

## 爆炸焊接与相图

郑远谋

(湖北汽车工业学院)

**摘要** 在爆炸焊接的过程中, 结合区一薄层基体金属, 在高温下将发生熔化、熔解或化合。大量的检验结果表明, 这种熔体内的化学和物理组成, 与对应组元的一般相图内的物理和化学组成相似。这种相似性便为相图在爆炸焊接中的如下应用打下了基础: 可以根据相图来估计对应的复合材料中的熔体的组成, 估计金属材料之间的爆炸焊接性, 估计它们的结合强度, 估计后续热加工或热处理对结合性能的影响, 从而为爆炸焊接工艺参数和热加工及热处理工艺参数的制订提供理论依据。

**关键词** 爆炸焊接 爆炸复合材料 结合区中的熔体 相图

### 1. 引言

众所周知, 两种不同的金属材料在爆炸焊接的过程中, 在冲击区内存在着高的浓度差、

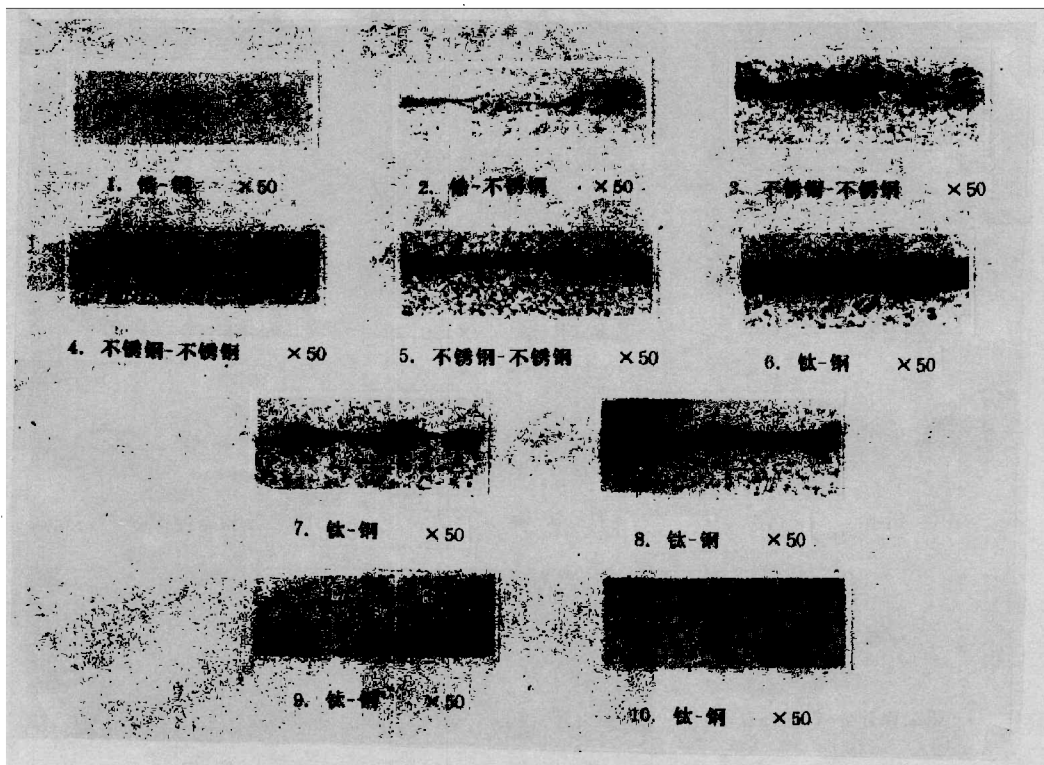


图1 爆炸焊接双金属连续熔化层结合区内熔体的分布形式(1~10)

Fig.1 Distribution types of fusion of continuous layer in bonding zone of bimetal explosion welding (1~10)

