

鑿型ミルにみる肉盛溶接による再生技術

青田 利一・福本 宏昭

2004年9月

(株)ウェルディングアロイズ・ジャパン

豎型ミルにみる肉盛溶接による再生技術

㈱ウェルディングアロイズ・ジャパン
青田 利一・福本 宏昭

1 はじめに

種々の業界で使用されている各種粉砕機器の中で、豎型ミルは各分野でもっとも幅広く使用されている効率的な粉砕装置である。この豎型ミルの粉砕面（仕事面）は一定期間の使用により摩耗し、機器の粉砕効率が低下する。このような段階で摩耗した機器の摩耗面を肉盛溶接により再生することが一般的に知られている。

本稿では、主として国内において当社が再生事業を通じて確立している技術および海外で長年にわたって精力的な展開をしているWA（Welding Alloys）グループの技術に基づいて、国内外におけるこのような豎型ミルの肉盛溶接による再生技術の現状を整理し、今後の課題を抽出する。

2 豎型ミルの構造と肉盛溶接箇所

図1に代表的な豎型ミルの構造を示す。ミル上部から供給される原料はテーブルライナ中央部に落下する。テーブルライナはミル下部に設置されている減速機により回転し、ローラはテーブルライナにより従動回転する構造になっている。テーブルライナ上の原料はテーブルライナとともに回転しながら遠心力によりテーブルライナ周辺部に移動し、ローラとテーブルライナの間で圧縮粉砕・摩擦粉砕という原理により粉砕される。テーブルライナの外周にはミル下部より熱風が連続的に供給されており、粉砕された原料はこの熱風により巻き上げられ、ミル上部のセパレータにより分級される。あるサイズ以下の微粉は次の工程に送られ、セパレータにより振り落とされたあるサイズ以上の粉砕原料はもう一度ミル内の粉砕プロセスを通じて再粉砕される。

ミル内では各所で摩耗が発生するが、もっとも摩耗が著しいのはローラとテーブルライナである。この摩耗が進行するにしたがって粉砕効率が低下する。比較的粉砕

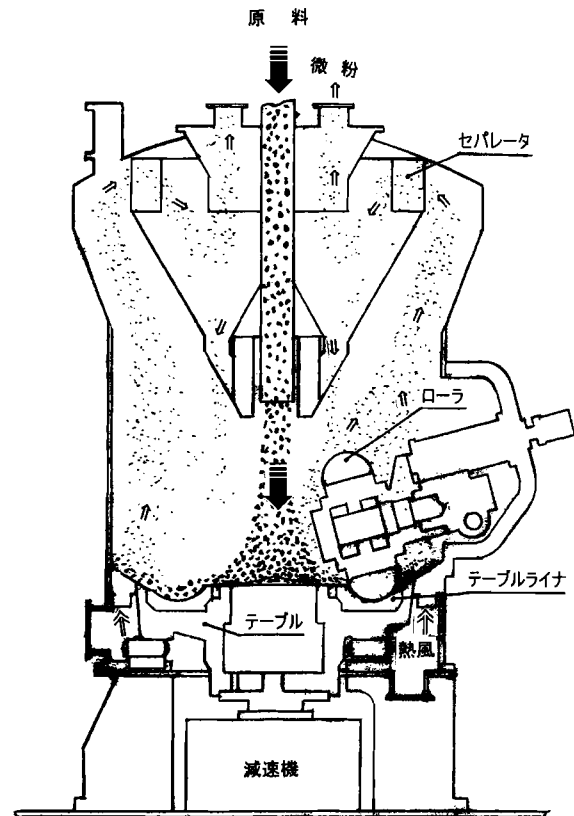


図1 代表的な豎型ミルの構造

されやすい石炭の場合は摩耗が少なく耐用年数は2~3年であるが、高炉スラグやある種のセメント原料の場合には摩耗が激しく耐用年数は数ヶ月であると言える。

摩耗したローラとテーブルライナのメンテナンス方法としては、新品と交換する方法および摩耗部分を肉盛溶接により再生する方法がある。後者は前者に比較して耐摩耗性と経済性に優れているために広く採用されている。

3 縦型ミルの特徴と肉盛溶接による再生の現状

国内外の縦型ミルの特徴と再生の現状を表1に示す。この表に示すように海外ではボールミルのボールを除くすべてのミル（ローラとテーブルライナ）の肉盛溶接による再生がなされているが、国内での再生比率は海外に比べると少ないと言える。

