

爆炸焊接法

BAO ZHA HAN JIE FA

[英] B. 克劳思兰等 建谟译



中国建筑工业出版社

爆炸焊接法

(英) B.克劳思兰等

建 谟 译

中国建筑工业出版社

本书介绍了爆炸焊接法的几项研究成果与实际应用，其中包括大面积钢板复合法、管接头覆盖法、导管对管板的焊接法及热交换器导管塞焊法等。书中详细阐述了爆炸焊接的机理与焊接参数，扼要说明了各项应用的工艺要点，并与熔焊法对比做了技术经济分析。最后一章介绍了爆炸焊接法扩大应用的初步成果。

EXPLOSIVE WELDING
B. Crossland & others
THE WELDING INSTITUTE 1976
Abington Holl Abington Cambridge CBI 6AL

* * *

爆炸焊接法

建 谟 译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：3¹/₄ 字数：73千字

1979年10月第一版 1979年10月第一次印刷

印数：1—14,420册 定价：0.28元

统一书号：15040·3690

序 言

爆炸焊接法是在1944年开始被人们当作科学奇闻而受到重视，但是，直到1956年，人们才意识到它的潜在实用价值。爆炸焊接法现在仍然是一种不大出名的加工方法，因而应用的范围也很有限。然而，目前的情况已逐渐明朗，因为有几项应用已表明爆炸焊接法在技术方面和经济方面有很多优点。现在已明确肯定的用途有大型钢板复合法、管接头覆盖法、导管对管板焊接法，以及热交换器塞焊法等；其它即将达到应用程度的有管道与管道的焊接法、管道间使用卡圈的焊接法，等等。

在大型钢板复合技术方面，厚度达15~25毫米的钢板可以复合成厚得多钢板，面积一般可达数十平方米。通常用的复合材料有铜与软钢、不锈钢与软钢、镍铜合金与软钢、钛与软钢，等等；一些较难复合的材料，如马拉勃（maraging）钢（马氏体时效钢，含镍18~25%——译注）与软钢、高强度钢与软钢等，虽然也能构成，但迄今还未加以利用。关于导管对管板的焊接法，直径达50~75毫米和壁厚为2.3毫米的导管已经焊接成功；对管孔圈容许的最低厚度虽有一定限制，但可以用毗连管孔的膨胀法予以克服。在导管对管板的爆炸焊接技术方面，已经用于许多种材料的连接，如供低温热交换器用的铝与铝的焊接、钛与不锈钢连接等。热交换器，特别是用于核动力厂的热交换器，英国已广泛采用爆炸塞焊法，它比其它方法有更多的优点。

管道与管道用爆炸焊接的可能性，虽十五年前在英国就

已证明，但是实际应用只是在近一两年才开展起来。直径达 820 毫米的管道已经用爆炸法焊接成功，并且已能在水下构成完好的焊接头。在水深达 120 米的爆炸焊接作业的研究工作，现正在进行中。

爆炸焊接的工艺技术水平，英国与世界其它工业国家是并驾齐驱的，而且在利用爆炸技术方面，特别是导管对管板的焊接技术和塞焊技术，英国工业界也是走在前面的。本书介绍了焊接研究所于 1975 年举办的全英爆炸焊接法讨论会的研究活动的成果。由于它收入了从事于爆炸焊接研究工作的主要团体的一些著作，因而对爆炸焊接法目前的技术发展动向提供了有参考价值的综合报道。

目 录

序 言

第一章	爆炸焊接的机理和焊接参数·····	1
第二章	爆炸复合法——技术问题的解决办法·····	7
第三章	爆炸复合法——适用的产品、性能和应用·····	14
第四章	导管与管板爆炸焊接接合处影响管孔圈厚度收缩率的因素·····	22
第五章	卡圈与导管的爆炸焊接法·····	39
第六章	热交换器的爆炸塞焊法·····	44
第七章	热交换器的现场爆炸塞焊法·····	53
第八章	爆炸塞焊法及促进其实用性的因素·····	61
第九章	管道对管道的爆炸焊接法·····	68
第十章	爆炸焊接法的各种应用·····	89

