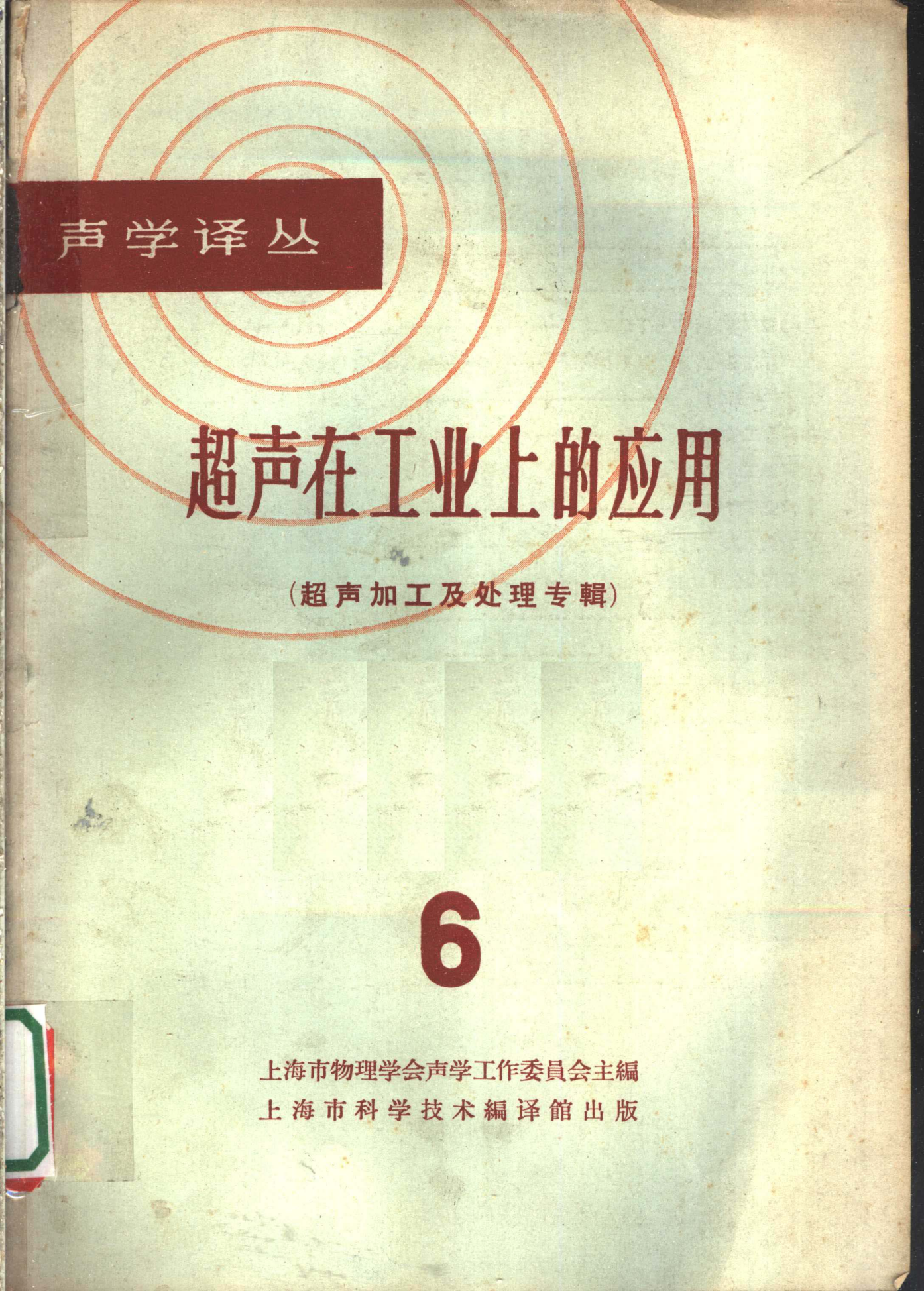




声学译丛

超声在工业上的应用

(超声加工及处理专辑)

6

上海市物理学会声学工作委员会主编
上海市科学技术翻译馆出版

声学译丛

(总第18号)

超声在工业上的应用

(6)

(超声加工及处理专辑)

上海市物理学会声学工作委员会主编

*

上海市科学技术翻译馆出版

(上海南昌路59号)

商务印书馆上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

《科技新书目》征订期号：55—158

*

开本 787×1092 1/16 印张 5 1/2 字数 175,000

1965年5月第1版 1965年5月第1次印刷

印数 1—2,700

编号 15·268 定价(科七) 0.80元

L1:6

RAM 85/01

目 录

超声焊接时形成联接的机理問題.....	С. Б. Айнбиндер 等.....	(1)
超声焊接的机理.....	岡田 実等	(5)
塑料超声焊接中的若干理論問題.....	Л. Н. Скороходов.....	(10)
超声焊接机的縱橫向波导杆的計算.....	Л. И. Брозгуль.....	(13)
超声焊接蜂窩結構.....	Б. В. Савченко 等	(20)
超声加工裝置的試制研究.....	大平正広 等	(22)
超声加工时材料中的应力与振幅和压紧力的关系.....	В. Ф. Казанцев	(30)
超声变幅杆的效率.....	И. И. Теумин	(32)
高放大率声振幅变换器的設計.....	Edward Eisner	(34)
阶梯型聚能器共振頻率的計算.....	И. И. Теумин	(46)
超声清洗系統.....	A. E. Crawford	(47)
超声在新合金生产中的应用.....	Г. И. Погодин-Алексеев	(52)
超声波对 P 18 鋼机械性能的影响.....	К. М. Погодина-Алексеева 等.....	(55)
乳浊液形成过程与超声强度的关系.....	С. А. Недужий	(58)
液体超声噴霧.....	R. L. Peskin 等	(59)
超声促进不加热的干燥.....	R. M. G. Boucher	(63)
粒狀固体流化中的声能.....	R. D. Morse.....	(67)
声振动对气泡床中二氧化碳吸收速度的影响.....	K. L. Harbaum 等.....	(73)
空化作用和高聚物的超声降解.....	N. H. Langton 等	(77)
冷冻食品的超声解冻.....	A. L. Brody 等	(82)
超声設備的經濟性.....	Ю. И. Китайгородский	(86)

超声焊接时形成联接的机理問題

С. Б. Айнбиндер, Е. К. Тихомирова

在对超声焊接过程进行一般性分析的基础上,文献[1]提出了在焊件被焊表面之間产生接合的机理可能是这样的:由振动极尖所引起的两被焊接件表面作相对位移时,破坏了的表面氧化膜部分地消除,并可能烧毁。各种污层,同时也使表面加热。其結果为清洁的表面之間形成大接触面积創造了条件,从而产生牢固的接合。

本文将以焊接接头金相分析的結果来証明上述形成接合的过程。

研究方法

試件是在巴依科夫(А. А. Байков)金属研究所实验室中的设备上焊接的。

試件材料为軋制过的銅和鋁,試件尺寸为 $60 \times 10 \times 1$ 毫米;鋁試件硬度为 $H_V 22.7$,銅試件的硬度为 $H_V 66$ 。接触压力是由荷重通过杠杆系統施加的。焊接工作频率为 20 千赫,試件未經特殊的表面处理就进行焊接。

为了进行研究,曾焊接两組試件:

1. 一組試件是在恒定振幅和恒定振动频率下,改变焊接時間所焊成的;

2. 另一組試件是在不同振幅下焊成的,在接触表面(試件-波导杆及試件-試件)上有网状切痕,切痕深度为 0.5 毫米。

对每批試件进行了剪切試驗;并对焊区进行了金相分析。不論鋁或銅,都分别在暗室中和在偏振光下进行过研究。

实验結果

鋁的焊接時間在 0.04 至 0.64 秒之間变化,每次間隔 0.04 秒。鋁試件焊接时的法向靜压力为 90 公斤,振幅为 15~17 微米。当焊接時間为 0.04~0.12 秒时,接触处形成了局部的接合,这一特点說明由于摩擦的結果而产生了巨大的形变(图 1)。其余的部分呈毛糙的表面,在它們之間如果形成了結合,也只不过是几个别的点上而已。在这种情况下,接合面积为极尖面积的 30~50%。焊接接头的机械

