

燃料電池金属セパレータの 高精度プレス成形技術の開発

Development of High-Precision Sheet Metal Forming for Fuel Cell Metal Separator

白川 信彦*

Nobuhiko Shirakawa

(2015年6月30日 受理)

キーワード：金属セパレータ，プレス成形，サーボプレス，温間成形，燃料電池

1. はじめに

水素と酸素を反応させて電気を取り出す燃料電池 (Fuel Cell) は、高効率でクリーンなエネルギー源として注目され、精力的に研究開発が進められている。中でも固体高分子形燃料電池 (PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell) は、発電の際の作動温度が 100℃以下で取り扱いが容易である上に高い出力密度が得られ、軽量小型化も可能であることから、自動車や家庭用分散電源、可搬型電源など幅広い分野での実用化開発が盛んに行われ、市場投入や実証試験も始まっている。しかし、これらの燃料電池においては、発電の心臓部ともいえる膜・電極接合体 (MEA, Membrane Electrode Assembly) をはじめとしてその構成部品がいずれも高価な素材であり、その普及に際してはさらなる低コスト化が求められている。主要構成部品の一つであるセパレータを金属薄板プレス化することは低コスト化の要求に応えられる有効な手段であり、カーボン樹脂モールドや切削加工で製造されるセパレータに比べてコンパクト化も達成することができる。

セパレータの金属薄板プレス化については、材料面でのアプローチも含め、サーボプレスのモーション制御の適用などこれまで数多くの取組み^{1)~7)}がなされており、戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン事業) においても、金型精度およびプレス技術の高度化に取

り組んだ幾つかの事例^{8)~10)}がある。

当所においては、平成 22~24 年度のサポイン事業「固体高分子形燃料電池の低コスト化・コンパクト化及び高生産性に資する金属セパレータ成形技術の開発とそれによるセルスタックの自動組立技術の開発」に参画した後、その参画企業の内の一社と事業化を見据えた共同研究を継続し、計 5 年間にわたってセパレータの金属薄板プレス化のための技術開発を行った。一連の研究開発においては、サーボプレスのモーション制御と温間成形の組み合わせにより高精度のプレス成形が実現できることを明らかにした。また、この金属薄板セパレータを実際に燃料電池に組み込んで発電実験を行い、セパレータとしての要求性能が満足されていることを実証した。

本報告では、この開発の経緯を紹介するとともに、当所が実施した高精度プレス成形技術の開発について述べる。

2. 開発の経緯

2.1 対象材料の選定

セパレータに要求される性能には表 1 に示すようなものがあげられるが、この中で「発電環境での耐食性」を重視すると、金属薄板材でターゲットとなる材質は自ずとステンレス材やチタン材が主体になる。しかし、その他の要求性能である「低い固有抵抗および接触抵抗」、「高い熱伝導率」などを考慮すると、銅板に金メッ

* 加工成形科

キを施すなどのアプローチも候補になる。そこで開発の初期においては、ステンレス系材料として光輝焼鈍された SUS304-BA, SUS316L-BA の 2 種類, チタン系材料として TR270C, 銅系材料として C1100P-O, アルミニウム系材料として A1050P-O の 5 種類を対象に検討した。図 1 にこれらの材料を冷間で成形した結果を示す。ここでは、サーボプレス of モーション制御によって下死点で 1 秒間停止させるリンクモーションを用いて成形した。C1100P-O 材では平面度の高い比較的良好な成形を行うことができたが、SUS304-BA や SUS316L-BA 材ではひねりやペコつき, TR270C 材や A1050P-O 材では凹面状の反りなどの成形不良が発生した。これらの成形不良はサーボプレス of モーション制御を変更するだけでは解消できなかったが、150~200 °C 程度に素板を加熱して成形したところ、特に SUS 系材料において成形不良が低減し、高精度な成形加工を実現できる可能性があることがわかった。また、最終的には成形したセパレータを発電実験に供することから、市中で容易に入手でき、一定レベル以上の耐食性を有する SUS316L-BA 材 (公称板厚 0.2 mm, 130 mm × 130 mm サイズ) を対象材料として選定し、開発を進めた。

