

前 言

美国航空和宇航局技术应用处编制了在材料制造领域中的一系列技术报告。这些报告是宇航局工作计划中的一部分,它们来自实验研究总结而得的技术资料。其中很多报告已应用到美国民用工业领域内。

这份技术报告是镍、镍基和钴基合金一系列制造报告中的一份。其他一系列有关沉淀硬化不锈钢的技术工艺研究报告,则发表在 NASA 专利 5084~5090 之间。

这份报告评述了焊接镍和镍基合金的生产实践经验。其中含镍量至少 50%,并且详细地讨论了焊接准备工作、焊接工艺方法和焊接质量问题。当焊接这些合金时随之而来的那些技术问题和应专门考虑的问题,亦作了说明。

毛主席语录

备战、备荒、为人民。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

目 录

前言

一、引言	(1)
二、焊接准备	(2)
1. 材料	(2)
2. 接头设计	(8)
3. 清洁	(9)
4. 材料状态	(11)
5. 工具	(11)
6. 剩余应力	(14)
7. 焊接方法的选择	(18)
三、焊接方法	(21)
1. 熔焊	(21)
2. 固态焊	(47)
3. 钎焊与软钎焊	(50)
4. 异类金属焊接	(53)
四、接头质量	(56)
1. 检验	(56)
2. 缺陷	(56)
3. 修理补焊	(58)
五、结论与建议	(63)
附录：各种镍和镍基合金过去和目前商业牌号对照表	(64)

一、引 言

镍和镍基合金可用许多普通焊接方法进行焊接。一些新的焊接方法也已成功地得到应用。一般说来,所采用的焊接方法,只要根据待焊的具体合金,将一般焊接程序稍微修改一下,就可以了。但是,必须采取专门的预防措施。必须除去接头区或接头周围区域内的有害物质,以免损坏焊缝及其附近受热的母材区。一些高强度、时效硬化合金,在焊缝区内或焊缝区附近都易于产生裂纹,除非材料经过适当的热处理,则在焊接操作中留下的杂质和熔剂残渣将会给以后的使用带来困难。

为了消除或尽量减少通常所遇到的困难,现已研制出这些合金的焊接程序。当选用了适宜的焊接程序时,就能满意地进行镍和镍基合金的焊接。

本报告汇总了关于镍和镍基合金焊接的现有资料。在第二部分中,报道了可适用于所有镍基合金或大部分镍合金的使用要点。讨论内容包括产品材料、接头设计、焊前和焊后清理、焊接夹具和工具以及其他的焊前注意要点。第三部分叙述某几种焊接方法,讨论了异类金属的焊接以及在焊接各种合金时要特别注意的事项。第四部分讨论检验方法、缺陷和修理办法。

本报告叙述了下列四种镍基合金的焊接: (1) 高镍、非热处理合金; (2) 固溶硬化镍基合金; (3) 沉淀硬化镍基合金; (4) 弥散硬化镍基合金。

高镍、固溶硬化合金广泛用于制造化学容器与试管。这些材料有极好的耐腐蚀和抗氧化性能,并且能在高温下保持其有效的强度。沉淀硬化合金在高温下有很好的性能。它们在航空工业领域的许多应用方面更为重要。弥散硬化镍基合金也用于制造高温装置。

镍和镍基合金的多种用途是由于有某些固有的性能: (1) 在室温与高温下,能耐腐蚀; (2) 在高温下能抗氧化; (3) 在低温、室温和高温下,有良好的机械性能; (4) 制造方便。

将所有镍基合金制成有用产品,焊接操作起着重要作用,而这些产品具有上述的综合性能,适应于特种使用规范。

广义地说,对成功地焊接镍基合金影响最大的因素是: (1) 待焊材料; (2) 所采用的焊接方法; (3) 检验和修理办法。在本报告中将详细地报道这些因素。

二、焊 接 准 备

选择材料、设备、组装设计以及加工方法都是在进行焊接操作前所要采取的重要步骤。焊接专业人员应熟悉待焊材料的基本性能。必须备有焊接所需要的各种加工设备。必须考虑接头设计、清理方法和热处理操作。还必须制定一些计划,以控制变形,并预示所需求的焊后操作。最后,还必须选择适宜的焊接方法。下面讨论在焊接镍基合金中,颇为重要的选择准则。

1. 材 料

如要对镍和镍基合金进行焊接,需要很好地了解这些材料及其在焊时的性能状态。如下面所讨论的三种基本材料乃是:

(1) 母材 通常将正在焊接的材料称为“母材”、“基体材料”或“底板”。镍和镍基合金母材厚度范围可从箔的厚度一直到几吋的厚板,尺寸从微小的电子元件直到油罐车那么大。母材制的金属件常用来帮助进行焊接操作,但如不再需要它们时,就应去除。起弧片和停弧片的使用就是个典型例子。

(2) 填充金属 填充金属是为了焊成一个接头而填入焊缝的那些金属材料。熔焊用的填充金属包括药皮焊条,卷在卷筒上的焊丝,以及从母材金属薄板或厚板上剪下的或加工出的短丝材或短带材。对于钎焊,填充金属可含镍或不含镍,它以箔状、丝状、粉状和焊粉、熔剂的膏状形式使用。对于软钎焊,以丝状、膏状的形式使用,并以软钎料熔融槽浴形式焊接。但在接触点焊和缝焊、接触滚点焊和闪光焊中很少使用填充金属。

镍和镍基合金焊接用的填充金属,都必须符合使用要求,并符合以后的加工要求。例如,整个焊缝的耐腐蚀性能和机械性能会与母材的大不相同。填充金属同样也应适应焊后热处理要求。通常,在竣工焊件中,要求填充金属具有相等或超过母材的性能。