1988年3月9日收到原稿, 9月5日收到修改稿。

高压和高温。这样不可避免地在它们的结合区内发生一薄层金属的塑性变形、熔化和扩散。实质上,这种塑性变形、熔化和扩散,正是金属之间爆炸焊接的原因和机理。

本文在实践和研究的基础上,讨论该爆炸复合材料结合区中熔体的组成与对应组元的相图的关系,以及相图在爆炸焊接中的应用。

## 2. 结合区熔体的分布和组成

金相检验表明,爆炸焊接复合材料结合区中的熔体主要有两种分布形式。一种以连续熔

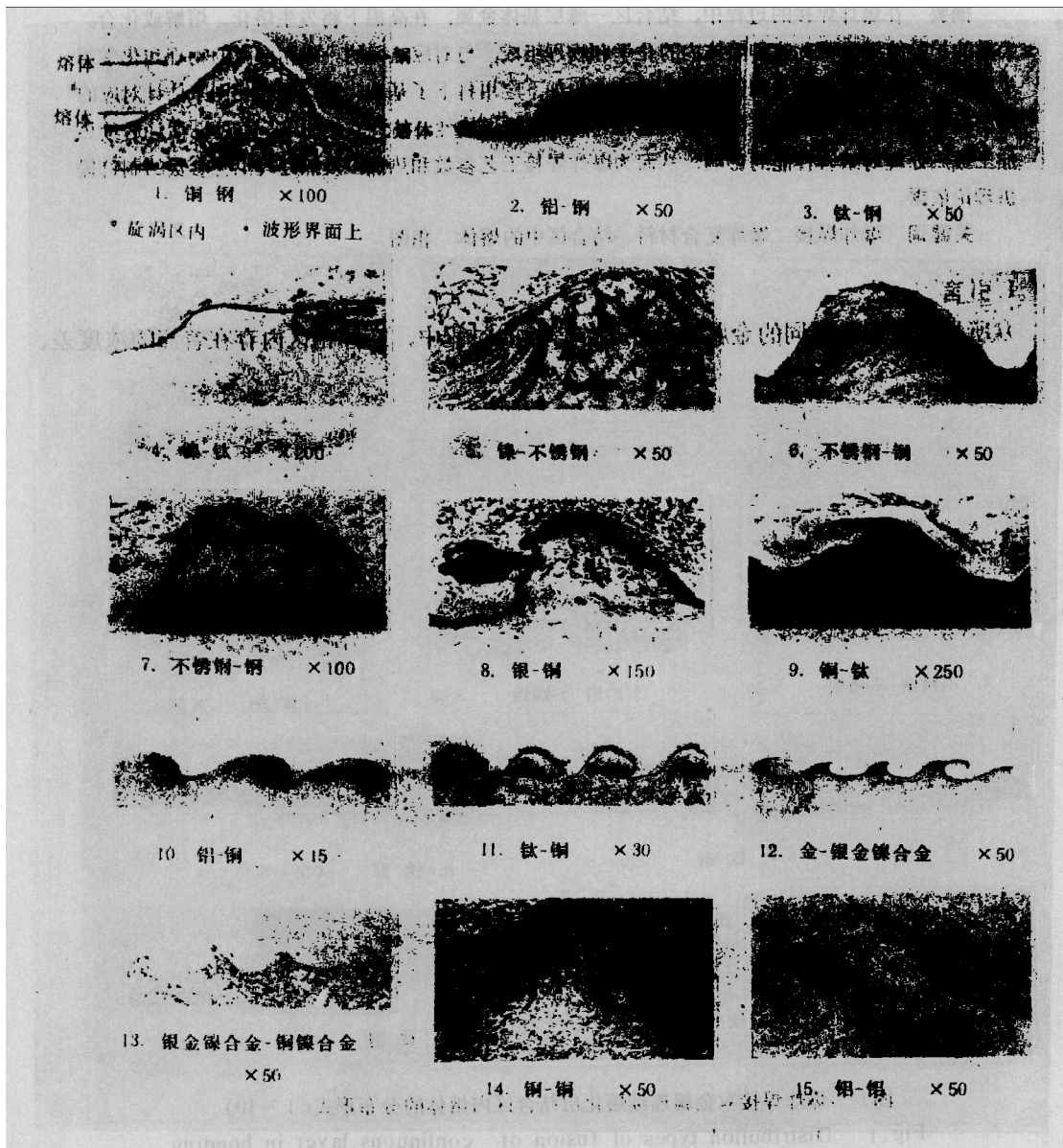


图2 爆炸焊接双金属波形结合区内熔体的分布形式(1~15)

Fig. 2 Distribution types of fusion in the wavy bonding zone of bimetal explosion welding (1~15)

化层的形式存在于界面上, 它的形态和作用类似于中间层(图1); 另一种是在波形结合区中, 大部分流到了漩涡区, 少部分残留在波形界面上, 后者的厚度以 $\mu$ 计(图2)。

电子探针和电子显微镜检验表明, 由于基体金属的物理和化学性质的不同, 结合区熔体中的物理和化学组成也不同。其中, 有的是两种基体金属的混合物, 有的是它们固溶体, 还有的是它们的中间化合物, 有一些则兼而有之, 这些熔体的形式和组成, 与爆炸焊接工艺参数有关, 并对爆炸复合材料的性能产生重要的影响。

研究指出, 爆炸焊接双金属和多金属的结合区中熔体的组成及其影响的分析, 与对应组元的相图有密切的关系。这种关系的探讨, 对于自觉地将相图理论应用于爆炸焊接之中, 有着重要的意义。

