

溶接全書編集委員会

顧問 木原 博 (日本溶接協会会長)
手塚、敬三 (日本ウェルディング・ロッド)
委員長 稲垣 道夫 (金属材料技術研究所)
委員 飯田 國廣 (東京大学)
應和 俊雄 (神戸製鋼所)
尾上 久浩 (三菱重工業)
栗山 良員 (石川島播磨重工業)
佐藤 邦彦 (大阪大学)
鈴木 春義 (新日本製鉄)
妹島 五彦 (日立製作所)
田村 博 (東京工業大学)
寺井 精英 (川崎重工業)
中西 実 (田中製作所)
(五十音順)

発刊に当たって

溶接全書編集委員会

溶接は局部的にエネルギーを与えて材料を接合し一体化する技術で、ほとんどあらゆる構造物や製品の組立て技術として重要な役割を果たしている。また材料の製造や肉盛、成形あるいは補修にも活用されている。近年、人間・社会・資源エネルギー・経済・産業のニーズに対応して、溶接技術が著しく進歩し、材料の開発とともに溶接法の自動化が進み、さらに人間性を考慮し、安全性を確保するための溶接技術のシステム化が追究されている。

日本溶接協会では戦後の溶接技術の啓蒙普及の一環として「溶接叢書」全20巻を(株)産報の協力のもとに刊行し、溶接界における各分野の技術向上に貢献してきた。この間新技術の動向と相まって、度々改訂を行い補完を期してきたが、刊行以来約20年を経過して内容も古くなり、時代に即応しない部分も多く見られるようになった。そこで溶接に関する最も権威ある技術宝典として、時代の要請にこたえるべく「溶接叢書」を全面的に一新することにした。シリーズ名は「溶接全書」とし、当協会に特別な編集委員会を設置構成して再出版を期し、出版社は産報出版(株)とし刊行の運びとなった。

編集委員会では「溶接全書」出版の基本方針、書名、執筆者、目次内容などにつき十分検討した。その結果出版の基本方針としては、溶接に関する最も権威ある内容とするため、国内外の各分野の重要事項を公平かつ明確に記述し、わが国の溶接技術者および関係者に広く正しい理解を与え、その実際の活用役に立つことをねらいとした。全書の構成および書名は、溶接技術の重要な専門分野を網らし、溶接技術の全体像を総合的かつ体系的に把握することを企図した。執筆者の選考に当たっては、溶接界の第一線で活躍されている最高権威の方々とし、これらの執筆者と目次内容について十分練り上げた。

「溶接全書」は全20巻から成り、溶接の基本として溶接工学関係の溶接金属学、溶接法の基礎、溶接変形・残留応力を取りあげ、次に溶接技術の基盤として溶接構造物の設計と基準、溶接材料、溶融溶接機器をあげ、さらに溶接法の各論として半自動・自動アーク溶接、抵抗溶接、固相溶接・ろう付、炎加工・熱切断の各巻とした。また各種材料の溶接としては、高張力鋼・低温用鋼の溶接、アルミニウムとその合金の溶接、耐熱鋼・耐熱材料の溶接、肉盛溶接・溶射を取りあげ、溶接構造物の信頼性・安全性関係では、溶接部の非破壊試験・検査、溶接継手の強度、溶接施工管理・安全衛生、溶接の生産性、溶接構造物の品質保証の各巻とした。

溶接技術の多様化に伴って、研究者・技術者の専門化と一般化が進んだが、本書は溶接の基礎から各種材料の溶接、溶接生産技術の自動化およびシステム化、溶接物の信頼性・安全性確保のための品質保証などの重要課題に対して、近年の溶接技術の革新を導入して明確な指標を与えている。

ここに、綿密に計画された「溶接全書」が最も権威ある溶接技術宝典として世に問う運びとなった。従来のものにまして溶接関係者に十分活用されることを期待するとともに、溶接技術発展の基盤になることを切望する次第である。

