

EXPLOSIVE FORMING OF L-BAND COPPER 3-CELL CAVITIES

FUJINO, Takeo INOUE, Hitoshi SAITO, Kenji NOGUCHI, Shuichi
ONO, Masaki KAKO, Eiji SHISHIDO, Toshio

National Laboratory for High Energy Physics (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305 Japan

ABSTRACT

The explosive forming of L-band copper 3-cell cavity has been tried to fabricate seamless cavities. The forming material is seamless copper tubes with 85 mm diameter, 4 or 6 mm thick and 600 mm long. If this manufacturing method could be successfully developed, it will bring many benefits to superconducting rf cavities as fabrication cost reduction, use of Nb/Cu clad cavities and so on. In this paper, we present a result of the feasibility study of this method for multi-cell cavities.

爆発成型法によるL-バンド3セル銅空洞の試作

1. はじめに

超伝導リニアコライダーの実現には、空洞の高性能化のみならず、製作費の大幅なコストダウン化が重要な鍵となる。現在採用されているニオブ超伝導空洞の製作方法は、深絞りでハーフセルを成型した後、それらを一個々電子ビーム溶接で接続している。このため工程数が多くなり、作業時間や製作費の増大を招いている。この問題を解決するために、シームレス管を爆発成型法で一体成型して多連の空洞を製作する方法を試みた。

爆発成型は高エネルギー且つ高速度の加工法で、一般的には水中で爆薬を爆発させ、それによって生ずる衝撃波の高い圧力を利用して瞬時に材料を変形させる塑性加工法の一つである。この方法は加工速度が速いため、油圧成型(バルジ成型)に比べて塑性加工の際の変形量が大きいと云われている。もしこれが多連空洞

の成型に適用できれば、時間的にも経済的にも他の製法よりも良さそうである。しかし実際には、空洞の加工は形状的な形作りだけでなく、加速空洞の性能に関わる内面状態の問題も含むから、爆発力による表面の肌の状態や火薬による表層への化学的な影響等、多くの検討を加え、総合的に爆発成型による加工法の良否を判断しなければならない。

ここに、爆発成型法による多連空洞の製作の可能性について報告する。

2. 爆発成型

今回はとりあえず、爆発成型で空洞の形に成型できるか否かと云う、形状的な面を確認するために三連のLバンド空洞の成型を試みた。

被成型材料としてニオブ材に比較的近い抗張力を有する銅材のシームレス管を使用した。このものの形状寸法は外径φ 85 mm×肉厚 4

及び6 mm×管長600 mmである。この管を治具内の中心部に配置し、管内の中心部の軸方向に導爆線〔標準薬量10 g/m、火薬種：四硝酸ペンタエリスリット、化学式： $C(CH_2ONO_2)_4$ 、爆速6000～6500 m/sec〕を仕掛けた。爆発力と変形量の関係を知るために、肉厚4 mmの管に対して、導爆線の数をそれぞれ1本、3本、6本、9本束ねた4種類のものを使用した。また肉厚6 mmの管に対しては、9本と12本の2種類を使用した。なお導爆線は起爆装置で点火して、導火線を介して爆発させる。

この一連の爆発成型の作業は中国化薬株式会社吉井工場で行った。そして爆薬の点火作業はこの工場の水槽設備を使って、成型治具をホイストで吊った状態で水深約1 mに沈めて行った。

図1に爆発成型に用いた治具と銅管及び、管内に装填した導爆線を写真で示す。

3. 結果

図2に導爆線の本数と管の張り出し量及びその肉厚の変化の関係を示す。

肉厚4 mmの管に関して、導爆線6本を同時に爆発させた場合はアイリス部（空洞小径部）において軸方向に切断した。爆発により塑性変形して素管が径方向に張り出した量（率）を、張り出し前の素管の径を1として100分率で表せば、この時の最も大きい値は66.6%であった。また9本の時はアイリス部の切断に加え、赤道部（空洞大径部）に相当する位置において径方向（たが方向）に亀裂を生じた。この場合の張り出し率は114.7%であり、空洞の赤道径（空洞大径）とアイリス径（空洞小径）との設計値の差を1として、張り出しの完成度の程度を100分率で示せば、この量は最終張り出しの73.7%に相当する。更に導爆線1本及び

3本の場合の径方向の張り出し率は、それぞれ最大15.1%と28.4%であった。また肉厚6 mmの管については導爆線6本の時、張り出し率の最大値が49.2%であった。更に12本束ねて使用した時はアイリス部で破断した。この時の最大の張り出し率は84.1%であった。最大張り出し部における管の肉厚は、4 mm厚さの管において2.2 mm、また6 mm肉厚管で3.2 mmに減少した。

4. 考察

管の破壊は最初にアイリス部において軸方向の破断が生じ、次に赤道部で径方向（たが方向）の亀裂が起こっている。これは爆発によって径方向に管壁が張り出す際に、治具のアイリス型部分で被塑性物である管壁の軸方向への動きが拘束されると同時に、アイリス型の比較的尖った突起部を支点にして、この点の両側の管壁が張り出し方向に引っ張られ、突起物によってへし切られるものと推定される。そして、この場合に発生するへし切りの応力はたが応力より大きいと思われる。この理由として、もし突起物がなく、しかも管壁の動きが拘束されていない状態の薄肉円筒管に内圧が加われば、管の長手方向に発生する引っ張り応力は円の接線方向に起こるたが応力よりも小さいから、長手方向の破断よりも先に径方向の亀裂が生じるはずである。