(3) 保护气氛和焊剂 在焊接操作过程中,采用保护气氛,以防焊缝和电弧受大气污染。氧、氮、水蒸汽和其他空气成分以及车间压缩空气成分都会侵蚀损害焊件。镍和镍基合金在焊接时,可采用某几种气体作保护。氩、氮、氩-氮混合气体及氢气都是最常用的。氩和1%氧的混合气体也已采用焊接极少数合金^[1]。当这些气体用于焊接时,建议要采用特别高纯度的,这些高纯度的气体是民用工业上使用的。最近,关于因康镍(Inconel)600的钨极气体保护焊焊件的报告特别强调了这一点^[2]。结论是用氩作保护气体时,若含有较少量的杂质元素,特别是含氧,将对这种电弧的熔化效率有显著影响,杂质总含量由690 ppm(百万分之一)增至2440 ppm时,会使焊缝降低熔深约50%。在这些杂质含量大大超于民用工业用气体的水平时,结果表明,随着杂质含量的增加,对熔深会有很大的影响。

焊剂帮助焊缝金属免受污染。它们的作用是提供气体层和焊渣层或保护膜层以覆盖于加热部位上。焊剂以焊条药皮形式和松粉形式为熔焊提供防护。对软钎焊和硬钎焊,焊剂以粉状和膏状形式提供。

(1) 镍和镍基合金的类型

较常见的镍基合金及其用途列示于表1^[3~6, 1c]中。每种主要类型内的个别合金,其特性各

表 1 镍和镍基合金的化学成分和用途

牌 号	成 分 (重 量 百 分 比)													用 途
	Ni①	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Al	Ti	Ob②	Mn	Si	其 他	
民 用 工 业 纯 度 的 高 镍、非 热 处 理 合 金														
镍 200	99.5	0.06	—	—	0.15	—	0.05	—	—	—	0.25	0.05	—	火箭发动机,化学物质运输圆桶
镍 201	99.5	0.01	—	—	0.15	—	0.05	—	—	—	0.20	0.05	—	耐腐蚀的蒸发器,燃烧舟皿
镍 204	95.2	0.06	—	—	0.05	4.50	0.02	—	—	—	0.20	0.02	—	声纳设备,超声波清理和焊接设备
镍 205	99.5	0.06	—	—	0.10	—	0.05	—	0.02	—	0.20	0.05	0.04 镁	电子元件,电线棒,引线
镍 211	95.0	0.10	—	—	0.05	—	0.03	—	—	—	4.75	0.05	—	点火塞电极,电子管栅极线
镍 212	97.7	0.10	—	—	0.05	—	0.03	—	—	—	2.00	0.05	—	灯架线,炉子导线
镍 220	99.5	0.06	—	—	0.05	—	0.03	—	0.02	—	0.12	0.03	0.04 镁	电子管阴极
镍 225	99.5	0.06	—	—	0.05	—	0.03	—	0.02	—	0.13	0.20	0.04 镁	电子管阴极
镍 230	99.5	0.09	—	—	0.05	—	0.01	—	0.003	—	0.10	0.03	0.06 镁	电子管阴极
镍 233	99.5	0.09	—	—	0.05	—	0.03	—	0.003	—	0.18	0.03	0.07 镁	电子管板极,阴极和结构件
镍 270	99.97	0.02	有迹象	—	有迹象	—	有迹象	—	—	—	有迹象	有迹象	—	热交换器,电子管元件
原 则 上 经 固 溶 处 理 过 的 合 金														
莫涅耳 400	66.0	0.12	—	—	1.35	—	31.5	—	—	—	0.90	0.15	—	航海和化学用热交换器
莫涅耳 401	44.5	0.03	—	—	0.20	0.50	53.0	—	—	—	1.70	0.01	—	电子元件
莫涅耳 402	58.0	0.12	—	—	1.20	—	40.0	—	—	—	0.90	0.10	—	用于钢件和铜件的浸渍槽
莫涅耳 403	57.5	0.12	—	—	0.50	—	40.0	—	—	—	1.80	0.25	—	汽油和淡水容器,扫矿设备接头配件
莫涅耳 404	55.0	0.06	—	—	0.05	—	44.0	0.02	—	—	0.01	0.02	—	波导管,晶体管壳,金属陶瓷密封件
莫涅耳 405	66.0	0.18	—	—	1.35	—	31.5	—	—	—	0.90	0.15	—	无切削螺紋车床产品
莫涅耳 406	84.0	0.12	—	—	1.35	—	13.0	—	—	—	0.90	0.15	—	热水槽
Nimonic 75	72~78	0.08~0.15	18~21	—	5.0	—	0.5	—	0.2~0.6	—	1.0	1.0	—	燃烧室火焰筒
	76	0.12	20	—	2.4	—	—	0.06	0.4	—	0.4	0.6	—	
Illium R	68	0.05	21.0	5.0	1.0	—	3.0	—	—	—	1.25	0.70	—	
Illium G	56	0.20	22.5	6.4	6.5	—	6.5	—	—	—	1.25	0.65	—	
Hastelloy B	其示	0.05~0.13	1.0	26~36	4.0~7.0	1.5	—	—	—	—	1.0	1.03	0.2~0.6 铜	
	61	0.10	1.0	29	5.9	—	—	—	—	—	0.8	0.7	—	耐蚀合金

牌 号	成 分 (重 量 百 分 比)													用 途
	Ni①	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Al	Ti	Cb②	Mn	Si	其 他	
Hastalloy C	其余	0.08~ 0.15	14.5~ 17.5	15~18	4.0~ 7.0	2.5	—	—	—	—	1.0	1.0③	0.35 钒, 3.0~5.25 钨 4 钨	燃烧室,集电环
Hastalloy D	57	0.10	16	17	5	—	—	—	—	—	0.8	0.7	—	耐蚀合金
	其余	0.12	1.0	—	2.0	1.50	2.0~ 4.0	—	—	—	0.5~ 1.25	8.5~ 10.0	—	
Hastalloy F	82	0.10	—	—	1.0	1.50	3.0	—	—	—	1.0	9.0	—	—
	44	0.05~ 0.12	21~23	5.5~ 7.5	其余	2.5	—	—	—	1.75~ 2.50	1.0~ 2.0	1.0③	1.0 钨	—
Hastalloy X	其余	0.05~ 0.15	20.5~ 23	8.0~ 10.0	17~20	0.5~ 2.5	—	—	—	—	1.0	1.0③	0.21~1.0 钨	喷气发动机零件
Hastalloy N	45	0.10	22.0	9.0	20	1.5	—	—	—	—	0.8	0.5③	0.6 钨	耐热氟化物盐槽
因康镍 600	67~72	0.04~ 0.08	6.0~ 8.0	15~18	5.0	—	—	—	—	—	0.20	0.20	—	喷气发动机,热交换器及核反应堆组 件
	76.0	0.04	16.8	—	7.20	—	0.10	—	—	—	—	—	—	
因康镍 625	61.0	0.05	22.0	9.0	3.00	—	0.10	—	—	4.0	0.15	0.30	—	在高温达1200°F下使用的高温合金