第一章 爆炸焊接的机理和焊接参数

前 言

爆炸焊接法，虽然早在1944年卡尔（Carl）就已经指出它是科技方面的一件新奇事，可是，直到1956年，美国人皮尔森（Pearson）才首先确认它的潜在功用。随后，菲利普乔克（Philipchuk）在1957年进一步肯定了它是工业上可能利用的一种工艺方法。

现在人们虽意识到爆炸焊接法作为一种工业用加工方法是有局限的，但是同时也已鉴别到有几种加工方法是可以利用的，并且是有商业化前途的，例如，不同金属大型板材复合法、导管对管板的焊接法、热交换器塞焊法、导线焊接法，以及导管对导管焊接法。

机 理

虽然在过去十年间人们对爆炸焊接的机理已进行过大量探讨，但是，在十五年前初次提出的简单工艺模型仍然是对这种加工法适当见解的具体表现。图1a表示炸药发爆前基本的和最全面的结构；图1b则表示以 V_D 的速度传布的爆炸波波面到达B和击中点已到达S的方位。传到悬置板材的速度矢量 V_P 视炸药装用量，也就是炸药质量与悬置板材和缓冲层质量的比率，以及所用特定炸药的性能来确定。 V_P 的准确方向不容易预先测定，因而必须做一些假定，但是这种假定对于分析工作不会有太大影响。假定悬置板材如图1b

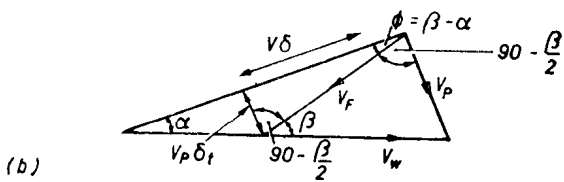
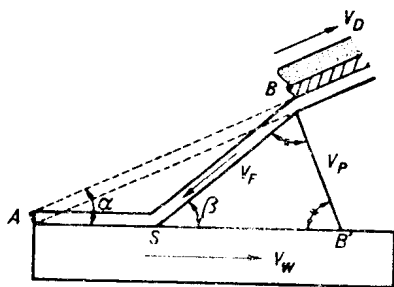
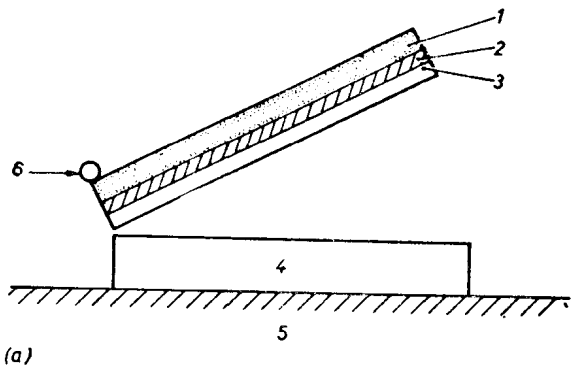


图 1 倾斜放置爆炸焊接法

1—炸药；2—缓冲层；3—悬置板材；4—基体板材；
5—台座；6—发爆器

所示那样稍加延伸，于是形成 $AS+SB>AB$ ，但是延伸后，则 $SB=SB'$ 。从这个假定出发就可以列出下式：

$$\frac{V_p}{\sin(\beta-\alpha)} = \frac{V_D}{\cos\beta/2} \quad (1)$$

所以由于已知 V_p 、 V_D 和 α 的数值，就可能计算出 β 值。

在 B 点处所产生的压力很大，由于材料的抗剪强度比较小，因而金属就呈现如低粘度流体的状态。从图 1b 中的速度流线上可以表示出与 S 、 V_F 有关的悬置板材的速度如下：