まえがき

本書は肉盛溶接と溶射の全貌についての現在の知識を各種機械・装置類の設計・製作に活動されている技術者およびその方面に進まれる学生諸君に提供するものである。

各種の機械・装置の部品・部材あるいは構造物の性能および寿命を支配する最も重要な因子の一つは、それらの表面の性状である。他の一つはそれらを構成する材料の力学的性質である。すなわち、使用温度における強度あるいは耐クリープ性、延性、衝撃値、疲労強度などであるが、使用環境に適応するような力学的性質をもつ材料を適切に選択して、十分な強度を有する部品・部材などが設計される。ところが、それらの表面は、高温ガス、燃焼ガス、種々の腐食性物質などにさらされ、あるいは土砂などによってひっかかれるなど苛酷な状態で用いられる。また、材料表面は機械部品の相対運動部の摩耗、成形機械部品などに見られる高温・高圧下の金属接触による損傷などを生ずる。これらの状況は諸機械・装置の高速化、大形化および高能率化などの要求によって、ますます材料表面に対してきびしくなっている。したがって、部品・部材の材料そのものの選択と材質処理によってこれに対処することが困難あるいは不可能になってくる。

このようなとき、材料の表面に高度の耐熱・断熱・耐食あるいは耐摩耗などの性質を与えることが要求される。これを簡単に解決する有力な表面処理法に肉盛溶接と溶射がある。いずれも比較的に古くから用いられている技術であるが、それぞれの方法・装置・材料および施工法の開発と改善が進んで、肉盛金属および溶射皮膜の性質は次第に向上している。

最近、特に、種々の分野において資源の節約とエネルギーの有効利用が叫ばれているが、それに応える手段として肉盛溶接と溶射の利用に対して関心が高

まっている。本書は、両者について基礎から応用までの現状を理解し、これらの技術の検討あるいは活用に利していただきたいと願って執筆したものである。

著者らの過去の体験から肉盛溶接については森垣、溶射については蓮井が執筆した。その間、内外の文献を参照させていただいた。これらの文献の著者に深甚の感謝の意を捧げるものである。

終わりに、肉盛溶接に関しては、熱心なご協力をいただいた日鐵溶接工業(株)研究所の戸倉基氏、小池弘之氏の両氏及び資料のご提供をいただいた石川島播磨重工業(株)山崎康久氏に御礼申し上げる。また、溶射に関しては、種々ご教示を賜った金属材料技術研究所北原繁氏、東京メタリコン(株)石川量太氏および貴重な資料のご提供をいただいた日本航空(株)松田政之助氏、光興業販売(株)光田卓三氏に御礼を申し上げます。

昭和53年3月

蓮 井 淳

森 垣 脩

著者しるす

目 次

第1章 序 説	(11)
第2章 肉盛溶接の概要	(17)
2.1 概 説	17
2.2 特 質	18
2.2.1 長 所	18
2.2.2 短 所	20
第3章 肉盛溶接材料	(23)
3.1 硬化肉盛溶接材料	25
3.1.1 パーライト・ソルバイト系	25
3.1.2 マルテンサイト系	27
3.1.3 高マンガンオーステナイト系	33
3.1.4 高クロム鉄系	35
3.1.5 タングステン炭化物系	36
3.1.6 ステライト系	37
3.2 耐食肉盛溶接材料	39
3.2.1 ステンレス鋼溶接材料	40
3.2.2 ニッケルおよびニッケル合金溶接材料	44
3.2.3 銅および銅合金溶接材料	46
第4章 肉盛溶接法	(47)
4.1 ガス肉盛溶接法	48
4.2 被覆アーク溶接法	50
4.3 サブマージアーク溶接法	51
4.3.1 サブマージアーク溶接法の特徴	51
4.3.2 ワイヤによるサブマージアーク溶接法	51

4.3.3 吊状電極によるサブマージアーク溶接法	52
4.4 ノンガスシールドアーク溶接法	54
4.5 炭酸ガスアーク溶接法	54
4.6 イナートガスアーク溶接法	55
4.6.1 ミグ溶接	55
4.6.2 ティグ溶接	56
4.7 その他の肉盛溶接法	56
4.7.1 エレクトロスラグ溶接法	56
4.7.2 プラズマアーク溶接法	57