能 进 行 沉 淀 硬 化 的 合 金

牌 号	Ni①	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Al	Ti	Cb②	Mn	Si	其 他	用 途
莫涅耳 K-500	65.0	0.15	—	—	1.00	—	29.5	2.80	0.50	—	0.60	0.15	—	泵,轴,叶轮
莫涅耳 501	65.0	0.23	—	—	1.00	—	29.5	2.80	0.50	—	0.60	0.15	—	陀螺仪零件和小机制品
因康镍 700	46.0	0.12	15.0	3.75	0.70	28.5	0.05	3.00	2.20	—	0.10	0.39	—	涡轮叶片和转子
因康镍 702	79.5	0.04	15.6	—	0.35	—	0.10	3.40	0.70	—	0.05	0.20	—	补燃器套筒
因康镍 718	52.5	0.04	19.0	3.0	18.0	—	0.10	0.60	0.80	5.2	0.20	0.20	—	水翼艇,宇宙飞船,喷气发动机,火箭 发动机,超音速飞机致冷应用
因康镍 721	71.0	0.04	16.0	—	7.20	—	0.10	—	3.00	—	2.25	0.12	—	内燃机阀门
因康镍 722	75.0	0.04	15.0	—	6.50	—	0.05	0.60	2.40	—	0.55	0.20	—	喷气发动机组件
因康镍 X-750	73.0	0.04	15.0	—	6.75	—	0.05	0.80	2.50	0.85	0.70	0.30	—	燃气涡轮零件,弹簧,螺栓,波纹管, 飞机板材,真空罩
因康镍 751	72.5	0.04	15.0	—	6.75	—	0.05	1.20	2.50	1.00	0.70	0.30	—	喷气发动机涡轮转子叶片,柴油机构 气阀
坡莫镍 300	98.6	0.25	—	—	0.10	—	0.02	—	0.50	—	0.10	0.06	0.35 镁	弹簧,栅极边管,横向绕组
杜拉镍 301	94.0	0.15	—	—	0.15	—	0.05	4.50	0.50	—	0.25	0.55	—	弹簧,玻璃板,可塑性挤压零件

(续表)

牌 号	成 分 分 (重 量 百 分 比)													其 他	用	途
	Ni①	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Al	Ti	Cb②	Mn	Si				
因康镍 713C	66~77	0.20	11~14	3.5~ 5.5	5.0	—	—	5.5~ 6.5	0.25~ 1.25	1.0~ 3.0	1.0	1.0	0.02 硼, 铅	—	—	喷气发动机转子叶片, 零件
	72	0.12	13	4.5	1	—	—	6	0.6	2.25	0.15	0.4	—	—	—	—
DCM	63~70	0.08	14~16	4.5~ 6.0	4.0~ 6.0	—	—	4.4~ 4.8	3.35~ 3.65	—	0.10	0.15	0.07~0.9 硼	—	—	燃气涡轮转子叶片, 零件
	68	0.05	14.3	5.3	4.6	—	—	4.4	3.4	—	—	—	0.08 硼	—	—	—
Hastalloy R-235	其余	0.10	14~17	4.5~ 6.5	9.0~ 11.0	2.5	—	1.75~ 2.25	2.25~ 2.75	—	0.25③	0.6③	0.006 硼③	—	—	燃气涡轮和喷气发动机零件
	63	0.15	15.5	5.5	10.0	—	—	2	2	—	—	—	—	—	—	—
Waspaloy	56	0.05	19.0	4.3	1.0	14.0	—	1.3	3.0	—	0.70	0.40	0.005 硼, 0.06 铅	—	—	喷气发动机转子叶片, 零件
	70~77	0.1	18~21	—	5.0	2.0	—	0.5~ 1.8	1.8~ 2.7	—	1.0	1.0	—	—	—	—
Nimonic 80	76	0.05	20	—	0.5	—	—	1.0	2.3	—	0.7	0.5	—	—	—	—
	70~77	0.1	18~21	—	5.0	2.0	—	0.5~ 1.8	1.8~ 2.7	—	1.0	1.0	—	—	—	—
Nimonic 90	75	0.04	21	—	0.5	—	—	0.6	2.5	—	0.7	0.5	—	—	—	—
	50~62	0.1	18~21	—	5.0	15~21	—	0.8~ 2.0	1.8~ 3.0	—	1.0	1.5③	—	—	—	—
Nimonic 95	58	0.10	19.5	—	—	18.0	—	1.2	2.4	—	—	—	—	—	—	—
	50~62	0.15	18~21	—	5.0	15~21	0.5	1.4~ 2.5	2.3~ 3.5	—	1.0	1.0③	—	—	—	—
Nimonic 100	50	—	20.0	—	—	20.0	—	2.0	3.0	—	—	—	—	—	—	—
	50~62	0.30	10~12	4.5~ 5.5	2.0	18~22	—	4.0~ 6.0	1.0~ 2.0	—	—	0.5③	—	—	—	—
Udimet 500	46~55	0.15	11.0	5.0	—	20.0	—	5.0	1.5	—	—	—	—	—	—	—
Udimet 700	52	0.12	19.0	4.0	2.0	19.0	—	2.5~ 3.25	2.5~ 3.25	—	0.75	0.75③	0.005 硼, 0.06 铅	—	—	燃气涡轮零件, 板材, 螺栓
	46~55	0.15	13~17	4.5~ 5.75	1.0	17~20	—	3.0~ 4.75	3.0~ 4.0	—	—	—	0.005 硼, 0.05 铅	—	—	—
Udimet 600	53	0.12	15.0	5.1	0.75	18.5	—	4.25	3.5	—	—	—	0.10 硼	—	—	—
	50	0.10	18.0	4.0	4.00	17.1	—	4.0	3.0	—	—	—	0.08 硼	—	—	—
Unitemp 1753	51	0.25	16.5	1.5	9.5	7.5	—	2.0	3.1	—	—	—	0.005 硼	—	—	—
													0.005 硼, 0.05 铅	—	—	—