4 肉盛溶接に影響を及ぼす因子

表1に示した項目の中で、ローラとテーブルライナの肉盛溶接を行う上で重要な因子に分けて以下に述べる。

4.1 ローラ

(1) ローラの数量

ローラの数量は通常各ミル毎に2～4ローラである。このローラの数量はミル内で肉盛溶接を行う場合の作業空間に影響を及ぼす。

(2) ローラの支持形式

ローラは一般にテーブルライナとのクリアランスを調整できるように上下に移動可能な回転軸に取付けられている。回転軸は図1に示すようにミル外壁を貫通して外部で支持される場合とミル内で支持される場合があり、ミル内で支持される場合には図2に示すようにローラ直上の構造物に支持されるものもある。とくに図2に示したような構造物に支持される場合には作業空間が狭いためメンテナンスには時間を要し、ミル内で肉盛溶接を行う場合のローラ駆動方法について工夫を凝らす必要がある。

(3) ローラの形状

ローラの形状は、粉碎能力に大きな影響を与えるため

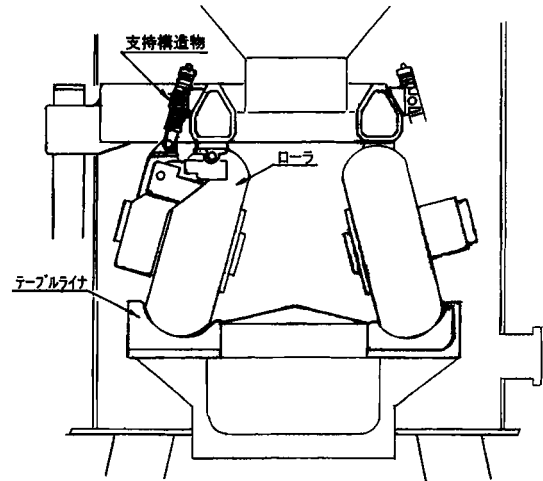


図2 ミル内部の構造物に支持されるローラの一例

に各メーカーは工夫を凝らしているが、一般に図3に示すようにタイヤ型、円錐台形型、円筒短冊型およびボール型に分類できる。このローラ形状は肉盛溶接施工における溶接姿勢に影響を及ぼす。

(4) 一体型ローラと分割型ローラ

ローラには一体型と分割型があり、一体型が多い。分割型は主に交換作業性を考慮して採用されている。なお、分割型の場合には分割部に隙間ができるために肉盛溶接施工において注意が必要である。

(5) ローラの材質

ローラの材質としては、高クロム鋳鉄、炭素鋼鋳鋼、溶接構造用鋳鋼および高マンガン鋼鋳鋼がある。それぞれの材質に適した施工法を採用する必要があるが、肉盛溶接による再生の観点より高クロム鋳鉄がもっとも適した選択である。

表1 国内外の縦型ミルの特徴と肉盛による再生の現状

ミルの型式	ローラ							テーブルライナ		主要粉砕物	再生の現状		備考
	形状	数量	支持形式	分割数	材質	反転	形状	分割数	材質		国内	海外	
OK	特殊タイヤ型	2~4	ミル外	6,8	高クロム鋳鉄	可	すり鉢型	10~12	高クロム鋳鉄	スラグ、クリンカなど	再生	再生	
CK	タイヤ型	3	ミル外	一体	高クロム鋳鉄	可	すり鉢型	9~16	高クロム鋳鉄	スラグ、クリンカなど	再生	再生	海外では鑄鋼+硬化肉盛もある。
IS	タイヤ型	3	ミル外	一体	高クロム鋳鉄	可	すり鉢型	3~8	鑄鋼+硬化肉盛、高クロム鋳鉄	スラグ、クリンカなど	再生	再生	
AVM	タイヤ型	3	ミル外	一体	高クロム鋳鉄	可	すり鉢型	10~16	高クロム鋳鉄	石炭	再生	—	輸出例が少ない。
KVM	タイヤ型	3	ミル外	一体	高クロム鋳鉄	可	すり鉢型	9~12	高クロム鋳鉄	石炭	再生	—	輸出例が少ない。
MBF	タイヤ型	3	ミル外	一体	高クロム鋳鉄	可	すり鉢型	8~12	高クロム鋳鉄	石炭	再生	再生	
MPS	タイヤ型	3	ミル内	一体	高クロム鋳鉄	可	すり鉢型	15	高クロム鋳鉄	石炭	一部のみ再生	再生	
MVM	タイヤ型	3	ミル外	一体	鑄鋼+硬化肉盛	可	すり鉢型	8	鑄鋼+硬化肉盛	石炭	再生	再生	
LM	円錐台形型	2,4	ミル外	一体	鑄鋼+硬化肉盛	否	平面型	8~10	鑄鋼+硬化肉盛	石炭、スラグなど	再生	再生	海外では高クロム鋳鉄。
ハウル	円錐台形型	3	ミル外	一体	鑄鋼+硬化肉盛	否	平面型	24~45	鑄鋼+硬化肉盛	石炭	約半数が再生	—	
レイモト	円錐台形型	3	ミル外	一体	高クロム鋳鉄	否	リング型	一体	高クロム鋳鉄	石炭	一部再生	再生	
イトクス	円筒短冊型	3	ミル内	8	高クロム鋳鉄	可	平面型	8~12	高クロム鋳鉄	セメント原料など	国内導入例無し	再生	
クルツネ/リクス	タイヤ型	2	ミル内	8	高クロム鋳鉄	可	平面型	8~12	高クロム鋳鉄	セメント原料など	国内導入例無し	再生	
ボール	ボール型	多数	ミル内	一体	低合金鋼	—	すり鉢型	一体	高クロム鋳鉄	石炭	再生無し	再生	リングが再生されている。

