

硬质合金深冷处理研究进展

蔡惠坤^{1,2}, 翁泽钰^{1,2}, 顾开选², 王凯凯², 郑建朋^{2,3}, 王俊杰^{2,3}

1 厦门大学航空航天学院, 厦门 361005

2 中国科学院低温工程重点实验室(理化技术研究所), 北京 100190

3 中国科学院大学, 北京 100049

硬质合金自1923年问世以来,人们主要通过改进其烧结工艺、制备超细WC-Co复合粉末以及表面强化等方法来不断优化它的性能。然而,由于上述方法存在设备复杂、制备成本高、技术难度大等问题,在一定程度上制约了我国硬质合金产业的转型升级。深冷处理作为一种低能耗、无污染、操作便捷的新型材料改性技术,能够有效提高材料的力学性能、耐磨性、尺寸稳定性、耐腐蚀性以及导电/导热性等多种性能,并在多种材料的产业化方面得到了成熟的应用。因此,将深冷处理用于优化硬质合金的性能,能够有效避免传统改性方法的不足,为高效、低成本地改善硬质合金性能提供了新的工艺路线。

然而,由于硬质合金的深冷处理研究起步较晚,因此其深冷处理工艺和改性机理两方面依然面临诸多问题。近年来,人们在实验室研究了硬质合金经深冷处理后各方面性能的变化,同时对深冷处理工艺参数与宏观性能变化的影响规律,以及宏观性能发生变化的微观机制开展了深入的研究,并取得了一定的成果。

大量试验表明,深冷处理能够显著改善硬质合金的抗弯强度、耐磨性和切削性能,可有效延长硬质合金工具的使用寿命,而对其硬度和韧性影响不大。硬质合金性能的改善效果与深冷处理工艺参数密切相关,较低的深冷处理温度与较长的保温时间有利于其性能的提高,但是硬质合金性能并不随深冷处理温度的降低和保温时间的延长而呈线性变化。一般而言,对于特定成分的硬质合金,存在最佳的深冷处理工艺参数。深冷处理对硬质合金服役性能的强化机制主要是黏结相Co的马氏体相变、 η 相的弥散析出以及材料表面残余应力状态的改变等方面。

本文归纳了硬质合金深冷处理的研究进展,并结合本团队的研究工作,分别介绍了深冷处理对硬质合金的力学性能、服役性能、微观组织、残余应力等方面的影响,分析了深冷处理工艺参数对硬质合金的性能的影响规律,探索了微观组织、残余应力与性能之间的相互关系及作用机理。本文基于目前硬质合金深冷处理的研究现状及当前研究中存在的不足,对其未来的研究方向与产业化前景进行了展望。

关键词 深冷处理 硬质合金 力学性能 耐磨性 微观组织 残余应力

中图分类号: TG135.5 文献标识码: A

Advances in Deep Cryogenic Treatment of Cemented Carbide

CAI Huikun^{1,2}, WENG Zeju^{1,2}, GU Kaixuan², WANG Kaikai², ZHENG Jianpeng^{2,3}, WANG Junjie^{2,3}

1 School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005

2 CAS Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Beijing 100190

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Since the advent of cemented carbide in 1923, the properties of cemented carbide have been continuously optimized by improving its sintering process, preparing ultrafine WC-Co composite powders, and strengthening its surface. Nevertheless, these methods suffer from complicated equipment, high manufacturing cost and high technical difficulty, which block the transformation and upgrading of the cemented carbide industry in China to a certain extent. Cryogenic treatment, as a novel material modification technology with low energy consumption, no pollution and convenient operation, can effectively improve the mechanical properties, wear resistance, dimensional stability, corrosion resistance, conductive property and thermal conductivity of the material. It has played a crucial role in industrialization of a variety of materials. Accordingly, cryogenic treatment is suitable for optimizing the performance of cemented carbide, which can effectively avoid the deficiency of conventional modification method, and provides a new process route for enhancing the performance of the cemented carbide with high efficiency and low cost.

Unfortunately, the research on cryogenic treatment of cemented carbide started late in China. There are still many problems in the cryogenic treatment process and modification mechanism. In recent years, great efforts have been put in the research on the property variations of cemented carbide after cryogenic treatment in laboratory, the influence laws of the cryogenic treatment process parameters on performance variations, as well as the microscopic mechanisms of changes in macroscopic properties, and fruitful achievements have been made.

Numerous research results have shown that cryogenic treatment can significantly improve the bending strength, wear resistance and cutting performance of cemented carbide, and effectively prolong the service life of cemented carbide tools, while exerts little effect on its hardness and toughness. The improved effect of the cemented carbide performance is closely related to the process parameters of cryogenic treatment. A lower cryogenic temperature and a longer holding duration are beneficial for the improvement of performance, yet no linear variations of the cemented carbide performance occur with the decreasing temperature or the extension of soaking time. Generally speaking, there is an optimal cryogenic process for cemented carbide with specific composition. The strengthening mechanism of cryogenic treatment for the service performance of cemented carbide mainly lies in the martensitic transformation of Co phase, the dispersion and precipitation of η phase, and the change of the residual stress state on surface.

This review summarizes the research progress of cryogenic treatment on cemented carbide. Taking the research work of our team as reference, the influences of cryogenic treatment on the mechanical properties, service performance, microstructure and residual stress of cemented carbide are introduced. The impact of cryogenic treatment process parameters on the properties, and the mechanism between properties and microstructure are also analyzed. Based on the current research status of cryogenic treatment and the relative deficiencies, the future research direction and industrialization prospects are put forward.

Key words deep cryogenic treatment, cemented carbide, mechanical properties, wear resistance, microstructure, residual stress

基金项目: 福建省自然科学基金(2018D0018); 福建省工业科技重大专项(2016HZ0001-9); 低温工程重点实验室开放课题(CRYO201708); 中国科学院青年创新促进会(2016021)

This work was financially supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province (2018D0018), Industrial Science and Technology Major Project of Fujian Province (2016HZ0001-9), the Open Topic of CAS Key Laboratory of Cryogenics, TIPC (CRYO201708), and Youth Innovation Promotion Association of CAS (2016021).