(续表)

牌 号	成 分 (重 量 百 分 比)												其 他	用	途
	Ni①	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Al	Ti	Co②	Mn	Si			
M-252	其余	0.02~ 0.28	15.5~ 17.5	1.0~ 2.0	7~11	6.5~ 8.5	—	1.75~ 2.25	2.9~ 3.4	—	—	—	0.002~0.010 硼 0.02~0.10 铅 7.5~9.5 铈	喷气发动机组件 薄板,螺栓,涡轮盘 高强度零件	
	51~57	0.10~ 0.20	18~20	9.10~ 11.0	5.0	9.0~ 11.0	—	0.5~ 1.25	2.25~ 2.75	—	0.5~ 1.5	0.3~ 1.0	—		
	55	0.15	19.5	10.0	2.0	10.0	—	1.0	2.5	—	1.0	0.7	0.005 硼, 0.06 铅		
René 41	52~58	0.06~ 0.10	18~20	9.0~ 10.5	5.0	10~12	—	1.5~ 1.8	3.0~ 3.3	—	0.5	0.5③	0.01 硼		
	55	0.10	19.0	1.00	1.0	10.0	—	1.5	3.0	—	0.05	0.1	0.005 硼		
René 62	48	—	15.0	9.0	22.50	—	—	1.25	2.5	2.25	—	—	0.05 硼, 8.0 铈 0.05 铅	高强度零件	
	61	0.10	12.0	—	—	10.0	—	4.0	4.0	—	—	—	—		
Astroloy	56	0.50	15.0	5.25	—	15.0	—	4.40	3.5	—	0.05	—	—		

扩 散 硬 化 合 金

TD 镍	其余	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0 二氧化钍	涡轮转子叶片
TD 镍铬	其余	—	20.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0 二氧化钍	喷气发动机组件

注: 如给出两种成分时,第一行是最大的成分或范围;第二行是典型的成分。

① 除非另有规定,含有少量钴;

② 含有钼;

③ 表示最小含量

稍有不同。此由诸合金的不同用途来示例说明。

每种主要类型镍合金各具有下述不同特性:

1) 高镍、非热处理合金 高镍、非热处理合金,一般含有95%以上的镍。这些合金的机械性能取决于热加工或冷加工。冷加工能增大其硬度和强度;如果要降低这些性能,就得对冷加工过的材料进行热处理。一般说来,热处理不会增加这些合金的强度。

2) 固溶硬化合金 这些合金的品种较老,是一种耐热性差而耐蚀性强的镍基合金。通常,不考虑采用热处理来硬化。但是,热处理可使经冷加工过的合金软化。

3) 沉淀硬化镍基合金 这些合金是采用热处理来加强的。研制沉淀硬化镍基合金是为了适应合金在高温、高应力状态下工作。特别是含铝和含钛的所有沉淀硬化镍基合金,由于镍-铝-钛相 $[\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ 称为 γ' 相]的沉淀,而得到加强。一般热处理程序分两步——固溶处理和时效处理。

4) 弥散硬化镍基合金 氧化钽弥散强化镍(TD或DS镍)约含有2%的氧化钽和98%的镍。氧化钽微粒均匀弥散于镍材基体组织中。这种弥散使镍材的高温抗拉强度显著增加。较新的合金品种是TD镍铬,约含铬20%,与TD镍相比,具有较高的强度和较好的耐蚀性能。

(2) 合金元素的作用影响

对镍和镍基合金中的合金元素叙述其全部作用影响不属本报告的范围,但考虑一下主要合金元素对可焊性的影响则是有益的。了解约25种元素的影响,对了解镍基合金的焊接特性是必要的。这些元素对焊接影响的结论示于表2中,并在下节中讨论^[7~9]。

表2 元素对焊接镍和高镍合金的影响

有 利 元 素	无实际影响元素①	不 一 定 元 素	有 害 元 素
钨 镁	锰 铜 铬 铁 钴	铝 钛 碳 钼 硅	硫 磷 铅 锑 硼 氧 氮 氢

① 在常规含量范围内

1) 硫 硫会引起热脆。可能是在焊接镍基合金时所碰到的最有害的元素。硫在镍中的可溶度极小,因而形成低熔性硫化物,这些化合物凝聚在晶界上,而使合金变脆。在真空中熔炼合金或凝固镍是克服硫的恶劣影响的一些方法。由于焊前去除含硫的机加工物、粉笔痕迹或车间污迹的工作做得差,就有可能使优质的镍基合金报废。

2) 镁 硫化镁的熔点比硫化镍高得多。因此,硫的凝固就由镁来实现。但是,特别在使用药皮焊条进行熔焊时,镁的回收是很差的。

3) 铈 铈用来防止含硅的镍-铁-铬合金产生热裂纹。需铈量,随镍/铁比而变化。镍/铁比越高,需铈量就越多。

4) 铅 铅在镍合金焊缝金属中会引起热脆,但在优质基体金属或填充金属中很少发现铅。

5) 磷 磷,如同铅一样,在镍基合金的有害含量中很少发现。即使含量很低的磷也会引起热裂纹。通常,其不利影响与铅和硫相似。

6) 硼 虽然硼加入镍基合金中,可改善其高温机械性能,但对焊件是有害的。硼的存在,即使含量很低,也会在焊缝金属、热影响区和受热的母材处产生裂纹。

7) 锆 锆象硼一样,可加入镍基合金中,以改善高温机械性能,但这种添加物会破坏焊接性。即使含锆百分之零点几也极易使镍基合金焊缝引起裂纹。锆镍合金无熔焊可能。

8) 碳 在无铬镍基合金中含碳,如果使用温度范围在 600°F 至 1400°F 内,会导致故障,因为焊接中的热力过程会促使碳沉淀成颗粒状石墨,从而起减弱的作用。补救的方法是限制碳含量低于 0.02% 。在含铬的镍基合金中,如果含碳量正常,是不会引起什么问题的。