注：1. ハウルミルおよびレイモンドミルのテーブルライナはブルリングと呼ばれる。
2. ボールミルのテーブルライナは通常リングと呼ばれる(上下に1対あり)。

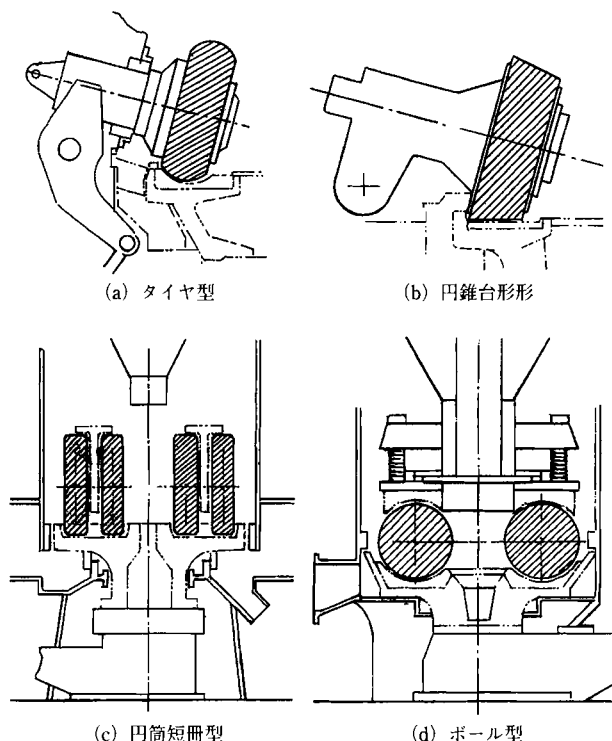


図3 各種ローラの形状

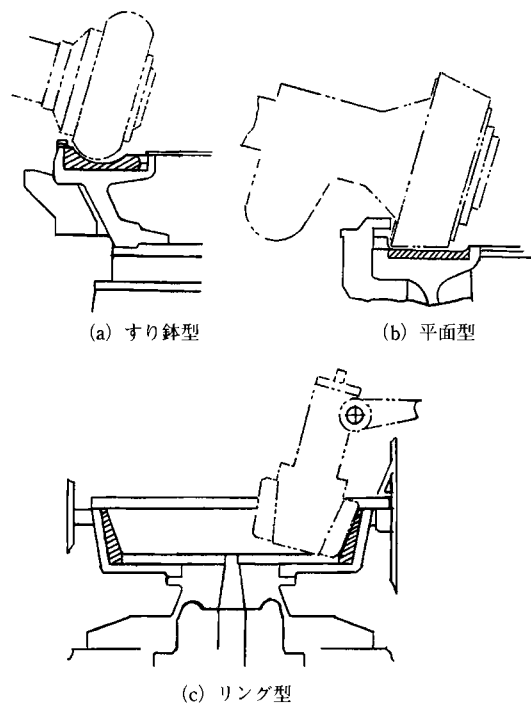


図4 各種テーブルライナの形状

4.2 テーブルライナ

(1) 分割型と一体型テーブルライナ

一般的に3～16分割の分割型が多く、バウルミルのようにきわめて分割数の多いものもある。なお、一部の小型ミルには一体型がある。分割型の場合には分割部に隙間があるために肉盛溶接施工において注意を要する。

(2) テーブルライナの形状

図4に示すように、すり鉢型、平面型およびリング型があり、これらの形状は肉盛溶接施工における溶接姿勢に影響を及ぼす。

(3) テーブルライナの材質

テーブルライナの材質としては、ローラと同じように、高クロム鋳鉄、炭素鋼鋳鋼、溶接構造用鋳鋼および高マンガン鋼鋳鋼がある。それぞれの材質に適した施工法を採用する必要があるが、肉盛溶接による再生の観点より高クロム鋳鉄がもっとも適した選択である。

