

# 航空高强度钢原材料和热加工的缺陷及改进措施

王 广 生

为了提高飞机的性能,航空零件尽量选用比强度高的材料,所以航空工业中广泛使用多种低合金高强度钢( $\sigma_b \geq 110$  公斤/毫米<sup>2</sup>)。高强度钢主要用于制造受力较大的重要承力件,该件往往形状复杂,服役条件苛刻;而高强度钢却具有对环境敏感、断裂突然、危害较大等特点,因此对它的生产和使用应引起足够重视。

本文讨论了高强度钢的冶金特性并提出了改进意见,希望能对高强度钢的生产、加工和使用有些参考价值。

## 一、高强度钢原材料和热加工缺陷实例

### 1. 冶炼工艺不当造成的缺陷

(1) 飞机横梁30CrMnSiNi2A 平炉钢质量问题

飞机结构钢均要求电弧炉或电渣炉冶炼。1969年钢厂为航空工业生产了一炉30CrMnSiNi2A酸性平炉钢(炉号31271),航空工厂用此炉钢制成了飞机横梁。

通过试验分析,表明此平炉钢存在如下问题:

1) 化学成分波动大,碳含量波动超出技术条件要求。虽然此炉钢在出厂和入厂检验时化学成分合格,但经多部位取样分析发现,碳含量波动很大(0.32~0.36%),上限超出技术条件要求。这是由于平炉钢炉量大、浇注锭盘多、锭型大等引起严重偏析的结果。

2) 夹杂物多,在锻件试片和拉伸试样断口附近及光滑周期强度试样断口上均发现了夹杂物,如图1所示。

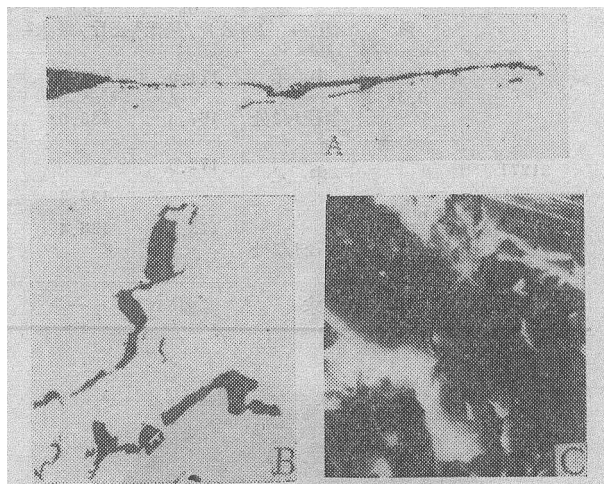


图1 31271炉平炉钢夹杂物情况

- A——锻件上的皮下夹杂, 50× (缩去1/4)  
B——拉伸试样断口附近夹杂物和次裂纹, 100×  
C——光滑周期强度试样断口上夹杂物, 1000×

3) 平炉钢横向断面收缩率和延伸率及纵向旋转弯曲疲劳性能比电炉钢明显偏低,其中横向断面收缩率和延伸率低于锻件技术条件要求(表1),这是由于平炉钢中夹杂物较多所致。

### (2) 40CrMnSiMoVA钢点状偏析

航空工厂入厂检验时,曾发现在三相电渣炉生产的40CrMnSiMoVA钢300毫米方料(供飞机主起落架锻件的坯料)低倍试片上,有技术条件不允许的点状偏析。锻造后虽然点状有所缩小,但锻件上仍明显可见,如图2A所示。金相试样上偏析区不易受腐蚀,并且受蚀不均匀,如图2B所示。