9) 钼 在双相合金中含有 $20\sim 30\%$ 的钼,会引起热裂纹。而在单相合金中不会产生严重的裂纹。因此,钼可能只在一、二种重要合金中成为问题。

10) 硅 硅在镍基合金中会产生热裂纹。而这种影响的严重程度变化很大,它既取决于合金情况,也取决于所用的焊接方法。特别在含铬的高镍合金中含硅是不利的。通常将铈加入高镍合金中,以抵消硅的影响。

11) 铝 铝作为脱氧剂而加入镍合金中,以产生时效硬化性能。一般说来,铝对焊接的影响与硅相同。铝在高镍高温合金中,作为时效硬化剂,所以在熔焊这些合金时成为填充金属中所需要的添加剂。但通常是,热裂问题发生后,铝的充分有利作用才可获得。因此,就必须找出其他方法,以便使焊缝金属性能与基体金属性能相匹配。

12) 钛 把钛加入高镍合金中有两个理由: (i)使产生时效硬化反应; (ii)减少气孔疏松。在焊接这些合金时,钛的影响大致与铝相同。焊缝金属产生热脆,并难以得到无裂纹的焊缝,特别是受约束的接头是如此。

13) 氧、氮和氢 氧、氮和氢是焊缝金属产生疏松的主要原因。但是,这些元素还未显示出会促使镍和镍基合金产生裂纹的迹象。

某些合金元素,在除熔焊外的焊接操作中,譬如钎焊时会有很大影响。而另一些合金元素只有很小影响。在填充金属选妥之后,在钎焊中应考虑的最重要之点就是由母材中的合金元素所引起的表面污染。对含铝和(或)含钛的镍基合金来说,如要成功地钎焊需作特殊考虑,本报告后面部分将讨论这个问题。

2. 接头设计

虽然有些焊接方法的容许范围比另一些焊接方法的大。但接头设计会限制焊接方法的选择。对镍和镍基合金板制成的薄度规来说,其邻近直角接头,宜用电弧焊或电子束熔焊来焊接。而厚板材需要更为复杂的接头设计。典型的例子是,这种准备工作包括把邻近加工成斜形坡口或一定的外形。如设计好的接头的零件公差也是一个重要的考虑因素。经常优先选择精密公差,但在零件生产中,这种公差不一定会加工得出。

无论是钨极惰性气体保护焊、金属极惰性气体保护焊还是以电子束焊来焊接镍和镍基合金,通常都以机加工来制备配合良好的焊接接头(如铣削、仿形、磨削以及其他通用的机加工方法)。

适用于电弧焊焊接镍和镍基合金的接头设计参见文献[11],同时还示出钢板厚度相同的接头制备情况,以作比较。镍和高镍合金不象软钢那样易于流动,且焊缝熔透性通常较差。因

此,需要操作人员有较为精巧的技艺才能焊制出令人满意的焊缝。焊接时热输入量应正常,热量输入太高会导致剩余的脱氧剂烧耗。

就电子束焊缝而言,其焊缝是很狭窄的,采用平头对接接头,以确保接头的全厚度上有良好的配合。

接触焊如点焊、缝焊和凸焊,通常接头由材料的搭迭层组成。单一接头可包括多层材料。用于接触焊的许多接头设计,其目的并不在于传递横向抗拉载荷。在接触焊中,如边缘距、平直度、点间距、原板的翘高,以及可达性等许多因素。对于选择合适的接头设计都是重要的。

钎焊接头设计也必须控制其配合状况。钎焊接头设计中虽有许多变量,但考虑在钎焊温度下保持接头的间隙是有益的。接头的间隙对钎焊焊缝强度的影响示于图1^[12]。接头间隙-强度曲线的形状和焊缝的最佳强度,都取决于基体金属和填充金属的成分,取决于钎焊参数及其测试方法。

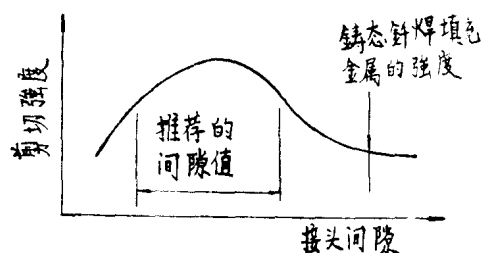


图1 接头间隙对钎焊接头剪切强度的影响

3. 清 洁

清洁对于镍和镍基合金的成功焊接是非常重要的。焊前、焊时及焊后的清洁程度会影响焊缝质量。清洁材料对于电子元件的成功焊接特别重要^[13]。在清洁时,必须考虑到主要的表面污染有两种类型:(1)表面污物如漆、油脂和滑油;(2)氧化膜和氧化皮。为了防止漆、油及其他表面污垢中出现的硫、铅和其他元素的有害影响,为了防止氧化膜或氧化皮的产生,就必须作好表面准备工作。

(1) 表面污物、油脂和滑油

焊缝金属和附近的母材区域都会受表面污垢而污染。很明显,接头表面上的任何外来物质会容易地聚集在焊缝中,并引起污染。接头外表面的杂质在焊接时也会污染零件。当零件加热时,如硫和铅等元素会扩散到基体零件中。这种现象通常称为“烧着”,来自粉笔、铅笔或漆迹的元素的烧着会产生严重的裂纹。

