

テルミット溶射の安全対策

Safety Measures for Thermit Welding

古稲 明*, 本田和寛**

Akira KOINE* and Kazuhiro HONDA**

要 旨

テルミット溶射は簡便かつ高耐用な補修技術としてコークス炉炭化室炉壁の補修に広く適用されているが、金属Siを含んだ材料を酸素で搬送する技術である為、安全対策を十分に講じなければならない。特に材料搬送ラインでの逆火、発火といった異常燃焼は、これまで稀に見られていた現象である。現在、逆火、発火の抑制と発生時の二次災害の防止について装置、材料、作業面での考えられる全ての対策を具現化することで、安全を確保している。

Abstract

Thermit welding is widely applied to the repair of coke oven carbonization chamber walls as a simple and highly durable repair technology, but it is a technology to transport materials containing metal Si by oxygen, sufficient safety measures must be taken. Especially, abnormal combustion such as backfire and unexpected ignition in the material feed line is a phenomenon rarely observed until now. At present, safety is ensured by realizing all possible countermeasures in apparatus, materials, and work for the suppression of backfire and unexpected ignition and prevention of secondary accidents.

1 緒言

テルミット溶射の語源は大熱量の発熱を生じる金属Siと酸素のテルミット反応であり、式(1)で表される¹⁾。特徴は、火炎溶射よりも施工が容易、乾式吹付けの様な水使用起因の耐火物損傷が無いことであり、コークス炉に有効な耐火物熱間補修法の一つとして適用されている。



一方で、金属粉(Si)を含む材料の酸素による高速搬送、施工面での燃焼が必要であり、逆火、発火による危険と隣り合わせの工法でもある。テルミット溶射の危険性を可能な限り排除すべく、行った取組みについて述べる。

2 テルミット溶射メカニズム

熱間コークス炉の不定形耐火物による補修工法には乾式吹付け、火炎溶射、テルミット溶射があり各窯炉環境、補修部位、損傷形態等に応じて工法が選択される。

図1にテルミット溶射の原理、図2にテルミット溶射

1 Introduction

The term “thermite welding” comes from the thermit reaction of metallic silicon with oxygen expressed by Equation (1) to generate a large amount of heat.¹⁾ The process is characterized by the ease of operation compared with flame gunning and the absence of adverse effects on the refractory to be repaired caused by the slurry water of dry gunning, and as such, it has been effectively used for the hot repair of coke ovens.



On the other hand, it involves high-speed pneumatic transfer of powder material containing metallic Si with oxygen gas and the Si + O₂ combustion at the refractory surface to be repaired, and consequently, there is always the danger of backfire and unexpected ignition. The present section explains the measures that we took to decrease the possibility of danger to the very minimum.

2 Process of thermit welding

Coke ovens are repaired in heat using unshaped refractories by the methods of dry gunning, flame gunning, and thermit welding; the most suitable method is selected in consideration of factors such as the surrounding conditions of the oven, the portion to be repaired, and the type of damage.

Figure 1 shows the principle of thermit welding,

* 設備部 外販機器技術グループ アシスタントマネージャー Assistant Manager, External Sales Equipment Technology Group, Facility Dept.
** 不定形製造事業部 製鋼不定形・補修材グループ マネージャー Manager, Steelmaking Monolithic Refractories Group, Monolithic Refractories Div.

装置の構成を示す。テルミット溶射は Si と耐火物を混合した材料を酸素で搬送し、ノズル先端から吐出、補修面に到達した Si の酸化反応（テルミット反応）による燃焼熱が短時間で材料を溶融、施工体を形成する技術である。形成される施工体の耐用は水との反応による材料の凝集、硬化反応を利用した乾式吹付けに勝るが、プロパンと酸素の燃焼炎中で材料を比較的長時間溶融、補修面で固化させる火炎溶射には劣る。

施工開始時の Si 酸化反応には補修面からの受熱が必要であるが、補修面の温度が低い場合にはガスバーナー等、火種を準備することで施工を開始することも可能である。但し、課題として補修面の温度が低い場合には耐火物の溶融が不十分となるため、付着性、耐用共に低下する。また、ノズル先端と補修面の距離が近すぎるとリバウンド、ノズル加熱による逆火リスクが高まり、遠すぎると燃焼不十分から付着性、耐用低下となるため、距離を適正（50～100 mm）に保つことが重要である。装置を単純、軽量とすることで容易な施工が可能である一方、施工体耐用、付着性、安全性が補修面の状態、施工者の技量に左右されることも本工法の特徴である。