5 肉盛溶接による再生方法

摩耗部分を肉盛溶接により再生する方法としては、ミル内で溶接する方法とミルから対象部品を取出して溶接する方法がある。以下に具体的な方法を示す。なお、摩耗した表面の性状が異常な場合には肉盛溶接前に摩耗表面を除去することが必要である。

5.1 溶接方法

代表的な溶接方法としてセルフシールドアーク溶接法とサブマージアーク溶接法がある。セルフシールドアーク溶接はサブマージアーク溶接に比して以下に示すような特徴があるために広く採用されている。

- ① 溶着金属がスラグで覆われないために冷却速度が大きく、溶着金属は硬化する。
- ② 溶込み深さが小さく、素材への影響が少ない。
- ③ フラックスの回収作業およびスラグの剥離・回収作業がないために、作業空間が限定される場合においても自動溶接が容易に施工できる。
- ④ ヒューム回収装置の設置により安全衛生上の観点より作業環境も良くなる¹⁾。

5.2 溶接装置

5.2.1 溶接電源

溶着速度を高めるために大電流の直流電源（例えば最大1,000Amp、使用率100%）を使用し、電源は定電圧特性とする。

5.2.2 溶接制御装置

(1) 溶接トーチ位置制御

溶接が一周終了した段階で、トーチの水平方向および上下方向の位置制御（エンコーダフィードバック制御）を自動的に行い、2周目の溶接に移る。この制御を連続

して繰返すことにより所定の肉盛溶接を行う。

(2) 溶接条件制御

一般的な溶接条件の制御に加えて、ワイヤ突出し長さの制御を自動的に行う。さらに、肉盛対象物の回転直径が変化しても周速が一定に保持できるように制御する。

5.2.3 その他

溶接トーチ過熱防止用冷却水循環装置およびヒューム回収装置を用いる。また、迷走電流によるトラブルを防ぐためのロータリーアースも取付ける。

5.3 溶接材料

硬化肉盛溶接材料は一般に以下のように分類できる。

- ① クロム炭化物系：Cが3%以上、炭化物形成元素としてCrを添加したもの
- ② 複合炭化物系：Cが3%以上、炭化物形成元素としてCr以外にV, Nb, Ti, B, W, Moなどを添加したもの
- ③ タングステン炭化物系：WCを約50%以上添加したもの

また、素材が鋳鋼の場合には下盛溶接材料として低合金鋼またはオーステナイトステンレス鋼の溶接材料を使用する。これらの溶接材料肉盛金属の化学成分および硬さの一例を表2に示す。

5.4 溶接施工要領

5.4.1 素材が高クロム鋳鉄の場合

適正溶接条件を表3に示す。硬化肉盛溶接部には特有の亀甲状割れが発生するが、パス間温度をある温度以下に管理することによりこの亀甲状割れを多く発生させ、

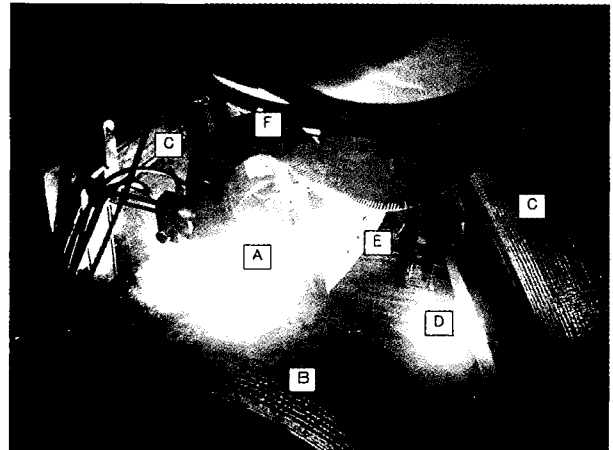
表2 代表的な溶着金属の化学成分および硬さの一例

分類	記号	化学成分(%)										硬さ(HRC)	
		C	Mn	Si	Cr	Nb	Mo	V	W	Ni	WC		
クロム炭化物系	A	3.0	1.5	1.5	15.5	—	—	—	—	—	—	—	46~50
	B	4.0	1.8	1.5	23.5	—	—	—	—	—	—	50~55	
	C	5.0	1.5	1.5	27.0	—	—	—	—	—	—	60~62	
複合炭化物系	D	5.0	0.8	1.0	22.0	6.5	—	Tr.	—	—	—	62~64	
	E	5.0	0.8	1.4	22.0	—	—	10.0	—	—	—	63~65	
	F	5.4	1.4	1.4	25.0	3.8	1.7	Tr.	—	—	—	62~64	
	G	5.4	1.5	1.6	23.0	7.0	6.2	1.0	2.0	—	—	63~67	
タングステン炭化物系	H	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80	60~65	
下盛溶接材料	I	0.1	1.2	0.4	1.3	—	—	0.5	—	—	—	—	
	J	0.1	6.0	1.0	19.5	—	—	—	—	8.0	—	17~20	