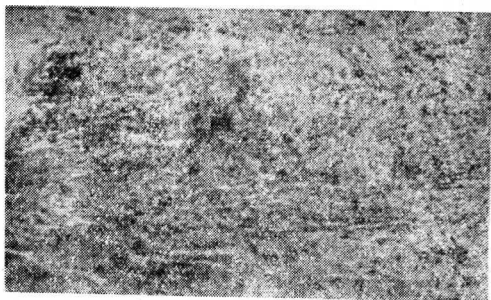


图 1 在短的焊接時間下鋁試件的結合部分($\times 250$)

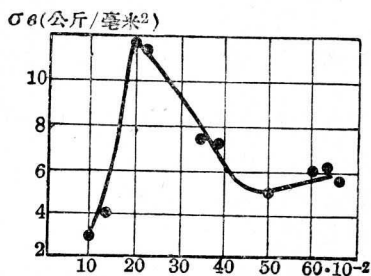
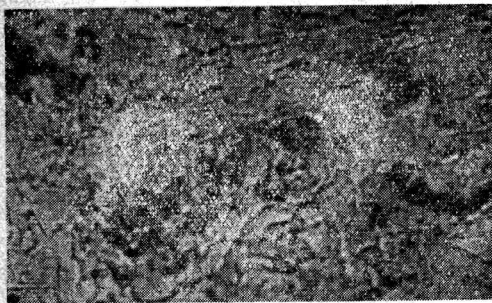


图 2 在不同焊接時間下鋁試件的机械性能

性能是低的(图 2)。

通过在暗室中照相而看到的夹杂物分布情况,說明了在接合处材料达到了塑性状态。实际上,只有在表面熔化或非常强烈的塑性流动情况下,才有可能出現这种夹杂物的渦旋形分布。在鋁中难以看到再結晶过程(图 3a)。

但是,从顆粒的大小来判断,焊接部分显然发生过再結晶現象,如图 3a 所示。当焊接時間增至 0.17~0.23 秒时,結合面积扩大达极尖面积的 95%。同时,于近焊缝区域的結構中,在个别地方沿着顆粒边缘出現了熔化的 $Al-FeAl_3$ 或 $Al-AlFeSi$ 共熔体(图 3b)。因为共熔体的熔化温度为 $610 \sim 630^\circ C$,显然,在結合区域的个别部分上温度曾达到这个数值。机械試驗表明,在这种焊接時間下試件的性能最佳(參見图 2)。随着焊接時間的增加,含有熔化共熔体的部分也增大,然而并未看到連續的区域。如焊接持續時間再增大(0.35 秒或更大),則在整个焊区中呈



(a)



(b)

图3 在铝试件中的再结晶现象(a)和沿颗粒边缘的共熔体熔化情况(b) ($\times 250$)

现了强烈搅动的涡旋状金属的特点。结合面积达到了100%。但是接头强度却降低了,虽然在断裂时也会出现了一些拉破的点。这说明在极尖下面产生了巨大的金属形变,那里的凹坑达到了原来厚度的43% (图4)。由图上可看出,从持续时间为0.22秒开始,压入的深度急剧地增加。看来,这说明了金属抗形变的强度减低了,表面上还可能发生熔化现象。

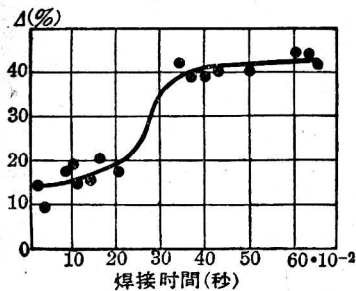
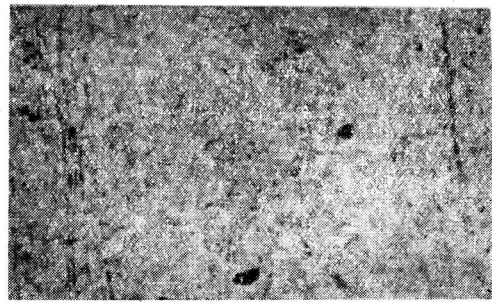


图4 试件的形变随焊接时间而变化的关系

铜试件焊接是在法向静压力为150公斤、振幅为18微米时进行的。焊接时间在0.5秒与2秒之间变化。当焊接时间为0.5秒时,出现了具有巨大形变(图5a)和涡旋的结合部分。情况和铝接头相似,不同之处在于结合部分的连续性和集中性。

这种接头的机械性能是很差的,结合面积也不



(a)



(b)

图5 在铜试件中的焊接时间较小时的结合部分(a)和再接晶现象(b) ($\times 250$)

大。当持续时间再增大,可看到接合区扩大,但同时在这区域内出现了细微的裂痕。在结合部分可看到再接晶结构(图5b)。此时试件的机械性能提高了,而在1.5秒时达到了最佳值(图6)。因此,在超声焊接时,铜试件形成牢固结合的同时一定发生再结晶过程。

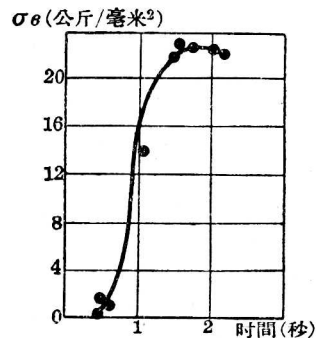
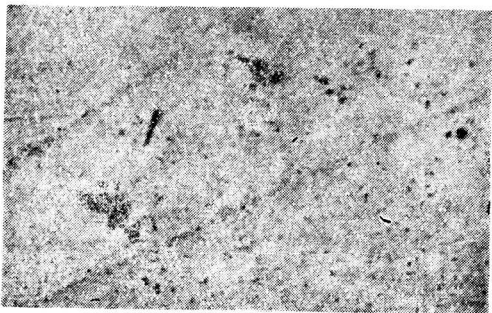


图6 在不同的焊接时间下铜试件的机械性能

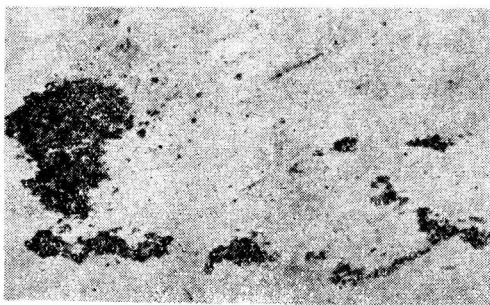
当焊接时间增至2秒时,结合区出现了个别的裂纹,机械性能下降了。结合区除了含有再结晶结构外,还有着严重变形结构的部分(图7a)。在个别的部分中,夹杂的氧化物变成了球形,这证明了在较小的体积内会发生熔化以及迅速的冷却(图7b)。照片中夹杂物的分布显示出强烈的搅动情况,而这只



(a)



(b)



(c)

图7 在銅試件中的結合区(a)焊接時間較大的夾雜物形狀(b)和氧化物的分布(c) ($\times 250$)

有在塑性状态或焊区中的金属熔化时才有可能发生(图7c)。

对于表面带有交錯格紋的試件进行研究的結果,表明了不論是鋁試件或銅試件,其結合面积都急剧地减小了。鋁試件仅在格紋处产生結合,甚至焊接時間达0.64秒时还不能使整个接触面結合。此时試件的强度很差,当焊接時間最大时,强度最大为 $\sigma_s = 5.0$ 公斤/毫米²(图8a)。在銅試件中,結合的趋势不明显,其强度也是很差的。当焊接時間最大时,得到的最大强度为 $\sigma_s = 8.5$ 公斤/毫米²(图8b)。由此可以利用交錯格紋来避免波导杆与焊件之間或焊件与底座表面之間的粘牢。

