U.D.C. 621. 386. 22 :: (620. 179. 152 : 621. 644)

全周放射型工業用X線管の開発 Development of Panoramic Type Industrial X-ray Tube with Cone Target

パイプ ラインの溶接部の非破壊検査を目的とした工業用X線管として円錐状ター ゲットをもち、360度照射可能な小形X線管H7106Aを製品化した。この論文は、主 として円錐状ターゲット球での焦点形成の問題、及び焦点中心とターゲット中心と が一致しないことに起因するX線量分布のアンバランスの問題を取りあげ検討を加 え、併せて製品の主な性能について述べた。

小田部宗倫*		Munenori Kotabe	
立木	茂*	Shigeru	Tachiki
須 藤	佼**	Satoshi	Sudô

1 緒 言

近年、パイプラインによる流体輸送は急速な発展をとげ た。現在ではガス、石油などの気体、液体はもちろん、石炭 や鉱石などを細かく砕きスラリー状にしてパイプラインで輸 送する方法なども用いられている⁽¹⁾。このパイプラインの安 全性の確保には、各種の非破壊検査機器が用いられているが、 パイプラインの溶接部の欠陥検査には、X線による放射線透 過検査が最も多用されている。この用途に使用されるX線管 としては汎用の工業用X線管、すなわち傾斜した平板状ター ゲットをもち、単一方向にだけX線放射するX線管と、全周 放射型X線管とがあるが、パイプライン検査用としては、作 業能率などを考慮して専用装置が開発されつつあり、後者が 主に使用されるようになってきた⁽²⁾。日立製作所はこのたび、 全周放射型X線管の中でも欠陥検出能の良い円錐状ターゲッ トをもつX線管H7106Aを製品化したので、以下にその構造、 及び性能につき説明する。 法(図2),及び二重壁複影像法(図3)の三つに分類される。 一重壁単影像法は、パイプの径が比較的大きい場合に行なわれ、X線源をパイプの外部に置く場合と、パイプの内部に置 く場合とがある。後者の場合、X線装置として360度照射型の ものを使用すれば、1回の照射で全円周の撮影ができ最も効 果的な方法である。二重壁複影像法は、1枚のフィルム上に フィルム側と線源側の両溶接部を同時に撮影する方法である ため、パイプの径が小さい場合に行なわれる。二重壁単影像

2 パイプ ラインのX線透過検査

パイプ ラインの溶接部で検査の対象となるのは,現場検査 ではその大部分が円周の突合せ継手である。継手の撮影方法 は,原理的には平板の突合せ溶接部の場合と変わりはないが, パイプ径の大きさ,板厚,現場での施工状況などにより撮影 方法は異なってくる。

一般に撮影方法は、一重壁単影像法(図1)、二重壁単影像

法は,中程度の径のパイプに適用されるが,二重壁複影像法 と同様,管壁を二重に透過させるためX線の出力を大きくす る必要があること,X線源を溶接部に対してずらせてやや斜 め方向からX線を照射するため,溶接部の欠陥像が見にくい ことなどの欠点がある⁽¹⁾。

360度照射型のものでの撮影法としては,現在図4と図5に 示す場合がある。前者は平板状ターゲットのX線管を用いた 場合で,後者はこの論文で述べる円錐状ターゲットのX線管 を用いた場合である。いずれの場合もパイプの外側にX線フ ィルムを巻きつけ,X線源をパイプの内側に設置し撮影を行 なうもので,X線撮影は1回で済む。平板状ターゲットの場 合,線源(以下,焦点という)位置で管球軸に直角方向にはX 線がほとんど放射されないので,二重壁複影像法の場合と同 様,溶接部にX線が斜め方向から照射されるため,溶接部の 欠陥像が見にくくなり,欠陥の検出精度が低下する⁽¹⁾。



1058 日立評論 VOL. 57 No. 12(1975-12)