2.2 セパレータ形状の検討

本サポイン事業では、セルカートリッジ発電能力の

表 1 セパレータに要求される性能

① 発電環境での耐食性
② 低い固有抵抗および接触抵抗
③ 高い熱伝導率
④ 高強度 (割れ, 破損の恐れがない)
⑤ 水素ガスを透過させない
⑥ 軽量, コンパクト性 …など

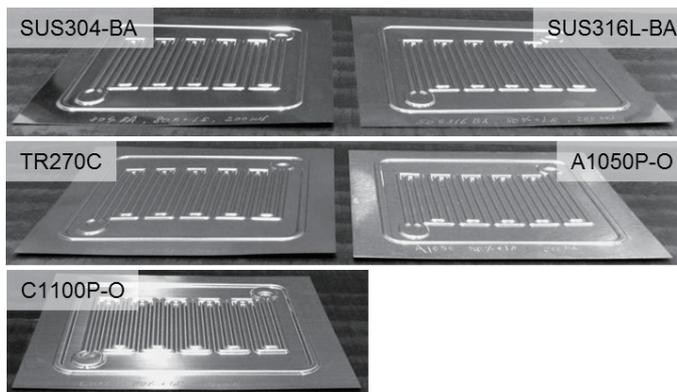


図 1 各種材料の冷間成形結果

数値目標 (発電電圧: 0.7 V/セル, 発電電流: 0.2 A/cm²) を達成するために、金属セパレータの形状について検討した。図 2 にこれまで検討したセパレータの形状を示す。ガス導入口/排出口の形状や個数, サーパーペンタイン流路の形状, 組立時の締付けによる変形を防止するためのディンプルやビードなどの追加が主な変更点である。これらの形状変更を行うごとに後述のプレス成形条件についても再検討した。

最終的に決定したセパレータの概略を図 3 に示す。流路形状は、溝幅約 1.8 mm, 溝深さ約 0.55 mm のスーパーペンタイン流路で、反応部面積は約 50 cm² である。

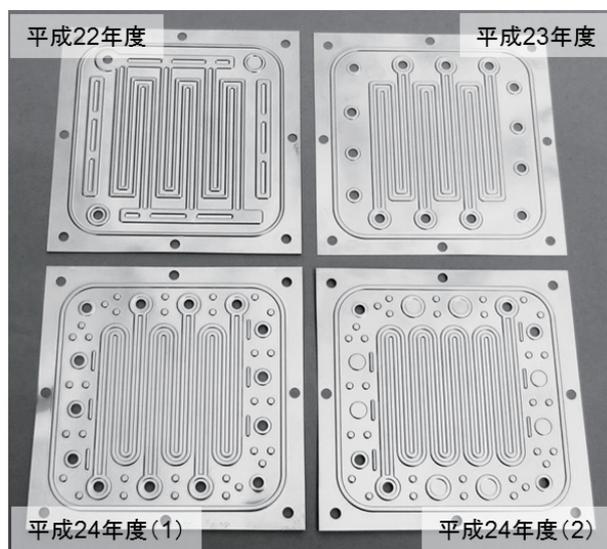


図 2 セパレータ形状の変遷

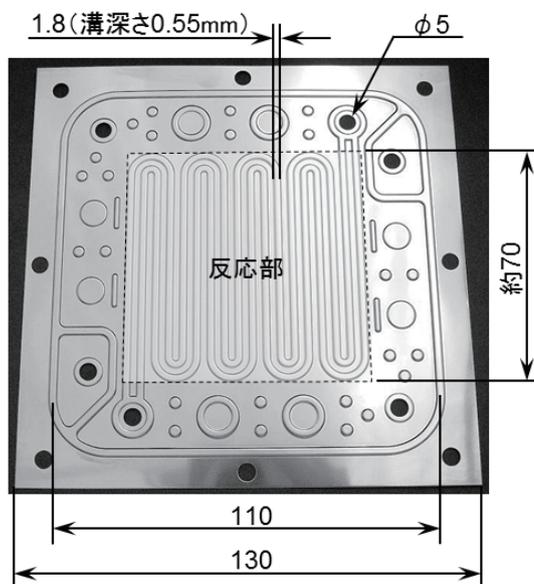


図 3 セパレータ概略

3. 高精度プレス成形技術の開発

3.1 プレス機械および加熱方法

実験に使用したプレス機械は、図4に示す加圧能力2,000 kNのACサーボプレス(コマツ産機(株)製H1F200CS)で、最大クッション力200 kNのサーボモータ式ダイクッションを装備している。