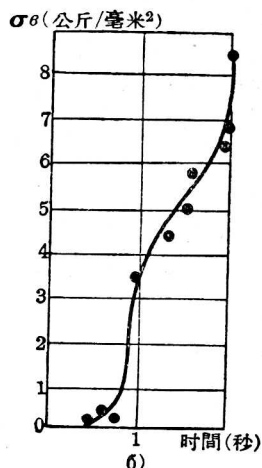
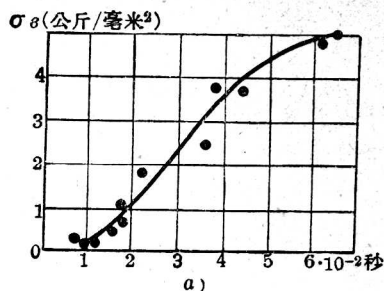


图8 表面带有交錯格紋的鋁試件(a)和銅試件(b)的机械性能

对于实验結果的討論

关于超声焊接理論的基本問題之一是闡明在焊接点上产生連續接合区的机理。

从于摩擦的实验中已經看到,物体作相对位移时产生了个别的接合斑点。还有一种焊接法^[2],在文献[3~5]中曾进行詳細的研究。然而在这些焊接方法中,接合总是发生于个别和偶然的一些点上,因而不可能获得連續的焊接区。必須在具有足够的搭接面积后,接头才可能达到需要的强度。

还有一种已知的方法是摩擦焊^[6],它是由于在摩擦过程中产生了高温而获得連續的結合区。

現在我們看一下,連續的接触区是如何形成的:

进行超声焊接时,在一般情况下,将振动极尖压向上层焊件的壓力,比金属的硬度小得多。

例如在上述的实验中,焊鋁时所用的压强是1.47~3.7 公斤/毫米²($H_V 22.7$);焊銅时是3~4.5 公斤/毫米²($H_V 66$)。显然,在施加法向負載作用时,金属不均匀表面的抗塑性形变强度約等于其硬度。因此,施加法向負載只能产生个别和不大的接

触区。如施加切向负载,则抗形变强度减低,而接触面积则增大。看来,此时也还包含了先行的位移过程^[9]。然而,通过对于先行位移的研究以及计算^[3],表明了这时的接触面积可能增长达2~3倍,因此可以相信,它不足以解释在超声焊接时所发生的现象。

实际上,当仅施加法向负载时,铝试件中的接触面积应约为4毫米²^[3,8],而当施加切向负载时,则可能增加达12毫米²。于是,当焊接时间较短时,连续接合区的面积约为25毫米²,而当焊接时间较长时,则达到60毫米²。焊接铜时,如考虑了切变应力,计算的接触面积约为50毫米²。

如果施加了与在超声焊接时相同的静态法向和切向负载,并不能获得必需的连续焊接区。但是如考虑了在摩擦过程中的表面发热,则情况将有所不同。若表面温度达到了再结晶温度或比其更高,则抗塑性形变强度急剧下降,而施加的力将足以形成大的连续接合区,当然,这必须在表面上的膜和污层已被去除的条件下才行。

上述的这些金相研究一致地说明了,在实际的超声焊接规范下,表面温度永远是相当高的(高于再结晶温度)。所以得出这个结论,不仅由于在接合区存在着部分的再结晶金属,还由于接触区的金属具有涡旋性质的强烈塑性形变,而这种现象只有当金属表面的抗塑性形变不大时才可能发生。

我们知道,在两个摩擦物体的短暂动程中^[7],真正接触点上的温度可能达到熔化点,因此在摩擦情况下,实际上它并不比在超声焊接时更强。同样,还产生了重复的形变,这自然也增强了发热过程。

因此,虽在某些个别的接触面积上即使完全不

发热也有可能发生接合,但一定要在加热的情况下才能够形成连续的接合区。看来,对于超声焊接过程可作如下描述:由于施加了恒定的法向力和交变的切向力,焊区处发生了破坏作用,并去除了接触表面上的氧化膜;同时也破坏了污物,且可能部分地将其烧毁。随后,由于摩擦的结果,表面温度升高而达到了在给定压力下足以形成连续接合区的程度,在此以后焊区处的能量消耗减少了,因为这时已由外摩擦过渡为内摩擦。如果将施加超声的时间再延长,则可能使已形成的联接发生疲劳性的破坏。

参考文献

- [1] Айнбиндер С. Б. Некоторые вопросы ультразвуковой сварки. — «Сварочное Производство», 1959, № 12.
 - [2] Костецкий Б. И. Сб. «Повышение износостойкости и срока службы машин» Машгиз, 1953.
 - [3] Айнбиндер С. Б. Холодная сварка металлов. Изд. АН Латв. ССР, 1957.
 - [4] Айнбиндер С. Б. и Пранч А. С. Известия АН Латв. ССР, 1959, 9, 48.
 - [5] Айнбиндер С. Б. и Пранч А. С. Сб. «Сухое Трение», Изд. АН Латв. ССР, 1961.
 - [6] Вилль В. И. Сварка трением, Машгиз, 1960.
 - [7] Боуден Г. и Тейбор Д. Трение и смазка. Машгиз, 1960.
 - [8] Айнбиндер С. Б. Новые способы сварки давлением. Изд. АН Латв. ССР, 1960.
 - [9] Johnson K. L. Proceeding of Royal Society, London, Vol. 230, 1955, p. 531~549.
- (曾克京译自苏联《Сварочное Производство》
1962年第9期第34~37页,黄耀丰校)

超 声 焊 接 的 机 理

岡田 実 新 成夫 宮城政和 松田浩身

一、結 言

最近人們將 Ti、Zr、Ta 或 Be、Ge 等新材料广泛应用于原子能工业或电子工业。由于这些金属的金属学特性,用普通的焊接方法焊接时,会在其焊区形成大量脆性的金属間化合物,因而不能获得富有韧性的焊接接头。超声焊接法沒有这些缺点,因而受到了人們的重视^[1]。可是对超声焊接的机理还不够清楚,也就是說,用金属学来研究焊接組織的结果,看到有温度上升的形迹,但看不出熔化組織,同时认为一般并不会发生生成金属間化合物以及相互扩散等现象^[2]。作者为了闡明这种焊接机理,曾对各种不同金属間的焊接接头作了显微镜檢驗、X 射线衍射、测定焊接接头的温度、X 射线显微分析等檢驗,以便探討其焊接机理。

二、試驗方法

本研究所用设备为島田理化工业股份公司制造的、最大超声功率为 2 瓩的点焊机,其簡图如图 1 所示。用这台设备把試样按各种不同条件焊接,并按下面的方式进行試驗。

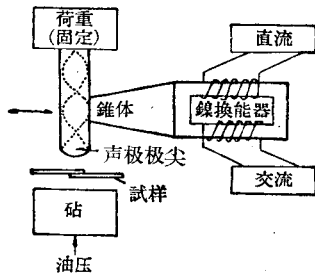


图1 超声焊接示意图

1. 用显微镜檢驗 把 0.06 毫米及 0.5 毫米厚的 Al、Ti、Cu 等,在被认为是合适的条件下焊接,作斜面抛光,用显微镜作了檢驗;

2. X 射线衍射 把 0.06 毫米及 0.5 毫米厚的 Al、Cu、Zn、Ti 以不同的組合焊接,用 Debye-Scherrer 法的底影反射法等进行衍射观察;

3. 测定焊接接头的温度 用压延到約 0.2

毫米厚的銘若天-阿留迈合金热电偶測定。此外,分别求出示波器上的振幅与温度的关系;

4. 用 X 射线显微分析进行研究 把 0.5 毫米厚的 Cu 与 Ti 焊接起来,将其焊接接头作斜面抛光,沿截面通过电子束加以檢驗,测定 Cu 与 Ti 的濃度变化;

5. 焊接性能与时效条件的关系 假如认为超声焊接是由于被焊材料間两金属原子的相互扩散的作用,则时效合金的时效处理条件对其焊接性能并无任何影响,因此,我們对以各种不同时效处理条件的 Cu-Be 合金与不同成分的 Ag-Cu 合金焊接的性能进行了研究。