$$V_F = V_w = \frac{V_r/2}{\sin\beta/2} \quad (2)$$

式中的 V_w 是焊料的扩散速度。对一个随着 S 点移动的观测者来说，这种方法就简化如图 2a 所示那样。根据能量守恒的定理，可以如图 2b 所示那样把悬置板材分别用一个涌出喷射流和一个再入喷射流来表示，于是：

$$m_s = \frac{m}{2} (1 + \cos\beta) \quad (3)$$

$$m_r = \frac{m}{2} (1 - \cos\beta) \quad (4)$$

式中的 m 是指悬置板材的质量， m_r 是质量偏转成为再入喷射流， m_s 则是质量偏转成为涌出喷射流。

这是一种超简化方法，因为事实上，在 S 点有一种高制动压力，如图 3 所示，从基体板材和悬置板材的表面推动着物质。因此，喷射流控制着悬置板材和基体板材的污染面，把污染面完全清净后就露出洁净表面。在高制动压力下，这两种板材的表面就彼此牢固地粘结起来。另外，还有一种更为简化的方法，是用亚音速流进行处理。如喷射流是超音速的，即，如果 V_F 或 V_w 超过悬置板材和基体板材中各自的音

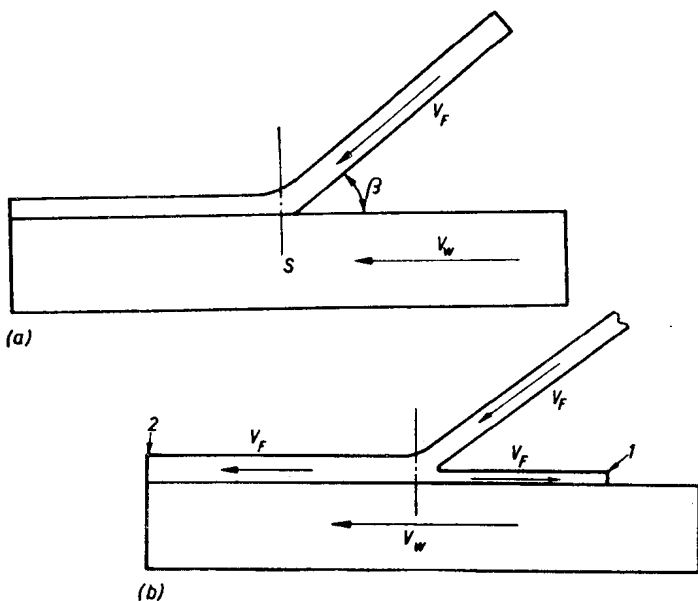


图 2 再入喷射流的形成

1—再入喷射流；2—涌出喷射流

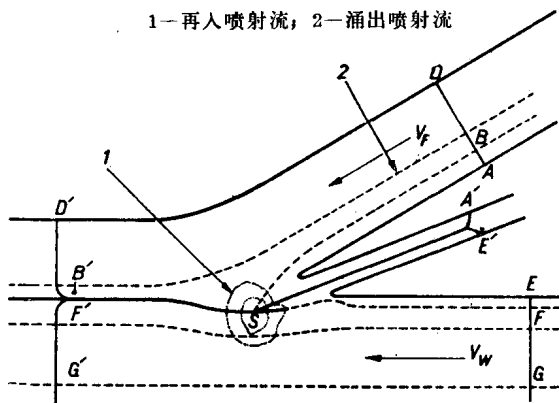


图 3 在悬置板材表面和基体板材表面形成的再入喷射流

1—等压线；2—流线

速，则问题是难以分析的。即使在超音速情况下喷射流仍可能发生，但是，实验工作证明不可能达到完好的焊接。最后的一个问题是，虽然在板材之间的接触面整洁时能完成牢固的焊接，但是，在多数情况下常发现有波纹出现在焊缝接触面中。波纹发生的机理是研究工作的一个侧面，但其重要性则是学术价值大于实用价值。