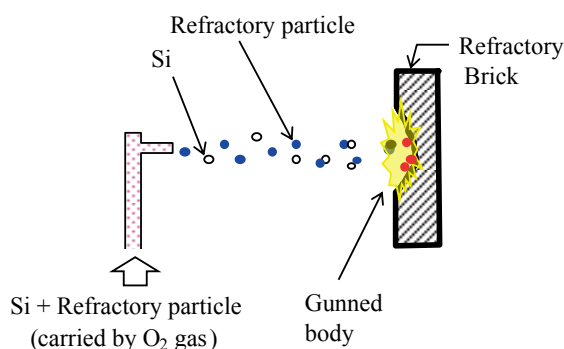


Fig. 1 Principle of thermite welding²⁾

and Fig. 2 the configuration of the equipment. The process consists of pneumatic transfer of a mixture of refractory and metallic Si in powder using oxygen gas, spraying them through a nozzle, and having the Si oxidize (thermite reaction) at the surface to be repaired so that the refractory material is quickly melted by the reaction heat and forms a gunned body there. The durability of the gunned body obtained is superior to that of dry gunning, which involves material agglomeration and hardening through reactions with water, but inferior to that of flame gunning, whereby the material is melted for a comparatively long time in the combustion flame of propane and oxygen and solidified on the object surface.

For the thermite welding process to start it is necessary to receive heat from the object surface, but when it is not hot enough, the work can be started using a gas burner or some other ignitor. In this case, however, the sprayed material is not melted sufficiently, and the adhesion and durability of the gunned body tend to be poor. In addition, when the distance from the nozzle to the object surface is too short, the sprayed material rebounds, and the danger of backfire due to excessive heating of the nozzle increases, and when the distance is too large, on the other hand, the combustion becomes insufficient and the adhesion and durability tend to be poor: it is important to keep the distance at 50 to 100 mm. The operation of thermite welding is made easier with a simplified and light-weight equipment system, while the durability and bonding strength of the gunned body and work safety generally depends on the condition of the surface to be repaired and the operators' skill.

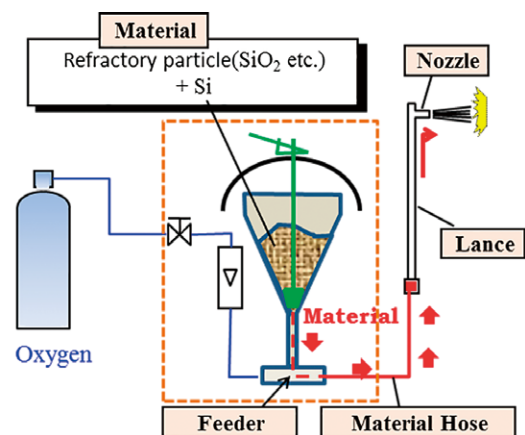


Fig. 2 Configuration of thermite welding apparatus²⁾

3 安全対策

3・1 主なトラブルと危険性、対策

テルミット溶射における主なトラブルは、①逆火と②発火である。いずれも発生時には大きな災害につながる可能性を秘めているが、これらに対して対策を行うことでテルミット溶射の安全性は確保できる。

①逆火はノズル内の酸素流速を材料燃焼速度が上回り逆流する現象で、リバウンド粒がノズル内に侵入する、炉内でノズル自体の温度が上がり燃焼速度が大きくなることが発端となるケースが多い。逆火発生直前には多くの場合、ノズルから火花が吐出するため、それを目視することで材料搬送ラインに火種が侵入する前に酸素吐出停止操作が可能である。対策は、(i) 発生を抑制すること、(ii) 発生の前兆が確認された際の処置、(iii) 二次災害の防止が考えられる。

②発火とは材料高速搬送中に発生する火花、静電気放電を火種として搬送ライン中の材料が燃焼する現象であり、施工者にとっては何の前兆もなく突然発生するトラブルである。対策は、(i) 発生を抑制すること、(ii) 二次災害の防止が考えられる。

逆火と発火はいずれも発生した場合には材料搬送ライン中の材料が酸素雰囲気中で激しく燃焼、処置が遅れば材料ホース、材料等、装置内可燃物の燃焼のみならず、破孔した材料ホースからの酸素、燃焼した材料噴出もあり得るため、非常に危険な状態となる。抑制と同時に発生時の早期処置で二次災害を防止することは非常に重要である。

