

# 航空发动机不锈钢导管用铜基钎料

一〇〇厂 六二一所

## 一、前言

航空喷气发动机的燃油、滑油、氧气用各种导管;广泛采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢制造,其联接方法大部分采用 HL-4 (仿苏 ИЖЛ-500) 钎料进行钎焊。但由于该钎料的熔化温度偏高 ( $1122\sim 1166^{\circ}\text{C}$ ),引起基体金属晶粒长大,并使导管产生表面腐蚀等缺陷,致使导管工作时断裂,影响了发动机质量。为此,研制了新铜基钎料 HLCu-2 和 HLCu-2a,用以代替 HL-4。

本文介绍了 HLCu-2 及 HLCu-2a 两种新钎料的化学成分、主要机械性能、金属物理性能和真空加热、氩气保护与火焰钎焊工艺等参数。

## 二、合金系列的选择

1Cr18Ni9Ti 不锈钢的热处理规范是在  $1030\sim 1080^{\circ}\text{C}$  加热,然后空冷(或水冷)处理。大部分导管是在  $400^{\circ}\text{C}$  以下工作,部分零件在  $600\sim 700^{\circ}\text{C}$  工作。导管除经受氧化及工作压力外,还要经受发动机的振动而产生的疲劳应力以及周期性的冷热疲劳作用。此外,根据产品的结构型式,目前部分零件是用炉中钎焊或高频钎焊,而大部分则采用火焰钎焊。因此,在选择钎料时必须考虑以下几个问题:

1. 选用钎料的钎焊温度应与导管材料的热处理温度相适应,最高不应超过 1Cr18Ni9Ti 不锈钢晶粒长大的敏感温度 ( $1150^{\circ}\text{C}$ ),否则将由于晶粒长大使基体性能下降。

2. 钎料在高温 ( $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ ) 下必须具有一定的高温强度、疲劳强度和良好的抗氧化性能。

3. 选用的钎料不仅能适应炉中钎焊和高频钎焊,还必须能适应火焰钎焊。

4. 为了适应火焰钎焊和装配方便,钎料应能加工成丝材及带材等。

目前,据文献报导,国内外用来钎焊不锈钢的钎料种类不少,如银基、锰基、铜基、镍基和金基等都广泛用于不锈钢的钎焊,但能满足上述要求的钎料并不多。例如银基钎料,虽然具有一定的强度和良好的钎焊工艺性能,但高温抗氧化性能较差,高温强度较低,一般只能在  $400^{\circ}\text{C}$  左右使用。镍基钎料具有良好的热强性能及高温抗氧化能力,但镍的熔点太高,为了降低熔点,必须加入大量的其它元素(如硅等),其结果加工成型困难,也不便采用。锰基钎料用来钎焊不锈钢时,除了具有合适的钎焊温度外,尚具有一定的热强性。锰基钎料中较典型的钎料为 Mn-16、ONi-16、OCu-1、OB。该钎料的熔点较低 ( $1010\sim 1038^{\circ}\text{C}$ ),可在  $1060\sim 1100^{\circ}\text{C}$  进行气体保护炉中钎焊,但它的最大弱点是抗氧化性较差,在高温长期使用不够稳定。此外,因锰含量太高,不能进行火焰钎焊及真空钎焊。金基钎料用来钎焊不锈钢时,除了具有合适的钎焊温度(约  $1000^{\circ}\text{C}$  左右)及良好的钎焊工艺性能外,还具有非常好的抗氧化性能、高温强度及抗腐蚀性等。金基钎料中最典型的是 82Au-18Ni,该钎料英、美等国应用较广,如美制涡轮风扇发动机(JT-3D)的燃油总管就采用了此种钎料。但金基钎料的价格非常昂贵,所以近几年来英、美等国已着手研制它的代用料。铜基钎料是应用比较广泛的一种钎料,近十多年来,人们在铜基钎料方