三、試驗結果与討論

1. 显微镜檢驗

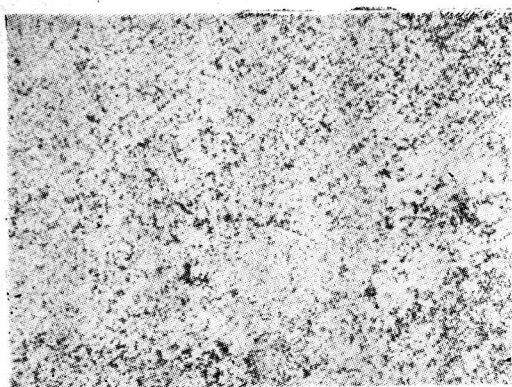
图 2 为焊接接头的典型組織。在图 2a 及 2b 上可以看到完整的焊接接头。在图 2c 上清晰地看到分界面,其細結晶部分的組織还不明确。图 2d 是 β 相 8 Mn-Ti 合金淬火后与 Ag 焊接后的东西;若在 500~600°C 以上回火,在焊接分界面附近可以看到有 α 相析出。

图 3 为 0.5 毫米厚的 Cu 与 Ti 的焊接分界面的电子显微組織,在分界面中并无非金属夹杂物和其他夹杂物,只有焊件的基体金属粒子。从图 2 及图 3 的組織来看,还分辨不出分界面的詳細組織。被焊材料的温度提高到再結晶以上,可以推論,焊件是在近乎两金属原子的相互扩散状态下被焊接的。

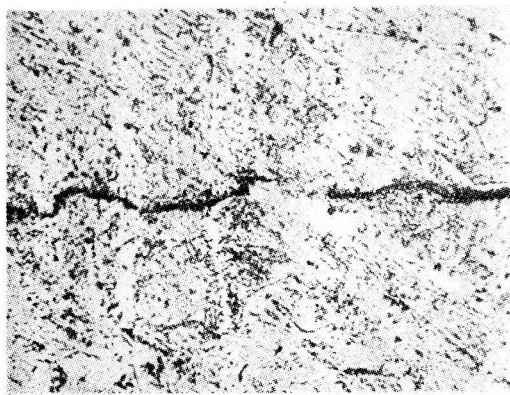
2. X 射线衍射

为了弄清焊接时是否有再結晶,用箔厚 0.06 毫米的 Cu-Al、Al-Zn、Cu-Ti、Cu-Zn 等組合焊接,并用 Debye-Scherrer 透射法拍照,图 4 所示为其中的两幀照片。从图上可見: Cu-Al、Al-Zn 的焊接接头被証实是有再結晶的。除有被焊金属的相以外,如金属間化合物所产生的衍射线等則看不見。此外,对于 Cu-Zn、Cu-Ti 再結晶的程度虽然有所不同,但所得結果相同。

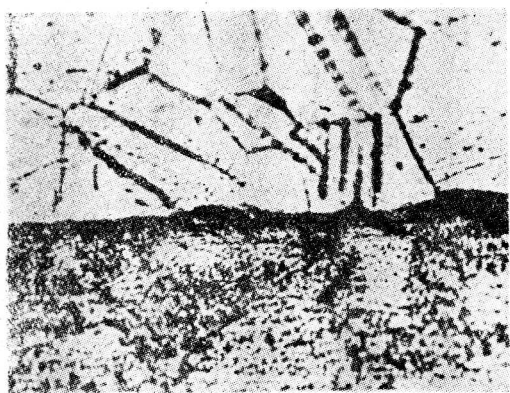
① 原文誤为 Al——譯者注



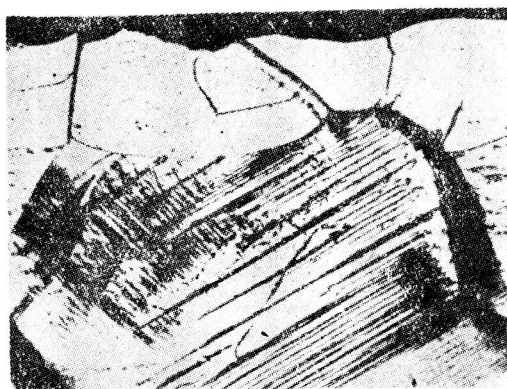
(a) 0.06 毫米厚的鋁箔間的超声焊接
浸蝕剂: HF (原图 $\times 200$)



(b) 0.5 毫米厚的鈦之間的超声焊接
浸蝕剂: HF+HNC₃ (原图 $\times 400$)

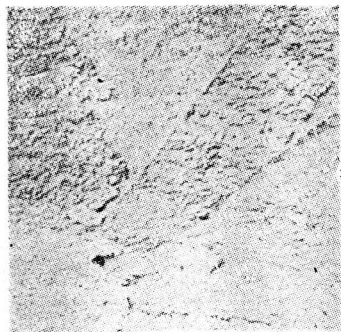


(c) 0.5 毫米厚的銅与 0.5 毫米厚的
鈦之間的超声焊接
銅的浸蝕剂: FeCl₃+HCl
鈦的浸蝕剂: HF+HNO₃
(原图 $\times 1000$)

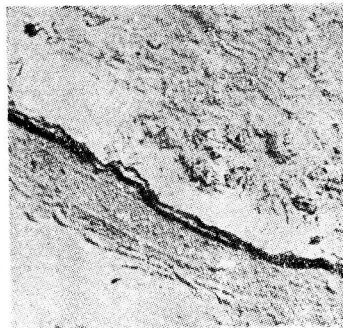


(d) 0.007 毫米厚的銀与 1.0 毫米厚的
8Mn-Ti 合金之間的超声焊接
銀未浸蝕
合金的浸蝕剂: HF+HNO₃
(原图 $\times 400 \times 7/8$)

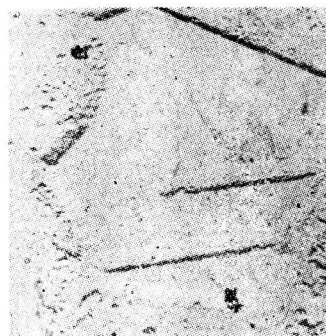
图 2 超声焊接的显微組織



銅



分界部分



鈦

图 3 0.5 毫米厚的銅与 0.5 毫米厚的鈦之間的超声焊接的电子显微
組織,用胶体复制法 (原图 $\times 5000$)

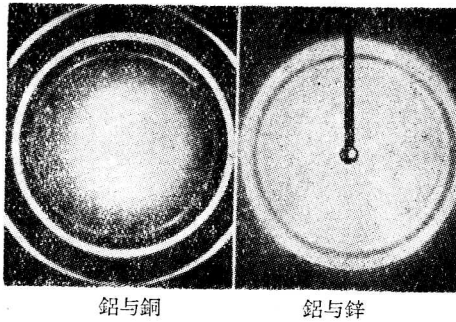


圖 4 0.06 毫米的銅箔與鋁箔間超聲焊接的 X 射綫衍射的試樣

为了查清是否存在金属間化合物，曾用 Debye-Scherrer 法（底影反射法和透射法）拍摄了 Cu-Al 的焊接接头照片，其中可以看到 Cu 和 Al 的衍射綫而看不見其他的衍射綫。

为了研究焊接接头的温度上升程度，把施以 0、30、60% 的加工的 0.5 毫米厚的 Al 在低于 400°C 的各温度下回火后，由各試样的底影反射衍射綫测定其半寬值，将此半寬值与在同一加工状态的 Al 类組合的焊接接头上所取得的半寬值进行比较。图 5 系示不同加工状态下經回火的 Al 的回火温度与其各种情况下的半寬值的关系，并显示了焊接接头的各部的半寬值（从近于声极极尖面开始逐渐向分界面約每 0.2 毫米用电化学抛光部分的衍射綫所求得半寬值）。不能认为，在回火与超聲焊接情况下，半寬值的变化是相同的。首先，如加工材料在焊接时的热影响受回火效果的影响，那末也可以說，在同一超聲功率下焊接的焊件加工度愈大，或在同一焊接接头距焊接接头分界面愈近，則受到回火效果也愈大。前者可以理解为是由于金属的加工度与再結晶温度的关系，后者可作如下解釋。如果說，超聲焊接时所发生的热随着压力的加大而造成励振的状态，即所謂发生摩擦，不用說，声极极尖接触面的温度必然比两金属接触面的温度的上升为高。所以其衍射綫的半寬值必然較小。然而从图 5 可見，接近焊接分界面部分的半寬值較大，与声极极尖接触的面上的声极极尖加压力的影响也比两金属接触的面上大，由于金属晶格歪扭，也就认为其衍射綫的半寬值亦稍大。但是，根据实验来看，在此程度的加压力下随着衍射綫的半寬值增大而晶格并不歪扭。然而，为了說明与声极极尖接触的面上的半寬值較大的原因，被认为是由于声极极尖与砧材的热容量大，发生的热量經由声极极尖或錐面很快逸散，因而与这些声极极尖或錐体接触的面的温度不上升，这样