3・2 逆火対策

3・2・1 抑制

逆火の発生原因としては、リバウンド付着等によるノズル閉塞、材料搬送ライン摩耗破孔による酸素リーク、その他異常起因の酸素流速の低下が挙げられる。また、燃焼した材料がリバウンドとしてノズル内に侵入することも逆火の発生原因となる。また、ノズルが過剰加熱された場合にも逆火が発生しやすくなる。

逆火への装置面の対策は小さな内径のノズルを使用することである。内径が小さいことで、酸素流速が速く、逆火が抑制される。しかし逆火の抑制は装置面の対策のみでは不十分で、ノズル先端の閉塞が無いか、材料搬送ラインの摩耗が破孔するまで進行していないか、ホースの折れが無いか、材料搬送ラインの酸素圧力低下が無いか等、使用前点検、摩耗管理が

3 Safety measures

3・1 Main problems, danger, and countermeasures

The main problems of thermite welding are ① backfires and ② unexpected ignition. Either of them may lead to a serious accident, but the safety of the process can be secured by taking adequate countermeasures.

① A backfire occurs when the combustion speed of the material exceeds the oxygen flow rate in the nozzle; it is often triggered by rebound material grain entering the nozzle or an increase in the material combustion rate due to the temperature rise of the nozzle during work inside a hot oven. Moments before a backfire, sparks are seen to flash out from the nozzle in most cases, and it can be prevented from occurring by closing the oxygen flow at the sight of them and before the fire enters the material feed line. The countermeasures against backfires consist of (i) suppression of its occurrence, (ii) procedures at the sight of the warning sign, and (iii) prevention of secondary accidents.

② Unexpected ignition is the combustion of the refractory material in the feed line triggered by a spark or an electrostatic discharge during its transfer at high speeds; it occurs without any previous warning signs. Its countermeasures consist of (i) suppression of its occurrence, and (ii) prevention of secondary accidents.

In the case of either a backfire or unexpected ignition, the material burns violently in the oxygen atmosphere in the feed line, and unless adequate measures are quickly taken, the material, the hoses, and other combustible parts of the equipment will be lost, and moreover, burning material may be ejected from the broken hose together with the oxygen, leading to an extremely dangerous situation. It is therefore essential to avoid its occurrence and take quick measures to prevent secondary accidents.

3・2 Countermeasures against backfire

3・2・1 Preventive measures

A backfire is caused by nozzle clogging by rebounding refractory material or the like, oxygen leakage due to wear and breakage of the material feed line, and reduction of the oxygen flow rate that may result from various anomalies. When a burning lump of the material rebounds and enters the nozzle, it is also highly likely to cause a backfire. Overheating of the nozzle is another possible cause.

The countermeasure against backfires on the equipment side is to use a small diameter nozzle. When the nozzle diameter is small, the oxygen flow speed increases to reduce the likelihood of a backfire. To prevent a backfire from occurring, the equipment measures alone are insufficient: it is essential to take operational measures such as inspecting before use as to whether there is clogging of the nozzle, wear of the material feed line possibly leading to breakage, bending of the hose, reduction of the oxygen

必須、更にノズルが過剰加熱された場合の予備ノズルへの交換は施工者判断に頼らざるを得ないのも事実である。

3・2・2 発生前、発生時の早期処置

図3に標準的なテルミット溶射装置の概略図を示す。逆火を完全に防ぐ手段は存在しないが、発生直前には多くの場合、前兆を目視することができることから装置には酸素吐出停止操作が可能なフットペダルを搭載している。フットペダルはホースで装置と接続されており、装置から離れた位置に設置可能で、施工者は安全な位置で操作できる。施工者の判断、操作が必要ではあるものの、適切に使用することで、逆火発生前に処置、発生した場合でも早期に処置、二次災害の防止が可能である部位から構成されている。

標準的なテルミット溶射装置の重量 65kg 以上に対して、重量約 30kg で作業性に優れた軽量型テルミット溶射装置の写真を図4に示す。現在、軽量型装置の開発は最終段階であり、実炉試運転を終え、メンテナンス性向上の為の改善を検討中である。軽量型装置は、フットペダルを、より軽量に特化した非常停止ボタンに変更することも可能である。