面进行了大量的试验研究工作, 研究出了一些适合于钎焊不锈钢的、高温性能较好的铜基钎料。据文献报导, 美国的一种新型铜基钎料 (9217), 其化学成分 (%) 是 58.5Cu, 31.5Mn 和 10Co, 钎焊温度为 1000℃ 左右, 具有较好的高温性能, 在 650℃ 时的瞬时强度为 10.6~15.0 公斤/毫米<sup>2</sup>。在苏联, 1960 年研究出了一种熔点较低, 热强性较高的铜基钎料, 牌号为 Bnp-4, 其化学成分 (%) 是 Mn27~29, Ni27~29, Co4.5~5.5, Fe0.8~1.2, Si0.8~1.2, B0.15~0.25, Na0.05~0.15, Li0.15~0.30, K0.01~0.20, P0.1~0.2, Cu 余量。钎焊温度 1000~1050℃。该钎料在 600℃ 时抗剪强度为 13~18 公斤/毫米<sup>2</sup>。但是这两种钎料含 Mn 太高, 火焰钎焊比较困难。

由此可见, 选择铜基钎料钎焊奥氏体不锈钢是大有希望的。因此, 在探索性试验阶段, 我们选择了以铜为基的四个合金系进行钎焊工艺性及 600℃ 抗剪强度试验。结果表明, Cu-28Mn-28Ni-5Co-1Si-1Fe-0.2B 具有较好的综合性能, 它除了具有较低的钎焊温度外, 还具有较高的抗剪强度。但由于含 Mn 量较高, 火焰钎焊时飞溅严重, 园根成型不好, 需要进一步改进。

### 三、钎料成分的选择和调整

在 Cu-28Mn-28Ni-5Co-1Si-1Fe-0.2B 钎料中, 各元素的作用如下:

Ni——是该钎料中主加元素之一, 它不但能显著提高合金的热强性, 而且能改善合金的钎焊工艺性能, 增加钎料在基体金属上的流动性以及有防止缝隙腐蚀的作用。但是 Ni 含量太多时, 就会大大提高合金的熔点。

Co——它的作用与 Ni 相似, 但它对铜基合金的热强性影响要比 Ni 好的多, 由 Cu-Co 二元合金状态图可知, 当 Co 量超过 5% 时, 随着 Co 含量的增加, 合金的液相线温度显著升高。

Mn——它在 Cu-Ni 合金中能大大降低合金的熔点而对合金的热强性及塑性没有明显的影响, 当 Mn 量超过 10% 时火焰钎焊就会发生

严重的飞溅, 而且 Mn 量越高, 真空钎焊越困难。

Fe——在 Cu-Ni 合金中加入少量的 Fe (1.5% 以下), 不但合金的强度和持久性能显著增加, 而且合金的塑性并不下降, 尤其是在 Cu-Ni 合金中同时加入 Mn 和 Fe 的情况下, Fe 的作用就更加明显。

Si——在 Cu 合金中加入 Si 之后, 能显著降低合金的熔点, 增加其流动能力, 加入适量的 Si 还能增加合金的热强性。但是 Si 能显著降低合金的塑性。

B——是活性较强的元素, 在 Cu 基合金中加入少量的 B 能大大改善钎料的钎焊工艺性能, 而对合金的强度和塑性没有坏的影响。

根据每个元素在 Cu 基合金中的作用, 我们研究了各个元素的相互影响, 通过一系列的试验研究工作, 冶炼了一百多炉的合金, 进行了钎焊工艺性能及机械性能对比试验, 最后选出了较理想的两种钎料, 分别定名为 HLCu-2 和 HLCu-2a, 其化学成分见表 1。

表1 钎料HLCu-2和HLCu-2a的化学成分

钎料牌号	化学成分, %						
	Cu	Ni	Co	Mn	Si	B	Fe
HLCu-2	67.55	18.00	5.0	6.5	1.75	0.20	1.0
HLCu-2a	69.05	18.00	5.0	5.0	1.75	0.20	1.0

### 四、HLCu-2及HLCu-2a上、下限成分的确定

在一系列试验工作的基础上, 选配了 HLCu-2 钎料的全上限及全下限两炉钎料, 并进行钎焊工艺性和 600℃ 抗剪强度试验, 其结果见表 2。

表2 HLCu-2 钎料全上、下限的化学成分

钎料特征	化学成分, %						
	Cu	Ni	Co	Mn	Si	B	Fe
全上限	65.11	19.0	5.5	7.0	1.9	0.25	1.2
全下限	69.91	17.0	4.5	6.0	1.6	0.15	0.8