### 3. 结合区熔体的组成与相图的关系

关于爆炸焊接结合区中熔体的物理和化学组成, 国内外许多学者使用多种分析和检验手段进行了大量的研究。表1~3便是那些研究成果的一部分。这些资料表明, 在爆炸焊接的瞬间, 在界面上, 不同金属在高压、高温、强烈的塑性变形和扩散中, 将发生熔解和化合, 生成一些不同于基体金属的新的组成物。不难发现, 这些组成物与对应组元的相图中的物理

表1 爆炸焊接双金属结合区中熔融层的化学和物理组成<sup>[1]</sup>

Table 1 The chemical and physical constituent of fusion layer of the bimetal bonding zone in the explosion welding

No	金属组合	检验方法	化学组成(重量, %)	物理组成
1	银 铜	电子探针	Cu 29-49, Cu 38*	固溶体
2	铜 镍	电子探针	Cu 55-65, Cu 56*	固溶体
3	钛 锆	电子探针	均匀熔融层时 Ti 47	固溶体
4	铜 铁	电子探针	Cu 67-72, Cu 70*	固溶体
5	钛 镍	X 射线衍射	Ni 60-80, Ni 76*	Ni <sub>3</sub> Ti、NiTi <sub>2</sub>
6	钛 铜	X 射线衍射	Cu 68-75, Cu 71*	CuTi、Cu <sub>2</sub> Ti
7	钛 铁	X 射线衍射	Ti 33-40, Ti 31*	Fe <sub>2</sub> Ti
8	镍 锆	X 射线衍射	—————	NiZr、Ni <sub>2</sub> Zr
9	镍 钽	X 射线衍射	Ta 78	NiTa
10	铁 钽	X 射线衍射	Ta 77	Fe <sub>2</sub> Ta
11	铝 铜	X 射线衍射	Cu 70-80, Cu 68*	Al <sub>2</sub> Cu、Al <sub>3</sub> Cu <sub>2</sub>
12	铝 铁	X 射线衍射	Al 61-64, Al 63*	Al <sub>3</sub> Fe、Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> Fe
13	铝 镍	X 射线衍射	Al 55-68, Al 57*	Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub> 、Al <sub>3</sub> Ni
14	铝 钛	X 射线衍射	Al 53-62, Al 57*	TiAl <sub>3</sub>
15	银 铁	电子探针	Ag 60-90, Ag 89*	不固溶和不均匀的 Ag、Fe 混合物
16	银 镍	电子探针	Ni 47-41, Ni 27*	不均匀混合物

注: 原文为叙述式, \* 为修正平均值

和化学组成基本相似。这种相似性使相图在爆炸焊接中的应用打下了基础。

实际上, 在爆炸焊接过程中, 不同金属的原子在高温下, 在结合区内, 必然地要发生相

表 2 爆炸焊接双金属结合区熔融层的化学和物理组成<sup>[2]</sup>

Table 2 The chemical and physical constituent of fusion layer of the bimetal bonding zone in the explosion welding

No.	金属组合	计算值(重量, %)		测量值(重量, %)			金属间化合物
		A	B	I	II	平均值	
1	银 铜	63Ag	66Ag	50Ag	72Ag	57Ag	
2	银 铁	89Ag	78Ag	92Ag	——	——	
3	银 镍	81Ag	75Ag				
4	铝 铜	29Al	40Al	32Al	(7Al)		Al <sub>3</sub> Cu <sub>6</sub> (Al <sub>2</sub> Cu)
5	铝 铁	67Al	54Al	75Al	65Al	70Al	Al <sub>2</sub> Fe, Al <sub>3</sub> Fe
6	铝 镍	50Al	46Al				Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub> , Al <sub>3</sub> Ni
7	铝 钛	81Al	50Al				
8	铝 锌	27Al	20Al	9Al	62Al	27Al	
9	金 铜	70Au	76Au	73Au	——	——	
10	金 镍	85Au	80Au	78Au	——	——	
11	铜 铁	83Cu	65Cu	69Cu	——	——	
12	铜 镍(1)	71Cu	56Cu	82Cu	35Cu	59Cu	
13	铜 镍(2)	71Cu	56Cu	84Cu	45Cu	64Cu	
14	铜 钛	90Cu	61Cu				CuTi, Cu <sub>3</sub> Ti
15	镁 铜(1)	23Mg	40Mg	49Mg	65Mg	57Mg	Mg <sub>2</sub> Cu
16	镁 铜(2)	23Mg	40Mg	45Mg			Mg <sub>2</sub> Cu
17	镁 铜(3)	23Mg	40Mg	40Mg			Mg <sub>2</sub> Cu
18	钼 镍	45Mo	44Mo	62Mo	——	——	MoNi <sub>3</sub> (?)
19	镍 钛	81Ni	55Ni				Ni <sub>3</sub> Ti
20	钽 铜	30Ta	57Ta				
21	钽 铁	68Ta	67Ta				
22	钽 镍	51Ta	62Ta				NiTa (?)
23	钛 铁	31Ta	54Ti				Fe <sub>2</sub> Ti
24	锡 铜	61Sn	86Sn	76Sn, (95-100)Sn			Sn <sub>3</sub> Cu <sub>6</sub>
25	锡 铁	89Sn	92Sn	(95-98)Sn			Sn <sub>2</sub> Fe
26	锆 铜	16Zr	54Zr	31Zr	16Zr	28Zr	
27	锆 镍	31Zr	60Zr	40Zr	7Zr	35Zr	NiZr <sub>3</sub> , Ni <sub>3</sub> Zr
28	锆 钛	63Zr	48Zr	66Zr	——	——	

