

学位論文題名

人造黒鉛電極の破壊挙動の評価に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、全粗鋼生産における電炉鋼の占める役割が高まって、電炉鋼の生産性を左右する人造黒鉛電極の性能向上が求められている。本研究は、この電気製鋼炉における人造黒鉛電極の性能に大きく影響している耐熱衝撃性と接続部の実効強度に関するものである。熱応力破壊は、先端で発生するアーク弧の大きな熱発生が引き起こす急激な温度分布変化に依るものであり、そのクラックによって電極が欠け落ちる事故となる。類似の熱応力破壊の問題が、電極を製造するための黒鉛化炉においても発生している。電極の接続部はねじ加工した継ぎ手とソケット部で構成されており、本質的に強度が低く、破壊しやすい傾向にある。巨大なスクラップが先端に崩れ落ちて大きな曲げモーメントが加わると、ソケットもしくは継ぎ手が破損する事故となる。本研究では、これらの破壊事故を減少させるために、人造黒鉛電極の破壊挙動を基礎的に検討するとともに、熱応力破壊を評価する方法、ならびに、接続部の実効強度を向上させるための方策を提案することを目的とした。

研究の成果は以下に要約される。

- 1) 小試験片による破壊靱性試験を行った。初期弾性線から徐々にずれて、非線形破壊することを正確にとらえることができた。そして、亀裂の進展に対しては、破壊エネルギーJ値で評価する必要があることを明らかにした。亀裂の進展に対する破壊エネルギーJ値を定量的に求めることができ、両者の関係が一つの回帰式で整理できることを示した。
- 2) AE法を活用し、破壊靱性試験における巨視亀裂発生点を判定できることを示した。人造黒鉛電極材では、最高荷重のほぼ90%の荷重で巨視亀裂(破壊)が発生していることが判明した。電極材の臨界破壊エネルギー J_{ic} は約0.01kgf/mm、継ぎ手材は約0.014kgf/mmであった。曲げ強度が高くなると、臨界破壊エネルギー J_{ic} は大きくなるが臨界開口変位 COD_f は小さくなる傾向を示した。また、弾性率から人造黒鉛電極材の臨界破壊エネルギーを推定できることを示した。この臨界破壊エネルギー J_{ic} や臨界開口変位 COD_f は、実用時の耐熱衝撃性を論ずるに重要な情報である。
- 3) 切り欠きを持った円板試験片の中心をアーク加熱するとともに切り欠きの開口変位を同時に測定することによって、耐熱衝撃性を評価した。開口変位がある時間でステップ状に増加し、クラックがアークスポットまで瞬時に進展する挙動をとらえることができた。種々の電極試験片そして種々の切り欠き長さについての実験結果をもとに、電極材の耐熱衝撃性を高精度、高再現性をもって評価できるパラメータ θ (熱衝撃エネルギー解放率)を提案した。 θ の値が小さいほど、耐熱衝撃性が良い。電極材の実用成績は、この θ 値とよい対応を示した。
- 4) 電気製鋼炉での熱衝撃破壊と本質的に同じである黒鉛化炉のターミナルの熱応力破壊

を解析した。電極材の製造工程の黒鉛化炉で使用されているターミナルに発生する同心円状の割れについて、有限要素法を用いて解析した。破壊は最高温度に達した後送電を終了する直前に発生し、高温域で高い値を示す熱膨張率はその破壊を助長していることを明らかにした。そして、このターミナルの熱応力破壊は、電気製鋼炉の電極におけるそれと本質的に同一であることを示した。

5) 継ぎ手の形状を変化させることで、継ぎ手の実効強度の向上を試みた。まず、種々の形状の継ぎ手について、その応力分布を有限要素法で解析した。その結果、継ぎ手をJISで規定するピッチラインより小さなテーパでねじ山を削り落とすと、継ぎ手の実効強度が上昇すると考えられた。この形状の継ぎ手を実用サイズで加工して実際に破壊させたところ、予測通り継ぎ手の実効強度（折損曲げモーメント）が上昇した。この成果は実用化され、現在継ぎ手の折損事故防止に貢献している。

6) また、ソケットの実効強度に着目した。まず、種々の長さの継ぎ手を接続した接続部の応力分布を、有限要素法で解析した。その結果、継ぎ手の長さが長いほどソケットの実効強度が上昇すると考えられた。この結果は、実用サイズでの破壊実験によって実証できた。この接続部の実用化によって、ソケット折損事故率は大幅に低下している。