図2のグラフから、4 mm肉厚管について張り出し量を約40%にするには、導爆線の本数を4本、また約50%では5本の導爆線が必要なが推定できる。破壊せずに安全に成型できる張り出しの限界値を、銅材のJIS規格の伸び率を参照して40%に見積れば、導爆線数は4本が妥当であろう。また一回の張り出し量が40%でも50%のいずれでも成型回数は共に同じ回数（推定3回）が必要であるから、1

回の張り出し量の少ない4本の導爆線を用いる方がなにかにつけて理にかなっている。

5. おわりに

1回の爆発成型では空洞形状に加工できず、多段階の成型が必要である。この場合、肉厚4mmの管に対して、1回当たりの張り出し量を元の径の40%に抑えるのが妥当な線であろう。従って、3回の爆発成型と熱処理を繰り返すことで空洞の形にすることができると予想される。しかしこれについては、成型回数と張り出し量の関係や肉厚変化との関係等、多段階成型法の技術的な諸問題及び多段階成型法の経済性の問題に対する詳細な検討を要する。

図2のグラフで示す如く、アイリス部で管が拘束された4mm肉厚管の場合、張り出し率が28.4%になった時の肉厚減少は0.8mmで比較的大きい。しかし仕上がった空洞の肉厚を設計値に保つために、予め肉厚の大きい素管を採用することは、成型後の空洞各部の著しい肉厚差を生じるから、後加工として空洞壁の各部の

肉厚を調整する作業が増える。また肉厚の増加に伴う管の重量増によって材料費が高額になる。従ってこのような問題を含まないように、張り出し部分の肉厚が減少しないような前段階成型法を考慮すべきである。この件に関して、バルジ成型法を採用することで、アイリス部分で管を拘束しないで、しかも管軸にそって管を張り出し部分に押し込めることができるので、最大張り出し径の部分の肉厚の減少を防げられそうである。

現在、油圧方式のバルジ成型やスプリングによる素管の軸方向への押し込み機構を付加した爆発成型方式等を検討しつつ、前段階の成型方法の開発を含めた爆発成型による空洞の製作について追求している。更に、銅管の内壁に薄肉のニオブ管を爆着した、シームレスCu/Nbクラッド管の試作を計画している。この管を材料にして爆発成型法で空洞を製作すれば、全体がニオブ材から成る空洞よりも一層経済的である。

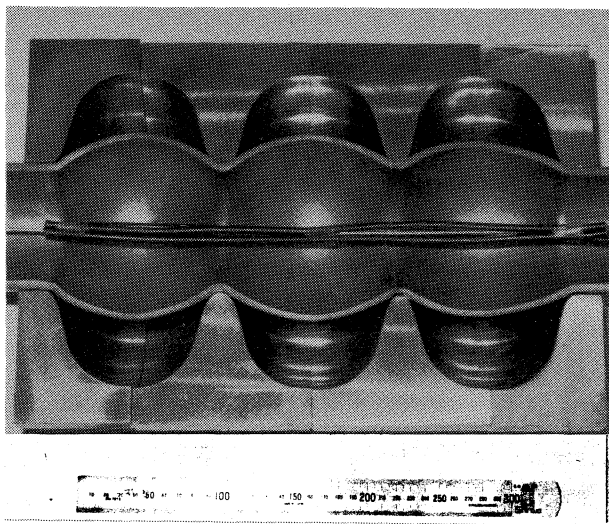


図1 成型治具と銅管及び導爆線

- (凡例)
- : 最大張り出し量(肉厚4mm)
 - : 最大張り出し量(肉厚4mm) (破壊)
 - : 最大張り出し量(肉厚6mm)
 - : 最大張り出し量(肉厚6mm) (破壊)
 - ×: 張り出し部の肉厚(素管時4mm)
 - ▲: 張り出し部の肉厚(素管時6mm)

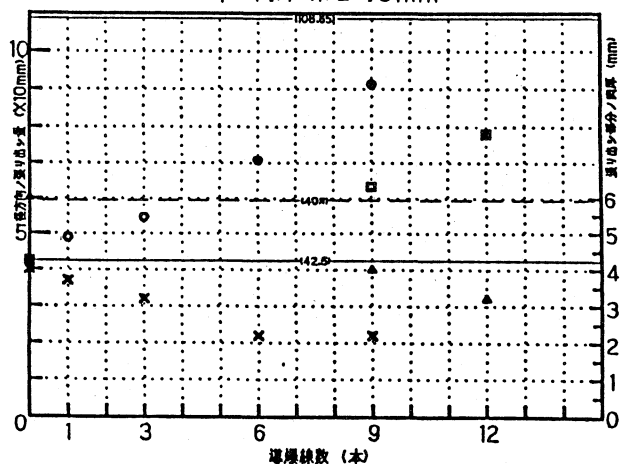


図2 導爆線の本数と径方向の最大張り出し量及びその部分の肉厚との関係