0 引言

随着《中国制造 2025》的不断推进, 高端装备制造业对材料的性能要求不断提高。经传统热处理后, 材料仍会存在某些不足, 如淬火后组织不稳定、较高的热应力与组织应力、组织不均匀等, 均会恶化材料性能进而影响材料的使用寿命。一般来说, 通过单一热处理工艺难以解决此类问题, 而深冷处理作为热处理的一种重要附加工艺, 能够有效地对材料热处理后的性能进行二次优化, 对延长材料的服役寿命具有显著效果。目前深冷处理已在高端制造领域、精密仪器领域及航空航天工业实现了广泛的应用并取得了良好效果^[1]。

1937 年 Gulyaev 首次提出深冷处理^[2], 但由于当时低温技术的限制, 未能对该技术展开深入研究与广泛应用。直到 20 世纪 80 年代初, 路易斯安那大学的 Barron 教授对工具钢开展了相关研究, 发现深冷处理对钢的耐磨性具有明显的提升效果^[3]。近几十年来, 在美国逐渐实现了深冷处理的工业化, 并成立了若干个专业的深冷处理服务企业。我国在深冷处理方面的研究起步较晚, 中国科学院理化技术研究所在国内率先实现了深冷处理技术及设备的产业化应用, 并通过长期的理论创新与技术实践, 形成了一套集工艺设计、理论分析与设备研制于一体的深冷处理综合解决方案。

深冷处理是指把材料(或工件)置于一定的低温(-100℃以下)环境下, 通过控制深冷处理温度、升降温速率以及保温时间等工艺参数对材料进行处理, 这种处理能够使材料的微观组织发生不同程度的不可逆转变, 从而达到改善宏观性能的目的。国内外研究表明, 深冷处理能够显著提高材料的力学性能和耐磨性^[4-6], 此外还能提高其尺寸稳定性^[7]、耐腐蚀性^[8]以及导电、导热性^[9]等多种功能特性。随着低温技术的发展和试验手段的多样化, 深冷处理从黑色金属的研究逐步延伸到铝合金^[10]、铜合金^[11]、镁合金^[12]、钛合金^[13]及非金属材料^[14], 应用领域越来越广。随着深冷处理应用范围的逐渐扩展, 其在硬质合金材料上的良好应用成为近年来深冷处理领域的研究热点与产业亮点。

硬质合金是以难熔金属硬质化合物为强化相, 以金属(通常为 Co)为黏结相, 通过粉末冶金工艺烧结出的一种具有高硬度、良好的红硬性、高化学稳定性、高抗压强度、高耐磨性的材料, 被称为“工业的牙齿”^[15]。与其他刀具材料相比, 硬质合金刀具在加工效率上的优势明显, 其切削速度约为高速钢刀具的 4~7 倍。与此同时, 硬质合金切削过程中面临的工况更加恶劣, 容易在周期性频繁冲击、热交变负荷、交变弯曲应力、高温下剧烈磨损等因素的作用下, 发生刃口磨损、崩刃、热变形、疲劳、断裂等失效形式。现阶段主要通过发展硬质合金新材料和表面强化技术来延长硬质合金的服役寿命, 但仍存在设备复杂、制备成本高、技术难度大等问题, 在一定程度上限制了我国硬质合金产业的发展。深冷处理是一种低能耗、无污染的新型材料改性技术, 利用该技术提高硬质合金性能的手段获得了广泛关注。

利用深冷处理对硬质合金进行改性优化最早见于 1981 年日本的刊物《机械技术》^[16], 文中报道了经深冷处理后的硬质合金刀、模具的耐磨性和抗破碎性与普通低温处理相比

有显著提高。随着硬质合金产业的迅猛发展, 深冷处理对硬质合金的优化效果受到了国内外学者的重视。然而, 硬质合金的深冷处理技术起步较晚, 因而在深冷工艺和微观机理等方面的研究还存在诸多不足。目前, 硬质合金的深冷处理研究主要集中在深冷处理的工艺参数优化, 以及相应的力学性能、耐磨性、切削性能、残余应力、微观组织等方面的变化规律。本文通过文献调研和分析, 综合论述硬质合金的深冷处理工艺参数及其相应性能的变化规律, 探索组织与性能的相互关系及作用机理, 并阐述深冷处理在硬质合金应用方面的前景。

1 深冷处理对硬质合金力学性能的影响

硬质合金的力学性能主要表现在硬度、抗弯强度、抗压强度、冲击韧性、疲劳强度等方面。深冷处理能否改善硬质合金的力学性能, 是体现深冷处理技术有效性的最直观表现。刘亚俊等^[17]对 YW1 硬质合金刀片进行深冷处理, 结果表明: 经深冷处理后, 该牌号硬质合金刀片的显微硬度由 1 764HV 提高到 2 263.7HV, 洛氏硬度由 90HRA 提高到 92HRA。Jiang 等^[18]将 YG8 硬质合金置于 77 K 的低温环境下进行深冷处理后发现, 其硬度和抗压强度分别提高了 4.9% 和 10.1%。陈振华等^[19]对相同牌号的硬质合金进行深冷处理后也得到类似的结果。张平等^[20]将 YG6X 细晶硬质合金置于深冷箱中进行深冷处理, 发现其抗弯强度和矫顽磁力分别提高了 7.6% 和 10.8%。陈红卫^[21]将 YG15 硬质合金预冷后浸入液氮中进行深冷处理, 结果表明: 与深冷处理前相比, YG15 硬质合金的抗弯强度提高了 5.19%。除此之外, 也有关于深冷处理提高硬质合金冲击韧性^[22]、疲劳强度^[18]等力学性能的报道。目前, 国内外学者对深冷处理后硬质合金力学性能的研究主要集中在硬度(包括洛氏硬度和维氏硬度)和抗弯强度两个方面, 并且硬质合金的成分对其深冷处理后力学性能的变化程度具有很大影响。图 1、图 2 总结了 WC-Co 硬质合金经深冷处理后, 其硬度和抗弯强度随 Co 含量的变化情况, 并对其潜在的变化规律进行讨论。

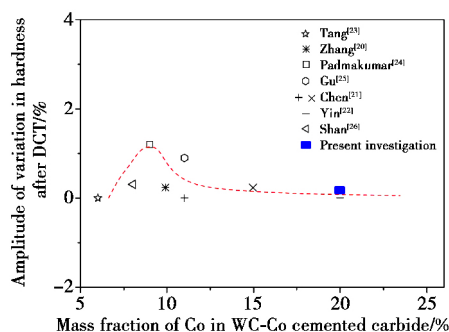


图 1 不同 Co 含量的 WC-Co 硬质合金深冷处理后硬度的变化幅度
Fig.1 Amplitude of variation in hardness of WC-Co cemented carbide with different Co content after deep cryogenic treatment

从图 1、图 2 可以看出, 深冷处理后低钴硬质合金的硬度变化幅度略高于高钴硬质合金, 但总体上深冷处理对硬质合金硬度的影响并不明显(深冷前后硬度差值大多在 1% 以内)。然而随着 Co 含量的增加, 深冷处理后硬质合金抗弯强度的改善效果存在逐渐提高的趋势。值得关注的是, 当 Co

含量相同时,深冷处理后硬质合金力学性能的变化也存在差异,其原因有两个方面:一是晶粒度影响了硬质合金的深冷处理效果。张平等^[20]对YG10C粗晶硬质合金进行深冷处理,发现硬度和抗弯强度变化不明显;而焦鹏鹤^[29]对超细YG10硬质合金进行深冷处理后,其抗弯强度提高了7.5%。这种现象在YG6^[20,23]、YG11^[21-22]、YG20^[22,30]等硬质合金的深冷处理研究中都有发现。二是深冷处理工艺不同,引起硬质合金的力学性能变化也不同。硬质合金的深冷处理工艺遵从传统深冷处理“降温—保温—复温”的工艺过程,因此深冷处理温度、保温时间、深冷循环次数、升降温速率等工艺参数对硬质合金的处理效果有显著影响。以下结合深冷后硬质合金力学性能的变化,分析各个工艺参数对其力学性能的影响及潜在规律。