试验分析表明,点状偏析主要是以钼正偏析为主的合金元素偏析,且在偏析区内成分分布不匀,致使偏析点强度、硬度均高于基体。

### 2. 锻造工艺不当引起的缺陷

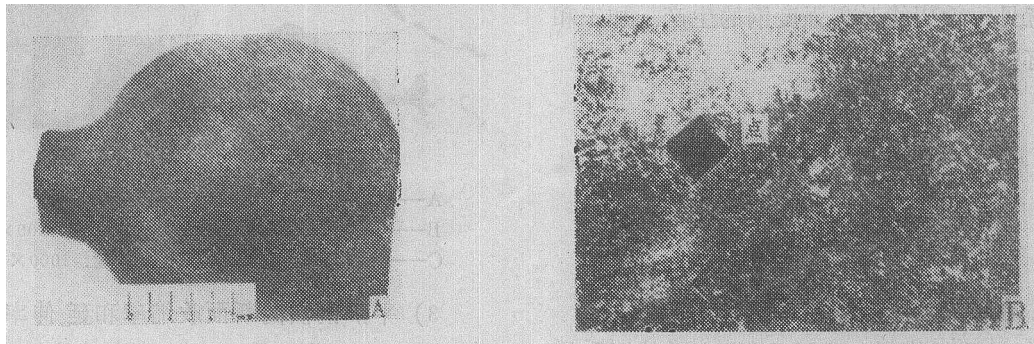
在40CrMnSiMoVA钢的原材料和锻件生产

检验中曾出现过“低倍粗晶”，如图3A所示，即在酸浸低倍试片上有肉眼可见的呈片状或多边形的晶粒。

试验研究表明，低倍粗晶是过热的粗大奥氏体晶粒受腐蚀显示出来的宏观组织，过热奥氏体晶粒随后冷却时产生取向相近的组织，如

表 1

炉 号	碳 含 量	取 样	横 向 拉 伸、冲 击 性 能					纵 向 旋 转 弯 曲 疲 劳 性 能	
	%	部 位	$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\psi$ %	$\delta_5$ %	$\alpha_k$ 公斤·米/厘米 <sup>2</sup>	$\sigma$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$N_f$ 次
31271	0.36	中 心	171.9	138.5	8.2	4.8	3.95	—	—
		半径1/2处	167.3	135.9	8.0	3.86	4.01	—	—
	0.33	中 心	172.5	132.3	13.8	6.5	5.91	55.8	$0.34 \times 10^6$
			半径1/2处					173.2	138.4
		173.2		138.4	8.9	4.06	4.93	53.4	$1.53 \times 10^6$
								51.6	$4.59 \times 10^6$
技 术 条 件 要 求			$\geq 155$	—	$\geq 25$	$\geq 5$	$\geq 2$	—	—



A. 飞机主起落架外筒锻件低倍上点状偏析 1×      B. 点状偏析区金相 100×

图 2 40CrMnSiMoVA钢锻件上点状偏析

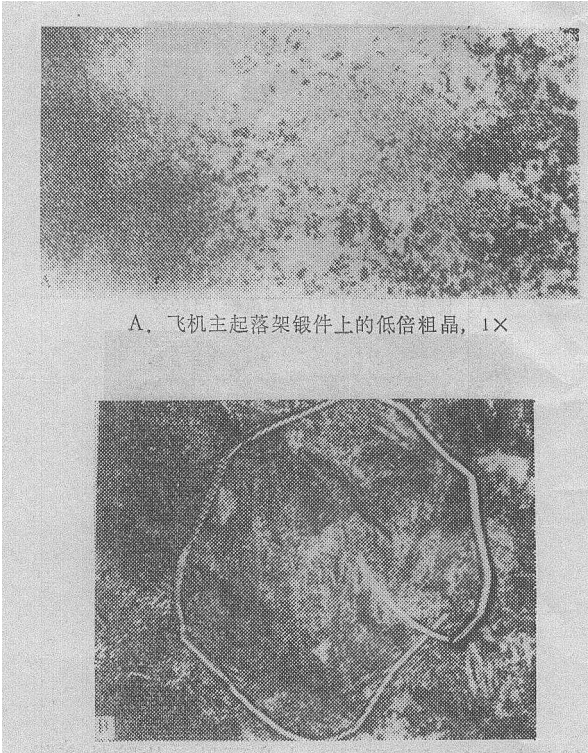
图3B所示。低倍粗晶降低钢的塑性、韧性及疲劳性能，如表 2 所示。产生粗晶的主要原因是钢材或锻件在热加工过程中，加热温度偏高，变形量小所引起的过热缺陷。用950℃ + 920℃ 两次正火可以消除粗晶，性能也有所改善（见表2）；但 1250℃ 以上过热产生的粗晶，经两次正火后性能仍低于正常组织的水平。因此，为避免粗晶应严格控制锻造工艺，特别是加热温度应控制在1150~1180℃ 范围。

3. 焊接工艺不当造成的缺陷

(1) 40CrMnSiMoVA钢焊接冷裂纹

用新型高强度焊条 HT-8（焊缝强度  $\sigma_b$  可达150公斤/毫米<sup>2</sup>）焊接的飞机主起落架，在一次落震疲劳试验时提前断裂。分析查明，在