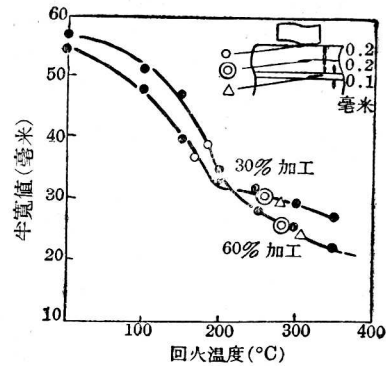


图 5 对应于超聲焊接(○、⊙及△)与回火(●)的鋁的 X 射綫衍射綫的半寬值的变化

解釋是恰当的。結果两金属接触面的温度上升較大，亦即可以說受到回火的效果較大。

3. 焊接接头的温度测定

如前所述，超聲焊接时，在被焊材料接触面上发生較大的温度上升，似乎可以认为，这是影响焊接的最大因素。为了研究超聲焊区的温度上升程度以及焊接条件对焊接时所产生的热的影响，我們曾用压延成 0.2 毫米厚的銘若天-阿留迈合金热电偶，并用示波器测定在如下条件下的焊接接头的温度：

(1) 把热电偶插在声极极尖与砧之間，振动条件如下表所示；

表 振动条件

热电偶	銘若天-阿留迈合金 (0.2×3.0×500.0毫米)
声极极尖半径	70 毫米
声极极尖表面条件	用 320 号的金剛砂紙抛光
砧的形状	扁平
砧的表面条件	用 320 号的金剛砂紙抛光
声极极尖的压力	5~40 公斤/厘米 ²
超聲输出功率(I_p)	400~900 毫安
振动持續時間	最大 10 秒

(2) 把热电偶插在各种厚度的 Ti 与 Al 之間，振动条件与表中相同，但片厚为 0.06、0.5 及 1.0 毫米，各材料的表面处理是 Ti 酸洗后、Al 碱洗后在三氯乙烯中洗滌；

(3) 把热电偶插在各种不同厚度的片間。

按照热电偶的插入位置 实验时，超聲功率与声极极尖上的压力如下所示。实验所用的焊接装置上有功率管板流(I_p)的指示表，由于沒有装設功率表，功率宜用 I_p 来表示。此外声极极尖上的压力(荷重)用油泵的气缸面上所加的油压 P (公斤/厘米²) 来表示。根据电子管电压表测定的結果， I_p 与

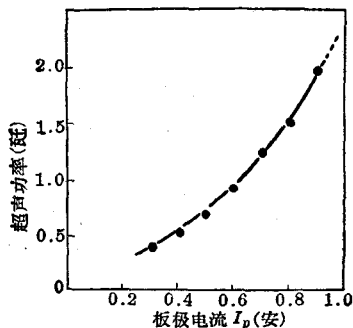


图6 板极电流 (I_p) 与超声功率的关系

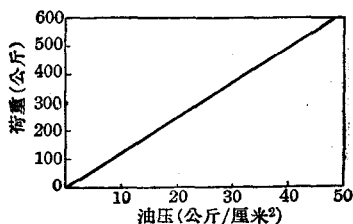


图7 油压与荷重的关系

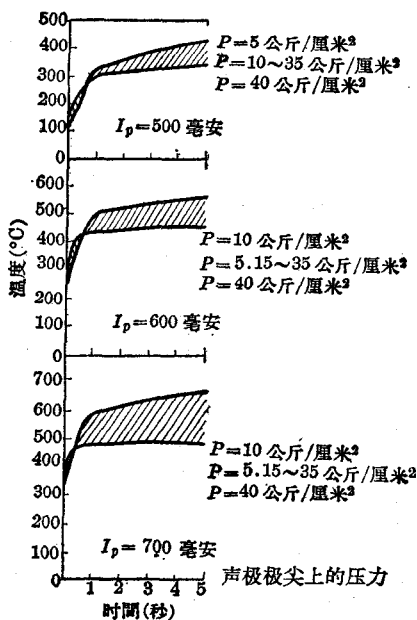


图8 不同情况下的温度上升,仅在声极极尖与砧之间插入一对热电偶

功率的关系如图6所示。图7乃是声极极尖上的压力与油压的关系。

图8所示为超声功率 I_p 及声极极尖上所加压力不同时励振时间与温度上升的关系。图9所示为温度上升与声极极尖上的压力以及温度上升与超声功率的关系。由这些图可知,超声功率愈大,焊区温度上升也愈大。这是由于在声极极尖上的压力相同

时,超声功率增加,因而振幅增大,施加于焊区的摩擦力也大。但是声极极尖上的压力与温度的关系是:在同一超声功率下,其声极极尖加压力使温度上升最高,提高超声功率时,如图9的曲线所示,温度上升最高的声极极尖上的压力有升高趋势。这是由于声极极尖上的压力增加,从而会使振幅降低的缘故。

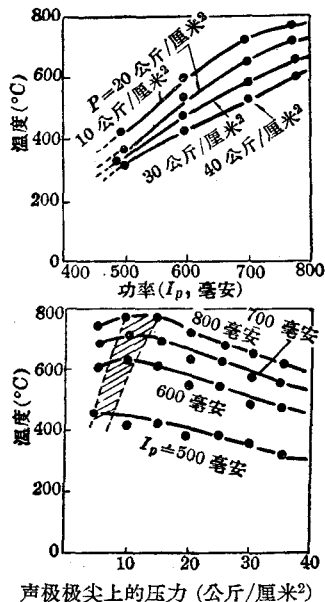


图9 温度上升与 I_p 及油压的关系,仅在声极极尖与砧之间插入一对热电偶

把热电偶插在被焊材料间的场合 振动条件与焊接接头温度上升的关系与上述热电偶插入声极极尖与砧之间有大致相同的倾向,但在同一振动条件下,热电偶插入被焊材料间时的温度上升比热电偶插入砧与声极极尖之间时稍低;此外,增加片厚时会使温度上升减少。

热电偶插入厚度不同的片间 从图10可见,在同一振动条件下,置于声极极尖侧的薄片比厚片的温度上升大。这一事实可以解释为:因为置于声极极尖侧的材料越厚,其间所吸收的振动能越大,因而接触面上的温度上升也越少。

此外,如把声极极尖、砧及被焊材料的表面状况作某些改变(用不同粒度的金刚砂纸抛光或电化学抛光),在一定的振动条件下进行温度测定,结果都在测定误差范围以内。在改变振动条件或被焊材料厚度的比较结果来看,也没有发现显著的差别。

如上所述,测定相当高的焊区温度时,可以举出许多影响热量发生的因素,其中影响最大的是超声功率,超声功率愈大,温度上升也愈大。

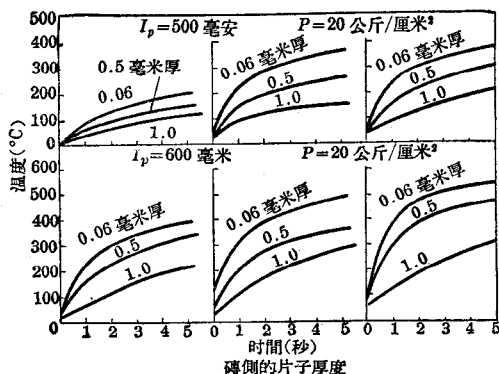


图 10 不同厚度试样片的温度上升(热电偶插在两片间)