表3 硬化肉盛溶接施工条件の一例

素材	下盛溶接材料	硬化肉盛溶接条件				
		ワイヤ径(mm)	パス間温度(°C)	溶接電流(A)	アーク電圧(V)	溶接速度(mm/min)
高クロム鋳鉄	不要	2.8~3.2	初層:Max.120	380~550	28~32	800~1200
鋳鋼	要		2層以降:Max.150			

注: 1) 極性はワイヤプラス(DCEP)とする。
2) ワイヤの突出し長さは30mm程度とする。



A: 溶接トーチ (ローラ用) B: ローラ (溶接施工中)
C: ローラ (溶接施工済み) D: 溶接トーチ (テーブルライナ用)
E: テーブルライナ (溶接施工中) F: ヒューム回収用ホース

写真1 溶接施工状況 (ミル上部からの写真)

残留応力を軽減するとともに素材への割れ侵入深さを小さくすることが重要である。併せて、肉盛金属の硬さがある値以上に維持する必要がある。このパス間温度を例えば、初層120°C以下、2層目以降150°C以下に管理する。

5.4.2 素材が鋳鋼の場合

(1) 下盛溶接

高靱性の低合金鋼またはオーステナイトステンレス鋼溶接材料を使用して下盛溶接を行う。これは粉碎時の負荷に因る剥離を防ぎ、併せて硬化肉盛金属の割れが素材に伝播するのを防止するためである。

(2) 硬化肉盛溶接

素材が高クロム鋳鉄の場合と同じである。

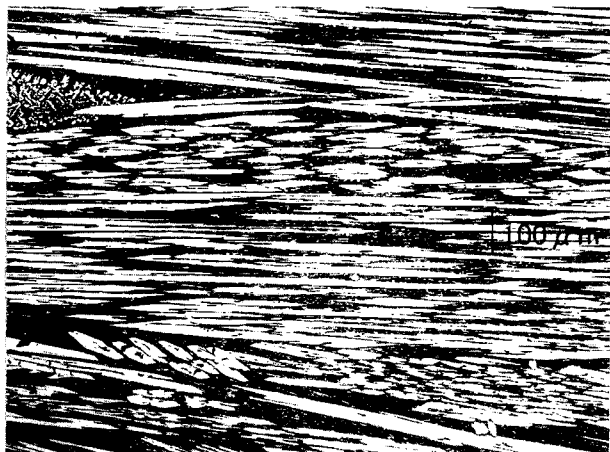
5.5 溶接施工状況

溶接施工状況の一例を写真1に示す。図に示すようにローラとテーブルライナを同時施工し、施工時間を短縮している。なお、テーブルライナは分割型で、ミル内で連続的に溶接を施工し、その状態で使用することが望ましい。

6 高クロム鋳鉄肉盛金属の特性

6.1 顕微鏡組織

写真2に高クロム鋳鉄肉盛金属の顕微鏡組織の一例を示す。微細な炭化物とマルテンサイトから成る共晶合金により囲まれた六方晶形の粗大な初析炭化物が認められる。これらの初析炭化物および共晶炭化物はいずれも(Cr, Fe)₇C₃型のCr炭化物である。なお、耐摩耗性向上のために肉盛金属にNb, V, Mo, Ti, W, Bなどが添加される



倍率：×100×0.63
腐食液：グラード液

写真2 肉盛金属の顕微鏡組織の一例
(肉盛金属の組成：5% C-25% Cr)

場合があるが、それぞれNbC, V₄C, Mo₂C, TiC, WC, B₄Cの炭化物が認められる²⁾。

6.2 ラバーホイール試験による耐摩耗性の評価

粉碎原料はローラとテーブルライナ間の圧縮力(面圧)と相対速度差による摩擦により粉碎される。このような粉碎時の圧縮と摩擦下での耐摩耗性を評価する方法とし

てASTM G65-85において規定されたRubber Wheel Testがある。粉碎時の摩耗条件はこの試験における負荷応力により再現できる³⁾。

図5は当社が実施したラバーホイール試験結果を他社のデータとともに示したものである。試験条件が同一でないために相互比較はできないが、硬さが増大するにしたがって耐摩耗性が向上する。また、高クロム鑄鉄肉盛金属は硬質鑄鉄素材の2倍以上の耐摩耗性があることが分る⁴⁾。

図6は高クロム鑄鉄肉盛溶接金属についてラバーホイール試験結果に及ぼす炭化物含有量と硬さの影響を示した²⁾。この図から、耐摩耗性は肉盛金属の炭化物含有量と硬さの関数であることが分る。硬さが増大すると耐摩耗性が向上する。また、硬さが同じであっても炭化物含有量が40~50% (体積率)において耐摩耗性が極大になると言える。