相互作用。这种作用还会由于高的压力和浓度的可选择性，而变得更加强烈及随意性。这就为结合区内各种组成物的生成创造了良好的条件。尽管爆炸焊接过程十分短暂，一般在微秒量级的时间范围内，异种金属的原子之间还是能够在那瞬时的高压和高温下，发生熔化、熔解和化合，生成混合物、固溶体或金属间化合物。这些结果可以用金相显微镜、X射线、电子探针和电子显微镜等分析检验技术检测出来。只是由于结合区内熔体的数量一般不多和仪器的精确度等原因，至今还不能将所有的组成物确定出来。

根据已有的资料推测，在异种金属爆炸焊接的结合区熔体内，可能存在与图3-6类似的相图：浓度轴的两端分别为基体金属，中间为它们任意组成的合金；温度轴则以两金属的熔点为顶点。在此相图内，根据两种金属相互作用的性质，其中可能存在与该两组元相对应的普通相图内所有的组成物。由于爆炸焊接的瞬时性，结合区内熔体的冷却速度将达每秒数千度至数万度。在如此高的冷却速度下，熔体中所有的组成物都会保留下来。并且，碰撞区内存在着几十MPa~几百MPa的压力。在这些情况下，可以推测，这种相图内的组合物在形态上、性质上、种类上和数量上，可能不同于普通的相图，而具有自己的特点。这些特点的探讨，是今后爆炸焊接复合材料微观分析和理论研究的一大课题。

表3 爆炸焊接双金属结合区熔融层中的金属间的化合物  
Table 3 Intermetallic of fusion layer in the bimetal bonding zone of the explosion welding

No	金属组合	金属间化合物	资料来源
1	铜 钛	$Ti_2Cu_7$ 、 $Ti_3Cu_3$ 、 $TiCu_4$ 、 $TiCu_2$ 、 $TiCu$	[3,4]
2	钛 钢	$Ti_3Fe$ 、 $TiFe$ 、 $TiFe_2$	[5,6,7]
3	锆 钢	$Fe_2Zr$	[8]
4	锆 钴	$ZrCo_3$ 、 $ZrCo_2$ 、 $Zr_6Co_{23}$ 、 $Zr_2Co_{11}$	[9]