第5章 肉盛溶接の基礎 (59)

5.1 母材と肉盛溶接材料	59
5.1.1 母材の種類	59
5.1.2 母材の溶接性	61
5.1.3 母材と肉盛金属のかたさ	62
5.1.4 シェフラ組織図	63
5.1.5 炭素の移動	64
5.2 溶接ふん囲気	65
5.2.1 ガス溶接法	65
5.2.2 アーク溶接法	65
5.3 溶接入熱と冷却速度	67
5.4 後熱処理	68
5.4.1 硬化肉盛溶接後の熱処理	68
5.4.2 耐食肉盛後の熱処理	70

第6章 肉盛溶接施工 (75)

6.1 溶接準備	75
6.1.1 溶接材料の乾燥	75
6.1.2 母材の清掃または機械加工	76
6.1.3 予熱	77
6.1.4 溶接用ジグ	77
6.2 溶接	78

6.2.1	ガス溶接	78
6.2.2	被覆アーク溶接	79
6.2.3	ガスシールドアーク溶接	80
6.2.4	サブマージアーク溶接	81
6.2.5	帯状電極肉盛溶接	82
6.3	後処理	83
6.3.1	後熱	83
6.3.2	応力除去処理	83
6.3.3	機械加工	85
6.3.4	溶接部の検査	85
6.4	欠陥と対策	87
6.4.1	割れ	87
6.4.2	ブローホール	88
6.4.3	アンダカット	88
6.4.4	その他の欠陥	88
第7章 肉盛金属の性質とその試験法		(91)
7.1	硬化肉盛	91
7.1.1	摩耗現象	91
7.1.2	摩耗試験	94
7.2	耐食肉盛	99
7.2.1	腐食現象	99
7.2.2	腐食試験	106
第8章 肉盛溶接の応用		(109)
8.1	建設機械	109
8.2	浚渫船	112
8.3	製鉄機械	115
8.4	車両	117
8.5	圧力容器	119
8.6	その他	124
8.6.1	バルブの肉盛溶接	124

8 目次

8.6.2 金型の肉盛溶接	124
---------------------	-----

第9章 溶射の概要 (127)

9.1 概説	127
9.2 特質	128
9.2.1 長所	128
9.2.2 短所	130

第10章 溶射材料 (131)

10.1 線材	131
10.1.1 アルミニウム	131
10.1.2 亜鉛	131
10.1.3 モリブデン	132
10.1.4 すずおよびすず合金	132
10.1.5 銅および銅合金	132
10.1.6 ニッケルおよびニッケル合金	133
10.1.7 炭素鋼および低合金鋼	134
10.1.8 ステンレス鋼	134
10.1.9 銀	134
10.2 棒材	134
10.3 粉末材	135
10.3.1 金属および合金	135
10.3.2 複合材料	136
10.3.3 自溶合金	138
10.4 セラミック	140

第11章 溶射法 (143)

11.1 ガス溶射法	143
11.2 ガス爆燃溶射法	146
11.3 アーク溶射法	147
11.4 プラズマジェット溶射法	149
11.5 線爆溶射法	152