温間成形を行う場合、成形前に素板を電気炉等で加熱する方法と金型を加熱して成形中に熱伝導により昇温する方法が考えられる。さらに金型を加熱する場合を分別すると、金型全体を同温度にする場合と、加熱冷却深絞り法¹¹⁾のように、ダイとブランクホルダを加熱しながらパンチを冷却し、部位によって温度差をつける場合がある。本研究開発においても、当初はダイとパンチをカートリッジヒータで加熱し、ブランクホルダを内蔵する水管で冷却して温度差をつける温間成形法を検討したが、加熱したいパンチと冷却したいブランクホルダが近接しており、温度を制御することが難しかったため断念した。そこで本研究開発では、素板をあらかじめ電気炉等で200℃程度に加熱し、これを加熱していない常温の金型で成形する方法を採用した。



図4 サーボプレス外観

素板の加熱には、送風定温恒温器(ヤマト科学(株)製DKN302, 最高使用温度260℃)を使用した。金型に対しては積極的に冷却するなどの温度制御を行わなかったため、金型温度は外気温によって変動したが、おおよそ10~20℃の範囲で成形実験を行った。なお、成形に際して潤滑剤は使用しなかった。

3.2 温度勾配付与プレス成形

電気炉で加熱した素板を人手で金型にセットしてプレスする実験では、移送の間の温度低下や金型に接触してから成形開始までの熱伝導による部分的な温度低下など、成形条件にばらつきが生じる要因が多い。開発当初は素板を電気炉から取り出した後、できるだけ迅速にプレス成形(高速のリンクモーションで加工し、下死点で1秒間保持)することを試みていたが、様々な加熱温度で実験したところ、金型にセットしてから成形するまでの時間を長くした場合に、成形されたセパレータの平面度が向上した。これは、プレス成形までに金型と接触している部分(成形品のフランジ部)で、熱伝導によって素板に部分的な温度低下が生じて適当な温度勾配が発生したためではないかと考えられる。すなわち、材料の変形抵抗は温度によって異なるため、素板に温度勾配があると場所によって変形抵抗がわずかに変化し、このことが結果的に成形品の平面度を向上させたものと思われる。

そこで、素板を予めやや高い温度で加熱しておき、成形前に外周フランジ部をダイとブランクホルダで一定時間拘束保持して温度低下を生じさせ、流路成形部の中央付近から外周フランジ部に向かって温度勾配を与えるプレス工法(温度勾配付与プレス成形:図5)を考案した。図6にスライドモーション線図、クッション力の制御線図を示す。図6(a)はスライドモーションの制御イメージ、図6(b)は成形時のスライド位置とクッション力の実測データである。成形条件は、下死点上7mmまでスライドを高速で下降させて

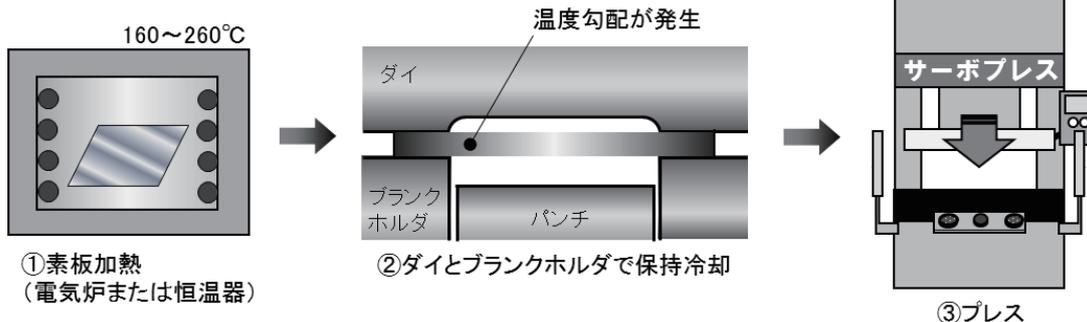


図5 温度勾配付与プレス成形

素板のフランジ部を2秒間拘束保持した後、プレス成形して下死点で1秒間保持するスライドモーションであり、クッション力については成形前の拘束保持時に50 kN、成形時に200 kNになるように制御したものである。

