

Q-44

マグネシウム合金は溶接できるのでしょうか。また、溶接可能ならばどのような点に気をつければよいのでしょうか。また溶接以外の接合方法はどのようにでしょうか。さらに最近話題となっています難燃性マグネシウムの溶接性や、アルミニウムとの異種金属接合性についても教えてください。

A-44

マグネシウムの溶接・接合性、難燃性マグネシウムの溶接・接合性、そしてアルミニウムとの異種金属接合性の三つに分けて回答いたします。

1) マグネシウムの溶接・接合性

マグネシウム合金の種類により溶接性は異なります。すなわち、一般的な合金元素であるAlおよびZnを添加したAZ系のAZ31, AZ61の展伸材はAZ91等の鋳造材に比較して溶接は容易です。溶接方法はアルミニウム合金に対して適用されている方法ならばマグネシウム合金にも適用できます。しかし、その溶接施工にはアルミニウム合金に対してよりも数段注意が必要です。

マグネシウムの溶接上の問題点としては次のことが挙げられます。融点は650℃、ならびに熔融潜熱は368 kJ/kgであり、アルミニウムとほとんど差異はないが、比熱は $1.78 \text{ Jcm}^{-3}\text{K}^{-1}$ (20-100℃) とアルミニウムの約70%と小さいために溶接時の入熱を低く抑えなければなりません。活性な金属のために表面に酸化皮膜(MgO)を作りやすく、この酸化皮膜の融点は2500℃と高く、耐熱性があり溶滴と母材の溶着をさまたげることがアルミニウムとよく似ています。熱伝導率は $154 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (20℃) と高いもののアルミニウムの約66%で、熱膨張係数も $26.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (20-100℃) とほぼアルミニウム並みに大きいことから、溶接ひずみが大きく溶接割れが発生しやすいです。このため良好な溶接部を得るためには、溶接前に母材の清浄、溶接時に高温部の空気との遮断、入熱の制御、および変形防止のための拘束治具が必要です。

純マグネシウムの熔融金属の表面張力 (559 mNm^{-1}) が小さいために溶落ちを起しやすいので裏波が必要な溶融溶接では、適切な溶接条件、裏当方法および開先形状の選定が重要となります。特に直流ティグ溶接ではクリーニング効果を作用させるために電極をプラスにしますが、溶込み深さが減少します。

マグネシウムは発火しやすいと言われますが、極端に過大な入熱を加えない限り溶接時に発火することはほとんどありません。しかし、溶接ビード部をグラインダなどで研削し粉じんが溜まると、いわゆる粉じん爆発を起こすことがありますので、速やかに清掃整理しておくことが肝要です。また、摩擦圧接では回転数を極端に低速にした場

合に、発火することもあります。実用的な圧接条件ではこのような現象はありません。

それでは、以下に溶接法ごとにその留意点を詳しく述べることに致します。

(1) アーク溶接

ティグ溶接法は最も一般的な溶接法です。その電源には、クリーニング効果がある交流あるいは直流電極プラスが用いられます。しかし、交流電源の方が電極の消耗が少なく、操作性が容易なため多用されています。一方、ミグ溶接は、アルミニウムの場合と同様に、クリーニング作用のある直流ワイヤプラスが用いられますが、スパッタが発生しやすい、溶着量が過大となりやすいなどの点からあまり適用されていないのが実情です。また、溶接電流にパルスを加えることによって溶融凝固部組織の微細化、継手効率の向上が図れます。

実際の溶接にあたっては次のことに注意して下さい。

- ① 母材の酸化皮膜が厚く、クリーニング作用の発生領域が溶融凝固部近傍のみです。
- ② 母材表面の酸化膜の影響でアークの陰極点が激しく移動する傾向があります。
- ③ アークによる過剰な加熱を予防するためには銅による冷やし金としての固定板が有効です。
- ④ 滑らかな裏ビードを得るためには裏当てによる冷却効果およびバックシールドガスによる酸化防止が必要です。
- ⑤ ヒュームおよびスパッタが多く、ビード周辺まで黒色のスマットが覆うので溶接部は観察がしにくいです。
- ⑥ ミグ溶接における溶加材であるワイヤの溶融量が多い、すなわち溶接電流に対して余盛が多く凸型のビードになりやすいです。
- ⑦ ティグ溶接終了後の溶加棒は、大気中にさらされると酸化されるので、アークを再スタートして溶接する場合には、溶加棒の先端をカットしてから用いるなど酸化による不具合には留意が必要です。