火焰钎焊工艺性试验结果表明,全上限及全下限都可以,只是全上限略有飞溅,有时有气泡,而流动性还好。

真空钎焊,在 $1 \times 10^{-4}$ 毫米汞柱真空炉中进行,可获得满意的结果,见表3。

表3 真空钎焊试样600℃抗剪强度

钎料特征	钎焊方法	装配间隙 毫米	抗剪强度 公斤/毫米 <sup>2</sup>	断裂位置
全上限	真空钎焊1070~1120℃5分钟	0.05	19.1~23.8* 21.8	均为剪开
全下限	真空钎焊1070~1120℃5分钟	0.05	17.1~17.8 17.4	均为剪开

\* 注:1.表中性能数据,分母为平均数据,分子为上下限范围(下同)。

2.HLCu-2a的全上限和全下限成分,除Mn为4.0~6.0%外,其余与HLCu-2相同。

由上述结果可以看出,全上限和全下限成分的钎料都可以进行火焰钎焊,真空钎焊的结果满意,600℃抗剪强度比HL-4稍高(HL-4钎料600℃抗剪强度为17公斤/毫米<sup>2</sup>,见表8)。因此,HLCu-2的上限和下限成分被基本确定。

## 五、HLCu-2及HLCu-2a全面性能

### 1. 钎焊工艺性能

火焰钎焊 HLCu-2及HLCu-2a钎料都可以进行火焰钎焊,并有良好的流动性。但HLCu-2比HLCu-2a容易产生气泡,园根成型也没有HLCu-2a好。对HLCu-2a钎料,操作者试焊后反映较好。这种钎料流动性比HL-4好,钎焊时间短,效率高,经过不长时间的试焊就能够掌握操作,获得较满意的成型。

氩气保护钎焊 可以满意地进行氩气保护下高频钎焊和炉中钎焊。

真空钎焊 在 $1 \times 10^{-4}$ 毫米汞柱真空中进行钎焊,可以得到比较满意的钎焊接头。

同时,在真空条件下,把HLCu-2及HLCu-2a钎料的润湿性、漫流性、填充间隙能力和对基体的熔蚀性等与HL-4钎料做了对比,结果表明,除新钎料比HL-4的流动性好些外,

其余没有差别。因此,在火焰钎焊时,建议采用HLCu-2a,而在真空与氩气保护钎焊时使用HLCu-2。

### 2. 熔化温度及钎焊温度

熔化温度及钎焊温度见表4。

表4 熔化温度及钎焊温度

钎料牌号	熔化温度, °C		钎焊温度, °C	
	固相线	液相线	真空钎焊	氩气保护钎焊
HLCu-2	1027	1070	1080~1100	1070~1090
HLCu-2a	1053	1084	1090~1110	1080~1100
HL-4	1122	1166	1180~1200	

\* 熔化温度范围由热差法测得。

### 3. 麻面问题

采用HL-4钎料钎焊1Cr18Ni9Ti不锈钢导管的生产中,长期存在的表面缺陷是近缝区的表面熔蚀(即俗称麻坑、麻点、麻面等),造成了成批导管表面锉修甚致报废,严重影响生产和产品的使用。

为了探讨克服麻面缺陷的可能性,进行了对比试验。其方法如下:

将 $\phi 16 \times 1$ 毫米的1Cr18Ni9Ti导管套入相应的管接头内,采用HL-4和HLCu-2a分别涂以201和16号钎剂,接头型式完全相同,用氧-乙炔中性火焰钎焊,试验结果见表5。16号钎剂成分为71%  $H_3BO_3$ , 23%  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ , 0.8%  $SiO_2$ , 1.2%  $Na_2SiF_6$ , 4%  $Na_3AlF_6$ 。201号钎剂成分为79%  $H_3BO_3$ , 15%  $Na_2B_4O_7$ , 6%  $CaF_2$ 。

表5 表面麻面情况

钎料	钎剂	接头个数	有麻面的接头个数
HLCu-2a	16	7	无
	201	7	无
HL-4	16	7	5
	201	7	4

由表5可见, HLCu-2a 钎料无论用 201 或 16号钎剂, 表面均未出现麻面缺陷, 而用HL-4钎料, 用201和16号钎剂都有50%以上的接头出现麻面缺陷。