3.3 成形精度に及ぼす加熱温度と拘束保持時間の影響

素板の加熱温度を160℃から260℃まで変化させ、前述のスライドモーションにおける拘束保持時間を0秒(保持なし)から10秒まで変化させて成形したセパレータについて、それぞれの形状精度を調べた。結果を表2に示す。

常温での成形(冷間成形)における成形不良としては、全体形状にひねりと凹面状の反りが発生している。

これに対して素板を加熱する温間成形では、180℃以下の比較的加熱温度が低い場合にはひねり(ペコつき)が発生し、240℃以上に加熱した場合には、凸面状の反りが発生している。このように、加熱温度によって成形不良の形態が異なることがわかる。

拘束保持時間に着目すると、保持時間が長くなるにつれてフランジ部分のひずみ(うねり)が顕著になり、中央部が浮き上がる形状となる。これは、保持時間が長くなることにより外周フランジ部の温度低下が大きくなり、中央成形部との温度差が過大になるためであると考えられる。

以上のことから、加熱温度と拘束保持時間には最適な条件が存在し、本開発でのセパレータ形状および使用素材(SUS316L-BA材)に対しては、表中の破線で

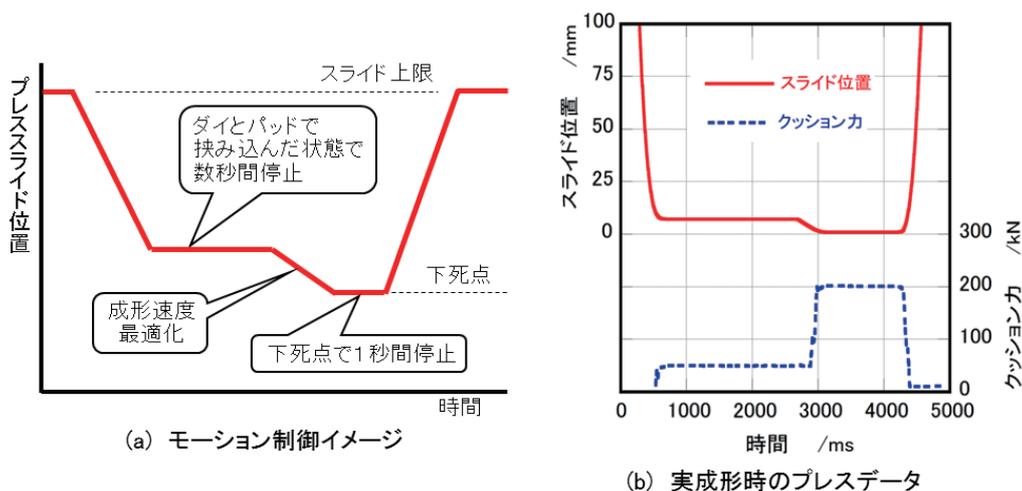


図6 スライドモーション線図(制御イメージ図と実測データ)

表2 成形精度に及ぼす加熱温度と拘束保持時間の影響

		常温	160℃	180℃	200℃	220℃	240℃	260℃
拘束保持時間 (秒)	0	・ひねり:× ・凹反り:× ・Fうねり:×	・ひねり:× ・Fうねり:△	・ひねり:△ ・Fうねり:△	・ひねり:△ ・Fうねり:△	・凸反り:△ ・Fうねり:—	・凸反り:△ ・Fうねり:—	・凸反り:× ・Fうねり:—
	3		・ひねり:△ (ペコつき) ・Fうねり:△	・ひねり:▲ (ペコつき) ・Fうねり:△	・良好 ・Fうねり:—	・良好 ・Fうねり:—	・凸反り:× ・Fうねり:—	・凸反り:× ・Fうねり:—
	5		・ひねり:△ ・Fうねり:▲ (中央部浮き)	・ひねり:△ ・Fうねり:▲ (中央部浮き)	・Fうねり:▲ (中央部浮き)	・ほぼ良好 ・Fうねり:△	・凸反り:× ・Fうねり:△	・凸反り:× ・Fうねり:△
	10		・ひねり:× ・Fうねり:× (中央部浮き)	・ひねり:× ・Fうねり:× (中央部浮き)	・Fうねり:× (中央部浮き)	・Fうねり:× (中央部浮き)	・凸反り:× ・Fうねり:▲	・凸反り:× ・Fうねり:▲