第12章 溶射の基礎	(155)
12.1 溶射材粉末・粒子の飛行速度と温度	156
12.2 溶射粒子の衝突と皮膜の形成	161
12.3 皮膜と母材の密着と皮膜の結合	165
12.4 後熱処理	173
第13章 溶射施工	(179)
13.1 溶射準備	179
13.1.1 母材表面の清浄	179
13.1.2 母材表面の粗面化	180
13.2 溶射	182
13.3 後処理	184
13.3.1 塗料塗布法	184
13.3.2 白溶合金皮膜の溶融	185
13.4 仕上げ	187
13.4.1 炭素鋼，ステンレス鋼などの皮膜	187
13.4.2 白溶合金皮膜	187
13.4.3 セラミック皮膜	188
13.5 欠陥と対策	188
第14章 溶射皮膜の性質とその試験法	(191)
14.1 皮膜の密着強さ	191
14.1.1 引張密着強さ試験法	191
14.1.2 セン断密着強さ試験	195
14.1.3 その他の密着性試験	196
14.2 皮膜の引張強さ	197
14.3 溶射皮膜の耐摩耗性と摩擦特性	199
14.3.1 各種溶射皮膜の耐摩耗性	199
14.3.2 各種溶射皮膜の摩擦特性	202
14.4 溶射皮膜の耐熱・断熱性	204
14.4.1 溶射皮膜の耐熱性	204
14.4.2 皮膜の断熱性	208

14.5	溶射皮膜の電氣的性質	210
14.6	溶射皮膜の耐食性	212

第15章 溶射の応用 (219)

15.1	ジェットエンジンのノズル	221
15.2	航空機エンジン部品	223
15.3	オートバイのエンジン	228
15.4	自動車の同期用歯車	230
15.5	水 車	230
15.6	ポンプ部品	233
15.6.1	水中ポンプのスリーブ	233
15.6.2	高揚程ポンプのシール部	233
15.6.3	油圧ポンプの油分配板	233
15.6.4	耐酸ポンプのスリーブ	234
15.7	ゲージ	234
15.8	高融点金属押出加工用ダイス	235
15.9	金属成形用のパンチ，圧延用案内ロールなど	235
15.10	コンピュータの記録ヘッド	236
15.11	オゾン製造用電極	237
15.12	調理用器具	237
15.13	義 歯	238
15.14	鉄鋼構造物	239
15.15	溶射成形	240

引用参考文献	243
--------------	-----

索 引	251
-----------	-----

(製版：白土健康)

第1章 序 説

各種の機械・装置の部材および部品には、ほとんどの場合、全面的にあるいは部分的に耐摩耗性、耐熱性、断熱性、耐食性などが要求される。部材あるいは部品の強度については比較的容易に所期の性質をもつ材料の選定ができる。逆にいえば、現在の材料の強度を前提に、諸機械・装置は計画され、設計が進められているといえよう。

しかし、それらを運転し、維持するに当たって、当然のこととして、次にはその性能と部材・部品の寿命および安全などの問題が生ずる。その場合、その性能と寿命を決する要因の一つは、それらを構成する材料の表面の性質である。

すなわち、構築物の風雨への曝露、船舶における海水との接触、化学機械において貯蔵あるいは流動する各種薬品・ガスなどによる腐食、各種部品に対する各種流体や燃焼ガスによるエロージョン、土木・建設機械部品にみられる土砂による摩耗、機械の相對運動部の摩耗、製鉄機械などにみられる高温高圧下の金属接触による損傷など、諸機械装置の寿命を支配する因子は無数である。しかも、これら環境は諸機械設備の大形化、高速化および高能率化に伴って、ますます苛酷になってきた。これに対して、機械・装置が置かれる環境下で、その構成部材あるいは部品の機能がより長く維持されるよう構成材料の表面に高度の耐食性、耐摩耗性、耐熱性、断熱性あるいは電気絶縁性などを有する層あるいは被覆を形成して使用環境に対処している。

材料表面の処理によって製品の耐用時間が増加すれば、資源の節約という重大な利益を生ずる。また、材料表面の性質改善によって、より高性能の諸機械・装置の設計、製作を可能とする結果、エネルギー消費の低減、各種工業における生産向上が促進されることにもなる。材料の表面処理法には多くの方法があるが、現在用いられている主なものを表1.1のように分類できる。^{1)~4)}

