

氏名	杭偉
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲博理工第467号
学位授与年月日	平成26年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Study on the characterization and grinding process of “soft-and-brittle”functional materials (“軟脆”機能材料の特性評価および研削加工技術に関する研究)
審査会	主査 周立波 委員 前川克廣 委員 乾正知 委員 清水淳 委員 中村雅史

論文内容の要旨

As a typical multi-functional material, single crystal lithium tantalate (LiTaO_3 or LT) exhibits its excellent piezoelectric and pyroelectric properties, and has now found many applications, such as pyroelectric detectors and SAW (surface acoustic wave) substrates. Although LT is known as a very brittle material, however, detailed summaries of its mechanical properties and machinability are not readily available yet. Hence, the objective of this Ph. D thesis is to characterize property of LT crystal and understand its influence on the grinding process.

This Ph. D thesis consists of seven chapters. In chapter 1, the background and objective of this research are addressed. From the mechanical properties point of view, LT crystal has been newly categorized into “soft-and-brittle” materials with the other family members like KDP and CaF_2 . The “soft-and-brittle” character makes those materials difficult to be machined by established processes. In order to fulfill the increasing demands of applications for those materials, it is essential to characterize property of LT crystal and understand its influence on the machining process.

Conducted in chapter 2 is a survey of machining technology of functional materials, it can be concluded that most of researches about the fabrication of functional materials focuses on geometry accuracy, sub-surface damage, cutting mode, tool wear and so on. There is none available report about the influence of physical properties on machining process. Hence, one of the objectives in this research is the influence of LT mechanical and physical properties on its machining process.

Aiming to determination of the mechanical property of LT, a new robust data analysis procedure is proposed in Chapter 3 for indentation tests. Following this data

analysis procedure, the mechanical properties of materials can be computed accurately at $\mu\text{N} \sim \text{mN}$ range of load which is essential for “soft-and-brittle” materials like LT.

In order to clarify and understand the fundamental mechanical properties of LT, micro/nano indentation tests are then conducted in the chapter 4 to evaluate its mechanical properties. The obtained results are also used to categorize the functional materials, to understand LT's behaviors in elastic, plastic (ductile) and brittle regimes and to analyze the influences on their machinability in the machining process.

In the chapter 5, a wafer grinding model is firstly established for the analysis and calculation of specific energy of material removal and the distribution of grinding force. A series of grinding experiments were carried out on LiTaO_3 and Si for the evaluation of specific energy of material removal. After discussed in association with results of indentation, it is found that the hardness of LT is only 83% of Si, however, the specific energy of LT is 147.46 J/mm^3 and 44% larger than that of Si which had well agreed with the indentation results. Both the grinding and indentation results indicated a fact that LT is so brittle that no or very limited extra energy was demanded to make the cracks propagate once the crack was initiated, while a certain extra energy was required for Si. The calculation results indicated a fact that the grinding force of LT is larger than that of Si at the same distance from the center of wafer. The increasing rate of consumed power played a very important role in the machining of LT. Compared with the grinding results of Si, the increasing rate in the LT grinding experiments had a linear relationship with the increase of feed rate at the same experimental conditions which indicated a fact that the physical properties may play a more important role in the grinding process.

The content of chapter 6 is firstly focuses on the physical properties of LT like piezoelectric and pyroelectric effects and their influences on grinding performance. In order to suppress the piezoelectric and pyroelectric effects induced by polarization during grinding of LT, control of coolant temperature and use of electrolyte solution are also purposely were tried in this chapter. The results suggest that the physical properties of LT could be the main factors which dominate the grinding process. Given in chapter 7 is the summary of this thesis.

論文審査の結果の要旨

近年開発された高機能半導体材料や光学素子用結晶などの多くは、軟らかく脆い機械特性を持っている。生産加工の分野では、これまでこのような“軟脆”（Soft-and-Brittle）材料が未踏の物性領域で、その超精密加工技術が確立されていない。本研究は、“軟脆”材料の特性評価及び精密加工プロセスに与える材料特性の影響の解明を目的としている。

第1章では、本論文の研究背景と目的、並びに論文の構成について述べている。また第2章では、機能材料に関する精密加工技術について精査した。形状精度、表面粗さ、工具摩耗、結晶方位の影響などに関しては既に多くの研究がなされているが、“軟脆”材料の物性に着目した研究がほとんど見当たらない。

第3章では、材料の特性評価によく用いられるインデンテーション計測にRobustな評価手法を提案した。この手法は金属のような延性材料からシリコン単結晶のような脆性材料まで幅広い材料に応用でき、さらにダイヤモンド圧子の摩耗による影響を受けず、安定した結果が得られる特徴を有する。第4章では、開発した評価手法を用いて、3種類の単結晶材料（ LiTaO_3 、Si、サファイア）について、加工に関連するヤング率、硬度、破壊靱性値などの機械特性を正確に評価した。また多結晶金属材料を含めた考察では、材料の硬度に関してヤング率のべき乗則を見出し、破壊靱性値と共に材料特性の評価指標として提案した。その結果、工作物は大きく延性材料と脆性材料に分類でき、脆性材料をさらに硬脆と軟脆材料に細分できることを示した。硬脆材料（Si、サファイア）に比べて、軟脆材料（ LiTaO_3 ）は硬度が低いにもかかわらず、比較的延性に富むため、除去に必要な比加工エネルギーが大きくなること、またき裂が一旦形成されれば、き裂進展に余分なエネルギーがほとんど必要ないことを明らかにした。

第5章では、 LiTaO_3 とSiウエハの研削を行い、 LiTaO_3 の比研削エネルギーがSiより45%程度高いこと、き裂進展（ウエハ破損）時に余分なエネルギーがほとんど必要ないことなど、第4章で得られた軟脆材料の特性が加工に与える影響を実証した。一方、研削抵抗が加工時間と共に線形増加するなど材料の機械特性のみでは説明できない現象も明らかになった。そこで、第6章では LiTaO_3 結晶が強誘電体であることに着目し、加工中に焦電および圧電の相乗効果により材料強度を超える内部応力が生じる可能性があることを、理論解析により明らかにした。この問題を解決するために、1) クーラントの温度制御による電荷発生の抑制、2) 電解液による電荷の中和を提案し、実験によりその効果を実証した。

第7章では、本研究を総括し、結論を述べている。

学位論文の内容は、学術誌論文2編と国際会議論文2編として発表している。軟脆機能材料 LiTaO_3 を対象にその機械特性の計測・評価手法を提案するとともに、加工に与える影響を初めて明らかにした。さらに、機能材料の物理特性にも注目して加工に与える悪影響の抑制方法を提案・実証した。本研究は、軟脆機能材料という精密加工が未踏の領域を切り開いたものであり、得られた結果は、学術だけでなく工業的視点からも高く評価できる。

審査会及び最終試験の結果、本学位申請は、博士（工学）の学位を授与するに十分な内容と認められたので、合格と判定する。