※表中の「F」はフランジを表し、記号は×, ▲, △, —の順に変形が大きいことを示す。

囲んだ加熱温度 200~220 °C, 拘束保持時間 3 秒で成形品の平面度が最も高くなることがわかった。

3.4 加熱ムラの影響

本技術を実生産に適用する場合, 順送プレスまたはトランスファープレスを用いてインラインで加熱し, 自動搬送するという工程が適当である。このとき, 加熱方式の選択は重要なポイントであり, 加熱方式によって素板に加熱ムラが生じた場合, 成形精度に影響すると考えられる。そこで, 加熱ムラが生じると考えられる小型電気炉で素板を加熱した場合と送風定温恒温器で加熱した場合とで成形結果を比較した。

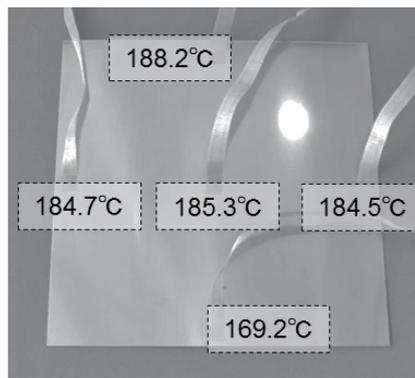
図 7 に, 熱電対を貼付した素板を用いて, 前述の送風定温恒温器と小型電気炉 (光洋サーモシステム (株) 製 KBF828N, 最高使用温度 1,100 °C) 内で加熱した場合の温度測定の結果を示す。図に示すように, 小型電気炉では素板内で最大 19 °C 程度の加熱ムラが認められるのに対し, 送風定温恒温器では加熱ムラが 4 °C 程度に抑制できている。

図 8 に, 送風定温恒温器と小型電気炉で素板を加熱して成形したそれぞれのセパレータのフランジ部の拡大写真を示す。これらの写真はフランジ部に格子模様を写り込ませて撮影したものである。送風定温恒温器で加熱した場合には写り込んだ格子模様の水平線がほぼ直線であるのに対し, 小型電気炉で加熱した場合には水平線が緩やかに湾曲しており, フランジ部にうねりを生じていることがわかる。以上のことから, 加熱ムラによる精度不良を回避するためには, 素板内の温度差を数°C以内になるように均一に加熱する必要があることがわかった。

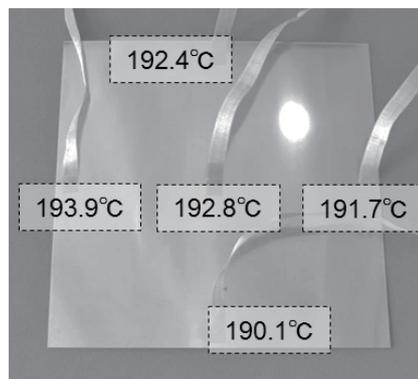
3.5 クッション力の影響

3.2 節で述べたように, クッション力を拘束保持時に 50kN, 成形時に 200 kN とした場合, 比較的良好な成形を行うことができた。ここでは, クッション力

が成形精度に及ぼす影響を調べるために, 拘束保持時, 成形時のクッション力を 25 kN 一定で成形した場合と, ブランクホルダで素板を拘束しないフォーム成形の場合について成形実験を行った。結果を図 9 に示す。クッション力が小さい 25kN の場合には顕著なフランジしわが, ブランクホルダを使用しないフォーム成形の場合には凹面状の反りが発生した。このことから, 本成形においては, 外周フランジ部を拘束するクッション力を高くしてプレスすることも成形精度の向上において重要なポイントであることがわかる。