落震疲劳试验之前，焊缝已存在小的焊接冷裂纹，落震疲劳试验使裂纹不断扩展，最后导致提前断裂，其宏观断口如图 4 所示。产生焊接冷裂纹的原因主要有两方面：第一，主导方面是焊接工艺及焊后热处理不当。焊前零件实际预热温度不够；每道焊缝焊间间隔时间长；特别是焊后回火不充分，没能使焊缝和近熔合线的热影响区转变为软化的索氏体，仍为马氏体和贝氏体（图 5），硬度较高（RC49~51），有较大内应力，以致产生焊接冷裂纹。第二是焊条本身。为了提高焊缝强度，提高了焊条芯与药皮的碳含量和合金元素含量，使焊缝的马氏体转变点降低，相变组织应力增加，所以冷裂趋向增加。此外还与焊接锁底对接形式在焊缝底



A. 飞机主起落架锻件上的低倍粗晶, 1×

B. 粗晶区金相组织 100×

图3 典型低倍粗晶及其金相

侧存在一小缝隙, 产生严重应力集中有关。

避免焊接冷裂纹的主要措施是改进焊接工艺和焊后热处理工艺, 以保证使焊缝和热影响区转变为索氏体组织。

#### (2) 40CrMnSiMoVA钢焊接显微疏松

40CrMnSiMoVA钢制造的飞机主起落架活塞杆曾发现有一件在使用 119 个起落后, 在焊缝熔合线附近有长 21.5 毫米裂纹(图6A); 另

外, 又在同样零件热处理后机加工中, 发现有两件在相似部位分别有 125 毫米和12.3毫米的裂纹(图6B)。

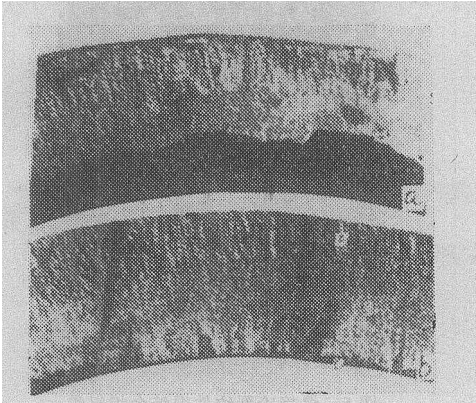


图4 断口主源附近宏观形貌

a. 断口原始情况, 3× (缩去1/4)

b. 清洗后断口, 3× (缩去1/4)

A—瞬断区; B—疲劳区; C—黑色区(原冷裂纹)

故障件金相分析表明: 熔合线附近的热影响区和焊缝区存在焊接显微疏松, 如图7所示。经分析认为, 上述裂纹均与这种焊接显微疏松有关。这是由于焊接操作不当, 温度过高造成的。因此, 应改进焊接工艺, 防止温度过高, 以减少或避免显微疏松。

#### 4. 热处理不当引起的缺陷

(1) 飞机横梁30CrMnSiNi2A 钢热处理硬度过高的问题

航空工厂在生产中曾发生一批30CrMnSiNi2A钢横梁在 900℃ 加热、210℃ 等温处理、270

表2 低倍粗晶对 40CrMnSiMoVA 钢性能的影响

试验单位	热 处 理 工 艺	室 温 性 能				周 期 强 度			
		$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\psi$ %	$\delta_5$ %	$\alpha_k$ 公斤·米/厘米 <sup>2</sup>	K	$\sigma_{max}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	N <sub>f</sub> 次	$\bar{N}_f$ 次
本 钢 (20047炉)	未正火有粗晶	196.5	29.5	9.8	6.45	—	—	—	—
	油淬+低温回火	189.5	30.0	11.0	5.6	—	—	—	—
	950℃+920℃两次正火	185.5	39.5	12.0	7.75	0.6	148.0	1831	1784
	油淬+低温回火	201.0	35.0	9.6	7.5			1761 1760	
技术条件	油淬+低温回火	≥190	≥35	≥8	≥5	—	—	—	—
	等温淬火+低温回火	≥180	≥35	≥8	≥6	—	—	—	—



图5 焊接冷裂纹件焊缝金相组织

A—光学金相, 1000×, 马氏体+下贝氏体

B、C—电子金相, 10000×, 马氏体+下贝氏体

℃回火后, 强度、硬度过高,  $\sigma_b = 185$  公斤/毫米<sup>2</sup>, RC = 52.4, 超出技术条件要求 (锻件技术条件要求  $\sigma_b = 170 \pm 10$  公斤/毫米<sup>2</sup>, RC = 47~51)。