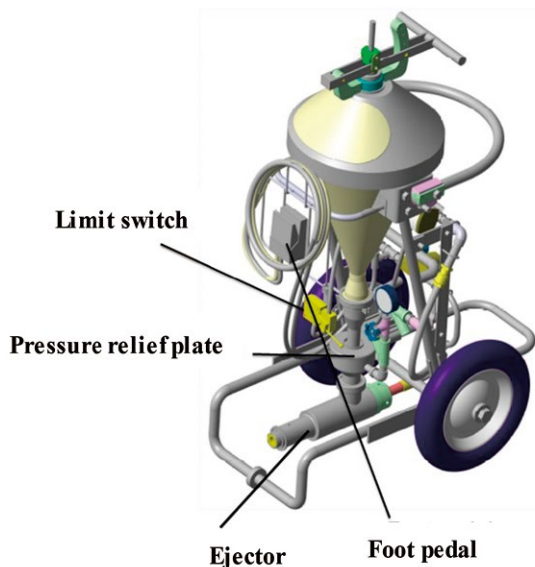


Fig. 3 Overview of standard thermite welding apparatus²⁾

pressure in the feed line, etc. Changing an overheated nozzle with a cooler one is another operational measure, but this depends on the judgment of the operator.

3・2・2 Quick action before and at the occurrence of a backfire

Figure 3 shows an overview of a standard thermite welding apparatus. There are no measures to prevent a backfire completely, but in most cases visible signs of one appear a little before its occurrence, and the apparatus is equipped with a foot pedal to stop the oxygen flow; it is connected to the apparatus with a hose and it is possible if needed to stop the operation from a safe position. Although the operator's decision and intervention are required, it is possible to prevent a backfire by adequately actuating the pedal, and even after a backfire has occurred, it is possible to prevent secondary accidents by quick action.

Figure 4 shows a photograph of a lightweight thermite welding apparatus having excellent workability of about 30 kg in comparison with a standard thermite welding apparatus having a weight of 65 kg or more. At present, the development of the lightweight apparatus is in the final stage, and the trial operation of the Coke ovens is finished, and the improvement in the maintainability is being examined. The lightweight apparatus can also change the foot pedal to a more lightweight specialized emergency stop button.



Fig. 4 Photograph of lightweight thermite welding apparatus

3・3 発火対策

3・3・1 抑制

発火の発生原因としては、材料と搬送ラインの衝突火花、摩擦等に起因した静電気が挙げられる。

燃焼の三要素は熱源(火種)、酸素、可燃物であるから、発火については三要素のいずれかの除去、または抑制という視点で対策を行っている。具体的には酸素、可燃物の除去は困難、火種の完全な除去も困難、しかし抑制は可能である。

装置面では材料搬送ライン内突起の可能な限りの除去、大きな衝突火花を発生させる材質(鋼)の不使用で火種を抑制している。突起は、部品にカエリ、バリが無いよう製作管理することで最小限とし、施工者が操作、熱間の炉内でテルミット溶射を行うランス、ノズルは鋼と同等の耐熱、強度で、衝突火花が小さいステンレス鋼製である。また、作業が必要ではあるが、アース線を装置に付属し、装置とバックステー等を接続することで静電気対策としている。

その他に、材料面の対策を行うことで、燃焼の三要素がそろった状態での燃焼抑制を可能としている。前提は酸素リーク無し、材料搬送ラインの酸素圧力が適正等、正規の状態の装置を正規の設定で使用していることである。手法は酸素流量に対して材料吐出量が爆発下限濃度以下となる材料設計を行い発火発生リスクを低減するもので、燃焼の三要素が一時的にそろっても燃焼が継続しにくい状態を作ることができる。爆発下限濃度を高くする(燃焼を継続しにくくする)ためには材料中のSi量を少なくすることが必要であるが、単純なSi量の低減では熔融性が大きく低下する為、燃焼助剤としてMgOの添加や、焼結助剤の添加等で十分な熔融性を確保し、実炉でも高耐用結果を得ている。

表1に施工体品質例を示す。MgOを添加したものは緻密質かつ高強度であり、高耐用を指向したものである。焼結助剤を添加したものは施工体の盛り上がり速く(時間当たり形成する施工体の体積が大きく)、高施工効率を指向している。

3・3 Countermeasures against unexpected ignition

3・3・1 Preventive measures

Unexpected ignition of the spray material is caused by the sparks of the spray material's collision with the feed line and electrostatic discharge due to causes such as friction.



Since the necessary elements of ignition are a heat source (an ignitor or fire), oxygen, and combustible material, the countermeasures against ignition consist of eliminating or minimizing any one of them. Although it is practically impossible to eliminate any one of oxygen, combustible material, and fire completely, it is possible to control them.

On the equipment side, the occurrence of fire is minimized by removing protrusions on the inner surface of the material feed line as far as possible and avoiding the use of a material that is prone to cause sparks at collision (common carbon steel) for the feed line. Burrs on the inner surface are removed at the manufacturing stage, and the lance and the nozzle, which are used inside a hot oven, are made of stainless steel, which has the same heat resistance and strength as those of carbon steel but emits fewer sparks at collision. In addition, the apparatus has a grounding cable to be connected to a backstay or some oven structural member made of metal to prevent electrostatic discharge.