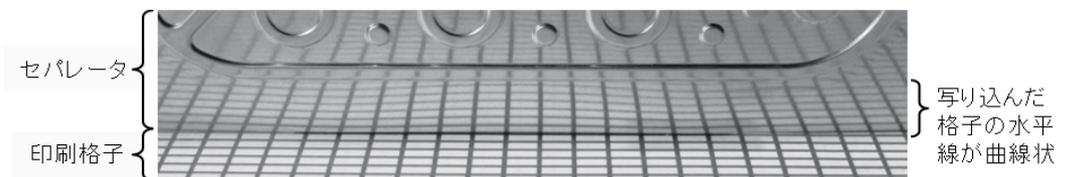


(a) 小型電気炉で加熱した場合

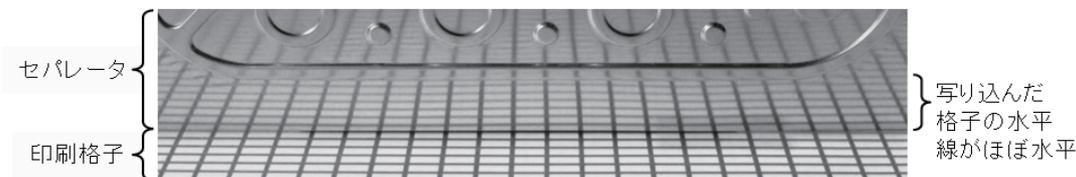


(b) 送風定温恒温器で加熱した場合

図 7 素板加熱時の温度分布

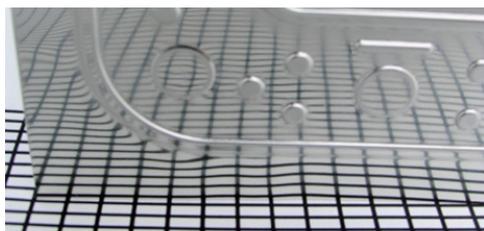


(a) 小型電気炉で加熱した場合

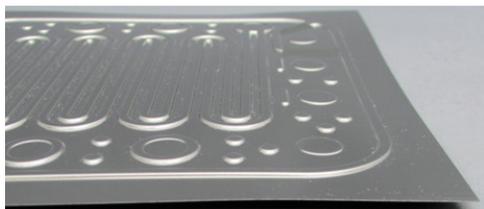


(b) 送風定温恒温器で加熱した場合

図 8 格子模様を転写した成形品フランジ部の拡大写真



(a) クッション力25kNの場合のフランジしわ



(b) フォーム成形の場合の反り

図9 クッション力の影響

4. おわりに

燃料電池の低コスト化，コンパクト化を実現する金属薄板セパレータの高精度成形を目指し，サーボプレス of モーション制御と温間成形を組み合わせた温度勾配付与プレス成形技術を開発した。また，プレス成形技術の開発で終わるのではなく，成形したセパレータを組み込んだ発電実験を行い，その結果をフィードバックして，所要発電性能を達成するための流路形状や金型について検討した。

本開発で得られた知見は，燃料電池セパレータだけでなく，例えばプレート式熱交換器のパネル部品などの金属薄板プレス成形品にも活用できるものと思われる，広い分野でのものづくり支援に役立てることができる。

参考文献

- 1) 樽谷芳男，花尾方史，小川和博，浜田龍次，有園太策：まてりあ，**48**, 1 (2009) 23.
- 2) 清藤雅宏，中川和彦，山内博史：第57回塑性加工連合講演会講演論文集(2006) 153.
- 3) 浅川洋平，中川和彦，清藤雅宏，上野恵尉：第57回塑性加工連合講演会講演論文集(2006) 155.
- 4) 宮川和幸，石田正文，斎藤修，渡辺政廣，柴田正実，佐藤幸徳，武田敏充，松下清人：山梨県工業技術センター研究報告，No.21 (2007) 1.
- 5) 宮川和幸，石田正文，早川 亮，渡辺政廣，柴田正実，佐藤幸徳，武田敏充，松下清人：山梨県工業技術センター研究報告，No.22 (2008) 1.
- 6) 宮川和幸，石田正文，早川 亮，有泉直子，渡辺政廣，柴田正実，佐藤幸徳，武田敏充，松下清人：山梨県工業技術センター研究報告，No.23 (2009) 33.
- 7) 加藤俊二：天田金属加工機械技術振興財団研究概要報告書 (2010) 50.
- 8) 戦略的基盤技術高度化支援事業研究開発成果事例集 (平成 18~20 年度PJ)，78.
- 9) 戦略的基盤技術高度化支援事業研究開発成果事例集 (平成 19~21 年度研究開発PJ)，112.
- 10) 戦略的基盤技術高度化支援事業研究開発成果事例集 (平成 21~23 年度採択事業)，122.
- 11) 渡部豊臣：塑性と加工，**33**, 375 (1992) 396.