去除镍和镍基合金表面杂质的方法与清除其他金属制品的方法相同^[14]。采用工业溶剂和蒸汽除油法来去除油脂及滑油。肥皂沫可用热水去除。要去除可溶的滑油、动物脂、脂肪和脂肪酸混合物是比较复杂的。典型的清洁方法是:(1)在10~20%的碳酸钠或氢氧化钠、10~20%的磷酸三钠和水的热溶液中浸泡10~30分钟。(2)用水彻底漂洗。还建议用这种碱性处理来去除溶剂清洗后残留下的膜层。要用清洁而干燥的空气吹干,以免滑油或其他空气中的杂质又来污染表面。

在整个焊接操作中,工件应避免污染。炉砖、工件支架和不清洁的工具都会引起污染。

(2) 污点和氧化皮

镍和镍基合金有三种表面污染形式:(i)污点;(ii)还原氧化物;(iii)氧化膜或氧化皮。去除这些污物的方法,取决于合金成分和热随时间的变化。

镍在强烈的还原气氛中退火时,会形成污点,而在缺氧情况下冷却时或在2%的乙醇液中淬火时,也会形成污点。当镍合金经过热加工时,其表面形成氧化膜。当在还原气氛中热处理并在缺氧气氛中冷却时,氧化物会被还原成金属镍(当合金内含铜时,则还原成金属铜)。无论

是污点,还是还原氧化膜,都不致妨碍焊接。因为这两种污物都可用酸浸法清除。

含铬和铁的合金,即使在保持其他合金光亮的气氛中加热和冷却时,也会生成氧化膜。所有的镍合金在空气中加热时也会氧化。这些氧化膜的熔化温度,要比母材的高得多,如果不清除,就会给焊接带来困难。在电弧焊中,氧化物作为外壳层留在基体金属上;这给焊接操作人员为妥善控制焊缝熔池造成困难。同样,氧化物会积存在焊缝金属中。此外,氧化物会妨碍各种焊接(例如接触焊、钎焊、软钎焊及固态焊)的操作。

采用酸洗法来去除镍和镍基合金上的薄层氧化物。镍合金经适当的热处理后,通常在下述溶液中酸洗^[14]:

硝酸 ---42B6	296 毫升
氢氟化酸 ---30B6	500 毫升
水	1000 毫升

常用酸洗规范是:

温度	125°F(最高)
时间	5~60 分钟

某一制造厂对几种选用的镍基合金所采用的酸洗程序示于图 2^[15]。

如不注意,在酸洗过程中就会产生一些不良的影响:(1)铜会积存在零件上。保持正铜



图 2 几种镍基合金的清洗程序

形式的铜离子(而不是保持亚铜形式的铜离子)是阻止沉积铜的办法;(2)硝酸-氢氟酸浸浴会引起晶间化学侵蚀。为了防止这点,浸浴时间应尽量缩短,温度请勿超过 125°F。

在制定浸泡程序时,合金的生产者与专用浸泡剂的生产者应该为提供补充资料而取得联系。

厚层氧化物可采用熔盐浸渍法去除。厚的氧化皮也可用喷砂或磨削法清除,然后抛光浸渍。喷氧化铝后,随即用不锈钢丝刷手工洗刷。在焊接因康镍 X 时,上述这种方法已用于焊道间的清洁工作中^[16]。

(3) 清洁状况鉴定

采用各种方法来鉴定清洁工作的有效性。要求最低的方法是找出气孔疏松、裂纹或整个焊件中的其他污染迹象。鉴定零件清洁度的通用办法是在去氧化皮和浸泡后用流水漂洗。在此过程中,检验水流是否中断过。如水流没有中断,就证明表面清洁。倘若水流中断,就表明有某些杂质残留在表面上。做接触电阻测量,能比较出焊前清洗方法的有效性。

(4) 去除熔渣

金属极电弧焊中作防护层用的焊条药皮,由于在焊缝表面上形成熔渣和放出大量能把焊接区内空气带走的气体,因而有助于控制焊接区的氧化作用。当施行多焊道焊接法时,在进行单道焊道焊接前,应先把所有熔渣清除干净。在焊后,必须从焊件上除去所有的熔渣,当焊件要求在高温下施焊时,去除熔渣尤其重要。如果熔渣残留在焊件上,则在使用过程中熔化,就会严重侵蚀金属。埋弧焊^[17,18]、钎焊和软钎焊所用的熔剂在焊后也应去除,以防在以后的使用中,侵蚀或腐蚀焊件。

(5) 清洗后的处理和贮存

焊接应在清洗后尽快进行。合金一暴露在大气中,就立即开始在合金上生成氧化物。虽然氧化层可能是极薄的,甚至看不见,但它们会影响接头的质量,并在接触焊和固态扩散焊操作中影响质量的一致性。必须注意避免油漆或粉笔痕迹、车间的污垢、冷凝湿气及其他有害杂质对接头质量的影响。

零件经清洗后,暴露在大气中,灰尘和脏的细粒子就可能积存在接头表面和附近区域。这种“飘落”的污物也会污染镍和镍基合金的接头。这种污物的去除,可用蘸过如丁酮溶剂之类的无棉绒擦布仔细措擦一下接头区域。所谓“白手套”处理操作通常用来预防经仔细清洗后的污染。清洗过的材料应在几小时以内焊接,或用无棉绒和无油的布包起来,直到需用时为止。久经贮藏的材料在决定焊接操作前,要求重新作些清洁工作。

待热压成形的或待应力消除的零件,必须加以清洗。鉴于清洗复杂零件中会遇到的问题,应考虑到务使这种零件在焊接操作中不受污染。要达到这个目的,就必须在整个施焊的所有操作过程中仔细地处理和贮藏。

4. 材料状态

纯镍和固溶硬化合金通常是在退火状态下焊接的。一些沉淀硬化合金只有经热处理和固溶处理后才可焊接。其余的镍和镍基合金母材可在退火、冷加工或热处理状态下焊接。

5. 工 具

用于焊接镍和镍基合金的工具一般和焊接其他材料的工具没有什么区别。焊接设备通常

是从焊接设备厂商处购得的,但是,有些工具例如在焊接中夹持零件的夹具、垫板条以及保护装置之类,常根据具体情况而专门设计和制造的。焊接用设备已在焊接手册和制造商手册中,有足够的叙述。因此,在本讨论中,可略去。但是,工具和惰性气体保护措施方面的要点,将于下文中叙述。