6.3 実機における耐摩耗性の評価

図7はNi-Hard IV素材と高クロム鑄鉄系肉盛金属の石炭粉碎時の耐摩耗性を比較した一例⁵⁾で、図より肉盛金属(5% C-23% Cr-7% Nb)の耐摩耗性が素材の約4倍であることが分る。また、図8は石炭粉碎ミル(テーブルライナ)において硬質鑄鉄(Ni-Hard IVと15% Cr鑄鉄)と高クロム鑄鉄系溶接材料による肉盛金属を耐摩耗

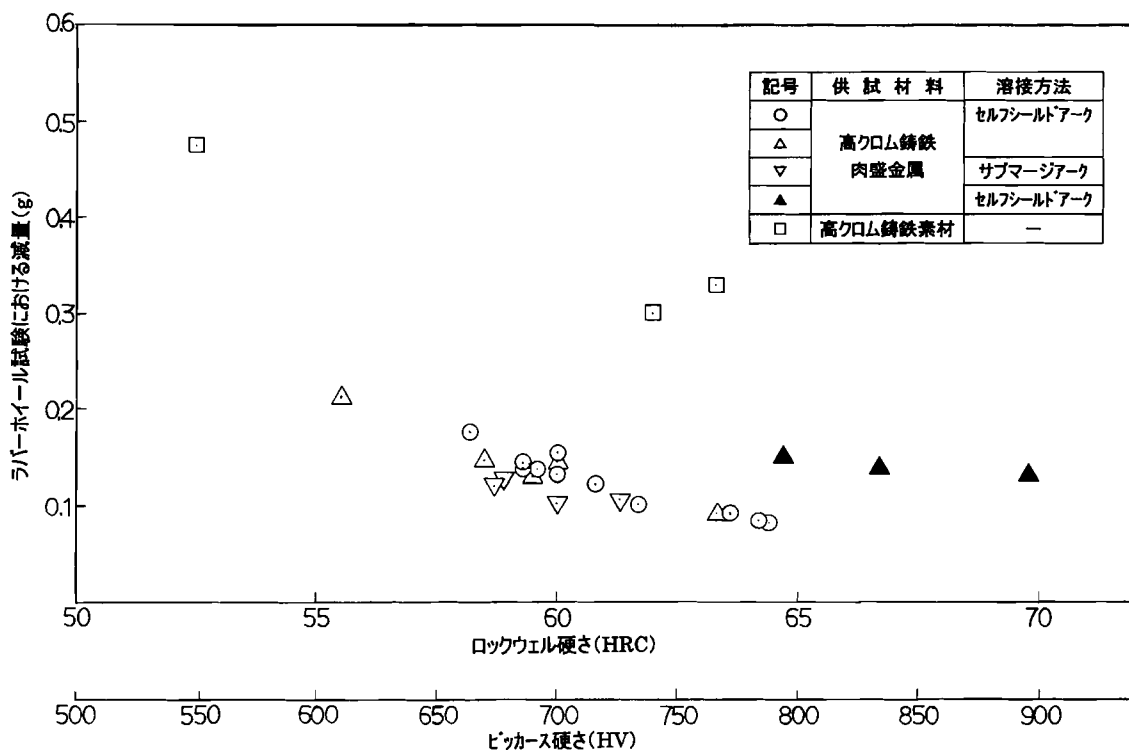


図5 ラバーホイール試験結果の比較

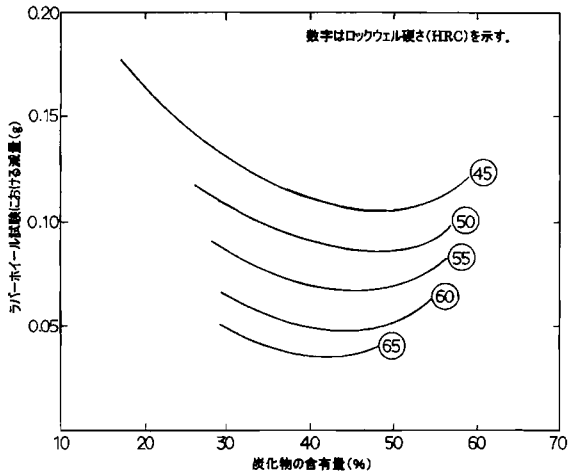


図6 高クロム鑄鉄肉盛金属のラバーホイール試験結果におよぼす炭化物含有量と硬さの影響

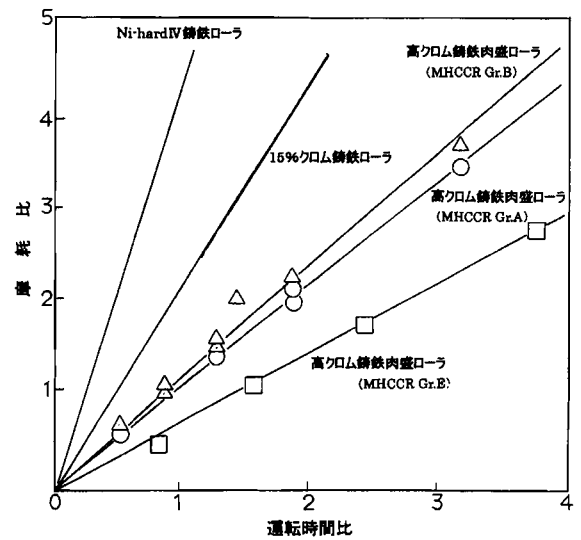


図8 実機試験における高クロム鑄鉄肉盛ローラと高クロム鑄鉄ローラの耐摩耗性の比較

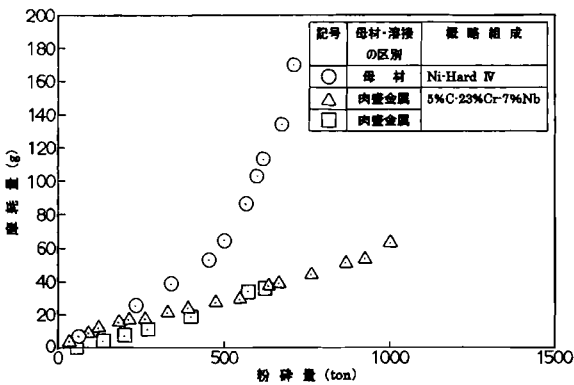


図7 石炭粉砕ミル（テーブルライナ）における粉砕量と摩耗量の一例

性に関して比較したもので⁶⁾、溶接材料の改良により石炭粉砕時の耐摩耗性が著しく改善されていることが分る。図9に各種ミルテーブルライナ肉盛金属の摩耗原単位を比較して示した⁷⁾。