为了进一步验证上述试验结果的准确性, 进行了第二次试验。条件和第一次相同, 结果也与第一次相似, 见表6。

表6 表面麻面情况

钎 料	钎 剂	接头个数	有麻面的接头个数
HLCu-2a	16	6	无
	201	6	无
HL-4	16	6	4
	201	6	4

用 HLCu-2a 钎料钎焊试车零件过程中, 共钎焊了173条焊缝均未发现麻面缺陷。

上述试验结果及生产实践证明, 降低钎料熔点和钎焊温度是克服麻面缺陷的有效途径。这是HLCu-2a钎料优于HL-4钎料的显著特点之一。

#### 4. 钎料的成型性能

HLCu-2及 HLCu-2a 具有较好的成型性能, 经包套轧制, 可顺利地得到 2 毫米左右的板材和 0.1 毫米左右的箔材。经挤压开坯而后轧制拉拔, 可获得直径 2 毫米左右的丝材。

#### 5. 金相组织

##### 1) 基体晶粒长大情况

试验所用的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢导管在供应状态基体金属的晶粒度为7~8级。用HLCu-2和 HLCu-2a 钎料火焰钎焊的接头中, 近缝区基体金属晶粒度约为7~8级, 见图1、2。真空钎焊的为 6~7 级, 见图3。而 HL-4 钎料火焰钎焊接头中近缝区基体金属晶粒度约为3~5级, 见图 4。真空钎焊的为 2~3 级, 见图 5。

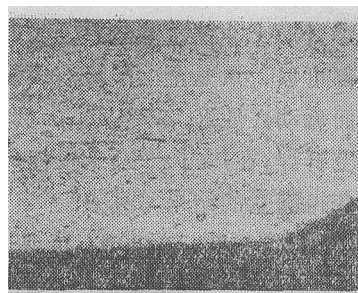


图 1 HLCu-2 火焰钎焊接头 (近缝区基体金属晶粒度7~8级) 100 × 10% 草酸电解腐蚀

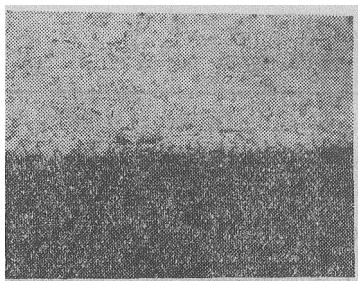


图 2 HLCu-2a 火焰钎焊接头 (近缝区基体金属晶粒度7~8级) 100 × 10% 草酸电解腐蚀

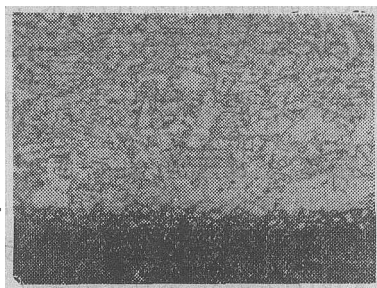


图 3 HLCu-2a 真空钎焊接头 (近缝区基体金属晶粒度6~7级) 100 × 10% 草酸电解腐蚀

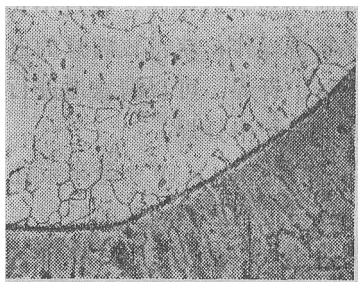


图 4 HL-4 火焰钎焊接头 (近缝区基体金属晶粒度3~5级) 100 × 10% 草酸电解腐蚀

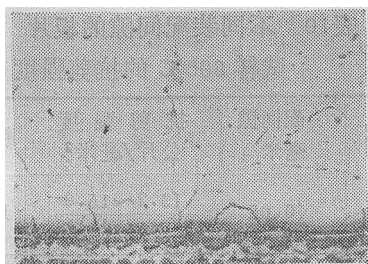


图 5 HL-4 真空钎焊接头 (基体金属晶粒度2~3级) 100×  
10%草酸电解腐蚀

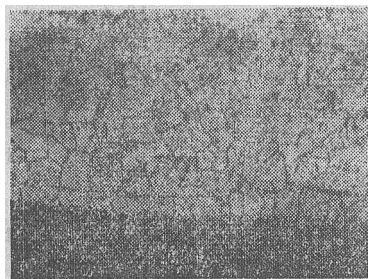


图 6 HL-4火焰钎焊接头(晶界渗入0.17毫米) 100×  
10%草酸电解腐蚀

表 7 管状接头瞬时强度

钎料牌号	试验温度 °C	破断载荷 公斤	断裂位置
HLCu-2	室温	1632~1770 1701	均断于 基体
	400	1140~1230 1187	
	500	1090~1245 1172	
	600	1095~1160 1127	
	700	794~860 838	
HLCu-2a	室温	1600~1670 1640	同 上
	500	1245~1285 1255	
	600	1120~1150 1137	
	700	860~924 892	
	700	860~924 892	
HL-4	室温	1610~1800 1700	同 上
	600	1030~1150 1083	
	700	774~880 811	
	700	774~880 811	