(1) 夹具和夹具材料

合适的工具,由于畸变最小且能保持校准,故常能有助于获得优质焊缝。夹持装置包括把零件夹持定位的简单夹子直到为专门零件而设计的更为精巧的夹持装置在内。简单夹具适用于有适当保护装置的焊接中,例如,在密封室里进行电子束焊或进行氩弧焊时。但是,对于在室外进行的熔焊操作,夹具对焊缝污染所能提供的防护效用要比其他保护装置更为有效。工具也经常用来快冷焊接区,以便把高温范围内出现的强烈化学反应活动降低到最小。这种工具被称为“激冷型”工具。

工具设计不当,会引起一些焊接问题。例如,工具约束焊接区过甚,以致产生裂纹。薄壁工具在焊时会改变形状,使焊件畸变。

在焊缝根部和表面两个部位处,与镍和镍基合金接触的焊接工具,通常是由铜制成的,但用其他材料也可以,并已得到应用^[19]。通常,这些材料以棒条式插件或薄衬板或厚衬板型式用于夹具上。可触及面的下压棒条和衬背垫撑条插入于焊缝的全长上,并经常用惰性气体,流经焊缝表面和焊缝根部,以资保护。当采用坡口衬背垫撑板条时,坡口应浅到使烧穿减至最小,并控制焊根的补强外形。此外,坡口应是圆的,以防熔渣卷旋沉积于角落中。焊接操作时发生相当多的故障是不可避免的,除非焊接接头经过精确的加工,并用焊接夹具适当夹持着。

以接触焊焊接镍合金时所用的工具,通常与采用接触焊焊接其他材料所用的工具相似。接触焊工具包括若干适用的夹具或卡具,以便将零件夹持在适当位置上进行焊接,并能将焊接电流传导到零件上。有时,所设计的工具用来把工件引入焊接设备中,以确保在正确的部位上制得焊缝。在设计接触焊工具时所遵循的一般规则,应同样适用于镍和镍基合金焊接的设计工具上。总的来说,就是特别要采用非金属的或非磁性的组件,且工具不应污染镍基合金。

软钎焊和钎焊用工具,也需加以仔细考虑。用这类焊接方法时的工具,需在钎焊时,将零件夹持定位,并应不污染填充金属和基体金属。

(2) 用于惰性气体保护的工具有

在焊接操作中,为使镍不受污染可用几种方法来达到:(i)在充有惰性气体的焊接室内进行焊接操作;(ii)当起保护作用的惰性气体流经焊炬、垫条、夹具或辅助工具时,就进行焊接操作;(iii)在密封的具有良好真空度的室内进行焊接操作;(iv)采用适当的熔剂进行焊接操作。已设计出多种工具,以便在焊接操作中能提供所需要的保护。虽然这些保护装置各有不同,但它们都是为了同一个基本目的,即保护待焊金属不受气体污染。

有若干种保护装置和调节气氛的焊接室,用于熔焊和钎焊中。这类焊接室,设计得既能容纳待焊的整个组件,也能在某些情况下只容纳焊接接头区域。采用下述诸法,以惰性气体替换焊接室内的空气气氛,(1)抽空和重新充气,(2)流动净化,或(3)打开焊接室,并用惰性气体重新填充。焊接室在焊接复杂零件中是特别有用的,因这类组件难以夹持,并在空气中难以妥善保护。但是,使用焊接室,并不是万能的。在许多焊接室中的惰性气体,其质量要比普通流动保护气体的质量差得多。必须避免空气或水蒸汽进入焊接室气氛中以防污染。以连续监控装置来监视焊接室气氛是否有污染是有效的。

容器式可控气氛焊接室，用于手工的和机械化的钨极气体保护焊和金属极气体保护焊中^[20]。许多小型焊接室，由塑料圆顶盖以及钢或不锈钢制得，以不锈钢为最佳，因它不生锈，而且容易清洗。用于焊接小零件的几种小尺寸焊接室可参见文献^[21, 22]。用于焊接大零件的小尺寸焊接室的改装可参见文献^[22]；只有受热的局部区域，才需要用惰性气体保护。软塑料焊接室也可参见文献^[23]。

用于这些焊接室内的保护气体，是否会流过焊炬，取决于焊制者。同样，保护气体也可通过净化车来回收，以去除不需要的气体，无论这种气体是从待焊金属中逸出来的，还是从受热的焊接室侧壁和受热的工具中放出的。

空气中焊接有气体钨极电弧焊和气体金属极电弧焊，它们可用下述几种方法来提供保护：(i) 使惰性气体流过焊炬，以保护熔池和邻近表面；(ii) 使惰性气体流过拖尾保护罩，以便在其冷却时保护焊件；(iii) 使起保护作用的惰性气体，流过下压棒条和衬背垫撑板条，而流过下压条的保护气体又为焊缝表面提供了保护。衬背的气流，在焊缝金属的焊接和冷却过程中起到保护焊缝根部的作用。

已研制出各种惰性气体保护装置，以用于敞开式施焊。所有设计的各种保护装置，主要用来掩盖受大气气氛包围着的受热金属区。图3表示两种不同保护方法，用于如镍、铝和不锈钢之类的金属方面。下压棒条和衬背垫撑条保护法示于图3(a)中，它们已用于许多焊接操作中。如要求作较好的保护时，则采用如图3(b)所示的保护法。用于钨极气体保护焊和金属极气体保护焊的焊炬拖尾保护罩已示于图4中^[24, 25]。可折式的拖尾保护罩的设计构思为其他的焊接接头设计提供了可互用的拖尾装置或提供了可接触程度。反射挡板也用来帮助于所需区域内获得惰性气体，以及用来防止杂散的气流去扰乱和偏移保护气流分布状况^[21, 26]。类似的设计，用来保护焊接接头的非接近面(焊根)^[21, 24~26]。图5中示出两种保护装置，用于焊接管子时以防止焊根的污染^[21]。