表1.1 各種の表面処理法

化学的処理 (電気化学的処理を含む)		
方 法	方法の説明	適 用
電気めっき法 (electro-plating)	金属塩の水溶液中にめっきしようとする金属板を陽極とし、金属製品を陰極として直流電流を流して製品表面に金属の膜を電解析出させる被覆法	ニッケルめっき：耐食性がすぐれ、強じんで衝撃にも耐える。かたさ $H_v 140 \sim 240$ で装飾用または機械部品の補修に利用する。 クロムめっき：軟質めっきと硬質めっきがある。前者は耐食性が良好で装飾に用いる。後者は硬く ($H_v 800 \sim 1,100$) 耐摩耗性がすぐれている。各種機械器具部品の耐摩耗性向上、摩耗部の補修、樹脂あるいは金属の成形用型の表面処理などに用いる。
化学めっき法 (chemical plating)	外部から電気エネルギーを供給せずに、金属塩水溶液中の金属イオンを金属製品表面上に析出させる被覆法	処理時間は数秒から数分程度で黄銅、カドミウム、銅、金、ニッケル、すずなどのめっきを行うことができる。
化成処理法 (chemical conversion treatment)	適当な溶液中に金属製品を浸漬させ、通常 200°C 以下で製品表面にりん酸塩、しゅう酸塩、酸化物などの皮膜を化学的に形成させる被覆法	アルミニウム、銅、マグネシウム、鉄鋼などの防食、装飾あるいは塗装の下地処理に用いる。たとえば、鉄鋼の場合高張力ボルト、自動車部品、携帯兵器類の防食に用いられている。
陽極酸化被覆法 (anodizing)	適当な電解液中で、金属製品を陽極として電解すると陽極上に発生機状態の酸素を生じ、この酸素が金属表面を酸化して強い皮膜を形成させる被覆法	アルミニウム、ジルコニウムなどに用いられ、特にアルミニウムの陽極酸化皮膜は γ アルミナからなり硬質である。耐摩耗用として用いる。
物理的処理		
方 法	方法の説明	適 用
溶融めっき法 (hot dipping)	金属の溶融浴中に金属製品を浸漬して、その表面に被覆層をつくる被覆法	溶融アルミめっき： 680°C 以上のアルミニウム浴に鉄を浸漬する。鉄表面とアルミニウムを反応させ、Fe-Al 合金層 (厚さ 0.1mm 程度) を形成する方法、耐高温酸化性、耐食性にすぐれている。 溶融亜鉛めっき： 450°C 程度の亜鉛浴中に鉄を浸漬する。めっき層は

溶融めっき法		純亜鉛層と、数層の硬くてもろい Fe-Zn 合金層からなる。
金属浸透めっき (拡散めっき) (cementating)	浸透させたい金属または合金の粉末を主成分とする、浸透剤あるいは金属または金属化合物のガスを用い、加熱によって製品表面に金属あるいは合金の拡散層をつくる被覆法	アルミニウム浸透めっき：アルミニウム粉末に少量の塩化アンモニウムを加えた混合物とともに、製品を回転炉中に入れ、所要温度 (850～1,000℃) で加熱を続ける。表面には Fe-Al 合金層が生成され、耐高温酸化性、耐食性にすぐれた層ができる。 クロム浸透めっき：フェロクロム、よう化アンモニウム、カオリン粉末などの混合物とともに、製品を密封炉中に入れ、炭素 0.3% 以下の炭素鋼の場合には 950～1,100℃、高炭素鋼の場合には 800～950℃ に加熱保持する。前者は耐食性を、後者は表面硬化を目的とするときに有用である。
浸硫法 (sulphurizing)	中性塩、炭酸塩、還元性塩などの無機物に硫黄化合物を添加して、処理温度 (600℃以下) で遊離硫黄を分解させて鉄鋼表面層に硫黄を拡散させ、硫化物層を生成させる方法	浸硫層により凝着を防止し、耐摩耗性を向上させる。
浸炭法 (carburizing)	低炭素鋼または合金鋼製品を一酸化炭素あるいはメタンのような炭素を含む還元性ガス中とか、木炭、炭酸ソーダ、炭酸バリウム、炭酸カルシウムなどの混合物中とか、あるいはシアン化ナトリウムを基剤とした浸炭性塩浴中で加熱 (800～950℃) して炭素を製品表面に浸入拡散させる方法	表面硬化に用いる。通常の処理層では H _v 700～850 程度のかたさとなる。浸炭法は浸炭剤によってガス浸炭、固体浸炭、液体浸炭に分類される。浸炭法は自動車部品など多くの機械部品・工具に使用される。
窒化法 (nitriding)	Al, Cr, Mo などを含む鋼製品をアンモニアガス中で加熱 (475～580℃) し、その表面に窒化物の硬化層をつくる方法	表面層の耐摩耗性、耐食性、耐疲労性などを向上させる。通常 H _v 500～1,200 程度の硬化層が得られる。窒化法にはガス窒化、塩浴窒化がある。ギヤ、歯車など多くの機械部品に使