図 2 二重壁単影像法 中程度の太さのパイプに適用される。



円錐状ターゲット全周放射型X線管による撮影 図 5 主放射方向 のX線は、溶接部に垂直に入射する。



パイプ



二重壁複影像法 図 3 細いパイプに適用される。

焦点中心の偏心によるX線量分布のアンバランス(計算) 図 6 焦点中心とターゲット中心の偏心がある場合の,円周方向のX線量分布を計算で 求めた。





 $\mathbf{72}$



焦点形状が辺の長さ比率

平板状ターゲット全周放射型X線管による撮影 図 4 長方形焦点のX線量分布例(計算) 主放射方向 図 7 のX線は、溶接部に斜めに入射する。 |:1.15の長方形になった場合の,円周方向のX線量分布を計算により求めた。

全周放射型工業用X線管の開発 1059

円錐状ターゲットの場合は上記の問題が改善され,欠陥の 検出精度は向上するが,製造上,焦点形状,X線量分布など の円錐状ターゲットに起因する問題が生ずる。

8 X線管に要求される事項及びその検討

3.1 X線管に要求される事項

平板状ターゲット全周放射型X線管としては,既に最高使用管電圧160kVp,200kVp,及び260kVpの系列を製品化しているが,今回対象としたものは,最高使用管電圧160kVpの円 錐状ターゲット全周放射型X線管である。

X線装置側からの主な要求事項は次に述べるとおりである。 (1) 連続最大入力

自己整流回路: 50/60Hz 160kVp 5mA

(2) 実効焦点寸法

幅寸法の最大値: 4 mm, 長さ寸法の最大値: 1 mm

(3) X線量分布(フィルム濃度で指定)

(a) 円周方向:平均濃度を2.0とした場合に,円周方向各部の濃度が2.0±0.2の範囲に入ること。

(b) 管球軸方向: 0度方向の濃度を2.0としたとき, 陰極, 陽極各側5度の範囲の管球軸方向の濃度が2.0±0.2の範囲 に入ること。

但し, 濃度の測定条件は被写体として内径350mm¢, 肉厚 8.5mmの鋼管を用い, その中心軸にX線管を配置し, 鋼管の外



図8 平板状傾斜ターゲット球と円錐状ターゲット球の管球軸方向のX線量分布の比較 平板状傾斜ターゲット球での実測結果と、円錐状 ターゲット球での計算結果の比較を示す。

ンバランスは最も大きく、その計算結果を図6に示す。焦 点幅4mmの焦点の場合、0.5mmの偏心があると約25%のアン バランスを生ずる。また、焦点幅寸法が小さいほど偏心に よる影響を受けやすいが、4mmあたりでは余り差はない。

周にフィルム(フジ I X * 100)を巻きつけ、自己整流回路100 kVp 5mAでフィルム濃度が2.0になるまでX線照射を行なう ものとする(増感紙としては、鉛はく増感紙0.03mmのものを2 枚使用する)。

3.2 要求事項の検討

3.2.1 焦点寸法

ターゲットを円錐状にした場合,同一入力では円周方向に 放射されるX線量が減少するため,その不足分を補う必要が ある。このため,連続最大入力を800HU/s^(*1)(160kVp×5mA) にして,平板状ターゲット球の480HU/s(160kVp×3mA)に 比べて刻倍に増やした。

実効焦点寸法は4mm×1mmが要求されているが、X線を全 周に放射する関係上、焦点形状は円形がよい。焦点面積は比 負荷の最大値として90HU/s・mm²(工業用X線管の比負荷とし ては中程度である)をとり、最小円形の直径を3.5mmにした。 従って、焦点幅寸法の許容範囲としては、公称値を3.5mmと し、3.5~4.5mmにした。

焦点長さ寸法は、円錐状ターゲットのターゲット角度が決まれば自動的に決まる。ターゲット角度は管球軸方向のX線量分布を考慮して20度に選んだので、焦点長さ寸法は最小値が0.64mm、最大値が0.82mmで、1mm以下になっている。

3.2.2 X線量分布

(1) 円周方向のX線量分布

ターゲットへの電子衝突が、ターゲット中心に対して円形、 対称で、且つ均一に行なわれた場合、円周方向のX線量分布 は均一になるが、陰極の電子放射源としてコイル状フィラメ ントを使用した場合に焦点が長方形になること、焦点中心の ターゲット中心に対する片寄りなどにより、X線量分布のア ンバランスを生ずる。 (a) 偏心の影響 焦点中心とターゲット中心の偏心によるX線量分布のア (b) 焦点が長方形であることの影響