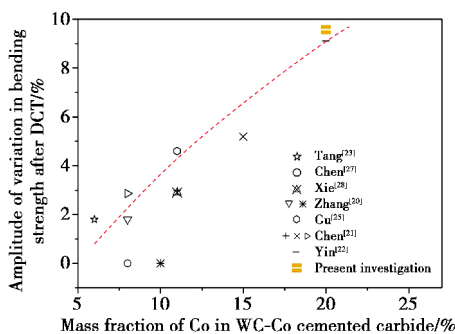


图2 不同Co含量的WC-Co硬质合金深冷处理后抗弯强度的变化幅度
Fig.2 Amplitude of variation in bending strength of WC-Co cemented carbide with different Co content after deep cryogenic treatment

1.1 深冷处理温度

深冷处理温度是硬质合金深冷处理过程中的核心工艺参数。深冷处理温度不同,引起的力学性能变化也不同。Reddy等^[31-32]对比了P30硬质合金分别经-110℃和-176℃深冷处理后的硬度变化,结果如表1所示。从表1可以看到,在室温下,深冷处理后P30硬质合金的硬度有所降低,而在100~600℃的温度范围内,深冷处理后的合金硬度都比未深冷处理的高,这说明深冷处理提高了硬质合金的热硬性。同时,深冷处理温度越低,高温下硬质合金的硬度相对更高。然而,并非深冷温度越低,硬质合金的力学性能改善效果越好。Gill等^[33]分别对P25硬质合金进行-110℃和-196℃的深冷处理,结果表明:经-110℃深冷处理后,硬质合金的硬度提高了4.75%,而继续降低深冷处理温度(-196℃)并没有进一步提高其硬度。该工作说明,在降至一定的温度后,深冷处理的优化效果并不会随深冷处理温度的进一步下降而更优。本团队对YG20硬质合金分别进行-80℃的普通冷

表1 深冷处理前后P30硬质合金在不同温度下的硬度^[31-32]

Table 1 Hardness values of P30 cemented carbide before and after cryogenic treated at different temperatures^[31-32]

Temperature/℃	Hardness(HRA)		
	Untreated	-110℃	-176℃
Room temperature	88.5	87	86.5
100	85	85.8	86
200	82	83	84
300	81	82.6	83
400	76.5	77.5	79.8
500	73	74.6	78
600	63	67	71.8

处理和-140℃、-196℃的深冷处理,结果表明:普通冷处理对YG20硬质合金抗弯强度的影响很小,而深冷处理后其抗弯强度分别提高了9.2%(-140℃)和6.2%(-196℃),说明深冷处理有效地提高了硬质合金的抗弯强度,然而抗弯强度并非随着深冷处理温度呈线性变化规律,深冷处理温度为-140℃时YG20硬质合金的抗弯强度获得最佳的优化效果。

1.2 深冷保温时间

在极低温环境下进行一定时间的保温是深冷处理改善硬质合金力学性能的必要条件,硬质合金的力学性能也会随着保温时间的改变而发生变化。Jiang等^[18]将YG8硬质合金置于77K的低温环境下分别保温2h、4h、8h、24h、72h,发现经深冷处理2h后,硬度和抗压强度分别达到最大值。由此可见,深冷处理并不是通常认为的保温时间越长,优化效果越好。因此,选择准确的深冷保温时间一方面能保证良好的优化效果,另一方面可以达到节省成本、提高效率的目的。陈振华等^[19]对YL20.3硬质合金进行2~72h的深冷处理,试验发现:维氏硬度在液氮中保温2h后达到最大值,随着保温时间的延长,硬度开始下降,并从30h开始硬度变化趋于平缓,如图3所示。因此,短时间的深冷处理即可有效提高该硬质合金的硬度。该结果也印证了在深冷处理过程中,在必要的保温时间上继续延长并不会提高深冷处理的优化效果。由此可见,在一定的深冷处理温度下,硬质合金力学性能并不随保温时间的延长而线性变化,对于特定成分的硬质合金,深冷处理过程中同样存在效果最佳的保温时间。Gao等^[34]对WC-Fe-Ni(黏结相Fe/Ni含量为20%)硬质合金进行-196℃深冷处理,保温时间分别为2h、12h、24h,结果表明:硬度和断裂韧性都在深冷12h后分别达到最大值和最小值,其中最大硬度提升20%,而断裂韧性由25.7MPa·m^{-1/2}降至19.6MPa·m^{-1/2}。该结果说明,在适合的温度下,当硬度具有最佳效果的同时,其他性能可能达不到预想效果,因而针对不同的性能须进一步制定相应的深冷保温时间等工艺参数。国外学者大多采用较长的保温时间。Reddy等^[31]对P30硬质合金进行24h的深冷处理;Yong等^[35]将硬质合金刀片置于-184℃的深冷环境中并保温24h;Özbek等^[36]对无涂层硬质合金刀片进行12h以上的深冷处理。

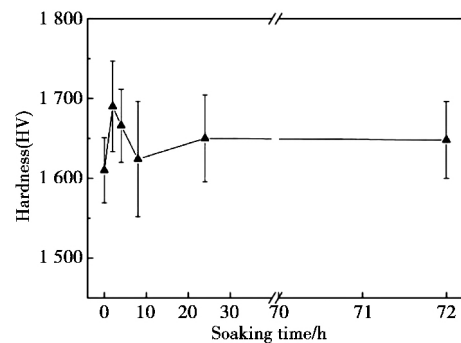


图3 硬度随深冷时间的变化^[19]

Fig.3 Variations of hardness values for different soaking time^[19]

1.3 深冷循环次数

循环深冷处理在钛合金的深冷处理研究中已有过尝试^[37],人们对硬质合金的循环深冷处理也进行了探索。陈红

卫^[21]对 YG8 硬质合金分别进行 0—4 次深冷处理, 结果表明: 随着深冷次数的增加, YG8 硬质合金的寿命系数逐渐提高, 并在深冷处理三次后达到最高值, 这说明多次重复深冷处理对 YG8 硬质合金具有明显的强化效果。吴良芹等^[38]对比了 1—3 次深冷处理对 YT15 车刀刀片硬度的影响发现, YT15 硬质合金的平均硬度值随着深冷处理次数的增加而提高。该研究表明, 相比单次深冷处理, 深冷循环处理可使硬质合金的部分性能得到进一步优化。也有关于重复进行深冷处理使硬质合金力学性能降低的报道。樊恋^[39]对 YL30.4 硬质合金分别进行 1、2、3、5 次的 2 h 深冷处理发现, 循环深冷处理并没有提高材料的抗压强度, 反而使其随着循环次数的增加而降低。目前, 循环深冷处理对硬质合金性能的影响机制尚不明确, 须进一步深入研究。