焊 接 参 数

为了求得爆炸焊接法中符合要求的参数，人们曾经进行大量研究工作，而且现有的文献中所大量介绍的‘爆炸焊接资料’也论述了可以完成焊接的界限。然而，资料中所规定的参数尚未有充分的论据，还需要通过几年的实践才可以使人完全理解。此外，在这些资料所介绍的范围内，还有爆炸焊缝是否在各方面都是符合要求的问题，以及什么样的焊缝才算是合格的。例如，焊缝的强度是用剪力来测试，或用弯曲试验、查路梅尔氏（Chalmers）试验来测定，还是用通过焊缝接触面的冲击试验，或者甚至用钻孔试验来测定，等等，都需待解决。

虽然焊接参数尚未完全和令人满意地确定，但还是可以用来考虑现有的尚不明确的基本设想，因为，即使在最后分析中还需对这些参数进行核实，现已掌握的焊接参数仍然可供作一种有用的物理见解。

(a) 速度必须保持在亚音速范围内，或

$$\frac{V_W}{V_{SP}} = \frac{V_F}{V_{SF}} < 1$$

式中的 V_{SP} 是在基体板材中的音速， V_{SF} 则是在悬置板材中的音速。

(b) 倾斜的动力角 (β) 应处于高界限和低界限的范围内。这个高、低界限可能随着材料的性质和表面状态的不同而改变,但其典型标准为 $5^\circ < \beta < 25^\circ$ 。如超过这个限度,则无论 V_p 是何数值也不能完成焊接。根据重量损失的数据,显然再入喷射流的最大体积出现在这两种限度之间。最大的重量损失或许是表明进行焊接的最好条件,因为在这种情况下,可以得到最高度的表面净化作用。

(c) 必须得到最小的 V_p 值,以完成合格的焊接。这可能与为产生类流体状态所需要的某种接触压力的临界值有关。

(d) 高于最小冲击速度值时,要取得良好焊接的条件就与动能值有关系,即 V_p 为最小值之外,还要求动能为最小值。这与为净化金属表面所要求的喷射流最小厚度是有间接关系的。另外,还有一个最大动能值,如高于此值时,焊缝就要变坏,其原因可能是由于过度的熔化作用会产生有害的金属间化合物。在理想的情况下,金属接触面间没有可见的熔化迹象,因为所形成的是固态焊缝。

(e) 通常采用的平行排列焊接法中,悬置板材与基体板材之间的间隙,在使用较高爆炸速度的炸药,如 Trinitite (苦味酸和硝基苯炸药, V_D 在 3000~4000 米/秒范围内) 时,应超过悬置板材厚度的一半;使用硝酸铵/柴油炸药 (V_D 在 1500~2500 米/秒范围内) 时,则应为悬置板材厚度的 1~2 倍。

第二章 爆炸复合法——技术问题的解决办法

前 言

用爆炸方法把一种金属板材与另一种金属板材复合起来比其它复合方法有许多优点的事实，显然早已为人们所承认；而这种方法有其局限性也是人们已注意到的。它的优点是能制成的板材面积比滚轧复合法所能制成的要大得多，而且也能制成用滚轧复合法不可能轧制的复合材料的成品。由于所用炸药的差别，因而所制的复合材料的厚度也受到一定限制，而且最重要的问题是必须选择一个适当的地点，以便把大量炸药在露天处或在地下室内引爆。

爆炸复合法在工业上已被广泛采用，特别是那些用其它方法难于制造或不能制造的大型板材和金属结合体等方面。由于采用这种工艺方法的西方厂商都是单干的公司，而东方集团国家又限制发表有实用价值的情报，因此，关于大型复合厚板材的实用资料一向很少发表。

在工业上，迄今采用大型板材复合法制成的结合体有黄铜与软钢、不锈钢与软钢、镍铜合金与软钢等，铝与软钢和钛与软钢也有小规模的应用。自然，其它结合材料也能制成，但是，由于商业上的需要量较少，不能促其广泛利用，例如，铅与软钢、高强度钢与软钢、马氏体时效钢与软钢、马氏体时效钢与装甲钢板、装甲铝板与铝、铝与软钢和高强度钢，等等。