4. 用 X 射线显微分析进行研究

用上述的温度测定方法可测得焊接分界面上的温度相当高。可以认为,在此状态下会引起扩散作用。我們曾用 X 射线显微分析来研究其扩散状态。

把 0.5 毫米厚的 Cu 与 Ti 焊接,焊接处进行斜面抛光,取得抛光试样。使用装置为 XMA-1 型。摄影条件为加速电压 25 千伏、照射电流 2.3~2.4 微安、试样面上的电子照射点直径 ~4 微米,试样位移速度 15 微米/分,胶卷移动速度 2 厘米/分。测定结果如图 11 所示。图中 Cu 与 Ti 的分界面为 0,其坐标数以微米计,同时记录由于电子照射而流经试样的电流,因而所记录的 Cu 与 Ti 的电子电流有显著不同,借此能确定其分界面。Cu 的浓度曲线渗入 Ti 方约 40 微米, Ti 的渗入 Cu 方约 10 微米,比 Cu 渗入 Ti 方约 40 微米的部分少。这可能会在两金属间发生扩散来解释超声焊接。

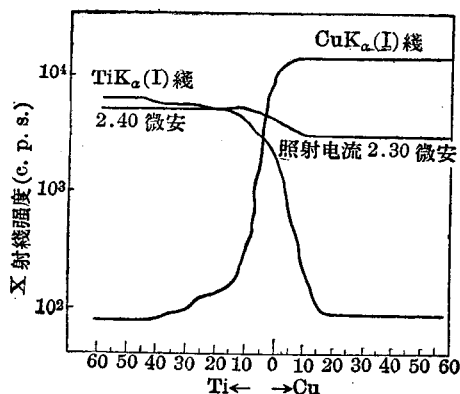


图 11 Cu 与 Ti 超声焊接的 X 射线显微分析结果

5. 焊接性能与时效条件的关系

根据前述的用 X 射线显微分析测定的结果,说明超声焊接时会引起扩散现象,它被认为随着时效合金的时效处理条件不同而使其焊接性能受到影

响。这里采用 0.5 毫米厚的 Cu-Be 合金 (2.1 重量 % Be、0.19 重量 % Co) 与 0.5 毫米厚的 Ag-Cu 合金 (90 Ag-Cu 及 60 Ag-Cu) 来研究其焊接性能。

Cu-Be 合金在 750°C 熔化处理,并在 350°C 作 5、15、30、60 分钟及 450°C 作 60 分钟的时效处理后,把这些试样与 Ag-Cu 合金焊接,测定其焊接强度(在剪应力试样上施加断裂荷重),还用三氯乙烯清洗试样表面。焊接条件:声电极尖上的压力为 30 公斤/厘米²、超声功率 $I_p=900$ 毫安、焊接时间 3~7 秒,剪应力试验用 INSTRON 材料试验机。

图 12 为 Cu-Be 合金及 Ag-Cu 合金的焊接强度与对 Cu-Be 合金时效处理条件的关系。从图中可以看出,焊接强度随 Ag-Cu 合金的成分而不同,这是受这种合金系的共晶点的影响,由于 60Ag-Cu 合金接近共晶成分而使焊接强度降低。此外还可看出, Cu-Be 合金的不同时效处理条件对强度有很大影响,在 350°C、15~30 分钟的时效处理后焊接强度非常高(为未经时效处理的 2 倍)。这种合金的最适当的时效处理条件为 350°C、1~2 小时。所以 350°C、15~30 分钟的处理乃是处于时效初期的状态,溶质原子刚开始移动的时期。在 350°C 经 60 分钟时效处理后的焊接强度稍有降低,但在 450°C 经 60 分钟的时效处理后其焊接强度却大大降低。

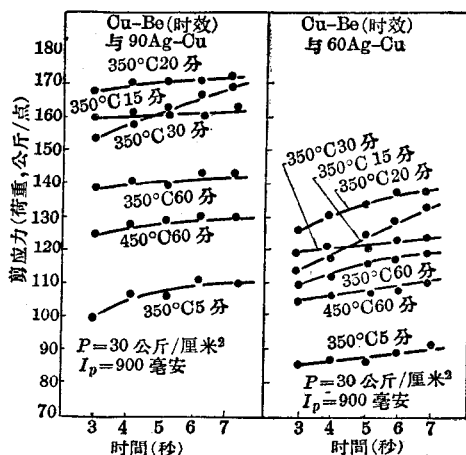


图 12 0.5 毫米厚的不同时效条件的 Cu-Be 合金与 0.5 毫米厚的 Ag-Cu 合金之间的超声结合的剪应力强度

这是根据 Cu-Be 合金的时效特性,在时效过程中有相当数量的溶质原子移动,由于超声的励振,更加速了溶质原子的运动,可以认为,其结果使时效过程中的焊接性能变佳。

(郑显明译自日本《日本金属学会誌》1962 年第 26 卷第 9 期第 585~590 页, 蔺承隆校)

塑料超声焊接中的若干理論問題

Л. Н. Скороходов

应用帕明杜尔^①换能器的磁致伸縮效应, 可以产生适用于焊接塑料制品的超声。以频率为 20~25 千赫的塑料的超声焊接示意图如图 1 所示。

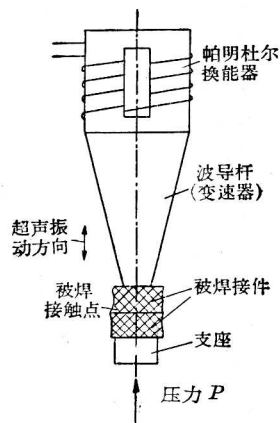


图 1 塑料的超声焊接示意图

莫斯科高等技术学院-莫斯科动力学院 (МВТУ-МЭИ) 曾研制几种装置, 可用来成功地焊接一系列工业制品: 内燃机空气滤清器的聚氯乙烯滤芯 (图 2)、无杆式水泵的聚酰胺涡轮和运输产品用的包装箱。各单位所进行的多次实验结果目前都还没有发表过; 塑料的超声焊接理论还不成熟, 因此对于这种焊接方法的评价也不一致。

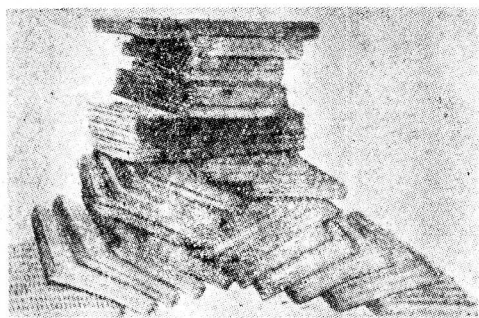


图 2 内燃机空气滤清器的聚氯乙烯滤芯

本文对塑料超声焊接中的若干现象作了分析。

实验表明, 超声波只能用来焊接热塑性塑料, 因为抗性塑料在受到加热时就会分解。这说明超声波

对于塑料的可焊性并不会有任何特殊的影响, 即超声焊接是一种以超声机械振动形式作为特殊能源的纯热过程。这种焊接工艺的最大优点在于焊接区域能放出最大的热量, 而整个焊件却不显著地变热。

在对塑料的超声焊接所作的理论分析中, 我们曾假定:

1. 制品内能流的大小由所加的压力来决定;
2. 在给定的振动频率下, 制品的横截面将比原材料内的波长小, 所以可以认为制品内有正弦波传播。

超声焊接的各元件结构如下: 振动部分—被焊接件—支座 (图 1)。振动部分系一种将电磁能转换为机械能的超声换能器。样件和支座系两种无源元件, 即它们能传导并吸收超声波。这两种元件是相互关联的, 所以焊接时的所有现象都必须综合地来加以研究。

超声焊接的主要参数:

1. 声功率;
2. 振动频率;
3. 被焊材料的物理-机械性能;
4. 压应力;
5. 超声波通过时间;
6. 被焊接件的尺寸;
7. 支座的材料。

目前还不可能分析上述各参数对超声焊接过程的影响, 但可以通过试验来确定超声的能流密度与压应力的关系, 而后进行计算:

$$q = f(\sigma_{c\omega t}) \quad (1)$$

式中 q 为被焊接件内的能流密度;

$\sigma_{c\omega t}$ 为压应力的值。

当用超声焊接塑料时, 在被焊接件上施加一定压力, 其大小 (考虑到被焊接件对超声波的惰性) 可决定制品内声压幅值。纵波的能流密度可用下式测定:

$$q = \frac{\sigma_{c\omega t}^2}{\zeta} \quad (2)$$

① 一种铁钴磁性合金——校者注

式中 ζ 为被焊材料的声阻抗。

压应力的极限值可用弹性材料的损耗来测定,即用材料的屈服点值 σ_{mek} 来测定。

根据弹性的不同,所有的塑料可以分成下列两大类:

软性塑料(聚乙烯、电缆素炼塑料等等),其弹性模量为 $E < 2 \cdot 10^4$ 千克重/厘米²,相对伸长 $\epsilon > 25\%$;

硬性塑料(有机玻璃、硬聚氯乙烯塑料、聚苯乙烯等),其弹性模量为 $E > 2 \cdot 10^4$ 千克重/厘米²,相对伸长 $\epsilon < 25\%$ 。在这两类塑料之间并没有明显的界限,而且有一种中间性质的塑料(如聚酰胺等)。

用超声焊接软性塑料效果很差,而硬性塑料却很好。

当塑料作超声焊接时,会产生最大的和最小的振动能量,它们主要是取决于材料的物理-机械性能。最大的振动能量可用该材料的屈服点值来决定。材料的屈服点值 σ_{mek} 越大,则“进入”制品材料内的能量亦越大,同时并不减小本身的弹性。超过该材料的 σ_{mek} 的压应力将使弹性振动能量不能传送到制品中,从而不能焊接。这说明超声焊接软性塑料是有困难的,因为它们屈服点值很小。

最小的振动能量也可作为焊接过程的特征,在这样的能量下,有可能使焊接质量十分优良。这种最小值决定于焊件的原材料、制品的边界条件和厚度。当超声通过制品时,其中一部分不可能返回而变成热能损耗掉。而这种损耗在使制品发热的同时,也使材料弹性发生变化,这样,对振动能量吸收作用更大,因而引起发热。因为制品的材料将通过连续地吸收振动能量而达到高弹性的状态,所以有可能使波导杆曲成凹形。

当进行超声塑料焊接时,曾使用钢支座。正如试验结果所指出,如果使用其他材料的支座,就不可能提高焊接的质量。通过简单的计算可以确信,能量的主要部分在波导杆与塑料相接处被反射,而为制品所吸收。所以,采用任何其他材料来代替钢支座并没有什么特殊意义。

制品焊接表面的状态对焊接质量的影响很大,因为整块材料中所发生的现象与焊点的现象有显著不同。在两种相同介质(塑料-塑料)的分界面上,它们的机械连接是不完善的。在两种相同介质的分界面上没有能量反射,然而由于焊接表面的粗糙性和微薄空气层的存在,所以接触点的声阻抗与整块材料的声阻抗有所不同。由(2)式可知焊点所放出的热量与振动能成正比。因此,单位能流随着焊点的声

阻抗的减小而增大,同时焊点内放出的热量亦有增加。由此可见,被焊塑料焊点内所放出的热能要比整块材料中大得多,这将使焊件焊接层熔化,同时在适当压力下可得到坚固的焊接。通过人为地降低焊点的声阻抗,例如使表面的粗糙度增大,就可使塑料的焊接更稳固,质量更好。

振动部分的设计是要使振动的密集度集中在波导杆的工作端。波导杆端的动能可由下式求出:

$$E = \pi/8 S \zeta \omega A^2 \quad (3)$$

式中 S 为横截面积;

ω 为角频率;

A 为振幅。

当振动部分用在“自由”状态下,即在无负载时,很大部分振动能量将被反射到波导杆内。如果与波导杆工作端接触的是塑料这类材料,则振动系统能量的重新分配就与无负载系统工作时有所不同。按公式(3)测定的波导杆的一部分动能将传送到样件中,而另一部分动能在与制品十分紧密地接触时,将转换为波导杆端制动的位能。正由于这样,所以在波导杆端与制品的接触点会放出热能,换言之,在一定的条件下,存在着波导杆端的动能对于材料的“过剩”,结果就会使波导杆端的制品烧焦。

对于分配为恒定的系统(振动部分属于这类系统)来说,其特点是固有频率为无穷数。塑料的超声焊接质量主要决定于紧靠波导杆端的制品厚度,这厚度是确定谐波次数的,而谐波波节与焊点相合。当制品线性尺寸短于制品材料内给定频率的波长时,焊点的加热主要是由更高次谐波所引起的。因此,加热程度很低,而焊接亦不稳固。随着制品线性尺寸增加到一定极限,谐波次数被减低,这保证了焊点放出的能量更大,同时焊接也比较稳固。但另一方面,由于材料对振动能的吸收,制品线性尺寸的增大将会产生相反的作用,而减低能流。

此外,实验指出,在振动波节处放出的热量最多。

根据以上所述,可提出下面关于塑料的超声焊接的假说:焊点所放出的热量取决于基本振动的谐波次数,而谐波的波节则与焊点相合。

图3所示为塑料的超声焊接过程的图解,表明弹性振动的能流密度与压应力的关系。

图中:

$q_{\text{вон}}$ 为波导杆的能流密度;

$q_{\text{отп}}$ 为波导杆动能被焊件反射的部分;

$q_{\text{на}}$ 为焊件中能流密度;

$q_{\text{ногл}}$ 为焊件材料所吸收的能流密度;

$q_{\text{менл}}$ 为波导杆的能流密度对于制品材料动能可能的“过剩”。

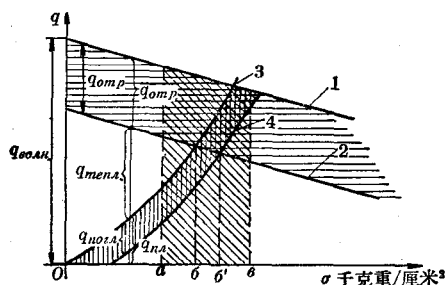


图3 塑料的超声焊接过程图解

下面是上述各种现象在考虑到文章开头处提出的一些前提下的定性分析。

曲线1指出压应力对波导杆振动的能流密度的影响。其函数为线性的,它的真实形状很容易用试验方法来确定。曲线2指出,在考虑到焊件反射能

流的情况下压应力对波导杆能流密度的影响。曲线3按公式(2)指出压应力对焊件内能流密度的影响。曲线4按焊件内的能流密度,考虑到制品材料内能的吸收。

在 $0 \sim a$ 范围内,大半是能量 $q_{\text{менл}}$ 的“过剩”,它是波导杆方面被焊接件过热的原因。在软性塑料中,这能量“过剩”要比在硬性塑料中大得多。

在 $a \sim b$ 范围内,大半是 $q_{\text{ногл}}$,它能保证焊接的质量优良。

$b \sim b'$ 范围相应于压应力的最佳值,这里波导杆端的动能将完全流入焊件。

在 $b' \sim c$ 范围内,能流密度还相当大,它能在焊点产生焊接所需的热量。

在 c 点开始往右的压应力值下,波导杆的能流密度相当于最小值,这里由于波导杆的过分制动而不可能得到高质量的焊接。

(徐宝铭译自苏联《Пластические Массы》1962
年第11期第33~35页,郑冠雄校)

超声在工业上的应用(7)《超声检测专辑》内容预告

本辑共收集了国外最近发表的有关超声在检测控制方面应用的文献约20篇,内容包括:超声探伤和检验、超声浓度测量、超声流量测量、超声粘度测量、超声显示、超声控制等。

超声在工业上的应用(8)《超声加工及处理专辑》内容预告

本辑共选译了最近国外发表的有关超声在加工及处理方面应用的文献约20篇,内容包括:超声加工、超声乳化、超声干燥、超声喷雾、超声处理熔融金属以及有关超声发生器的设计和测量等。