注:管状接头均采用火焰钎焊,钎焊时用 201钎剂,轻微还原焰(下同)。

## 2) 晶界渗入情况

由图1、2可知, HLCu-2和 HLCu-2a都有轻微的沿基体金属晶粒边界渗入现象。最大渗入深度为0.03毫米。而HL-4的最大晶界渗入更多,其深度为0.17毫米,见图6。

## 6. 机械性能

管状接头机械性能见表7。

板片接头机械性能见表8。

表8 板片接头瞬时强度

钎料牌号	钎焊方法	试验温度 °C	抗剪强度 公斤/毫米 <sup>2</sup>	断裂位置
HLCu-2	高频加热 氩气保护	-20	29.1~31.8 30.5	均剪开
		室温	26.4~29.6 27.8	均剪开
		400	22.3~24.9 23.5	一片断于 基体,二片 剪开
		500	16.3~18.6 17.3	均剪开
		600	13.4~17.9 15.4	均剪开
		700	12.6~16.3 14.2	均剪开
HLCu-2a	高频加热 氩气保护	室温	24.8~30.4 28.3	均剪开
		500	16.3~18.0 17.3	均剪开
		600	14.2~15.6 15.0	均剪开
		700	11.9~12.5 12.2	均剪开
		700	11.9~12.5 12.2	均剪开
HL-4	高频加热 氩气保护	室温	33.1~34.6 33.9	均剪开
	真空钎焊	600	15.7~18.6 17.0	均剪开
	高频加热 氩气保护	700	13.1~13.5 13.3	均剪开

注:基体板材均为2.0毫米厚的1Cr18Ni9Ti材料(下同)。

### 7. 钎焊接头抗氧化处理试验

针对设计要求, 希望提供 700℃ 抗氧化性能, 我们除做了 600℃ 抗氧化试验 (结果表明, 新钎料与 HL-4 经 600℃, 100 小时处理具有同等的抗氧化能力) 外, 还专门做了 700℃ 100 小时抗氧化处理, 结果见表 9。

表9 经700℃100小时抗氧化后的机械性能

接头形式	钎焊方法	钎料牌号	试验温度 ℃	破断载荷 公斤	抗剪强度 公斤/毫米 <sup>2</sup>	断裂位置
管状接头	火焰钎焊	HLCu-2	室温	1720~1840 1773	—	均断于基体
			700	580~910 730	—	
		HLCu-2a	室温	1730~1875 1808	—	
			700	770~914 835	—	
		HL-4	室温	1760~1875 1833	—	
			700	640~845 755	—	
		HLCu-2	室温	—	23.5~26.7 24.7	均剪开
			700	—	9.5~11.9 10.7	均剪开
		HLCu-2a	室温	—	24.9~28.7 26.3	均剪开
			700	—	10.5~11.6 11.2	*
板片接头	高频加热氩气保护	HL-4	室温	—	32.8~38.0 36.2	均剪开
			700	—	12.4~15.4 14.2	均剪开

\* 一片断于基体, 二片剪开。

### 8. 钎料对装配间隙的敏感性试验

钎料对装配间隙的敏感性试验结果见表 10。

表10 不同装配间隙的板片  
试样 600℃ 的抗剪强度

钎料牌号	装配间隙 毫米	抗剪强度 公斤/毫米 <sup>2</sup>	断裂位置
HLCu-2	<0.05	13.2~15.0 14.2	均剪开
	0.07	13.4~17.9 15.4	均剪开
	0.15	10.6~16.6 13.4	均剪开
HLCu-2a	<0.05	13.0~14.7 13.8	均剪开
	0.07	14.2~15.6 15.0	均剪开
	0.10	12.6~14.6 13.7	均剪开
	0.15	12.4~13.6 13.1	均剪开
	0.30	11.0~13.7 12.2	一片断于基体, 二片剪开