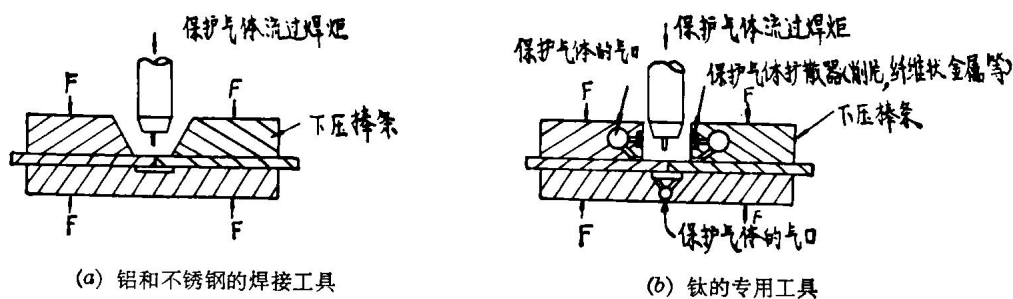


图3 用于通用和专用气体保护装置上的工具(F表示夹紧力)

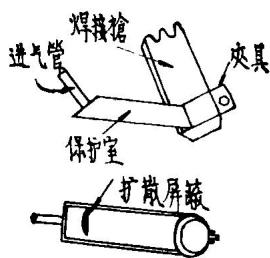


图4 焊炬带有拖尾保护罩的保护装置

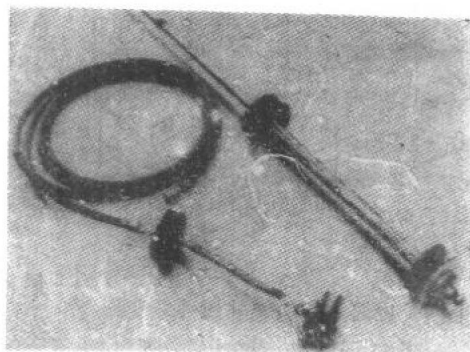


图5 用来保护管子焊根的内部保护装置

氩气的特点是能趋向下沉和置换空气。反之,当需要以上升气流来置换空气时,以氦最为适宜的。对于焊接,金属极惰性气体保护焊所用的空气拖尾保护罩通常要比钨极惰性气体保护所用的要长得多。这种设计是为了金属极惰性气体保护焊时,材料大体积受热时,能提供良好的保护作用,因而在焊后的冷却可较为缓慢。

考虑惰性气体保护,在设计某些焊接接头中也是重要的。但除费用昂贵外,某些接头设计,不宜用惰性气体来保护。

6. 剩余应力

所有焊接过程中,均发展着剩余应力。它们的影响,在着手焊接之前就应考虑到。剩余应力是指未受任何外力作用而存在于物体内的那种内应力。焊接接头内的剩余应力,是由于焊缝金属收缩以及焊接时焊缝附近的基体金属产生塑性变形而引起的。在焊接接头内的残余应力分如下两类:(i)在无任何外约束力时,接头中产生的焊接剩余应力,以及(ii)由于外约束力而产生的反约束应力或锁紧应力。

对大多数镍基合金而言,根据每种具体合金,推荐在 900°F 和 2175°F 之间,热处理 5 分钟至几小时,以消除应力。后文更为详细地讨论了这个问题。热力消除应力处理和材料中的其他变化之间可能的相互作用,会影响到材料的性能,这种情况必须预计到。例如,在某种温度范围内时效硬化会发生于因康镍 X 中。相似的影响亦发现于其他镍基合金中。因康镍 X 应尽可能迅速地加热到常规的应力消除温度范围。消除合金中剩余应力的其他方法可能也适用。例如,机械加工处理诸如喷丸处理之类已用来改变剩余应力的分布及其大小^[27]。

接触焊焊缝中的剩余应力,可通过机加工消除应力法或通过热力消除应力法来改变它,并在某种程度上能被消除。由于剩余应力分布状况的复杂性,以及通常受到接头布局的限制,机加工消除应力法应用于点焊接头中是有困难的。在最佳情况下,机加工法最多只能导致剩余应力分布图的重新分布,而不会完全消除剩余应力。另一方面,热力消除应力法能有效地消除由接触焊所引起的一切剩余应力。接触焊接头中控制剩余应力的最有效方法是选择合适的工艺参数。通常,剩余应力在钎焊接头或固态焊接头中,不是一个严重的问题,因为此时零件各部分的加热和冷却都是均匀的。

(1) 收缩和畸变

焊接工艺过程通常由其热力循环周期确定其特征,而这种热力循环周期引起局部收缩。这种收缩通常转而又引起正在焊接的零件上产生畸变。图 6 所示的为焊接一个简单对接接头时所发生的形状变化。较复杂的焊接,显然有复杂得多的收缩和畸变图形。必须计算出焊缝收缩值,因为没有绝对方法来避免它的。对典型焊缝之布局应常能获得期望的收缩值之后再制作焊缝前得到的。同样,在焊接具有几种接头的组件时,要确立合理的顺序,必须记住应将收缩考虑进去。

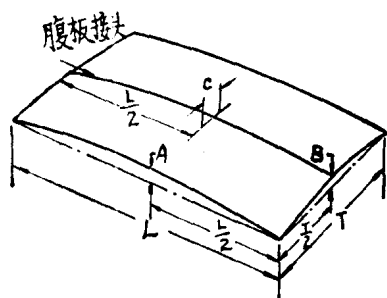


图 6 由熔焊所引起的焊件之变形

$A \propto$ 纵向拱曲 $B \propto$ 横向拱曲
 $C \propto$ 横向收缩

按适宜的焊接顺序施焊,便可利用收缩使畸变减到最小程度。这是通过适当地平衡所产生的各种收缩力来实现的。收缩在某种程度上也可受工具的制约来控制。应用这种技术有时能帮助零件防止严重畸变。用低热量