读者对象:声学工作者及物理、声学、电子学及应用超声各专业的研究人员、工程技术人员、有关高等院校师生等。

超声焊接机的纵横向波导杆的计算

Л. И. Брозгуль

在国外的期刊中曾介绍过用纵横向波导杆系统(图 1a)作为超声焊接机的基本元件。这样的系统比纵向波导杆(图 1б)更为有效。本文将讨论关于纵横向波导杆系统的计算问题。

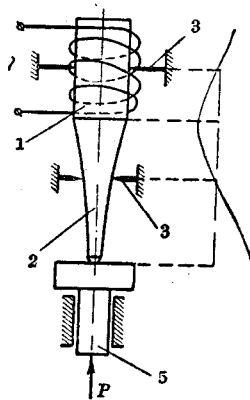
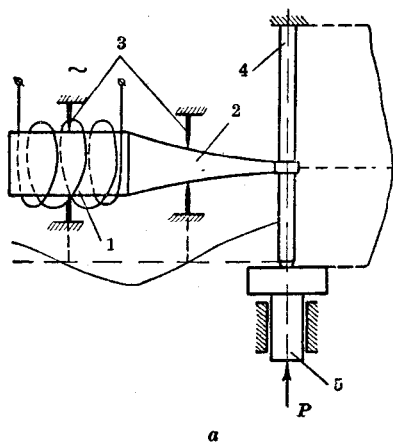


图 1

1—磁致伸缩振源；2—变声器(纵向波导杆)；3—法兰支持板；4—横向波导杆(细线表示在元件的组合中可能产生的振动波形之一)；5—反射波导杆

系统中各元件几何尺寸的决定

为了进一步说明问题，首先研究一下组成纵横向波导杆的个别元件：单柱磁致伸缩振源(振源)、

指数形变速器和横向波导杆。

我们先明确一下其中每一元件发生共振的条件，然后再来看是否可能将它们耦合起来而共振的条件仍保持着。

在变截面杆中纵向振动的一般方程式是：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[EF(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right] = \rho F(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中 E (千克重/厘米²) 为杆材料的弹性模量；

$F(x)$ (厘米²) 为与一端距离为 x 的杆横截面积；

ρ (千克重·秒²·厘米⁻⁴) 为杆材料的密度；

$u(x, t)$ 为纵向位移函数。

只有在某些特殊的情况下才可能获得上式的完全解。

振源可以看作相当于单杆的等截面振动器。而对于等截面杆

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

式中 $a = \sqrt{E/\rho}$ 是纵向振动在杆中的传播速度。将方程式(2)的解写成两个函数之积，其中一个决定振动的波形，另一个决定位移随时间的变化，即

$$u(x, t) = X(x) \cdot T(t) \quad (3)$$

可容易地得到杆的弹性振动的波函数

$$X(x) = C_1 \sin \frac{\lambda}{a} x + C_2 \cos \frac{\lambda}{a} x$$

式中 $\lambda = 2\pi f$ 为时间函数 $T(t)$ 中的振动圆频率。

考虑杆两端的边界条件(即不存在纵向力的条件)，可得到简单的频率方程式

$$\sin \frac{\lambda}{a} l = 0$$

从此式可求出杆的共振长度

$$l = \frac{n}{2f} \sqrt{E/\rho} \quad (4)$$

$n=1, 2, 3 \dots$ 为杆振动的第 1、2 种等等形式；

$n=1$ 为半波振动器；

① 原文中作 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$ ，系印刷错误——译者注

$n=2$ 为双半波振荡器, 依此类推。

以下将研究具有自由端和圆形截面, 而长度为 l 的指数形变导杆 (图 2)。如果任意截面的直径变化规律为已知, 则

$$F(x) = \frac{\pi}{4} D^2 e^{-\alpha x}, \quad (D_x = D e^{-\frac{\alpha}{2} x}) \quad (5)$$

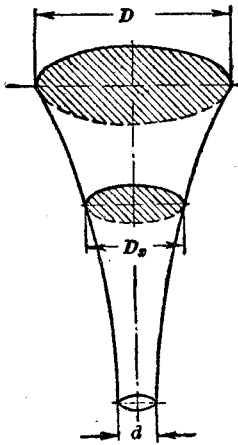


图 2 指数形聚能波导杆

将式(5)代入方程式(1), 即得到

$$a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \alpha a^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

取其解的形式如式(3), 则可得到确定振动波形的方程式如下

$$a^2 X'' - \alpha a^2 X' + \lambda^2 X = 0 \quad (7)$$

方程式(7)的解如下

$$X = C_1 e^{s_1 x} + C_2 e^{s_2 x} \quad (8)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= \frac{\alpha}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\lambda^2}{a^2}} \\ s_2 &= \frac{\alpha}{2} - \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\lambda^2}{a^2}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

可以证明, 如 $\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\lambda^2}{a^2} > 0$, 则振动不可能在杆中传播。边界频率 (在此频率以上方能开始振动) 决定于以下条件

$$\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\lambda^2}{a^2} = 0, \quad \text{即 } \lambda_0 = \frac{\alpha a}{2}$$

在此情况下, λ_0 称为给定聚能器的临界圆频率。要使振动产生, 必须满足下述条件

$$\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\lambda^2}{a^2} < 0 \quad (10)$$

当满足条件(10)时, 式(8)可写成如下形式

$$X(x) = e^{\beta x} (D_1 \cos \gamma x + D_2 \sin \gamma x) \quad (11)$$

式中

$$\beta = \frac{\alpha}{2}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{\lambda^2}{a^2} - \frac{\alpha^2}{4}}, \quad \alpha = \frac{2}{l} \ln \frac{D}{d}$$

D_1 和 D_2 是新的常数。

因为指数形聚能器的两端是自由的, 故在满足边界条件

$$\left(\frac{dX}{dx} \right)_{x=0} = 0, \quad \left(\frac{dX}{dx} \right)_{x=l} = 0$$

的情况下, 可得到一联次代数方程组如下

$$(\beta \cos \gamma l - \gamma \sin \gamma l) D_1 + (\beta \sin \gamma l + \gamma \cos \gamma l) D_2 = 0$$

$$\beta D_1 + \gamma D_2 = 0$$

由此可容易地得到频率方程式

$$\sin \gamma l = 0$$

并可得出杆的共振长度

$$l = \frac{na}{f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{2\pi n} \right)^2} \quad (12)$$

式中 n 为波导杆所包含的波数;

$n=0.5$ 为半波导杆;

$n=1.0$ 为双半波导杆, 依此类推;

$N = \frac{D}{d}$ 为聚能器的振幅放大系数;

f (赫) 为在时间函数 $T(t)$ 中的振动频率。

对第 n 种振动波形, 可通过使纵向位移式(11)等于零, 而容易地求出节点的位置

$$\operatorname{tg} \gamma x = \frac{\gamma}{\beta} \quad (13)$$

或

$$x_0^{(n)} = \frac{l}{n\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\pi n}{\alpha l}, \quad n=1, 2, 3, \dots$$

其次, 求应力 (同时也是形变) 最大处的坐标值 $x_1^{(n)}$ 。如此解如下方程式

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = 0$$

得到

$$\operatorname{tg} \gamma x = -\frac{\gamma}{\beta} \quad (14)$$

或

$$x_1^{(n)} = \frac{l}{n\pi} \operatorname{arctg} \left(-\frac{2\pi n}{\alpha l} \right), \quad n=1, 2, 3, \dots$$

方程式(13)和(14)的图解示于图 3。从此图可直接看出, 应力最大点的位置系在振动节点之下。在节点处产生的力最大。

现在转而研究杆状振荡器 I 和指数形波导杆 II (图 4) 的联合运用。

在上述基础上, 由第 I (X_1) 和第 II (X_2) 部分的振动波形方程式得出下列两表达式