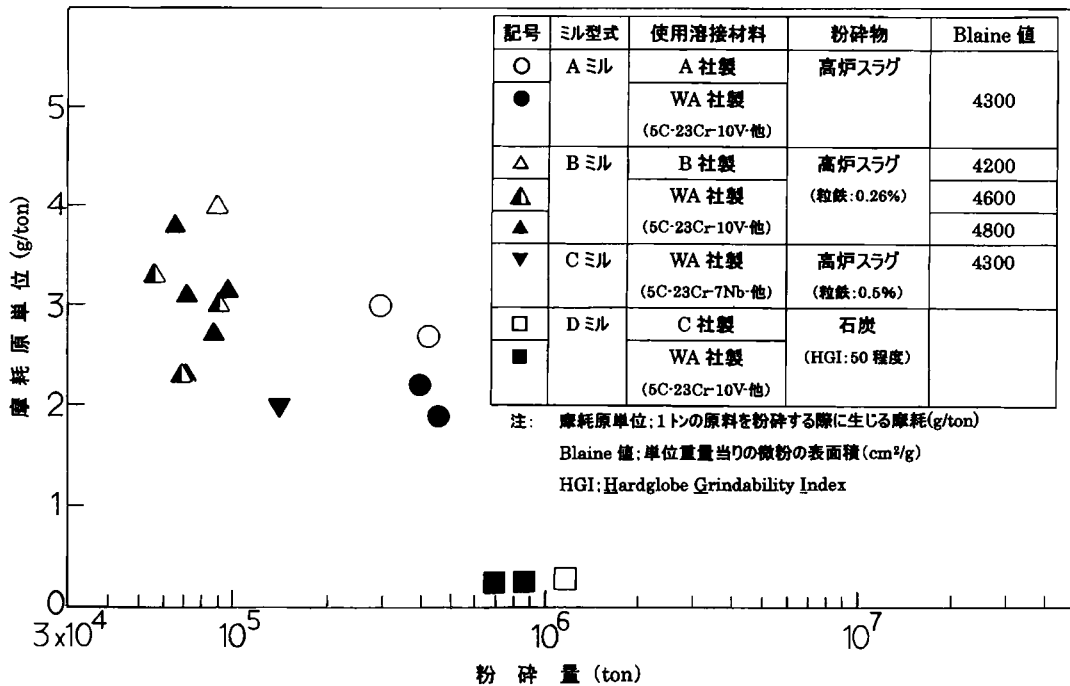


図9 各種ミル（肉盛テーブルライナ）における摩耗原単位の一例

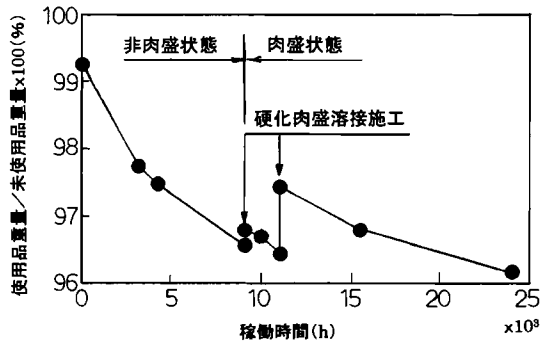


図10 高クロム鑄鉄素材と高クロム鑄鉄肉盛金属の実機における摩耗速度の比較（テーブルライナ）

7 耐摩耗肉盛溶接による経済効果

図10は肉盛溶接による再生により、クリンカー仕上げ型ミルの耐摩耗性が大幅に改善され、摩耗速度が1/2以下になっていることを示している。新しい部品と取り替える場合と比較してメンテナンスコストはテーブルライナの場合には約60%、ローラの場合には約70%の低減が行われた⁸⁾。

8 肉盛溶接による再生に関する今後の課題

以上述べた型ミルの肉盛溶接による再生の現状より、今後解決すべき課題を以下に述べる。

8.1 施工上の課題

5項で述べたように、型ミルの肉盛溶接技術そのものは現時点でもかなり自動化されていると言える。しかし、肉盛溶接前後の要素技術を含めて以下のような課題が挙げられる。

- ① 摩耗面の自動計測技術（非接触）とそのデータに基づく自動肉盛溶接技術の開発
- ② 肉盛面の自動研削システムの開発
- ③ 上記の①および②を含めた完全自動再生システムの開発

8.2 肉盛溶接部の特性に関する課題

6項で述べたように、現状でも肉盛金属部の耐摩耗性は一般に高クロム鑄鉄の2倍程度であると言えるが、耐摩耗性はミルの型式、粉碎条件、粉碎物の組成と性状などに大きく左右される。また、ミル内に異物が混入する場合にはその耐剥離性が重要である。このような観点より、肉盛溶接部の特性に関して以下のような課題が挙げられる。

- ① 耐剥離性に優れ、耐摩耗性の高い肉盛溶接材料の開発（各種炭化物添加による開発も含む）
- ② 最近開発されている複合材料（例：XWIN9）に経済性において十分に勝る肉盛溶接材料とその施工法の開発

8.3 粉碎効率に関する課題

型ミルはきわめて効率的な粉碎装置であるが、肉盛溶接により再生した型ミルはさらに高い粉碎効率で稼働しなければならない。そのような観点より以下のような課題が挙げられる。

(1) 最適な肉盛形状の把握

肉盛溶接による再生において、各種ミルに応じた粉碎効率の高い肉盛形状が存在するものと考えられるが、それぞれのミルに最適な肉盛形状を明確にする。

(2) 粉碎メカニズムの解明