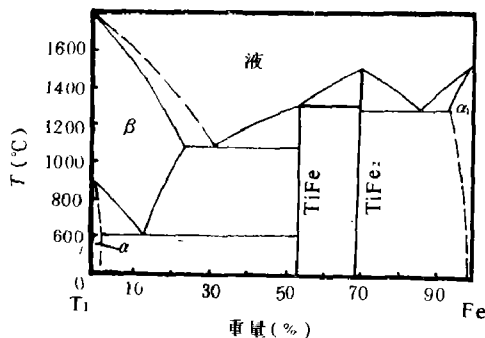


图3 Ti-Fe 相图  
Fig. 3 Ti-Fe phase diagram

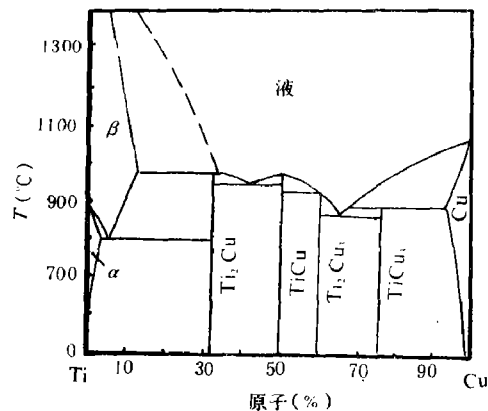


图4 Ti-Cu 相图  
Fig. 4 Ti-Cu phase diagram

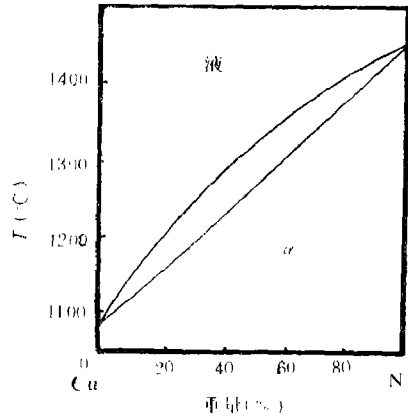


图5 Cu-Ni相图

Fig. 5 Cu-Ni phase diagram

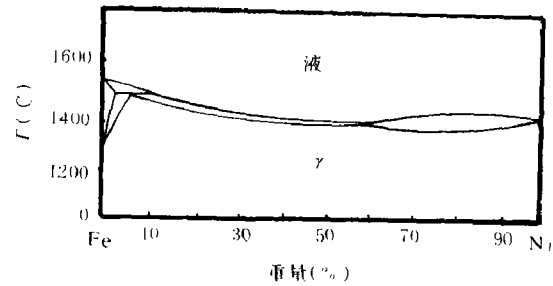


图6 Fe-Ni相图

Fig. 6 Fe-Ni phase diagram

#### 4. 相图在爆炸焊接中的应用

由表1~3和图3~6中的物理和化学组成可知,在爆炸焊接的结合区的熔体中,存在着相应组元的相图中通常就有的固体或金属间化合物。这一事实表明,相图在爆炸焊接中就具有实用价值。实际上,许多资料在分析和检测爆炸焊接结合区中的化学和物理组成的时候,总是自觉和不自觉地向相应的相图联系在一起<sup>[1,2]</sup>。

作者在长期的实践和理论研究中,也发现了上述联系。此外,还应用相图理论解释了许多爆炸态、热加工态和热处理态的爆炸焊接双金属的结合强度的变化与工艺参数和基体金属性质的关系。这方面的问题,实际上都属于相图在爆炸焊接中的应用。为了总结和提高,以及指导生产实践,在已有的资料的基础上,现将这种应用归纳为如下五个方面:

第一、根据一般相图,可以大致地估计出相应金属组合爆炸焊接后的复合材料结合区中熔体的物理和化学组成。

在拿到两种待爆炸焊接的金属材料之后,可以根据它们中的主要元素的相图,就能判断爆炸焊接后,它们的结合区中熔体内的化学和物理组成,就象表1~3和图3~6所提供的那些资料一样。应当指出,一方面由于上面指出的原因,并不是所有的组成物都能检测得出来;另一方面,由于爆炸焊接过程的特殊性,有些被检测出来的组成物是相图上没有的,如表3和图3、4所示,在铜-钛爆炸焊接结合区的熔体中,有 $Ti_2Cu_7$ 和 $TiCu_2$ ,而在铜-钛二元相图中却没有这两种金属间化合物;但在铜-钛二元相图中有 $Ti_3Cu$ ,而在铜-钛爆炸焊接结合区的熔体中却没有它们。又如在钛-钢(Fe)结合区的熔体中有 $Ti_2Fe$ ,而钛-铁二元相图中却没有这种金属间化合物。然而,不管怎样,实践证明,一般的相图是爆炸焊接复合材料结合区微观物理和化学分析的重要工具。

第二、根据相图上组元之间的相互作用的性质,例如它们的相互溶解性或生成金属间化合物的能力等等,在工艺参数适中的情况下,可以估计对应金属组合的爆炸焊接性。象钛-钛、钢-钢、铜-铜、铝-铝等相同金属的组合,以及不锈钢(Fe)-钢(Fe)、镍-钢(Fe)、镍

-不锈钢(Fe)和银-铜等形成固溶体的不同金属的组合,它们都能容易地爆炸焊接在一起。而象钛-钢(Fe)、钛-不锈钢(Fe)和镍-钛等生成金属间化合物的不同金属组合,虽然在原则上它们都有爆炸焊接性,但在工艺上比较困难一些。这就象用一般的焊接工艺(熔化焊、压力焊和扩散焊等)焊接相同和不相同的金属材料时,前者容易而后者困难一样。从爆炸焊接的窗口上分析和推测,相同金属的组合和能生成固溶体的金属组合的窗口一定较大,而易生成金属间化合物的金属组合的窗口一定较小。这就表现了不同的爆炸焊接性。