焊 接 参 数

关于焊接参数，第一章已做过论述。这些参数说明如下的结论：如图4所示的平行配置法是可行的，但必须达到某些条件的要求。如采用平行配置法，则要求：

$$V_F = V_W = V_D$$

以满足下列条件：

$$\frac{V_W}{V_{SP}} \text{ 与 } \frac{V_F}{V_{SF}} < 1$$

V_D 必须等于或小于 V_{SP} 和 V_{SF} 。

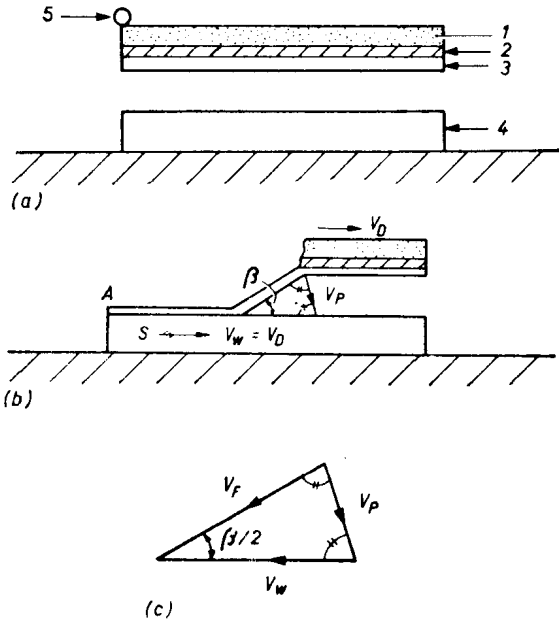


图 4 爆炸焊接的平行配置法

1—炸药；2—缓冲层；3—悬置板材；4—基板板材；5—起爆器

如使用厚的悬置板材，为了满足低于动能的上限要求，需要一个低 V_P 值，但是 V_P 也必须大于最低值，以产生类流体状态。如 V_P 小时，为了达到 β ($\beta \approx V_P/V_D$)的最低值，必须有一个低 V_D 值。

下面介绍两种便于炸药制造业以外的人采用并适于复合法使用的炸药：

(a) 诺贝尔 (Nobel) 炸药有限公司制造的三硝基甲苯 (Trimonitel) 炸药是一种硝酸铵、TNT和粉化铵的混合剂，它的 V_D 值可随着装药量厚度的不同在2~3.8公里/秒范围内变化。

(b) 含有6~12%柴油的硝酸铵和柴油混合剂是一种既方便又安全的自制炸药，它的 V_D 值可随装药量的厚度而不同，在1.5~2.3公里/秒范围内变化。

实际使用的配置法

大型板材爆炸复合法应解决的主要问题，正如图5中所示的那样，即板材在爆炸加载情况下，如何防止其边缘的不均匀移动。在板材倾斜式悬置时（这是不可避免的），如板间的间隙太大，边缘的不均匀移动会影响工艺过程，并引起所谓‘抖动’作用。这样会产生过高的 β 值，从而造成过多的接触面间波，并伴随着熔化作用，致使两个板材分离，而且常出现悬置板材断裂情况。因此，可以做如下的判断：大型厚悬置板材的焊接，最好采用平行配置法，其间隙应保持在足以使悬置板材达到终端速度一致的最小限度。另外还有一种有利措施，是把悬置板材延伸到基体板材边缘之外，即所谓“超覆盖”，这样，爆炸剂即扩散到悬置板材边缘之外，以减弱不均匀边缘效应的影响。