硬化肉盛ローラおよびテーブルライナによる粉碎メカニズムを解明する。

9 おわりに

本稿においては種々の業界で数多く使用されている型ミルに関して、主として当社および世界中で積極的に事業活動を展開しているWA（Welding Alloys）グループの技術に基づいて国内外における肉盛溶接による再生技術の現状を整理し、今後の課題を抽出した。ここで抽出した課題が具体的に解決されることにより完全自動再生システムが実現し、型ミルの肉盛溶接部の品質がさらに向上することが期待される。

参考文献

- 1) J.J.K. Stekly and M.F. Vinton, "Analysis of Welder Exposure in Sub-Arc and Open-Arc to Dusts and Fumes during the Welding of Martensitic High Chrome Wires", Internal Document of Welding Alloys Ltd., 1996
- 2) Borik F, "Factors Affecting Abrasion Resistance of Commercial Hardfacing Alloys", Wear Mater 1985, 595-604
- 3) S. Mizoguchi et al, "Multi-layer Submerged Arc Surfacing with High Chromium Iron Alloy", Surface Engineering, Vol.3, No.4 (1987)
- 4) 吉田, 杉岡, "硬化肉盛による型ミルローラおよびテーブルセグメントの寿命延長の改善について", 栗本技報, 1990, July
- 5) Welding Alloys Group内資料
- 6) 納富他, "石炭粉碎機の長寿命硬化肉盛りローラライナーの開発", まてりあ, Vol.36, No.6 (1997)
- 7) ㈱ウェルディングアロイズ・ジャパン技術資料
- 8) M. Itoh et al, "Produktivitaetssteigerung einer Waelzmuehle fuer die Zementmahlung", ZKG International, Nr.11, 1997 (50.Jahrgang)
- 9) Magotteaux社カタログ