

Title	Kinetics in Solid State Bonding of Superplastic Steel and Bonding Mechanism Analysis
Author(s)	衡, 中皓
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/55973
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

Abstract of Thesis

Name (衡 中皓)	
Title	Kinetics in Solid State Bonding of Superplastic Steel and Bonding Mechanism Analysis (超塑性鉄鋼材料の固相接合過程における速度論と接合機構解析)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>The superplasticity behavior of fine-grained high carbon tool steel can improve its weldability during solid state bonding. The superplastic deformation can facilitate the bonding process.</p> <p>In the present study, the solid state bonding of superplastic steel SK105 with different bonding surface asperities and original steel without superplasticity was investigated. Base on the existing identification model, the predominant bonding mechanisms during different bonding stages were distinguished by the characteristic values of stress exponent, n and activation energy, Q. The influence of bonding surface asperity on the bonding process was also discussed.</p> <p>In Chapter 1, the superplasticity behavior of fine structure materials and its evaluation indexes were explained to show the advantages of superplasticity for solid state bonding of dissimilar materials. The solid state bonding and its modeling were overviewed and the current researches on solid state bonding of superplastic materials were also introduced. The identification of predominant bonding mechanism and the description of the effect of superplastic flow on bonding process were extracted as the objective. Research flow was presented.</p> <p>The basic theories of high temperature deformation and the predominant bonding mechanisms were described in Chapter 2. The type of creep can be distinguished by the character values of n, and Q. the predominant bonding mechanisms controlled by high temperature deformation or diffusional creep can be also identified by n, and Q during different bonding stage. To calculated the characteristic values of n and Q during the bonding process, the identification model based on the solid state bonding of superplastic material and nonsuperplastic material in the present study was explained in detail.</p> <p>In Chapter 3, the experimental procedure employed in the present study was described. The superplastic tool steel SK105 with ultrafine structure was obtained after heat treatment. The mechanical properties of superplastic steel were investigated to determine the bonding conditions. The superplastic steel with different bonding surfaces were bonded to the original steel with perfectly flat surface in vacuum. Specimen 1 and 2 with relatively coarse bonding surface roughness were designed for identifying the deformation mechanisms in the middle bonding stage while Specimen 3 with fine bonding surface roughness was for diffusional mechanisms in the final bonding stage. The measurement method for the characteristic values of n, and Q and the characteristic microstructure after bonding were also described.</p> <p>In Chapter 4, the solid state bonding of superplastic steel with different initial void shapes was investigated under different bonding conditions. The bonding process controlled by deformation mechanisms was analyzed by characteristic values of n, and Q. Two predominant bonding mechanisms for solid state bonding in the middle bonding stage were discussed. According to the results, in the case of middle bonding stage, superplastic deformation played a dominant role from a bonding ratio of 30% to 50%, under the conditions of bonding temperature $T = 1023 \sim 1053\text{K}$ and bonding pressure $P = 35 \sim 45\text{MPa}$. The n value was about 2.5 and the Q value was close to the activation energy of $\gamma\text{-Fe}$ interface self-diffusion, Q_b. However, superplastic flow cannot be always predominant. If P and T were out of the appropriate range for superplastic flow. The bonding process should be controlled by power law creep. The bonding surface asperity as a geometrical factor influenced the bonding process, especially the bonding rate but it was independent to the predominant bonding mechanism.</p>	

That is, surface asperity of initial void cannot change the predominant bonding mechanism. On the whole, superplastic solid state bonding was just produced in the middle bonding stage under the conditions of $T = 1023 \sim 1053\text{K}$ and $P = 35 \sim 45\text{MPa}$.