由表 10 可以看出, 钎料对装配间隙不敏感, 较理想的装配间隙应控制在 0.05~0.10 毫米范围内。

### 9. 钎料对基体材料的影响

钎料对基体材料的影响试验结果列入表 11。

表11 钎料对基体材料机械性能的影响

钎料牌号	试样特征	抗拉强度 公斤/毫米 <sup>2</sup>	相对延伸率 %
HLCu-2	在真空加热条件下, 基体材料表面流布 0.04~0.08 毫米厚的 HLCu-2 钎料层	58.4~59.4 58.9	50.0~51.4 50.7
HL-4	在真空加热条件下, 基体材料表面流布 0.04~0.08 毫米厚的 HL-4 钎料层	55.5~59.4 58.0	55.8~60.2 57.6
无钎料	基体材料 (表面无钎料层) 同为真空加热条件下处理	63.7~64.5 64.1	52.3~53.7 52.9

由表11 可知, HLCu-2和HL-4 钎料在真空加热条件下, 对基体材料的机械性能影响没有差别。

10. 钎焊接头受海水腐蚀的影响

海水腐蚀试验条件: 将钎焊好的板片接头试样用塑料绳分别系在交替轮上, 交替轮的下部1/5浸入 35℃ 的人造海水槽中, 交替轮每30 分钟转一圈, 以保证试样在海水中浸 5 分钟、在空气中25分钟, 如此不停反复交替腐蚀, 累计试验时间200小时, 中间每 24 小时做一次观察记录, 其海水腐蚀后的钎焊板片接头的机械

性能见表12。海水腐蚀后的外观情况见表13。

表12 说明, HLCu-2a 及 HLCu-2 板片钎焊接头在海水腐蚀后的抗剪强度与 HL-4具有同等水平。

表12 钎焊板片接头受海水腐蚀后的机械性能

钎料牌号	试 验 温 度 °C	平均抗剪强度 公斤/毫米 <sup>2</sup>
HLCu-2a	700	18.7
HLCu-2	700	15.0
HL-4	700	16.3

表13 钎焊接头受海水腐蚀后的外观情况

试样类型	使用钎料	试样状态	外观检查 (表面颜色)							
			50小时		100小时		150小时		200小时	
			钎 缝	基 体	钎缝	基体	钎缝	基体	钎缝	基体
管状接头	HL-4	火焰钎焊后酸洗	稍灰, 与基体交界处有棕色锈	失去金属光泽	暗灰	失去金属光泽	暗 灰	失去金属光泽	暗灰, 有少量灰绿色粉末	失去金属光泽
	HLCu-2	同上	同上	同上	暗灰	同上	暗灰, 有少量灰绿色粉末	同上	同上	同上
	HLCu-2a	同上	同上	同上	暗灰	同上	同上	同上	同上	同上
板片接头	HL-4	真空钎焊	稍灰	同上	暗灰	同上	暗灰	同上	暗灰	同上
	HLCu-2	真空钎焊	稍灰	同上	暗灰	同上	暗灰	同上	暗灰	同上
	HLCu-2a	真空钎焊	稍灰	同上	暗灰	同上	暗灰	同上	暗灰	同上

注: 人造海水溶液成分: NaCl 27克/升, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 12.75克/升, KCl 1克/升, CaCl<sub>2</sub> (无水) 1克/升; 溶液温度35℃, 空气温度35℃。

六、试验结果的讨论

由上述结果可以看出:

- 1. 新钎料熔化温度比HL-4 低 80~100℃, 钎焊温度也相应低80~100℃。这是由于新钎料中降低了Ni含量, 加入了Mn的缘故。
- 2. 由于钎焊温度的降低, 克服了HL-4钎料的钎焊温度偏高而引起基体金属 (1Cr18Ni9Ti) 的晶粒长大及产生表面熔蚀现象 (麻点、麻面缺陷)。由于钎焊温度的降低, 火焰钎焊

- 或真空钎焊的接头基体金属的晶粒比用HL-4的晶粒细。如供应状态的基体金属晶粒度为7~8级, 新钎料钎焊后的基体金属晶粒度为 6~8级, 而HL-4钎焊后的基体金属晶粒度为 2~5级。消除了质量隐患。这是新钎料优于 HL-4的最显著的两个特点。
- 3. 如前所述, 为了提高发动机导管的抗疲劳性能, 钎料向基体金属晶界渗入深度应越小越好。试车断裂及长期工作过的发动机的1Cr18Ni9Ti 导管剖切检查结果也证实了这一点。