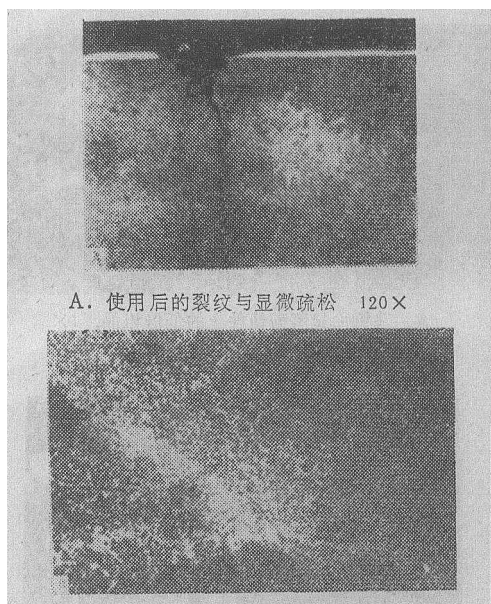


图6 飞机主起落架活塞杆熔合线附近裂纹

A—使用119个起落后的裂纹, 2×

B—热处理后机加工发现的裂纹, 2.5×

分析结果表明, 主要是等温淬火时等温温度偏低造成的, 当然也与这批料碳含量偏高有关。同一批料经不同等温温度处理后的硬度和



A. 使用后的裂纹与显微疏松 120×

B. 机加工时发现裂纹件的显微疏松  
200×(缩去1/4)

图7 故障件熔合线附近的焊接显微疏松

组织如表3和图8所示。由此可见, 故障件实际等温温度可能在180℃以下, 因此引起强度、硬度超差问题。补救办法是按正确热处理制度重新热处理。

表3 不同等温温度对30CrMnSiNi2A  
钢硬度和组织的影响

热 处 理 工 艺	RC	显 微 组 织
故障件	52.4	马氏体为基 +10%下贝氏体
900℃加热 180℃等温 1 小时 270℃回火 3 小时	50.2	马氏体为基 +20%下贝氏体 +少量残余奥氏体
900℃加热 210℃等温 1 小时 270℃回火 3 小时	49.7	马氏体为基 +30%下贝氏体 +10%残余奥氏体

(2) 飞机主起落架活塞 40CrMnSiMoVA 钢  
淬火延迟开裂

故障件裂纹是在热处理后机加工过程中发现的, 裂纹均发生在焊缝熔合线附近, 如图6B所示。裂纹断口如图9所示。宏观断口表面呈蓝色, 除裂纹源区被机械加工除掉外, 剩下的裂纹断口均为沿晶断裂+解理断裂。



图 8 不同等温温度处理的显微组织电子金相  
A—故障件；B—180℃等温处理；C—210℃等温处理

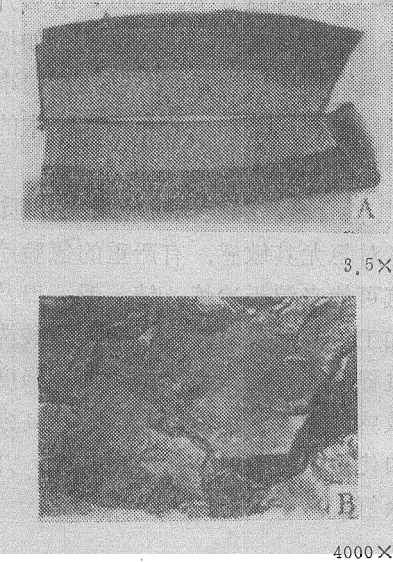


图 9 40CrMnSiMoVA 钢淬火延迟裂纹断口

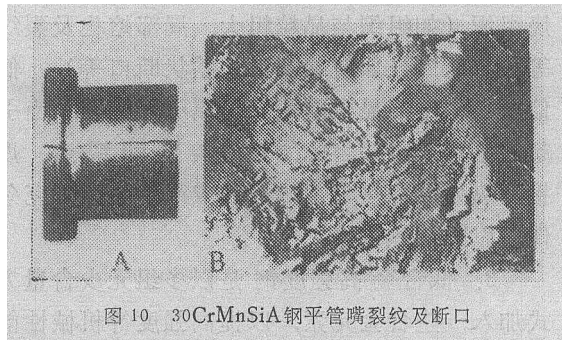
裂纹开裂的直接原因是淬火加热时甲醇裂化气体保护有渗氢现象，在等温淬火组织应力和热应力作用下，导致焊缝熔合线附近的延迟开裂。这种开裂还与焊接显微疏松有关。因此，为消除这种裂纹，要注意及时充分除氢与改善焊接工艺，减少或消除焊接显微疏松。

##### 5. 电镀工艺不当引起的缺陷

飞机油路起密封连接作用的平管嘴，曾连续发生多起裂纹，引起漏油事故。

平管嘴裂纹为轴向裂纹，如图 10A 所示，裂纹断口为沿晶断裂+准解理断裂，如图 10B 所示。故障件含氢量为 22~26ppm，所以此裂纹是由于氢和装配应力引起的氢致延迟裂纹。