Other measures have been taken in terms of the material composition so as to avoid ignition even when all the three factors of combustion are given. The prerequisites for work safety are to maintain the apparatus free from oxygen leakage, keep the oxygen pressure as prescribed, and operate the apparatus in prescribed conditions under the prescribed setting of operating parameters. The chemical composition of the spray material is designed such that its injection amount from the nozzle is kept below the lower limit concentration of explosion with respect to the oxygen flow rate; by this it is possible to maintain a condition where combustion does not advance even when the three necessary factors for combustion are temporarily given. To raise the lower limit concentration of explosion, or to hinder the progress of combustion, it is necessary to lower the Si content in the refractory material, but melting property is greatly lowered by simple reduction of Si content, sufficient melting property is ensured by addition of MgO as a combustion auxiliary and addition of sintering auxiliary, etc., and a high durability result is obtained even in repair of coke ovens.

Table 1 shows typical characteristics of gunned body. MgO added material is dense and high strength, and aimed at high durability. The addition of sintering aid results in fast build-up of the gunned body, or the volume of gunned body formed per hour is large, and aimed at high construction efficiency.

Table 1 Typical characteristics of gunned body

	MgO addition	Sintering aid addition
Feature	Dense and high strength high durability	High build-up high construction efficiency
Chemical composition/mass%		
SiO ₂	72	82
MgO	10	-
Build-up speed (index)	100	211
Cross section of gunned body		
Bulk density	2.34	1.95
Apparent porosity /%	7.8	11.5
Crushing strength /MPa	121	113

3・3・2 発生時の早期処置

現状、発火を完全に防ぐ手段は存在しないが、装置には発生時の二次災害を防止する吹き上げ蓋（圧力放散機構）とその動作を検知し酸素吐出自動停止を行うリミットスイッチを搭載している。また、前述のフットペダルは施工者の判断、操作による手動停止機能であり、万が一の自動停止不良時のバックアップの役割も持つ。

4 結言

- ①テルミット溶射は、容易な施工で高耐用の施工体を形成でき、水使用起因の耐火物損傷も無いことから、今後もコークス炉の耐火物熱間補修に必要な技術である。
- ②逆火、発火に対する対策は装置、材料のみでは網羅できず、施工者に依存する内容はあるものの、現状考えられる全ての対策を具現化、実炉使用に至っている。
- ③次のステップとして開発の最終段階にある軽量型テルミット溶射装置を完成させ、安全で、作業負荷を最小限としたテルミット溶射を実現したい。

3・3・2 Quick action at the occurrence of unexpected ignition

At present, there are no measures to completely prevent unexpected material ignition, but the apparatus is provided with devices to suppress secondary disasters: one is a blow-up lid of the material tank acting as a pressure release mechanism, and the other is a limit switch to automatically stop the oxygen blowing actuated by the blow-up of the lid. The foot pedal mentioned earlier is another emergency stop device to be actuated by the operator as a stand-by in the unlikely event of the above automatic stop mechanism failing to work.

4 Summary

- ①Thermite welding is capable of forming a highly durable refractory gunned body by simple operation. Since water is not used, no damage is inflicted on the refractory surface to be repaired. As such, the process is indispensable for hot repair of coke oven refractories.
- ②Although it is impossible to perfectly prevent backfires and unexpected ignition of the spraying material by measures related to the apparatus and the material, and operators' intervention is always required, every conceivable measure to prevent accidents has been incorporated in the apparatus, and the method has been successfully used for oven repair.
- ③As the next step, we would like to complete the lightweight thermite welding apparatus in the final stage of development, and realize safe and minimally workable thermite welding.

文 献

- 1) 本田他:耐火材料. 黒崎播磨. (163), 48-56 (2015).
- 2) 高木他:日本製鉄技報 第 415 号, 100-106 (2020).

本論文は以下の報文を加筆・再構成して転載したものである。

高木他：日本製鉄技報 第 415 号, 100-106 (2020).

References

- 1) Honda et al.: Refractory Material (Technical Report of KROSAKI Harima Corporation), **163** 48–56 (2015).
- 2) Takaki et al.: NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 415, 100-106 (2020).

This paper is reprinted with some additions and reconstructions to the following paper:

Tatsuya Takaki et al.: NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 415, 100-106 (2020).