第三、根据第二点,可以大致地估计相应的复合材料的相对结合强度。例如相图上为固溶体的金属组合,它们的结合强度相对较高,而相图上多为金属间化合物的金属组合,它们的结合强度相对较低。这从表4~10内象这两种类型的金属组合的爆炸态性能数据的比较中可以清楚地看出。因此,一般的相图也是爆炸复合材料宏观机械性能分析的重要工具。

表4 爆炸态和退火态钛-钢复合板的结合强度

Table 4 Bonding strength of explosion welding and anneal states in titanium-steel bimetal sheet

退火工艺	爆炸态	500*	600*	700*	800*	900*	1000*	高温下组元相互作用的产物
剪切强度 (MPa)	357	291.1	181.3	112.7	106.8	50.0	18.0	Ti <sub>2</sub> Fe TiFe TiFe

\* (C, 1h)。

表5 爆炸态和热轧态钛-钢复合板的结合强度

Table 5 Bonding strength of explosion welding and hot-rolling states in titanium-steel bimetal sheet

加热温度 (C)	爆炸态	750	800	850	900	1000	高温下组元相互作用的产物
加工率 (%)	0	11.3	11.0	52.1	43.0	11.0	TiFe TiFe TiFe
剪切强度 (MPa)	357.7	230.3	191.3	173.5	—	50.0	

表6 爆炸态和退火态不锈钢-钢复合板的结合强度

Table 6 Bonding strength of explosion welding and anneal state in stainless steel-steel bimetal sheet

退火工艺	爆炸态	500*	600*	700*	800*	900*	1000*	高温下组元相互作用的产物
剪切强度 (MPa)	406.7	289.1	284.2	247.0	215.6	235.2	112.7	两种材料的基本组元均为Fe

\* (C, 1h)。

第四、根据相图可以估计后续热加工和热处理对爆炸复合材料结合强度的影响。例如,对于相图上有硬、脆金属间化合物的金属组合,它们在经过热加工(如热轧制)或热处理(如退火)以后,由于高温下结合区大量金属间化合物的生成和长大,这样将严重地降低双金属

表7 爆炸态和热轧态厚不锈钢-钢复合板的结合强度  
Table 7 Bonding strength of explosion welding and hot-rolling states in thick steel-steel bimetal sheet

状态	爆炸态	热轧态			高温下组元相互作用的产物
		最高值	最低值	平均值	
剪切强度(MPa)	406.7	384.2	220.5	339.1	两种材料的基本组元均为Fe
分离强度(MPa)	463.5	418.5	310.7	363.6	

表8 爆炸态和退火态的两种复合板的结合强度  
Table 8 Bonding strength of explosion welding and anneal states in both bimetal sheets

复合板	退火工艺	爆炸态	500*	600*	700*	800*	900*	1000*	高温下组元相互作用的产物
镍-钛	剪切强度(MPa)	479.2	472.4	461.6	303.8	266.6	134.3	36.0	Ti <sub>2</sub> Ni TiNi TiNi <sub>2</sub>
	分离强度(MPa)	330.3	223.4	116.6	141.1	115.6	43.1	24.0	
镍-不锈钢	剪切强度(MPa)	556.1	584.1	576.2	600.7	551.7	489.0	482.2	固溶体
	分离强度(MPa)	415.5	417.5	370.4	344.0	392.0	577.2	531.2	

注: 强度实验时, 镍-钛试样均从界面破断, 镍-不锈钢试样均从镍层破断。上、下各表中的试验均从界面破断。\*(C, 0.5h)

Note: In strength tests, nickel-titanium samples break from interface, nickel-stainless steel samples break from nickel layer. The test in the above and following tables all break from the interface.

表9 退火对两种状态的铜-LY<sub>12</sub>复合板结合强度的影响  
Table 9 Effect of anneal on the bonding strength of both states of cuprum-LY<sub>12</sub> bimetal sheet

状态	结合性能	原始态	350*	400*	450*	500*	高温下组元相互作用的产物
爆炸态	分离强度 (MPa)	70.4	46.0	47.2	20.6	23.2	Cu和Al生成多种金属间化合物
热轧态		44.4	39.0	23.2	21.6	24.0	

\*(C, 0.5h)。

的结合强度。而对于相图上那些仅有固溶体的金属组合, 热加工和热处理后, 它们的结合强度的降低将缓慢得多。表4~10中的大量数据可以证实这个结论。图7~10为几种爆炸焊接双金属在热处理和热加工以后的结合区形貌。由图可见, 钛和钢(Fe)、铜和铝这两组在相图上会形成多种金属间化合物的金属组合, 它们的结合区形貌与原始态相比, 发生了显著的