1.4 升降温速率

早期由于深冷设备功能不完善, 大多数研究者^[21, 30]采用“直接浸入液氮”的方式进行深冷处理, 不能实现控温、控冷速的功能。一般来说, 直接将硬质合金材料浸入液氮中进行深冷处理容易造成冷速过快, 使材料不同相之间因热膨胀系数的差异而产生较大的热应力, 引起工件开裂或变形, 对力学性能产生不利影响。因此深冷处理过程中需要对材料进行缓慢降温。随着深冷设备的日益完善^[40], 多数研究^[18, 32-33, 36, 41]将硬质合金置于程序可控的深冷箱中, 利用低温氮气与材料的对流换热及其汽化潜热进行精确、缓慢降温, 其中升降温速率控制在 0.5~2 °C/min 之内。

综上所述, 深冷处理能够有效提高硬质合金的强度和韧性, 但是对其硬度的影响不明显。深冷处理后硬质合金力学性能的改善程度与深冷处理工艺密切相关。传统深冷处理工艺观念认为, 升降温速率越慢(0.5~2 °C/min)、深冷处理温度越低(-196 °C)、保温时间越长(12 h 以上), 则硬质合金材料在极低温环境下的组织转变更完全, 应力分布更均匀, 从而力学性能改善更显著。然而, 硬质合金力学性能并不随深冷处理温度的降低和保温时间的延长而呈线性变化, 即对于特定成分的硬质合金, 存在着最佳的深冷处理温度与保温时间。深冷处理温度过低、保温时间过长都会增加工艺成本和能源消耗。因此, 掌握深冷处理工艺参数对硬质合金力学性能的影响规律, 优化硬质合金深冷处理工艺, 对于推动深冷处理技术在硬质合金相关行业上的应用和发展具有重大意义。

2 深冷处理对硬质合金服役性能的影响

深冷处理对硬质合金力学性能的影响最终体现在其服役性能上, 而服役性能决定了硬质合金产品的使用寿命。本节主要介绍深冷处理对硬质合金服役过程中耐磨性和切削性能的影响。

2.1 深冷处理对硬质合金耐磨性的影响

硬质合金是用作耐磨零部件的理想材料, 然而传统的硬质合金产品已无法满足日益严苛的使用要求。近年来, 通过深冷处理技术来弥补传统硬质合金工具在耐磨性能上的不足引起了广泛的关注。Jiang 等^[18]采用销-盘摩擦磨损法测定了深冷处理前后 YG8 硬质合金磨损量的变化, 结果表明:

深冷处理后硬质合金试样的磨损量与金刚石对磨件的磨损量之间的比值由 6.41 降低至 4.02, 这说明深冷处理提高了硬质合金的耐磨性。Gao 等^[34]采用环-块摩擦磨损法测定 WC-Fe-Ni 硬质合金深冷处理前后耐磨性的变化, 结果表明: 经深冷处理后, WC-Fe-Ni 硬质合金的磨损率和摩擦系数分别降低了 56% 和 17.2%。Gill 等^[33]采用销-盘摩擦磨损法, 对 P25 硬质合金分别经 -110 °C 和 -196 °C 深冷处理后的耐磨性进行测定, 结果表明: 两种处理手段都明显提高了硬质合金的耐磨性, 且深冷处理温度越低, 材料的耐磨性改善程度越高。该试验结果也说明, 深冷处理温度对硬质合金耐磨性的改善效果具有较大影响。

本团队对 YG20 硬质合金分别进行 -140 °C、-196 °C 深冷处理后, 同样发现其耐磨性有显著提高, 深冷处理前后试样磨损表面的 SEM 照片如图 4 所示。从图 4 可以看到, 经过深冷处理后, 硬质合金的磨损表面更加平整, 并且大块的 WC 颗粒的剥落明显减少。然而 YG20 硬质合金的耐磨性并不随深冷处理温度降低而表现更优, 当深冷处理温度为 -140 °C 时, 合金磨损量与未经深冷处理时相比减小幅度最大, 为 51.88%。

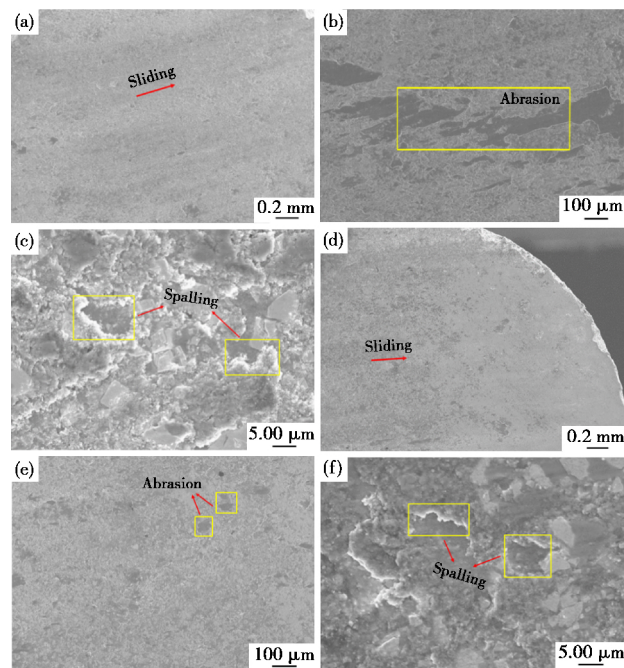


图 4 YG20 硬质合金磨损表面的 SEM 照片: (a—c) 深冷处理前, (d—f) 深冷处理后

Fig.4 SEM images of worn surface of YG20 cemented carbide: (a—c) un-treated, (d—f) deep cryo-treated

2.2 深冷处理对硬质合金切削性能的影响

硬质合金刀具在全球刀具销售中的占比高达 70%, 研究深冷处理对硬质合金切削性能的影响具有很大的现实意义。Yong 等^[42]用深冷处理后的无涂层硬质合金高速铣刀加工中碳钢。结果表明: 当连续切削时, 虽然深冷处理后硬质合金铣刀的后刀面磨损情况有改善的趋势, 但其磨损程度与未经深冷处理的相比没有明显区别。这是由于连续切削会产生较高的切削热, 高温会使深冷处理后的硬质合金刀具性能下降, 因此深冷处理前后刀具磨损都较大, 难以看出深冷处理引起的材料性能变化。当采用间断切削时, 在切削速度为