窒 化 法		用される。
浸炭窒化法 (carbo-nitriding)	炭素鋼製品を、たとえば、浸炭に用いるガス中に数%のアンモニアガスを加えたふん閉気中で、加熱 (750 ~ 900℃) 一焼入処理して、その表面を浸炭と同時に窒化して硬化する方法	製品表面の耐摩耗性、耐食性を向上させる。
火炎焼入法 (flame hardening)	加熱源としてアセチレンガス、プロパンガスあるいは都市ガスなどと酸素との混合ガスの燃焼熱を用いて、鉄鋼製品の表面層だけを急速に加熱し、続いて焼入れして硬化層をつくる方法	表面硬化により耐摩耗性を向上させる。
高周波表面焼入法 (induction hardening)	鉄鋼製品を加熱用高周波コイルの中に入れ、高周波電流の表皮効果と近接効果によって加熱された表面層のみを焼入硬化させる方法	表面硬化により耐摩耗性を向上させる。
真空めっき法 (真空蒸着法) (vacuum evaporation)	金属あるいは化合物を、13.3~1.3 mP. の高真空中で加熱蒸発させ、蒸発した原子または分子を製品表面に当てて、その表面に金属あるいは化合物の薄膜をつくる方法	製品表面の金属光沢の改善、光学的性質の向上に用いられる。
ほうろう (enameling)	金属製品の表面にガラス質のゆう薬を焼付ける方法	製品表面に耐食性、耐熱性、耐摩耗性、電気絶縁性、装飾を与える。
放電硬化法 (electro arc hardening)	電極と鉄鋼製品とをコンデンサに接続し、コンデンサは抵抗を通して直流電源に接続する。電極を振動器によって電磁的に振動させ断続的に製品との間で超高温のスパークを生じさせる。これによって電極物質を製品表面に移行拡散させ硬化層をつくる方法	表面硬化により耐摩耗性を向上させる。 工貝、金型などに利用される。
肉盛溶接法 (hard facing)	酸素-アセチレンガス炎、アークあるいはプラズマなどを加熱源として肉盛材料を製品表面に溶着させ、一様な被覆層をつくる被覆法	ある肉厚の被覆層を製品表面に溶着させることにより、耐摩耗性、耐食性、耐熱性を製品に付与する。

機械的処理		
方 法	方法の説明	適 用
合 板 (cladding)	2 種以上の金属を層状に全面積にわたって接着させた板。圧延圧接法、爆圧接法、鋳込法などによる。	接着させる金属としてはステンレス鋼、ニッケル、モネル、銅、ハステロイ、チタンなどがあり、耐食に用いる。
ショットピーニング (shot peening)	金属小粒子を金属製品表面に高速度で吹付けて、表面の薄層を加工硬化させる方法	組織上の変化は伴わず、硬化の深さは0.3～0.5mm程度である。製品の耐疲労性が増加される。
溶 射 (metallizing, spraying)	燃焼あるいは電気的エネルギーを用いて、熔融あるいはそれに近い状態にまで加熱した溶射材料粒子を製品表面に吹付けて積層する被覆法	耐摩耗、耐食、耐熱あるいは補修などに用いる。 あらゆる材質の製品に対して、金属、合金または化合物など種々の種類の材料が溶射できる。