试车断裂的导管, 钎料向基体的晶界渗入深度均在0.11毫米以上, 而经长期试车未断或由于机械损伤而断裂的导管, 钎料向基体的晶界渗入深度在0.07毫米以下。

高温钎料, 为了降低熔点、改善流动性等方面的需要, 一般都含有原子半径小、晶界渗入能力强的元素硼, 因此钎料渗入晶界是不可避免的。用新钎料钎焊时, 由于钎焊温度低, 且流动性好, 钎焊时间短, 晶界渗入小, 最大为0.05毫米, 而HL-4最大为0.17毫米。晶界渗入小, 对于薄壁导管来说, 具有重要意义。这是新钎料优于HL-4的显著特点之三。

4. 新钎料钎焊的1Cr18Ni9Ti管状接头抗剪强度, 无论是室温或高温(600℃和700℃)强度与HL-4钎焊的接头强度, 都具有同等水平。

5. 新钎料钎焊管状接头在700℃经100小时抗氧化处理后的强度, 略高于HL-4钎焊管状接头的强度。但板状接头强度比HL-4低。

6. 新钎料与HL-4的真空钎焊和氩气保护钎焊工艺性能差不多。火焰钎焊工艺性能HLCu-2a与HL-4大致相同。而HLCu-2火焰钎焊初焊时容易产生飞溅。这是由于钎焊时Mn的剧烈燃烧而引起的, 使用HLCu-2, 在操作时应注意使火焰中心加热基体, 火焰边缘加热钎料, 如果注意降低钎焊的温度, 就不会产生明显的飞溅。HLCu-2a比HLCu-2的含Mn量稍低(其它成分相同)不易产生飞溅, 所以HLCu-2a比HLCu-2的工艺性能要好。

7. 在真空加热条件下, 让新钎料和HL-4流布在基体金属上(厚为0.04~0.08毫米)。试验证明两种钎料对基体材料机械性能的影响没有差别。新钎料同HL-4都使基体材料抗拉强度降低9%左右, 而塑性都没有变化。

8. 新钎料和HL-4抗海水腐蚀能力在100小时以内无差别。在200小时以内真空钎焊接头没有差别; 而火焰钎焊接头则新钎料比HL-4早50小时在钎料表面产生少量灰绿色粉末。

总之, 由于钎焊温度的降低, 避免了晶粒长大, 消除了麻坑麻面缺陷, 减小了晶界渗入

深度, 从而可提高导管的抗疲劳能力。新钎料钎焊的管状接头, 在室温、高温、经过抗氧化处理或未经抗氧化处理的所有拉伸试样, 都断于基体金属, 达到或略高于HL-4, 这足以说明新钎料的钎焊接头具有足够的强度。

## 七、工厂试用和试车情况

### 1. 工厂试用情况

在有了些感性知识的基础上, 用新钎料试焊了三批零件, 共21个件号计45件173条钎焊缝; 用氧-乙炔手工火焰钎焊, 钎剂用201号, 其余工序按工厂现行工艺。

为了考验新钎料高温工作的可靠性, 第一次钎焊的导管是发动机扩散器内通向点火器的 $\phi 16 \times 1$ 毫米1Cr18Ni9Ti高温(700℃左右)工作零件。第二、三批生产的有各种用途、不同规格的导管, 如有 $\phi 14 \times 1$ 毫米、试验压力为150公斤/厘米<sup>2</sup>的燃油进油管, 有 $\phi 14 \times 1$ 毫米和 $\phi 12 \times 1$ 毫米、试验压力为20公斤/厘米<sup>2</sup>的空气进气管, 有 $\phi 8 \times 1$ 毫米、试验压力为50公斤/厘米<sup>2</sup>的氧气进气管和燃油排油管等等。

任何新技术新材料的应用, 都有一个由必然王国到自由王国的发展过程。第二次试焊零件时, 由于零件形状复杂, 有三件焊透量不够, 经补焊合格。第三批32件, 经过外观检查、X光透视、液压试验, 内腔通钢球等检验工序, 都一次合格, 没有返修。