次に、一般的な溶加材としてはAZ61合金、AM100合金、AZ92合金、EZ33合金が使用されています。すなわち、母材と同一の溶加材あるいは同一の合金系で合金元素が多く、融点の低い材質のものが使われています。

突合せ継手の継手効率は、展伸材で80~90%、鋳造材で75%程度です。純マグネシウムおよびAZ31合金の展伸材の溶接継手では、溶接中心部に相当する最終凝固部がランダムに近い方位分布を取るため、この領域では集合組織による強度増加の恩恵を受けません。従って、健全な溶接継手でも、常温で継手効率が低下します¹⁾。

(2) レーザ溶接

マグネシウムには YAG レーザを用いた検討例が多いです。中・厚板には出力が高い連続発振が使われ、薄板およびスポット溶接には瞬間的に高強度ビームの照射が可能なパルス YAG レーザが適しています。

健全なビードの継手効率率は94%以上が得られています。熔融凝固部の組織は15 μm 程度の等軸 dendrite であり、微細な Mg_2Zn_3 化合物が dendrite アームの間に分散しています。さらに、融合界面から粒状晶がエピタキシャルに成長しており、熱影響部は再結晶によって微細な組織を示しています²⁾。

ダイカスト材の溶接はポロシティの発生が主要な問題です。例えば、AM60 ダイカスト材を YAG レーザ溶接した場合、母材中既に存在するガス巻き込み分が合体、膨張して熔融凝固部に大きなポロシティができます。このポロシティは入熱が増加するにつれて多くなり、溶接後の再溶融によって減らすことができます³⁾。

(3) 抵抗溶接

マグネシウム合金はアルミニウム合金に比べて電気抵抗が大きく、熱伝導率は小さいので、抵抗溶接性は優れています。しかし、マグネシウム合金は高温で銅と合金を作るので、銅または銅合金の電極チップと板の間で発熱が多いと電極チップの寿命が低下します。そこで過度の発熱を避けるために、板表面の接触抵抗を低下させる目的で表面処理が行われることがあります。単相交流式はもとより、いずれの電源でも溶接可能です。溶接欠陥としてはナゲット内に割れが生ずることです。この原因は、電極加圧力によって大きく影響を受け、電極加圧力が低いと割れが生じやすいと言われています。

(4) 摩擦攪拌接合 (FSW)

母材と比較して微細な組織を示し、ツール回転速度の減少、接合速度の増加に伴い結晶粒は微細となっています。また、継手の強度は母材と同等以上ですが、伸びが低下しています⁴⁾。AZ31 および AZ61 合金 FSW 部のマイクロ組織に関して、アルミニウム合金のように熱と塑性流動の影響をともに受けた加工熱影響部が明瞭に観察されません。攪拌部には均一な等軸晶が確認でき凝固組織は観察されず、結晶粒径は母材より若干小さくなっています。これは、接合時に融点以下の温度、すなわち固相状態で激しい塑性変形を受け、再結晶が生じたことを示します⁵⁾。

AZ91D チクソモール材に FSW を適用した研究では、ツール回転速度が速くなる、もしくは接合速度が速くなりますと、十分な塑性流動が起らず溝状の接合不良や接合内部での空洞などの欠陥が発生します。接合部中心の組織は微細な再結晶組織となり、母材鑄造組織は消滅しています。また、適正な接合条件で得られた継手の引張強さおよび伸びとも母材値と同等の値が得られています⁶⁾。