焦点形状が円形から外れて長方形に近くなると,X線量 のアンバランスを生ずる。計算例(辺の長さ比率 1:1.15 の長方形の場合)を図7に示す。最大約8.5%のアンバランス を生じているが、実際の焦点では長方形の角部が丸味をおび るためにアンバランスは小さくなり、約5%以下とみられる。 (c) 焦点内の電子密度分布の差による影響

コイル状フィラメントをもつX線管の焦点では、電子密度の高い部分としてやや中央部に生ずる正焦点部と、外周部に生ずる副焦点部とがある。これらの電子密度分布のむらは円形状に生ずる場合は特に問題とならないが、焦点に偏心が起こった場合、又は焦点が長方形となった場合はX線量分布のアンバランスを増す要因となる。従って、焦点の偏心、又は長方形焦点の問題としてとらえればよい。以上をまとめると、円周方向のX線量分布のアンバランスとしては、約±20%が限界とみられる。

(2) 管球軸方向のX線量分布

この方向のX線量分布はターゲット角度で決まる。円錐状 ターゲットの場合のデータがなかったので、平板状傾斜ター ゲットの場合のデータを参考にして計算でX線量分布を求め てみた。図8にターゲット角度20度の平板状傾斜ターゲット 球の管球軸方向のX線量分布と、円錐状ターゲット球(ターゲ ット角度20度)の場合の計算結果について示す。円錐状ターゲ ットの場合、X線量分布が平板状ターゲットのものより悪く なっており、陰極側で約13%、陽極側で約20%のアンバラン スが生じている。

4 設 計

(*1) 1 HU/s = 1 kVp×1 mA \approx 0.71W

ここでは,陰極の電子集束構造と陽極構造とについて述べる。 4.1 **陰極の電子集束構造** 陽極の円錐状ターゲットの頂点に円形焦点を形成する手段 としては,図9に示すように円形の集束溝にコイル状フィラ メントを取り付ける構造を採った。フィラメントの取付けが

精度良く行なえることを重視したもので, 円形焦点を得るた

73

1060 日立評論 VOL. 57 No. 12(1975-12)







を示す。

 $\mathbf{74}$



図12 焦点形状 管球軸方向に直角方向からピンホールで撮影した焦点写 真例を示す。

めには集束溝の底部にも球形部を作り, 円形の集束溝と合わ せてほぼ目的が達成されている。

陰極からの電子の集束状況を図10に示す。図示のものは平 行な集束溝での計算例であるため実際のものとは若干異なり, 焦点寸法も実際のものより約10%大きくなっている。

図10 電子の集束状況 図9の電子集束構造での電子軌道計算結果を 示す。

4.2 陽極構造

図11に陽極の断面を含む構造を示す。ターゲットには円形 のタングステン板を用い, 銅から成る陽極に鋳造で埋め込み 後,円錐状に加工する。二次電子散乱防止用フードのX線放

全周放射型工業用×線管の開発 1061



主放射X線量 図13 円錐状ターゲット球の主放射X線量を, 平板状ター ゲット球の主放射X線量との比較で示す。後者は、陰極側に10度傾けた方向か ら測定した値である。





図14 鉄板による減弱曲線 主放射X線につき,鉄板をフィルタとして 入れたときの減弱曲線を示す。

射部分の厚さは、負荷時の温度上昇を考慮して最小0.4mmにし ている。また、管球軸方向の照射範囲は最大で陰極側、陽極

タを破線で示した。ターゲットが平板から円錐に変わること mmAlになっている。 により約%に減少する(計算では約%5に減少することになっ 製品の仕様及び主な性能 5 ていたが,実測では減少率が小さい)。 5.3 線 質 5.1 焦点寸法 鉄板をフィルタにした場合の減弱曲線を図14に示す。第一 焦点寸法は幅3.5~4.5mm, 長さ1mm以下のものが得られて 半価層は160kVpで1.1mm, 100kVpで0.5mmである。 いる。解像力的に見た幅寸法は2.5~3mmの範囲にある。また

