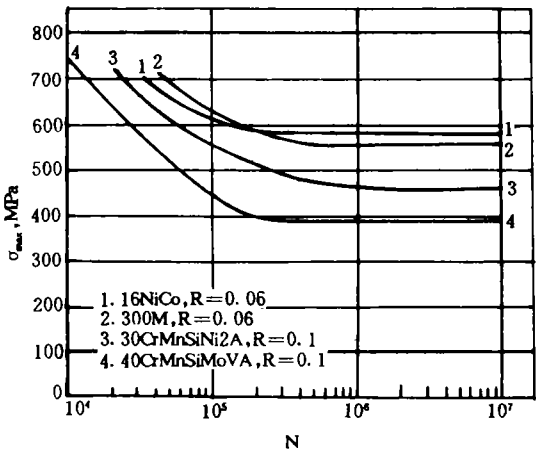


图 6 16NiCo 钢的缺口疲劳性能， $K_t=3$

的条件下，在所论各超高强度钢中，16NiCo 的缺口疲劳性能最好，这就为用它制造长寿命、高可靠性零件提供了必要条件。

6. 16NiCo 钢的缺口敏感性能

选材时应尽量选用对应力集中不敏感的材料，以尽量提高零件的可靠性并延长寿命。16NiCo 钢就是一种对缺口极不敏感的材料。取应力集中系数  $K_t$  分别为 3、4 和 5，观察缺口强度的变化，所得数据列于表 3。表中缺口强度  $\sigma_{bH}$  为 5 个试样的平均值。

表 3 16NiCo 的缺口拉伸性能

序号	缺口根部半径 mm	应力集中系数 $K_t$	$\sigma_{bH}$ MPa	$\sigma_{bH}/\sigma_b$
1	0.5	3	2533	1.454
2	0.24	4	2540	1.457
3	0.15	5	2533	1.454

表 3 告诉我们，应力集中系数由 3 加大到 5 时， $\sigma_{bH}/\sigma_b$  一点也不降低，说明该钢对缺口极不敏感。如果同其他钢的  $\sigma_{bH}/\sigma_b$  加以比较，16NiCo 钢更显示出突出的优越性<sup>[5~7]</sup>。

五、16NiCo 钢的焊接性能

16NiCo 为低碳超纯钢。一些剧烈降低焊接性能的

碳、硅、磷和气体含量都很低，所以焊接性能很好。按航标规定的方法，对 16NiCo 进行可焊性评价试验，其可焊性评为一级。可焊性与低碳贝氏体钢 18Mn2CrMoBA 和 15CDV16 相同甚至更好些。这是其他超高强度钢无法比拟的。16NiCo 钢的这一特性为其扩大应用提供了广阔前景。

六、结 论

- 1. 16NiCo 为可焊接超高强度钢用途广泛，可用以制造受力接头、平尾大轴，着陆钩、各种螺栓和起落架零件；制件的可靠性高、寿命长。
- 2. 16NiCo 钢靠二次硬化获得高强度。它的典型成分是 0.16C-2Cr-10Ni-1Mo-14Co。
- 3. 使用状态下，16NiCo 钢的基体由低碳板条马氏体组成，基本强化相为细小粒状  $M_2C$ ，碳化物沿位错线分布。
- 4. 16NiCo 钢经 830℃ 风冷，-73℃ 冷处理和 510℃ 时效后具有良好的综合性能；典型抗拉强度为 1740MPa，冲击值  $a_K$  为 128J/cm<sup>2</sup>。
- 5. 16NiCo 钢在超高强度状态下的断裂韧性很高，典型  $K_{Ic}$  值为 153MPa  $\sqrt{m}$ 。
- 6. 16NiCo 钢的抗应力腐蚀性能良好，其  $K_{ISCC}$  值可达 82MPa  $\sqrt{m}$ ， $da/dt-K$  曲线平台处的裂纹扩展速率为 10<sup>-8</sup>m/s。
- 7. 16NiCo 钢的可焊性好，按航标试验可评为一级，利于制造复杂结构件。

参考文献

- 1. AMS6527
- 2. 钟炳文等，航空材料学报，第 13 卷，第 4 期，P21，1993
- 3. 16NiCo 钢等温与连续冷却转变的特点，621 所内部资料，1994
- 4. 16NiCo 钢中残余奥氏体与逆转变奥氏体的测定，621 所内部资料，1993
- 5. 中国航空材料手册，第一册，中国标准出版社，1988，北京
- 6. 美国军用手册，航空与航天飞行器结构用金属材料与元件，上册，1984
- 7. 300M 钢性能数据手册，621 研究所，1991
- 8. Cytemp Special Steel，Unimach AF1410，1990
- 9. 40CrMnSiMoVA 钢性能数据汇编，621 研究所内部资料，1978
- 10. 国产 35NCD16 钢试验研究，621 所内部资料，1979
- 11. 轰七用 30CrMnSiNi2A 钢油淬工艺研究，621 所内部资料，1980