以上、人造黒鉛電極の熱応力破壊の評価を行うとともに接続部の実効強度向上について研究し、いくつかの研究成果を得ることが出来た。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 稲 垣 道 夫
副 査 教 授 鈴 木 朝 夫
副 査 教 授 真 田 雄 三
副 査 教 授 小 平 紘 平

学位論文題名

人造黒鉛電極の破壊挙動の評価に関する研究

人造黒鉛電極の実用過程に於ける破壊事故は、大きな温度分布に起因する熱応力破壊と本質的に強度の低い接続部での曲げモーメントによる破壊に大別される。これらの事故を減少させるためには、複雑な組織を持つ人造黒鉛電極材の破壊挙動の基礎的検討とともに、熱応力破壊を評価するための新しい方法を開発すること、さらに実効的に接続部の強度を向上させることが望まれている。

本論文はまず、人造黒鉛電極の破壊挙動が非線形的であり、その破壊靱性は破壊エネルギー J で評価することが必要であることを示した。そして、亀裂の進展に対する破壊エネルギー J 値が $J = J_i + S (\Delta a)^m$ なる回帰式で整理できることを示した。巨視亀裂発生点の電位差法、Acoustic Emission(AE)法およびクラックゲージ法による判定を試み、AE法が最も適していることを実験的に示すと共に、7種の人造黒鉛電極試料の破壊靱性値 J_{ic} を評価した。さらに、破壊エネルギーや臨界開口変位と弾性率および曲げ破壊強度との関係を明らかにし、弾性率を測定すれば、非破壊検査的に人造黒鉛電極材の破壊エネルギーを推定できることを示した。また、人造黒鉛電極材での非線形破壊挙動の原因をその組織から論じた。

耐熱衝撃性試験として、切り欠きを持つ円板試片の中心をアーク加熱し、切り欠きの開口変位の時間変化を測定した。開口変位はある経過時間でステップ状に増加し、クラックがアークスポットまで瞬時に進展する、いわゆる熱衝撃破壊する。この破壊にともなって急増した切り欠きの開口変位が原点を通る直線上にほぼ存在することを見出し、その直線の傾き θ を耐熱衝撃性を評価するパラメータとして提案し、熱衝撃エネルギー解放率と名付けた。そして、この θ 値が電極の実用成績とよく合致することを見出した。

電気製鋼炉での熱衝撃破壊と本質的に同じである、人造黒鉛電極製造のための黒鉛化炉に於けるターミナル黒鉛電極での熱応力破壊挙動を有限要素法によって解明した。実用時の同心円状のクラックの発生が、ジュール発熱によって最高温度に達した送電終了直前に起こり、電極材の高温での高い熱膨張率によって破壊が助長されていることが明かとなった。そして、電気製鋼炉での人造黒鉛電極の熱応力破壊との共通点についても議論した。

人造黒鉛電極本体(ポール)を継ぎ手材(ニップル)を介して接続している部分が最も破壊の確率が高い。しかも、この接続部はネジ加工されており、その破壊は電極素材の強度のみでなく、接続の状態にも強く依存している。そこで、この接続部での応力分布を有

限要素法によって解析し、接続部の実効強度向上のため継ぎ手およびポールのソケット部の形状をいかに改良すべきかを検討した。その結果、継ぎ手のネジ山をJIS規格よりも小さいテーパで切り落とすことによって実効強度が上昇させ得ること、ソケット部の実効強度が継ぎ手を長くすることによって向上し得ることを明らかにした。そして、この結果に従って形状を改良した電極が高い実効強度を持つことを実証した。

以上のように、本論文は電気製鋼炉などに使われている人造黒鉛電極の破壊挙動の解明を通して、その耐熱衝撃性の評価のための新しいパラメータを提案するとともに、電極接続部の強度を向上するための実効的な方法を提案したものである。本研究の成果は人造黒鉛電極の破壊挙動の理解と製造工程の改良に寄与すると共に、接続部の改良に関してはすでに実用化され、人造黒鉛電極の折損事故防止に貢献している。このように、本研究は炭素材料の科学と工学に寄与するところ大である。よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。