表 10 爆炸态和退火态的铜-LY<sub>2m</sub> 复合板的结合性能  
 Table 10 Bonding properties of explosion welding and  
 anneal states of cuprum-LY<sub>2m</sub> bimetal sheet

退火工艺	爆炸态	350*	400*	450*	500*	高温下组元相互作用的产物
剪切强度 (MPa)	86.4	67.9	58.8	46.9	20.3	Cu 和 Al 生成多种 金属间化合物
分离强度 (MPa)	116.6	77.3	51.6	47.4	24.4	

\* (C, 0.5h)。

变化。而镍和不锈钢 (Fe) 在相图上形成固溶体的金属组合, 结合区的形貌除各自晶粒长大以外, 没有其它异常的变化。这两种类型的情况无疑是上述相应结合性能变化的基础和依据。

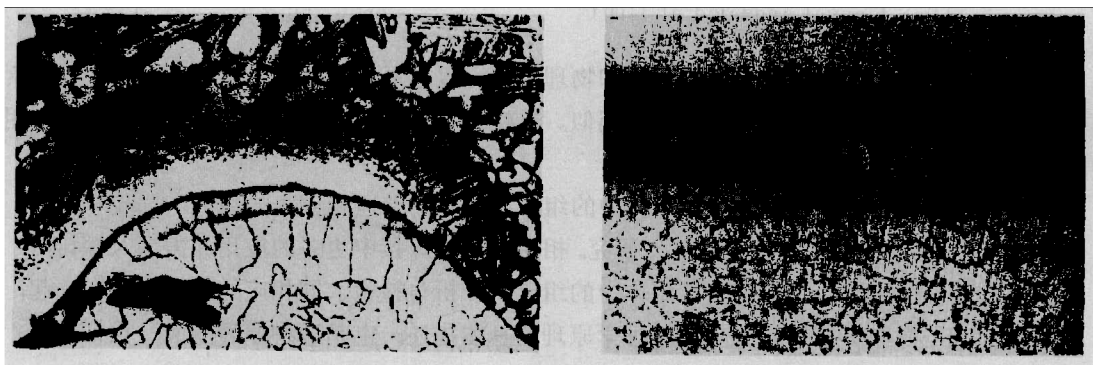


图7 钛-钢爆炸焊接双金属在1000℃、  
1小时退火后的结合区形貌 ×50  
Fig. 7 Bonding zone form after 1hr.  
titanium-steel explosion welding  
bimetal annealed at 1000℃

图8 钛-钢爆炸焊接双金属在800℃、2  
小时加热和 $\epsilon = 42.7\%$ 热轧后的结合  
形貌 ×50  
Fig. 8 Bonding zone form of after  
2hr. titanium-steel explosion welding  
bimetal hotted and  $\epsilon = 42.7\%$  hot-  
rolled at 800℃

第五、从上述分析和研究的结果可以看出, 对于一定的金属组合来说, 能够依据相图来制定它们的爆炸焊接工艺参数、以及后续热加工和热处理的工艺参数, 以便获得良好的结合区组织和最佳的机械性能指标。这就是在爆炸焊接中研究相图的最终目的, 也是相图在爆炸焊接技术中最好的和最需要的应用。当然, 要达到此目的, 还必须做大量的和深入细致的工作。

## 5. 结论和讨论

1. 在爆炸焊接复合材料的结合区的熔体内, 理论上说来含有基体金属材料所包含的所有化学元素和它们在高温下所能形成的物理组成。这是界面两侧一薄层金属在高温、高压、强烈的塑性变形和扩散下, 熔化、溶解或化合的必然结果。

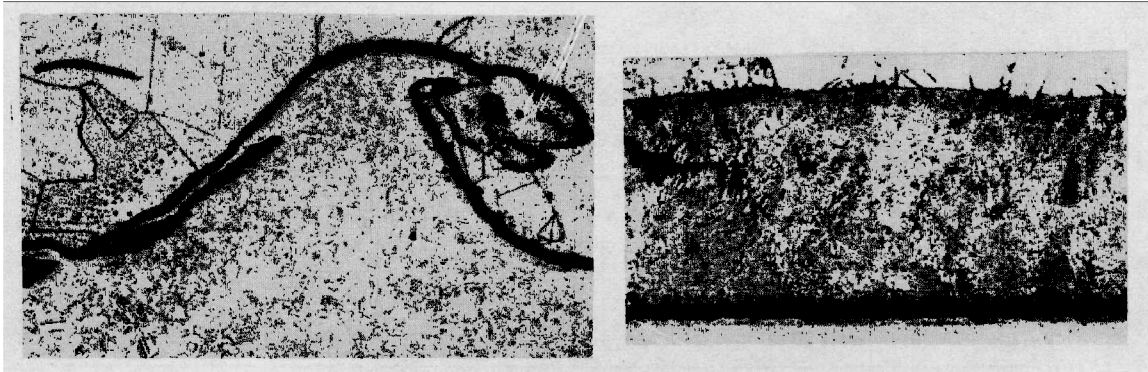


图9 镍-不锈钢爆炸焊接双金属在1100℃、  
1小时退火后的结合区形貌 ×50  
Fig. 9 Bonding zone form of after 1  
hour nickel-stainlee steel explosion  
welding bimetal annealed at 1100℃