为了考察操作者对新钎料钎焊零件的熟练程度, 根据产品设计部门的意见, 由技术熟练的老工人、有一定实际操作经验的青年工人和从事钎焊工作不到一年的青年工人, 进行了不同操作方法的技术表演。从多年的生产实践得出, 导管越粗, 加热时间越长, 局部受热温度越高, 接头缺陷越多, 返修率越高, 所以技术表演选用较粗的 $\phi 16 \times 1$ 毫米导管, 作了新旧操作方法和补焊试验, 三位操作者对HLCu-2a运用自如, 21个接头经X光透视等检查, 都一次焊成合格。钎焊用轻微还原焰, 速度快, 效率高。如果加热温度过高, HLCu-2a钎料将会飞溅



而有“自动报警”的作用，从而克服了由于加热温度过高而产生的弊病。

新钎料钎焊的产品质量大为改观。用HLCu-2a钎焊的194条试验件钎焊缝，外加对比试验的26条钎焊缝，均未发现导管表面麻点麻面缺陷及零件烧伤等现象，而这些在工厂用HL-4钎焊产品时，是经常发生并要返修甚至报废的缺陷，从而解决了导管生产中长期存在的质量关键。新钎料不但降低了废品率，而且降低了返修率，减轻了劳动强度，降低了生产成本，提高了产品质量。

由于降低了钎焊温度，新钎料钎焊后导管表面呈亮白色，钎剂熔渣呈玻璃状，透明发亮，冷却后，部分熔渣从导管表面自行崩落。除渣腐蚀时间大大缩短。用HL-4钎焊后，熔渣呈暗黑色，不易脱熔，除渣腐蚀时间长。

## 2. 新钎料参加试车情况

第一次将新钎料焊的两根导管，装入发动机扩散器内部，顺利地通过了长期工艺试车，该机总工作时间为126小时8分，加力工作时间25小时13分。

第二次又将新钎料HLCu-2a焊的13种导管装入另一型号发动机上进行地面长期试车，该发动机总工作时间为140小时18分，状态工作时间为111小时35分，加力状态工作时间为29小时31分。试车后分解检查未发现裂纹、脱

× × × ×

(上接第47页)

下降，因此初步认为喷丸强化是目前较为有效的一项改进措施；5.对不同冶炼工艺的原材料、不同炉号及不同热处理参数的影响，进行了试验研究。发现国产料优于苏产料，而在不同炉号、不同工艺中，高温拉伸塑性和持久塑性低、缺口敏感性强的，较易产生裂纹，从而找出了从根本上改进材料的方向。并初步研究了补充热处理工艺，在进一步做工作后即可在修理中推广试用；6.研究了使用不同寿命后叶片的组织和性能变化，确定了叶片内部材料在使用400小时以后无异常变化，有继续使用的

焊、局部钎料剥落等异常现象。

430厂将HLCu-2a钎料钎焊的导管装在该厂发动机上，顺利地通过了200小时长期试车。

现在，有关的设计所和工厂决定正式投产使用。新钎料已转由北京铜厂试生产。

## 八、结 论

1. 本研究提供了新钎料HLCu-2和HLCu-2a的化学成分和钎焊规范。

新钎料比HL-4钎料钎焊温度低80~100℃。

2. 新钎料可用于火焰钎焊、氩气保护钎焊和真空钎焊1Cr18Ni9Ti不锈钢。由于钎焊温度的降低，钎焊后近缝区基体金属的晶粒长大倾向远比HL-4小，晶界渗入深度也比HL-4的小，并可克服导管表面的麻面缺陷，消除了质量隐患，满足了工厂的要求。

3. 新钎料可在0.05毫米以下至0.3毫米的装配间隙进行钎焊，但较理想的装配间隙应为0.05~0.10毫米。

4. 用新钎料钎焊的1Cr18Ni9Ti接头具有满意的高温性能及抗氧化性能。

5. 初步试验表明，新钎料可以轧成板材、箔材，也可拉拔成φ2毫米左右的丝材。

6. 长期试车考验和生产实践证明，HLCu-2a等可以取代HL-4钎料。(张文尚 执笔)

× × × ×

潜力；7.测定了一级和二级涡轮叶片的静频和相对应力分布，为故障分析及模拟试验提供了依据；8.有关单位还介绍了取消一次固溶处理等新品叶片方面开展的研究工作。

根据介绍，涡轮叶片故障随着使用寿命而增加，备件需求量也在增加，同时还希望进一步延长寿命。为了进一步降低涡轮叶片的报废率，延长使用寿命和确保飞行安全可靠。会议又拟订了新的工作计划，准备在排故措施、模拟试验和延寿等方面深入展开研究。

(冯维熹)