200 m/min 的情况下,深冷处理后刀具失效点的最大后刀面磨损量大约降低了 4%。然而 Gill 等^[43]的研究认为,经深冷处理后的刀具需要在高切削速度、较长切削时间的条件下才能表现出显著的性能改善。当切削时间较短时,深冷处理前后的刀具间磨损情况相差不大,不能体现出深冷处理的优越性。因此,对硬质合金刀具进行切削试验时,选择合适的切削条件,能够较好地反映深冷处理的有效性。此外,切削条件对深冷处理工艺的选择还具有一定影响。Özbek 等^[36]对无涂层硬质合金刀具分别进行 12 h、24 h、36 h、48 h、60 h 的深冷处理,结果表明:经深冷处理后,硬质合金刀具的后刀面磨损、边界磨损、前刀面磨损分别降低了 29%、81%、67%。深冷处理前后刀具的边界磨损量如图 5a、b 所示。从图 5 可以看到,深冷处理后刀具的边界磨损量明显降低,但最优工艺与切削速度有关:当切削速度为 100 m/min 时,深冷处理 48 h 后边界磨损量最低;当切削速度为 120 m/min 时,最低边界磨损量出现在深冷处理 12 h 后。深冷处理技术在硬质合金涂层刀具上也有较好的应用。Reddy 等^[32]用 -110 °C 深冷处理过的 P30 硬质合金车刀切削 45 号钢,其中刀具涂层厚度为 25 μm(第一层:TiN 1.5 μm,第二层:TiCN 12.5 μm,第三层:Al₂O₃ 6 μm,第四层:TiN 5 μm)。结果表明:深冷处理后硬质合金刀具的后刀面磨损降低了 21.2%,使用寿命提高了 11.1%。同时,切削过程中的切削力以及 45 号钢的表面粗糙度分别降低了 2% 和 8.42%。Reddy 等^[31]对该牌号刀具进行 -176 °C 的深冷处理后也得到了类似结论。

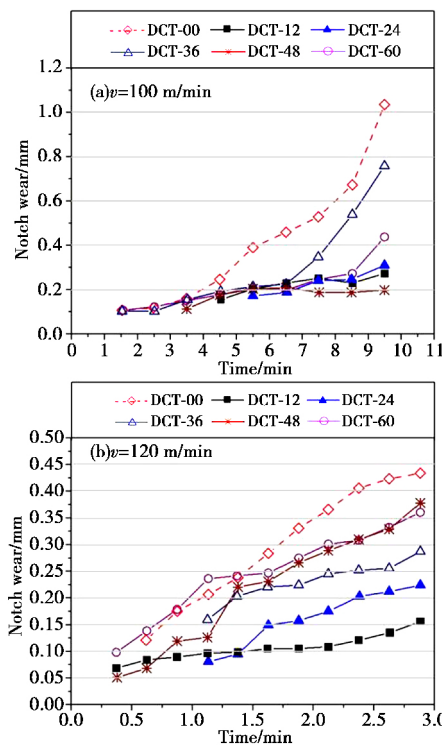


图5 刀具深冷处理前后边界磨损量随时间的变化:(a) 100 m/min, (b) 120 m/min^[36]
 Fig.5 Variations of notch wear formed on the untreated and treated inserts according to cutting time: (a) 100 m/min, (b) 120 m/min^[36]

综上所述,深冷处理对硬质合金的服役性能有明显提升。在切削试验中,既研究了深冷处理对无涂层硬质合金刀具^[35-36, 42-45]的影响,也报道了涂层刀具^[32, 46]经深冷处理后的

表现。试验结果均表明:深冷处理对硬质合金的切削性能有显著的改善效果。同时,是否使用冷却液也引起学者们的关注^[35, 42, 45]。一般认为,经深冷处理后,非连续短时间切削并伴随冷却液的使用,可以最大化地延长硬质合金刀具的使用寿命。也有观点^[43]认为,短时间切削不能明显表现出深冷处理前后切削性能的差异,且对切削效率有一定影响,所以延长切削时间并适当提高切削速度,可以充分发挥硬质合金刀具经深冷处理后的性能优势。由此可见,深冷处理对硬质合金切削性能的改善效果与所选择的切削条件密切相关。

3 深冷处理对硬质合金微观组织的影响

不同深冷工艺引起硬质合金性能的变化,而性能的变化又与其微观组织演变密切相关,因此,需进一步分析深冷处理对硬质合金微观组织的影响规律。

WC-Co 硬质合金的典型微观组织如下:α相-WC(硬质相);β相-Co(黏结相);γ相-(TaC、TiC、NbC、WC)等立方晶格混合碳化物;η相-脱碳相(Co₃W₃C、Co₆W₆C)。Gill 等^[33]给出了α、β相的示意图,如图6所示。其中α相-WC(硬质相)以刚性骨架的形式在硬质合金材料中占据主要部分,而β相-Co(黏结相)则像网格一样与碳化钨(WC)紧密相连。硬质合金在烧结后冷却时,由于大量的W和C溶于Co中,使得室温下的高温相α-Co依然稳定存在。当温度继续降低时,黏结相-Co中发生面心立方α-Co向密排六方ε-Co转变的马氏体相变。由此可见,当温度发生变化时,硬质合金中存在微观组织的改变,这为深冷处理促使硬质合金发生相变提供了可能。许多研究重点关注了深冷处理前后硬质合金微观组织的变化,并探究了宏观性能发生改变时的微观演变机制。

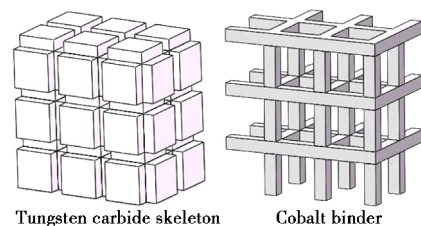


图6 WC-Co 硬质合金中 WC 晶粒(α相)骨架与黏结材料 Co(β相)的结构示意图^[33]
 Fig.6 Schematic representation of continuous ceramic skeletons of tungsten carbide grains (α-phase) and cobalt binder material (β-phase) in WC-Co inserts^[33]

3.1 深冷处理对硬质相 WC 的影响

碳化钨(WC)具有高硬度、高热稳定性和高耐磨性,是硬质合金材料的硬质相,其微观结构对硬质合金性能具有很大影响。

有研究认为深冷处理后硬质相-WC 存在晶粒粗化行为。Xie 等^[28]对 WC-11%Co 硬质合金进行深冷处理研究后发现,WC 晶粒尺寸有小幅增大,他们认为 WC 晶粒粗化可以利用活化能的理论进行解释,且其与含碳量密切相关。同时,深冷处理过程中 Co 相的致密化对 WC 晶粒粗化也有显著影响。硬质相-WC 决定了硬质合金的导热性,Gu 等^[25]在研究中也发现 WC 平均晶粒尺寸增大,因此,深冷处理后 WC 晶粒尺寸增大有利于硬质合金刀具导热性的提高,从而降低了

切削热,使刀具的耐磨性和使用寿命得到改善。除了晶粒粗化,硬质相-WC的晶粒形貌在深冷处理过程中也发生变化。许多研究^[25, 28, 33, 43]发现,低温环境中WC晶粒趋向于形成一个更加稳定的三棱柱形态。Gill等^[33]认为深冷处理后,硬质相通过球化作用形成其最稳定的形态,如图7a、b所示。深冷处理后,硬质相晶粒排列成一种耐久的、无应力状态的晶体结构,能够降低应力致裂的风险,从而提高硬质合金的强度和耐磨性。