(5) ろう付

マグネシウム合金をろう付する場合には浸漬ろう付が推

奨されています。また、ろう付が可能な合金系は AZ 系、ZE 系および ZK 系合金であり、ろう材としては AZ92 および AZ125 が使用されます。しかしながら、ろう付後ろう付部の洗浄を充分に行わなければなりません。ろう付は 450°C 以上で行われますから製品の機械的性質は著しく低下します⁷⁾。

2) 難燃性マグネシウム合金に関する溶接・接合について

難燃性マグネシウム合金は、AZ 系（アルミニウム、亜鉛添加）合金に数%の Ca を添加することにより、発火点を高くした合金です。ティグ溶接⁸⁾、YAG レーザ溶接⁹⁾ および摩擦攪拌接合¹⁰⁾に関する報告があります。いずれの溶接方法においても、従来のマグネシウム合金の溶接性との相違は認められていません。

熔融溶接では熱影響部の結晶粒が粗大化することですが、この現象は従来の合金系である AZ 系でも認められています。すなわち、溶接速度が遅くなる条件では入熱が過大になり高温割れが発生する危険があります⁸⁾。溶加材に関しては、数種の溶加棒を試作してティグ溶接を行った研究では、Mo を添加した溶加棒で母材の99%弱の引張強度を得ることができたとの報告があります¹¹⁾。また、最近のトピックスとして、難燃性のマグネシウム合金用溶接材料を開発したとの記事があります¹²⁾。

3) アルミニウムとマグネシウムとの異種金属接合性

アルミニウムとマグネシウムとの異種金属接合に関しては YAG レーザ溶接、摩擦攪拌接合 (FSW) による方法が試みられているようですが、いずれも接合界面に金属間化合物である $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ (β 相) が生成されます。このため、接合部は硬く、脆弱であり、継手の引張強度は低くなります。ただし、化合物層を極力薄くすることによって引張強度を向上することができるものと考えられますが、溶接性は悪いです。

なお、参考として Fig. 1 に AZ31 マグネシウム合金をティグ溶接したサッカーボールを示します。母材板厚は 4 mm プレスで成形後、手で交流電源のティグ溶接で 2 層行ったものです。

以上、マグネシウム合金の一般的な溶接接合について述べましたが、詳細は参考文献^{13)~17)}を参照ください。



Fig. 1 AZ31 マグネシウム合金製のサッカーボール (ティグ溶接)。

参 考 文 献

- 1) 金子純一ほか：日本金属学会誌, Vol. 64 (2000), 1239.
- 2) Z. H. Yu et al.: Material Science and Engineering A. May. (2009). 639.
- 3) H. Zhao et al.: Welding Journal, Aug. (2001), 204-s.
- 4) 加藤数良ほか：軽金属溶接, Vol. 42 (2004), 130.
- 5) 佐藤 裕：マグネシウム協会第一回接合分科会例会資料, 2001, 40.
- 6) 中田一博ほか：軽金属, 51 (2001), 528.
- 7) Robert S. Busk：マグネシウム製品設計, (財)軽金属協会マグネシウム委員会 (1988), 92.
- 8) たとえば, 森田ほか：鹿児島県工業技術センター, No. 20 (2006), 51.
- 9) たとえば, 有年ほか：溶接技術, Vol. 53 (2005), No. 4, 58.
- 10) たとえば, 春山ほか：軽金属学会第108回春期大会概要 (2005), 62.
- 11) 小川ほか：溶接学会全国大会講演概要集第82集 (2008), 96.
- 12) 産報特信 (2011) 1月21日号.
- 13) Dow Chemical Company Bulletin: Joining Magnesium (1990).
- 14) Dow Chemical Company Bulletin: Magnesium in Design (1963).
- 15) 中田一博：軽金属溶接, Vol. 39 (2001), No. 12, 582.
- 16) 朝比奈敏勝：軽金属, Vol. 60 (2010), No. 5, 251.
- 17) 笹部誠二：溶接学会誌, Vol. 79 (2010), No. 8, 35.
- 18) (財)溶接学会：第2版溶接・接合便覧, 丸善 (1995) .