The solid state bonding of superplastic steel and original steel in the final bonding stage was investigated in Chapter 5. The bonding process controlled by diffusional mechanism was identified and two fundamental diffusional mechanisms were also discussed. In the case of final bonding stage, diffusional creep predominantly contributed to the bonding process from a bonding ratio of 65% to 72%, under the conditions of relatively low bonding pressure $P = 10 \sim 20\text{MPa}$ and bonding temperature $T = 1023 \sim 1083\text{K}$. The n value was less than unity due to the flattening of void shape. The Q value was much close to the activation energy of volume self-diffusion, Q_v . The predominant bonding mechanism can be controlled by diffusional creep and influenced by the coarse structure of original steel. The predominant bonding mechanism depends on the combined effect of both bonding materials. In spite of the representation of superplasticity, the diffusional bonding mechanisms should be predominate in the final bonding stage for a sound bond.

In Chapter 6, conclusions of this research were given. In general, the superplastic solid state bonding were produced under appropriate bonding conditions and it was confirmed by the characteristic values of n , and Q . superplastic flow cannot always predominantly contribute to the bonding process. It just acts on the interfacial contact process in the middle bonding stage when the interfacial stress is appropriate. The influences of surface roughness and material microstructure on the bonding process were investigated. Several unfinished points needed to be research further such as the stress distribution at the bonding interface, the prediction of bonding time required to attain a sound bond, and a more comprehensive description of bonding process between superplastic materials were also discussed.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (衡 中 皓)			
論文審査担当者	(職) 氏 名		
	主 査	教授	高橋 康夫
	副 査	教授	廣瀬 明夫
	副 査	教授	才田 一幸

論文審査の結果の要旨

炭素鋼を細粒化すると機械的特性が改善されることはよく知られている。硬度が増し強くなるので、工具、電子電気機器の筐体等、利用範囲は広い。しかし、細粒炭素鋼の炭素濃度を高めると、溶融溶接性に問題が生じる。そこで、本研究では細粒炭素鋼を固相接合することを試みている。固相接合は接合対象材の機械的性能を損うことなく、接合が可能である。高炭素鋼を細粒化すると、適当な高温で変形速度を制御すると超塑性特性を示す。

接合界面近傍の変形条件をうまく制御すると、超塑性変形によって、密着接合が達成されたと考えられていた。しかし、固相接合は接合圧力、接合温度、接合時間に伴う接合進行過程で、優勢接合機構が大きく変化する。すなわち、密着接合機構が超塑性変形だけで生じるとは限らないのである。本研究は、固相密着接合機構を同定するための速度論的理論を用いて、優勢密着接合機構を実験と理論から、同定することに成功している。接合機構の理論的考察から、各優勢密着接合機構にはそれぞれ、特徴的な応力依存性、温度依存性があるので、それを利用し、特徴的な応力依存指数 n と活性化エネルギー Q を実験的に求め、その依存性から、優勢密着接合機構の接合圧力及び接合温度に伴う変遷を調べている。すなわち、各機構の速度論的解釈から接合過程中の優勢接合機構を明確化している。結果として、超塑性材料の固相接合であっても、その密着接合過程は超塑性変形によって常には生じないことを明らかにしている。

言い換えると、超塑性変形機構が優勢となる接合条件を明確化していると言える。したがって、本研究は、従来の超塑性材料に対する固相接合の間違った知見を指摘し、本質的な密着接合機構の定量的研究を行い、その接合機構を速度論的に考察し、変形接合機構と拡散接合機構の寄与を明確化した研究と見なすことができる。

第一章では、超塑性変形挙動に関する研究の動向について記述している。特に、超塑性鉄鋼材料の研究に関して調査に、その固相接合の動向を調べている。その調査から、研究課題点を抽出し、本研究の目的と方針を記述している。

第二章では、高温変形のメカニズムおよび接合における支配密着接合機構の応力依存性、温度依存性に関する理論的予備的考察を記述している。応力依存指数 n と各機構の活性化エネルギー Q という特徴的数値を理論的に説明している。高温クリープの種類を区別し、接合における支配機構を区別し、その応力依存性と温度依存性を明確化している。さらに、固相接合二次元モデルを用いて各機構の特徴的数値 n 及び Q を示している。この数値は、各密着接合機構を同定するために不可欠な数値である。