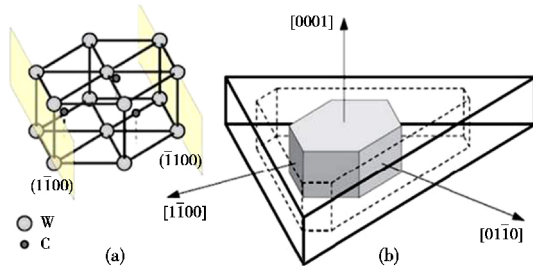


图7 (a) 六方晶型的 α -相(WC); (b) 沿棱柱面择优生长的WC晶粒形状^[33]

Fig.7 (a) The hexagonal α -phase (WC) cell; (b) tungsten carbide grain shape resulting from preferential growth along prismatic planes^[33]

3.2 深冷处理对黏结相的影响

在WC-Co硬质合金中,黏结相-Co存在面心立方(α -Co)和密排六方(ϵ -Co)两种晶格结构,其中 α -Co是高温相, ϵ -Co转变为 α -Co的相变温度约为421.5 $^{\circ}\text{C}$,也有的研究测定为417 $^{\circ}\text{C}$ 。尽管在室温下密排六方晶型较稳定,但在烧结后的冷却过程中,由于异类原子固溶于 α -Co中而产生“钉扎”效应,从而抑制了 α -Co向 ϵ -Co的晶型转变^[15]。本节结合现有文献报道,讨论深冷处理后黏结相的组织变化、相变机制及其与宏观性能的机理对应关系。

Jiang等^[18]对深冷处理后的YG8硬质合金进行XRD(X-ray diffraction)表征,通过衍射峰特征可以明显看到 α -Co转变为 ϵ -Co(图8)。Xie等^[28]研究了深冷处理对不同含碳量的WC-11%Co硬质合金的影响,发现同样存在 α -Co转变为 ϵ -Co的现象,同时,Co相中W的溶解度有稍许降低,这是因为相同温度下W在 α -Co中的平衡浓度比在 ϵ -Co中高;Gu等^[25]在对WC-11%Co硬质合金进行冷、热处理对比研究中也发现,深冷处理后W在Co中的浓度有所下降,且 α -Co在Co相中的比例由50.21%降至40.74%,这表明深冷处理使黏结相-Co发生了 α -Co向 ϵ -Co转变的马氏体相变。在对WC-Fe-Ni的深冷处理中,也有黏结相的马氏体转变现象。通过

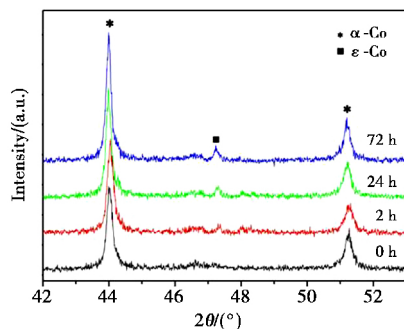


图8 YG8硬质合金的XRD谱^[18]

Fig.8 XRD patterns of YG8 cemented carbide^[18]

对内摩擦的测定,文献[34]认为WC-Fe-Ni硬质合金的马氏体相变温度大约在-23.28 $^{\circ}\text{C}$ 。

深冷处理使硬质合金黏结相-Co发生马氏体相变的观点已达成共识。关于深冷处理促使 α -Co向 ϵ -Co发生转变的机制,目前主要存在两种观点:一是深冷处理温度进一步增加了不同Co相间吉布斯自由能的差异,从而增大了相变的驱动力^[25, 34, 43];二是烧结后,Wc相与Co相之间不同的热收缩使材料内部产生内应力,导致烧结后面心立方 α -Co稳定存在^[47],深冷处理消除了其内应力^[41, 48],从而使 α -Co重排成相对稳定的密排六方结构^[33]。密排六方 ϵ -Co的摩擦系数比面心立方 α -Co的小,因此深冷处理后硬质合金表现出更好的耐磨性。也有研究认为,深冷处理后黏结相Co并未发生相变。Thakur等^[49]提出,深冷处理后主要发生的是物理变化,即Co的致密化,使其能够更稳定地与碳化物黏结。因此当硬质合金发生滑动磨损时,能有效降低WC颗粒的破碎和剥落,从而提高硬质合金的耐磨性。

3.3 深冷处理对 η 相的影响

η 相是在硬质合金烧结后的冷却过程中,Co中溶解的部分W无法形成WC,由部分Co原子参与形成的钨钴碳三元化合物^[15],这为深冷处理进一步促使 η 相的形成提供了潜在可能。

Reddy等^[31-32]、Gill等^[43]、Vadivel等^[46]、Seah等^[50]的研究都认为,深冷处理导致硬质合金中 η 相颗粒析出。这些细微碳化物颗粒的存在使得材料基体更加致密、稳定和坚韧。同时在深冷处理过程中,原本粗大而无序的 η 相颗粒被重塑成更加稳定的形态^[31-32, 41, 43, 46, 50]。对于前述的硬质合金刀具,深冷后 η 相的析出能够改善其硬度和耐磨性,而不对韧性造成太大影响,因此深冷处理后的硬质合金刀具表现出更好的切削性能。对于 η 相析出的机理,有研究^[28]认为与深冷时发生的马氏体相变有关,使得在缺陷的周围形成了以团簇的C原子为核的 η 相。

4 深冷处理对硬质合金残余应力的影响

深冷处理后硬质合金的宏观性能不仅受微观组织变化的影响,还与残余应力密切相关。本节介绍深冷处理对硬质合金残余应力的影响,并分析深冷处理后其应力状态和分布与宏观性能之间的机理对应关系。

4.1 深冷处理对硬质合金应力状态的影响

刘寿荣等^[30]研究了WC-8%Co与WC-20%Co硬质合金的深冷处理强化机理,认为深冷处理过程中的极大冷速导致硬质合金表层压应力明显增加。另外,该研究认为深冷处理后硬质合金表面残余压应力的增加量与其WC的含量有关,故深冷处理对高Co合金表面残余应力的影响低于对低Co合金的影响。Jiang等^[18]对YG8进行深冷处理的结果表明,深冷处理2h后其残余压应力由-496MPa提高至-1459MPa,如表2所示。他们认为残余应力发生变化是由于原子能级在深冷处理过程中的降温、保温、复温期间发生了改变。

合金的应力状态对其性能影响颇大。通常认为,在合金使用过程中,表层会产生一定值的残余压应力,当外部负荷产生拉应力时可大大提高其使用寿命。对于硬质合金,深冷

处理引起其表层残余压应力的增加有利于阻止服役过程中 WC 相的破裂失效^[30],同时能有效抵抗微裂纹的产生,从而提高 WC-Co 硬质合金的强度、硬度和耐磨性。

表 2 WC-Co 硬质合金经不同时间深冷处理后残余应力的变化^[18]
Table 2 Residual stress in WC-Co after different CT process^[18]