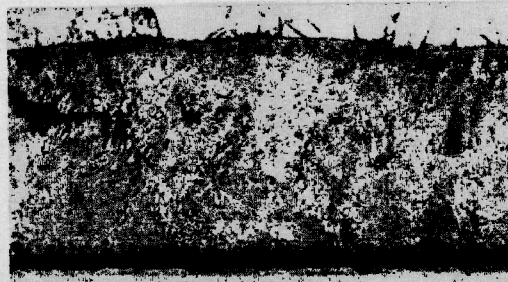


图10 铜-铝爆炸焊接双金属在550℃、  
0.5小时退火后的结合区形貌 ×50  
Fig. 10 Bonding zone form of after  
0.5 hour cuprum-aluminium explo-  
sion welding bimetal at 550℃

2. 实践和检验表明, 结合区的化学和物理组成, 以与复层和基层金属材料内的主要元素为系统的相图内的化学和物理组成基本相似。这就为本文所叙述的相图在爆炸焊接中的应用提供了理论基础。

3. 爆炸焊接条件下出现的金属熔体中的组成与对应的普通相图内的组成, 可能不尽相同。它们之间的联系和区别, 有待今后深入研究。相图在爆炸焊接中更多的应用亦需深入探讨。

本文明确地将爆炸焊接结合区熔体中的组成的分析与检验, 同相应的相图联系在一起, 这种联系既是爆炸焊接科学的金属物理学原理的具体描述, 也是这种原理的又一论证。

感谢相图专家、中南工业大学材料科学与工程系主任金展鹏教授的热情指导。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 石井勇五郎等, 爆炸焊接结合区熔融层的研究 (报告 1), 溶接学会志, 38 ( 6 ) ( 1969 ), 49.
- [ 2 ] 石井勇五郎等, 爆炸焊接结合区熔融层的研究 (报告 2), 溶接学会志, 38 ( 12 ) ( 1969 ), 104.
- [ 3 ] Schatt, W. et al., Diffusions unter suchnugen an system Cu-Ti kristall und technik, 13 ( 2. S ) ( 1968 ), 185.
- [ 4 ] Грабин, В. Ф. и др., Особенности образования интерметаллидов в соединениях титана с медью, полученных взрывом, Физ. и хим. обраб. материалов, 6 ( 1970 ), 56.
- [ 5 ] Schweven, F. F., Sonderfragen bei der schockwellenbearbeitung von metallen, metalloberfläche, 10 ( 1964 ).
- [ 6 ] Ben-Zen Weiss., Effect of jetting collision on structural changes at the interface of a Titanium-Steel system, Z. Metallkunde, 2 ( 1971 ), 159.
- [ 7 ] Trueb, L., Wittman, R., The effect of cold and hot rolling on the microstructure and fracture charateristics of titanium-to-steel explosion weldes. Z. Metallkunde, 6 ( 1973 ), 613.
- [ 8 ] Deribas, A. et al., Investigations of the changes in the zones of collison by explosive jo-

ining of metals, comport, milieux den ses haubes pressions dynam. ,Paris-New York.(1968), 351.

- [9] Дунаев, С. Ф. и др., Взаимодействие кобальта с цирконием под действием ударного импульса и при последующей термообработке, *Физ. и хим. обраб. материалов*, 3 (1971).

## EXPLOSION WELDING AND PHASE DIAGRAMS

Zheng Yuanmou

*(Hubei Institute of Automobile Manufacturing)*

**ABSTRACT** A thin layer of fusion zone is fused and compounded at the high temperature in explosion welding process. Lots of experimental results show that the phases in the fusion layer are corresponding to those in the phase diagram of the system. Thus, phase diagrams could be used to predict the phase in the fusion zone, the explosion welding ability of metals, the bonding strength and the effect of later forming process and heat treatment to the bonding properties. In other words, phase diagrams are the theoretical basis of parameter selections of the explosion welding forming and heat treatment.

**KEY WORDS** explosion welding, explosion welding bimetal sheet, fusion of the bonding zone, phase diagram.