模拟工艺试验的氢分析结果如表 4 所示。由表可见，镀镉工艺使材料氢含量增加很多，经 200℃ 2 小时除氢，氢含量有所下降，但仍较高，



A—裂纹宏观形貌，3×

B—裂纹断口电子金相，2000×

除氢不够充分。所以，为减少氢含量还应改进镀镉工艺和加强除氢两方面工作。此外，为避免氢致延迟裂纹，还应对平管嘴的螺帽拧紧力进行测量和控制，以减少应力来源。

## 二、分析与讨论

1. 大量实例说明，原材料的冶金质量对航空产品的质量影响极大。由于高强度钢在航空产品中的重要作用和它对缺陷很敏感的特点，所以，改进冶炼工艺，提高原材料的冶金质量，

表 4 工艺条件对 30CrMnSiA 钢中氢含量的影响

工 艺 条 件	氢 含 量, ppm										
	实 测 值										平 均 值
原材料	7.3	5.3	5.8	5.7	5.6	6.0	7.1	6.6	6.5	6.2	
零件镀镉前	12	13	11	10	11	13	10	10	10	9	11
镀镉后未除氢	20	23	20	19	18	21	19	18	19	18	20
镀镉后除氢	16	14	17	15	14	16	13	15	15	17	15

是航空高强度钢研究的重要课题。

近年来,国外在航空结构钢研究上很重视改进原材料的质量,发展新的冶炼工艺,由电炉钢发展为电渣钢、真空钢,甚至双真空钢,以减少夹杂和气体等缺陷,提高钢的纯洁度,改善塑性、韧性及疲劳性能。

2.目前,我国航空工业中使用的高强度钢均为低合金钢,其中有不少钢种过热敏感性较大,不时出现因热工艺不当引起的过热和过烧组织(如组织与晶粒粗大、局部熔化及裂纹等)和断口(如石状断口、蔡状断口等);低倍粗晶和焊接显微疏松,也属于热工艺不当引起的过热缺陷。因此,对这类钢的锻造、焊接、热处理等热加工过程都应严格控制工艺条件,以防过热过烧。

3.低合金高强度钢是以多组元少含量方式加入一些合金元素,以提高强度等机械性能和淬透性。其冷却转变曲线中珠光体转变部分右移,马氏体转变线( $M_s$ )下降,大都可空冷淬火,并且淬火内应力大,容易产生冷裂纹,如大锻件冷裂纹、焊接冷裂纹、淬火冷应力裂

纹等,在热加工过程中也应引起注意。

4.低合金高强度钢的另一个特点是其机械性能主要靠热处理工艺达到,即同一钢种可以通过不同的热处理工艺在很大范围内调整性能,以满足使用要求,这是有利的一面。如30CrMnSiNi2A钢根据需要可以处理成 $\sigma_b = 170 \pm 10$ 公斤/毫米<sup>2</sup>(油淬或180~230℃等温,250~300℃回火)、 $\sigma_b = 160 \pm 10$ 公斤/毫米<sup>2</sup>(280~320℃等温)、 $\sigma_b = 150 \pm 10$ 公斤/毫米<sup>2</sup>(310~330℃等温);另一方面,如操作稍有不当地,就会发生质量问题,甚至引起事故,所以要特别重视热处理工艺和操作技术的研究和改进。

5.低合金高强度钢对环境、介质条件很敏感,对氢尤其敏感,有严重的氢脆趋向。钢中的氢可能来源于冶炼、铸、锻、焊及热处理等热加工过程,也可能来自电镀、酸洗等表面处理过程,还可能来自周围环境。强度越高,氢脆敏感性越大。因而,在低合金高强度钢的生产和使用中要随时注意防止渗氢,并应及时充分除氢。



### 新 书 预 告

《航空锻压工艺文集》收集了六二一所近年来在航空锻压工艺技术方面取得的部分研究成果,如钛合金起动机整体叶轮等温模锻、叶轮和风扇叶片的高速锤锻造、叶片精密模锻、多向模锻、静液挤压、锻造防护润滑剂、锻模钢等新工艺技术和有关锻件质量控制等文章,对锻件的生产制造和新工艺的应用具有一定的价值,可供从事锻压工程技术工作的同志参考。该书预计于1983年4月出版,每本收费1.20元,欲购者请来函索取订单。

《航空材料》编辑部发行组  
(北京81信箱62分箱)

1983年3月