Soaking time	Residual stress/MPa
0 h	-496
2 h	-1 459
24 h	-1 391

4.2 深冷处理对硬质合金应力分布的影响

深冷处理除了增加硬质合金表层的残余压应力之外,还影响其整体应力分布状况。在 WC-Co 硬质合金中,黏结相-Co 的热膨胀系数大约是硬质相-WC 的三倍,因此在硬质合金烧结后的冷却过程中会产生残余热应力。其中,硬质相-WC 受压应力,黏结相-Co 受拉应力。黏结相是硬质合金在磨损过程中首先被破坏的相,而其受到的拉应力更会对硬质合金的服役性能产生不利影响。有研究认为,深冷处理消除了硬质合金烧结后产生的两相热应力^[41-48],因此材料的应力状态得到松弛。同时应力在材料内部分布更加均匀,避免了局部的应力集中,从而提高了硬质合金的力学性能。

5 结语与展望

自 20 世纪 80 年代以来,深冷处理已成功应用于优化硬质合金。诸多研究表明,深冷处理对硬质合金的力学性能、耐磨性、切削性能、微观组织、残余应力状况等具有一定的积极影响,且经过研究者的不断探索,现已得到一系列具有实用价值和科研意义的结论。

(1) 深冷处理可提高硬质合金的抗弯强度、耐磨性以及切削性能,从而有效延长硬质合金工具的使用寿命。通过分析深冷处理工艺参数对硬质合金力学性能的影响,认为深冷处理优化效果并不随深冷处理温度的降低、保温时间的延长呈线性变化。针对特定牌号的硬质合金,存在最佳的深冷处理工艺,在低成本前提下可以获得最佳的优化效果。

(2) 深冷处理对硬质合金微观组织的影响主要是:①改变硬质相-WC 的晶粒形貌;②促使黏结相发生马氏体相变;③微细碳化物颗粒(η 相)在材料基体上弥散析出。

(3) 深冷处理后黏结相发生的马氏体相变、微细碳化物的析出以及材料表面残余压应力的增加,能够显著提高硬质合金的强度和耐磨性。因此,硬质合金宏观性能得到改善是相变强化和应力强化综合作用的结果。

硬质合金的深冷处理研究起步较晚,国内外学者对其深冷工艺参数的选取、力学性能的变化、残余应力分布情况以及微观机理等方面的研究还有许多不足之处。为了进一步推动深冷处理技术在硬质合金行业中的应用,可以从以下几个方面深化硬质合金深冷处理的研究:(1)工艺方面,深冷处理作为传统热处理的补充,一般需要与热处理结合起来才能发挥更好的作用,因而将冷处理与热处理相结合是未来深冷处理领域的研究方向。(2)机理方面,深冷处理后硬质合金的性能变化由其工艺参数决定,探究深冷处理工艺与宏观性能之间的相互关系将会是今后的重点研究方向。此外,深冷

处理后硬质合金微观组织演变对其力学性能乃至服役性能的影响规律也需要进一步研究。另外,硬质合金多用作切削刀具,其良好的断裂韧性能够有效抵抗切削过程中裂纹的扩展,且刀具的尺寸稳定性对加工精度、刀具寿命具有显著影响。目前,对深冷处理前后硬质合金的断裂韧性和尺寸稳定性的研究还鲜有报道。此外,通过数值模拟的方法探究硬质合金材料在深冷处理过程中组织场和应力场的变化,可对不同深冷处理工艺下硬质合金性能的优化结果进行预测,能有效降低研究成本。深冷处理技术在硬质合金上的应用前景十分广阔,但还有很多值得探索和发掘的空间。随着我国工业化进程不断加快,深冷处理技术在硬质合金材料上的成功应用将为未来我国的高端、精密制造业提供有效助力,对增强我国工业技术水平具有极其深远的意义。

参考文献

- Podgornik B, Paulin I, Zajec B, et al. *Journal of Materials Processing Technology* 2016 229 398.
- Gulyaev A P. *Metallurgy*, 1937 (12) 65.
- Barron R F. *Cryogenics*, 1982 22(8) A09.
- Molinari A, Pellizzari M, Gialanella S, et al. *Journal of Materials Processing Technology* 2001 118(1-3) 350.
- Li W X, Gong H R, Bo Z H, et al. *Materials Review* 2000 14(3) 16 (in Chinese).
- 黎文献 龚浩然 柏振海,等.材料导报 2000 14(3) 16.
- Sun Y, Yu Q B, Min H. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014 35(11) 51 (in Chinese).
- 孙莹,于庆波,闵昊.材料热处理学报 2014 35(11) 51.
- Gu K X, Zhang H, Wang H J, et al. *Heat Treatment of Metals* 2015 40(10) 104 (in Chinese).
- 顾开选 张红 王洪建,等.金属热处理 2015 40(10) 104.
- Zhang S Q, Yin Y, Li P. *Heat Treatment of Metals* 2015 40(2) 169 (in Chinese).
- 张胜全 尹赞 李鹏.金属热处理 2015 40(2) 169.
- Wang S X, Gu K X, Wang J J, et al. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2013 37(2) 230 (in Chinese).
- 王思贤 顾开选 王俊杰,等.稀有金属 2013 37(2) 230.
- Araghchi M, Mansouri H, Vafaei R, et al. *Materials Science & Engineering A* 2017 689 48.
- Huang Y Z, Jin F W. *Heat Treatment of Metals* 2001 26(7) 5 (in Chinese).
- 黄云战 晋芳伟.金属热处理 2001 26(7) 5.
- Mónica P, Bravo P M, Cárdenas D. *Journal of Materials Processing Technology* 2017 239 297.
- Xu L Y, Zhu J, Jing H Y, et al. *Materials Science & Engineering A*, 2016 673 503.
- Zhang M Y, Li K Z, Shi X H, et al. *Journal of Materials Science & Technology* 2018 34(2) A09.
- Yang J G, Tan D Q, Chen H. *Cemented carbide*, Central South University Press, China 2012 (in Chinese).
- 羊建高 谭敦强 陈颢.硬质合金 中南大学出版社 2012.
- Sheng S. *Machinery*, 1982 20(9) 58 (in Chinese).
- 生水.机械制造 1982 20(9) 58.
- Liu Y J, Li Y, Zeng Z X, et al. *Tool Engineering* 2001 35(3) 19 (in Chinese).
- 刘亚俊 李勇 曾志新,等.工具技术 2001 35(3) 19.
- Jiang Y, Chen D. *Materials Science & Engineering A*, 2011 528(3) 1735.
- Chen Z H, Fan L, Jiang Y, et al. *Cemented Carbide* 2010 27(1) 1 (in Chinese).
- 陈振华 樊恋 姜勇,等.硬质合金 2010 27(1) 1.
- Zhang P, Wu E X. *Cemented Carbide* 2007 24(2) 96 (in Chinese).
- 张平 吴恩熙.硬质合金 2007 24(2) 96.
- Chen H W. *Cemented Carbide*, 1995 12(1) 33 (in Chinese).
- 陈红卫.硬质合金 1995 12(1) 33.