第三章では、実験方法、接合試料準備に関して記述している。高炭素鋼の供試材（工具鋼 SK105）を熱処理、急冷を繰り返すと、細粒構造の炭素鋼ができることを利用して、超塑性鉄鋼試料を作製したことを記述している。そして、作製した試料の超塑性性能の調査を述べている。超塑性が発現する温度、応力条件を明確化している。密着過程を調査するために、超塑性鋼の接合表面

粗さを三種類、作製している。この超塑性鋼を非超塑性鋼（供試材）に接合している。供試材の接合面は鏡面加工としている。変形メカニズムが優勢となると思われる接合条件、他方、拡散メカニズムが優勢となると思われる接合条件を設定し、接合実験を行っている、各接合機構の特徴的数値 n 、 Q を求める理論的手法を具体的に述べている。

第四章では、表面凹凸を持つ超塑性鋼と鏡面の供試材との固相接合の実験結果を述べている。中間段階の接合進行、すなわち、接合率が約30～50%前後での実験を行い、その実験結果から n 値と Q 値を求めている。二種類の優勢密着接合機構；累乗則クリープ変形接合機構と超塑性変形接合機構の同定に成功している。その結果から見ると、接合中間段階では、接合温度が超塑性変形を発現する温度条件で、さらに、接合界面近傍の応力状態が超塑性変形発現範囲内であれば、超塑性変形が密着接合プロセスを支配するということを示している。しかしながら、超塑性変形が常に接合プロセスを支配するわけではないことも明確化している。もし、接合条件が超塑性変形発現の条件範囲を超えるならば、接合プロセスは累乗則クリープ変形によって支配されることを示している。また、超塑性材料の表面凹凸の粗さは接合プロセスに大きく影響を与えることを明らかにしている。特に界面密着進行速度に大きく影響する。しかしながら、表面凹凸は優勢密着接合機構を同定することに対して、影響を与えない。すなわち、表面凹凸が変化しても、接合機構の同定は可能である。超塑性材料の固相接合に対して、定量的に超塑性変形接合過程を解析し、ある限られた接合条件での超塑性変形接合に関して考察を行っている。

第五章では、超塑性鉄鋼材料と供試材との固相接合過程の後期段階の接合機構に関する実験結果を記述している。特に、拡散接合機構が優勢となるであろう比較的低圧力条件での接合過程を調査している。特徴的数値 n 、 Q の結果から、接合優勢接合機構が拡散機構に起因していることを示している。接合材料が超塑性材料であるにもかかわらず、固相接合過程の後期段階で、且つ、低接合圧力条件では、密着接合優勢機構は拡散機構になることを示唆している。さらに、接合界面の両側の微細組織の影響も受けることを明らかにしている。定荷重下の接合後期における固相界面接合プロセスは、超塑性変形は寄与されないことを示唆している。これらの実験結果から、超塑性材料の固相接合プロセスの理解を大きく変える重要な知見を与えている。すなわち、超塑性材料であっても、接合過程の密着完了には、拡散接合機構が重要な役割をしていることを示している。

第六章では、本稿の重要な結論をまとめている。各接合機構（拡散、累乗則クリープ変形、超塑性変形）の特徴的数値 n 、 Q を基に、超塑性変形接合プロセスが生じる条件が限られていることを明確化し、超塑性接合の定義の曖昧さを改めて指摘している。さらに、界面の応力状態と接合界面の両側の被接合材料の影響に関して、結論を示している。

本研究は、超塑性材料の固相接合プロセスにおける拡散、変形の寄与とそれらが優勢となりえる条件を明確化している研究として価値がある。超塑性鉄鋼材料の高効率な固相接合工業技術の発展に、重大な貢献を持つのが言える。

よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。