(陰極側)	角 度 (°) (陽極側) (b)管球軸方向		
図15 X線量分布 のX線量分布を示す。	管球単体で測定した場合の円周方向,及び管球軸方向		
表1 H7106Aの主な 要約したものである。	仕様 全周放射形工業用X線管として必要な仕様を		
最高使用管電圧	自己整流回路 I60kVp		
実効焦点寸法	· 幅3.5mm×長さ丨mm		
ターゲット角度	円錐状 20度		
X 線 照 射 範 囲	陽極側15度~陰極側20度×360度(全周)		
X 線フィルム濃度分布	円周方向 ±15%		
	管球軸方向 陽極側-20%, 陰極側+10%		
連続最大入力	160kVp 5mA(800HU/s) 5分使用,5分休止の繰返し		
フィラメント加熱範囲	電圧2.0~4.5V, 電流3.4~4.5A		
管電流特性	160kVp 5mAのときのフィラメント電流4.0A		
外形寸法	最大径60mmø, 全長218mm		
重量	900 g		
固有ろ過	0.4mmCu+2.0mmAl		
NU-COL LIVER TRACE			

75

焦点形状は図12に示すようになっている。

5.2 主放射X線強度

主放射方向のX線量とX線管電圧との関係を図13に示す。 側とも20度とれるようにした。 同図では比較のため、360度放射型平板状ターゲット球のデー 主放射方向の固有ろ過値は160kVpにおいて0.4mmCu+1.6

1062 日立評論 VOL. 57 No. 12(1975-12)



図16 主放射X線の露出時間とフィルム濃度との関係 鉛はく増感 紙を用いた場合の露出時間と、フィルム濃度との関係を示す。





図18 外観 製品の外観写真を示す。160kVp級X線管としては、かなり小形になっている。

図17 フィルム濃度分布 8.5mmの鋼管をフィルタにして, 自己整流回路 100kVp 5mAの条件で撮影したフィルム濃度分布の一例を示す。

5.4 X線量分布

76

80kVp, 100kVp, 及び110kVpにおける円周方向, 及び管球 軸方向のX線量分布例を図15に示す。円周方向における分布 のアンバランスは20%以下で, 管球軸方向のそれは陽極側が 25%以下, 陰極側が15%以下である。

5.5 フィルム濃度分布

主放射方向のX線について,露出時間とフィルム濃度との 関係を求めたものを図16に示す。管電圧を80kVp,100kVp, 及び110kVpに変えているが,この電圧範囲での鉛はく増感紙 の効果は増感紙なしの場合に対し約2倍になっている。

100kVpにおけるフィルム濃度分布例を図17に示す。測定条件は3.1(3)に示した条件と同じである。円周方向における分布 のアンバランスは15%以下で、管球軸方向のそれは陽極側が 20%以下,陰極側が10%以下である。分布のアンバランス量 は、管電圧上昇とともにわずかではあるが減少する傾向にある。 5.6 製品の外観及び仕様 製品の外観を図18に、また、以上述べた製品の主な仕様を 要約して表1に示す。

6 結 言

以上,円錐状ターゲット全周放射型工業用X線管の開発経 過と,製品の主な性能とについて次に要約して述べる。

(1) コイル状フィラメントを用いた円形集束溝の電子集束系

で、ほぼ円形の焦点を得ることができた。

(2) フィルム濃度分布のアンバランスは円周方向で15%以下, また管球軸方向の陰極側で20%以下,同陽極側で10%以下に することができ,実用上満足すべきレベルに抑えることがで きた。

終わりに、この管球の開発に当たり、終始御指導、及び御協力をいただいた理学電機株式会社拝島工場花田課長、並びに今野主任に対し深く感謝の意を表わす次第である。
参考文献

日本能率協会編:非破壊検査の手引き、(昭47)
花田ほか:「パイプラインのX線透過検査装置について」 NDI資料 No. 1509 (昭48-8)