关于大型板材的另一个问题，是要在尽可能短的距离内

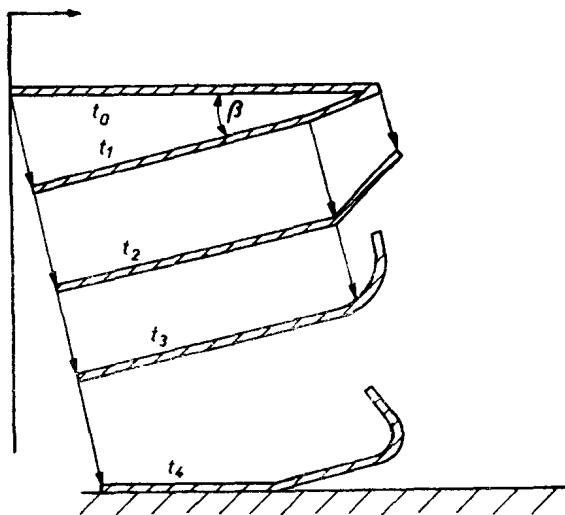


图 5 悬置板材边缘的不均匀移动造成的边缘损坏的发展情况

完成炸药的稳定起爆。即使是用一个8号雷管就容易引爆的三硝基甲苯 (Trimonitel) 炸药, 在爆炸波已冲进相当距离前, 也未必能达到稳定状态, 因而在这一区域内, 不是焊接不上, 就是焊接得质量差。而使用硝酸铵与柴油混合剂炸药时, 8号雷管是适于引爆的。因此, 在使用这两种炸药时, 必须加上一种高爆炸速度的强化炸药, 例如, 塑料炸药或偏铬酸片式强化炸药 (Metabel) ①。

如果对爆炸焊接参数仔细进行研究, 就能断定对厚度超过2毫米的悬置板材使用硝酸铵与柴油混合剂炸药较为适宜, 以便超过 β 的下限。用这种炸药可以把厚达20毫米的不锈钢

① Metabel——一种高爆炸速度炸药。——译注

悬置板材焊接到软钢板材上，甚至还可以把更厚的铝板材复合焊接到软钢板上。对于板厚小于2毫米的悬置板材，就要使用有较高爆炸速度的炸药，如三硝基甲苯 (Trimonitel)，以使 β 低于其上限。

如悬置板材的厚度适宜，不致在支起其边缘时因板的自重加上炸药重量使板材过度挠曲，则可以采用图6所示的配置方法。采用这种方法时，须把顶端部分用厚钢条固定到悬

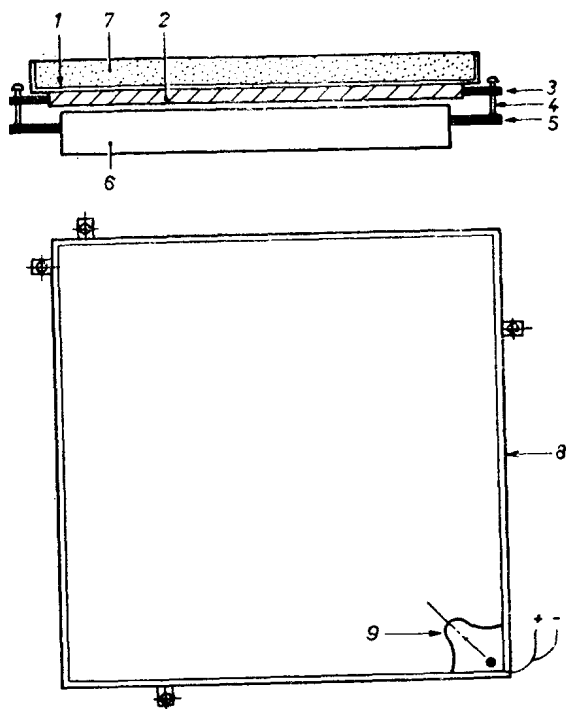


图 6 大面积悬置厚板材进行复合焊接的配置法

- 1—缓冲层；2—悬置板材；3—悬置板材的四个突缘；4—螺钉；5—
基体板材的四个突缘；6—基体板材；7—炸药；8—顶端部分安全框；
9—偏铬酸片式强化炸药