- 22 Yin C, Guo J Z, Ren Y, et al. *Cemented Carbide* 2014, 31(4) 224 (in Chinese).
- 尹超 郭建中 任跃 等. 硬质合金 2014, 31(4) 224.
- 23 Tang Y F, Huang J W, Zuo R, et al. *Cemented Carbide* 2015, 32(6), 372 (in Chinese).
- 唐云锋 黄继武 左锐 等. 硬质合金 2015, 32(6) 372.
- 24 Padmakumar M, Dinakaran D, Guruprasath J. *Materials Today: Proceedings* 2018, 5(2) 7797.
- 25 Gu L N, Huang J W, Tang Y F, et al. *Journal of Alloys & Compounds*, 2015, 620, 116.
- 26 Shan S J. *Cemented Carbide*, 1997, 14(1) 32 (in Chinese).
- 单世瑾. 硬质合金, 1997, 14(1) 32.
- 27 Chen Z H, Jiang Y, Fan L, et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment* 2011, 32(7) 26 (in Chinese).
- 陈振华 姜勇 樊恋 等. 材料热处理学报 2011, 32(7) 26.
- 28 Xie C H, Huang J W, Tang Y F, et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2015, 25(9) 3023.
- 29 Jiao P H. Study of ultrafine-grain YG10 cemented carbide preparation and deep cryogenic treatment. Master's thesis, Southwest University, China, 2012 (in Chinese).
- 焦鹏鹤. 超细晶 YG10 硬质合金的制备及深冷处理研究. 硕士学位论文, 西南大学, 2012.
- 30 Liu S R, Liu F. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 1997, 18(4) 57 (in Chinese).
- 刘寿荣 刘方. 金属热处理学报, 1997, 18(4) 57.
- 31 Sreeramareddy T V, Sornakumar T, Venkataramareddy M, et al. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 2009, 27(1) 181.
- 32 Sreeramareddy T V, Sornakumar T, Venkataramareddy M, et al. *Cryogenics* 2008, 48(9-10) 458.
- 33 Gill S S, Singh J, Singh H, et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012, 58(1-4) 119.
- 34 Gao Y, Luo B H, Bai Z H, et al. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 2016, 58 42.
- 35 Yong A Y L, Seah K H W, Rahman M. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2007, 32(7-8) 638.
- 36 Özbek N A, Çiçek A, Gülesin M, et al. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2014, 86(6) 34.
- 37 Chen Z H, Xie P R, Jiang Y, et al. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)* 2014, 41(7) 1 (in Chinese).
- 陈振华 谢配儒 姜勇 等. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(7) 1.
- 38 Wu L Q, Qian D, Qin Y. *Tool Engineering* 2011, 45(8) 70 (in Chinese).
- 吴良芹 钱丹 秦艳. 工具技术 2011, 45(8) 70.
- 39 Fan L. The research of deep cryogenic treatment of anvil-use YL20.3 cemented carbide. Master's thesis, Hunan University, China 2010 (in Chinese).
- 樊恋. 钎锤用 YL20.3 硬质合金深冷处理研究. 硕士学位论文, 湖南大学, 2010.
- 40 Zhang H, Wang J J, Guo J, et al. *Heat Treatment Technology and Equipment* 2008, 29(2) 70 (in Chinese).
- 张红 王俊杰 郭嘉 等. 热处理技术与装备 2008, 29(2) 70.
- 41 Gill S S, Singh J, Singh H, et al. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2011, 51(1) 25.
- 42 Yong A Y L, Seah K H W, Rahman M. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2006, 46(15) 2051.
- 43 Gill S S, Singh H, Singh R, et al. *Advanced Manufacturing Processes*, 2011, 26(11) 1430.
- 44 Özbek N A, Çiçek A, Gülesin M, et al. *Tribology International* 2016, 94 223.
- 45 Gill S S, Singh R, Singh H, et al. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2009, 49(3-4) 256.
- 46 Vadivel K, Rudramoorthy R. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2009, 42(3-4) 222.
- 47 Exner H E. Conference on the Science of Hard Materials. Wyoming, 1983, pp.233.
- 48 Gill S S, Singh J, Singh R, et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2011, 54(1-4) 59.
- 49 Thakur D, Ramamoorthy B, Vijayaraghavan L. *Materials Letters* 2008, 62(28) 4403.
- 50 Seah K H W, Rahman M, Yong K H. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2003, 217(1) 29.

(责任编辑 荆秋叶)



Huikun Cai received his B. E. degree from Zhejiang University in 2006 and received his Ph. D. degree from Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, in 2011. He has been teaching at the Electromechanical Engineering Department of Xiamen University since 2012. He is mainly engaged in the research of deep cryogenic treatment of materials, fluid analysis and simulation, vehicle vibration and noise technology, thermal management and thermal design.

He has participated in several research projects such as National 973 Project, Major Fund Projects, National Natural Science Foundation Projects, Chinese Academy of Sciences Research Equipment Projects, Military Supporting Projects, and Major Horizontal Issues in Corporate Cooperation.

蔡惠坤 厦门大学助理教授、硕士研究生导师。2006年7月本科毕业于浙江大学机械与能源学院, 2011年7月在中国科学院理化技术研究所制冷及低温工程专业取得博士学位, 2011年7月至2012年1月在中国科学院海西研究院动力工程研究所工作, 至2012年2月起任教于厦门大学航空航天学院机电工程系。主要从事材料深冷处理、流体分析与仿真、车辆振动与噪声技术、热管理与热设计等领域的研究工作。作为骨干力量参加完成了国家973项目、重大基金项目、国家自然科学基金面上项目、中科院科研装备项目、军工配套项目以及企业合作重大横向课题等多个科研项目。近年来, 在相关领域发表多篇国内国际论文, 其中第一作者7篇。



Kaixuan Gu graduated from North China Electric Power University in 2009, and received his Ph. D. degree from Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, in 2014. He has been working in TIPC and he is the project associate researcher now. He is mainly engaged in the study of material cryogenic treatment modification, and he is adept at using cryogenic treatment technology to modify various types of materials, and improve the quality of materials and product quality.

As first author or corresponding author, he has published more than 10 papers in journals such as *Materials Letters*, *Materials Science & Engineering A*, *Materials Science Forum*, *Rare Metal Materials & Engineering*, and *Metal Heat Treatment*.

顾开选 中国科学院理化技术研究所项目副研究员。2009年7月本科毕业于华北电力大学热能与动力工程专业, 2014年7月取得中国科学院理化技术研究所制冷及低温工程专业博士学位。主要从事材料深冷处理改性研究, 擅长于采用深冷处理技术对各种不同类型的材料进行改性, 提升材料品质 and 产品质量。作为第一或通讯作者在 *Materials Letters*, *Materials Science & Engineering A*, *Materials Science Forum*, *Rare Metal Materials & Engineering*, *金属热处理* 等国内外期刊发表论文 10 余篇。